

# ENERGIE FORSCHUNG ZUKUNFT

# INHALT

VORWORT .....	3
ENERGIEFORSCHUNG – FORSCHUNG FÜR DIE ZUKUNFT .....	4
Konzentrierende Solarsysteme GEBÜNDELTE ENERGIE AUS DER SONNE .....	6
Dünnschicht-Photovoltaik SONNENSTROM VOM FEINSTEN .....	8
Bioenergie SPEICHERFÄHIG UND VIELSEITIG EINSETZBAR .....	10
Geothermie STROM UND WÄRME AUS DER TIEFE .....	12
Fusion SONNENFEUER FÜR DIE ERDE .....	14
Klimafreundliches thermisches Kraftwerk MEHR STROM – WENIGER TREIBHAUSGAS .....	18
Dezentrale Energiebereitstellung AUF KURZEN WEGEN ZUM VERBRAUCHER .....	20
Energieeffizienz in Verteilung und Anwendung WENIGER IST MEHR .....	22
Nukleare Sicherheitsforschung HOHE STANDARDS .....	24
Nukleare Entsorgungsforschung SICHERHEIT AUF LANGE SICHT .....	26
Speichertechnologie ENERGIE AUF ABRUF .....	28
Elektromobilität STROM STATT SPRIT .....	30
Technologie, Innovation und Gesellschaft BLICK FÜRS GANZE .....	32
Der Helmholtz-Forschungsbereich Energie DATEN UND FAKTEN .....	34
BETEILIGTE ZENTREN UND ANSPRECHPARTNER .....	34
BILDNACHWEIS UND IMPRESSUM .....	35

## Titelseite:

Die Sonne – größte Energiequelle überhaupt (oben links; SOHO [ESA & NASA]). Stroh – Lieferant von Bioenergie außerhalb der Nahrungskette (oben rechts; [www.istockphoto.com](http://www.istockphoto.com)). Poröses Granulat für Lithium-Ionen-Batterien (unten links; rasterelektronische Aufnahme; Karlsruher Institut für Technologie). Radialverdichter zum Verdichten von Kohlendioxid (unten rechts; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt).

# VORWORT



Prof. Dr. Jürgen Mlynek



Prof. Dr. Eberhard Umbach



## LIEBE LESERINNEN UND LESER,

Bevölkerung und Wirtschaft nachhaltig mit Energie zu versorgen, stellt eine der zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. Daher suchen Wissenschaftler nach Lösungen, Energie in ausreichender Menge bereitzustellen – zuverlässig, bezahlbar und ohne unsere natürlichen Lebensgrundlagen zu gefährden.

Über eins besteht große Einigkeit: Es gibt keine Patentrezepte. Ein einzelner Energieträger oder eine bestimmte Technologie genügen nicht, um die künftige Versorgung zu sichern. Daher muss sich die Forschung mit einem breiten Spektrum von Optionen befassen und vielfältige Technologien entwickeln. Nur so lässt sich ein nachhaltiges Energiesystem verwirklichen, das auf die jeweiligen ökologischen, politischen, sozialen und ökonomischen Rahmenbedingungen abgestimmt ist.

Die Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren, größte Wissenschaftsorganisation Deutschlands, bearbeitet diese existenzielle Thematik in ihrem Forschungsbereich Energie in großer Breite und auf weltweit herausragendem Niveau. Dabei geht es nicht nur um unterschiedliche Energiequellen wie Sonne, Kernfusion, fossile Energieträger, Geothermie, Wasser, Wind, Kernspaltung und Biomasse. Eine Schlüsselrolle spielen auch Technologien zur Energiespeicherung, Energieverteilung und effizienten Energienutzung. Dieser umfassende Ansatz entspricht dem Energiekonzept der Bundesregierung, das einen dynamischen Energiemix mit Ausbau der erneuerbaren Energien, einen entsprechenden Ausbau des Stromnetzes, die Entwicklung neuer Energiespeicher sowie die Steigerung der Energieeffizienz vorsieht.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Helmholtz-Gemeinschaft untersuchen ganze Ketten von Energieprozessen und beziehen Randbedingungen und Begleiterscheinungen wie Klima- und Umweltfolgen sowie Fragen der Akzeptanz mit ein. Sie berücksichtigen Wechselwirkungen mit anderen Sektoren wie Rohstoffwirtschaft, Bauwirtschaft und Mobilität. Die Energieforschung zielt auf industrielle Anwendungen und ist daher mit Aktivitäten der Industrie verzahnt. Beim global erforderlichen Umbau des Energiesystems sollen deutsche Unternehmen eine führende Rolle einnehmen.

Bundes- und Länderministerien sowie Institutionen der EU sichern unsere Forschung mit finanziellen Mitteln. Dafür sei ihnen ausdrücklich gedankt.

Die vorliegende Broschüre vermittelt Einblicke in ausgewählte Bereiche unserer Arbeit und Ausblicke auf Entwicklungen in der Zukunft. Wir forschen für Sie – damit Sie auch künftig über ausreichend Energie verfügen, und das zu bezahlbaren Preisen!

**Prof. Dr. Jürgen Mlynek**  
Präsident der Helmholtz-Gemeinschaft  
Deutscher Forschungszentren

**Prof. Dr. Eberhard Umbach**  
Vizepräsident der Helmholtz-Gemeinschaft  
für den Forschungsbereich Energie und  
Präsident des Karlsruher Instituts für  
Technologie

# ENERGIEFORSCHUNG – FORSCHUNG FÜR DIE ZUKUNFT

Die Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren bearbeitet große Fragen der Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft, um die Lebensgrundlagen des Menschen langfristig zu sichern. Exzellente Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, leistungsfähige Infrastrukturen und modernes Forschungsmanagement tragen die strategisch-programmatisch ausgerichtete Forschung in sechs Bereichen: Energie, Erde und Umwelt, Gesundheit, Schlüsseltechnologien, Struktur der Materie sowie Luftfahrt, Raumfahrt und Verkehr.

Der Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem gehört zu den größten Aufgaben der Gegenwart und Zukunft. Die Bundesregierung formuliert in ihrem Energiekonzept eine langfristige, ganzheitliche Strategie für eine zuverlässige, bezahlbare und umweltverträgliche Energieversorgung. Vorgesehen ist, die erneuerbaren Energien als tragende Säule des künftigen Energiesystems auszubauen, einen flexiblen Kraftwerkspark zu entwickeln, in dem unter anderem auch hocheffiziente fossile Kraftwerke als Reserve- und Ausgleichskapazitäten bereitstehen, die Kernfusion als klimaschonende Option mit zu berücksichtigen und die vorhandene Kompetenz in der nuklearen Sicherheitsforschung zu erhalten und weiterzuentwickeln.

Einen hohen Stellenwert in diesem Konzept besitzen Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz sowie eine moderne Infrastruktur mit intelligenten Netzen und leistungsfähigen Speichern – essenziell für die Integration der erneuerbaren Energien und deren Zusammenspiel mit konventionellen Energien. Im Bereich der Mobilität sieht das Energiekonzept unter anderem vor, die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie weiter zu fördern, den Einsatz von Biokraftstoffen voranzutreiben sowie mehr Elektrofahrzeuge auf die Straße zu bringen.

Was die Bundesregierung in ihrem aktuellen Energiekonzept an Aufgaben und Zielen formuliert, verfolgt die Helmholtz-Gemeinschaft schon seit Langem. Dabei setzt sie immer wieder neue Akzente – auch diese im Einklang mit dem Energiekonzept. In ihrem Forschungsbereich Energie erarbeitet sie die entsprechenden Lösungen – von der Erschließung erneuerbarer Energien bis hin zur Entwicklung von innovativen Speichertechnologien.

## Zuverlässige und nachhaltige Lösungen

Helmholtz-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler erforschen das Potenzial regenerativer Energiequellen wie Sonne, Erdwärme und Biomasse. Sie entwickeln neue Technologien, die diese Quellen effizient erschließen, sie in das Energiesystem integrieren und gewährleisten, dass die Energieversorgung auch künftig zuverlässig funktioniert. Bei der Sonnenenergie liegen die Schwerpunkte auf materialsparenden Dünnschicht-Solarzellen sowie auf solarthermischen Kraftwerken. Die Forschung zur Bioenergie ist fokussiert auf biogene Reststoffe, die außerhalb der menschlichen Nahrungskette liegen.

Längerfristig stellt die Kernfusion als saubere, sichere und fast unerschöpfliche Energiequelle eine lohnende Option dar. Die Helmholtz-Gemeinschaft leistet wesentliche Beiträge zur internationalen Fusionsforschung und Entwicklung von Fusionskraftwerken. Parallel dazu arbeiten Helmholtz-Forscher an Materialien und Technologien, welche die Effizienz und Klimaverträglichkeit der mit fossilen Energieträgern betriebenen Kraftwerke steigern. Einen hohen Stellenwert besitzen Lösungen für höhere Effizienz bei der Verteilung und Anwendung von Energie – beispielsweise für Stromnetze, in der Bauwirtschaft oder bei der Fertigung von Leichtbauteilen.



Klimafreundliches thermisches Kraftwerk: Eine Wissenschaftlerin misst, wie gut eine keramische Membran Sauerstoff durchlässt.

*Forschungszentrum Jülich*

Die Energieeffizienz lässt sich auch durch gezieltes Speichern steigern. So entwickelt die Helmholtz-Gemeinschaft leistungsfähige elektrochemische, chemische, elektrische, thermische und mechanische Energiespeicher. Für elektrisch betriebene Fahrzeuge arbeiten Wissenschaftler an Batterien, Brennstoffzellen und Wasserstofftechnologien. Mit ihrem weltweit einzigartigen Know-how in der nuklearen Sicherheitsforschung trägt die Helmholtz-Gemeinschaft zum sicheren Betrieb von Kernreaktoren sowie zur Behandlung und Entsorgung hochradioaktiver Abfälle bei. Schließlich untersuchen Helmholtz-Wissenschaftler Energiesysteme in ihrer Gesamtheit, verfolgen die ganze Kette der Energieprozesse und berücksichtigen die ökologischen, ökonomischen, politischen, sozialen und ethischen Aspekte neuer Technologien.

### **Fächerübergreifend und vernetzt**

Der Forschungsbereich Energie zeichnet sich wie die Helmholtz-Forschung im Allgemeinen durch breit aufgestellte Kompetenzen, Großforschungsgeräte für die Wissenschaft, eine enge Zusammenarbeit verschiedener Fachrichtungen, die Verbindung von grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung sowie fruchtbare Kooperationen mit Industriepartnern aus. Forscherinnen und Forscher aus den Helmholtz-Zentren arbeiten über die Grenzen von Institutionen und Disziplinen hinweg in strategischen Programmen zusammen. Dies ermöglicht es ihnen, nicht nur Einzelfragen intensiv zu behandeln, sondern auch ganzheitliche Lösungen für komplexe Probleme zu erarbeiten.

Die Helmholtz-Zentren verfügen über eine herausragende wissenschaftlich-technische Infrastruktur, wie sie weltweit nur an wenigen Orten vorhanden ist. Bedeutende Großgeräte wie Teilchenbeschleuniger, Synchrotronstrahlungs-, Neutronen- und Ionen-Quellen sowie hochleistungsfähige Mess- und Laboreinrichtungen ziehen internationale Spitzenforscher ebenso wie den wissenschaftlichen Nachwuchs an und tragen wesentlich zur Attraktivität des Forschungsstandorts Deutschland bei.

Damit ist die Helmholtz-Gemeinschaft hervorragend positioniert, um Lösungen für eine nachhaltige Energieversorgung zu erarbeiten. Ihre Stärken wird sie weiter ausbauen – denn nicht zuletzt an der Frage der Energie wird sich entscheiden, wie gut wir in Zukunft leben werden.



Konzentrierende Solarsysteme

## GEBÜNDELTE ENERGIE AUS DER SONNE

In trockenen und sonnenreichen Gebieten stellen solarthermische Kraftwerke nachhaltig Energie bereit. Mithilfe von Wärmespeichern erzeugen sie Strom auch bei bewölktem Himmel und in der Nacht, und die Abwärme lässt sich zur Meerwasserentsalzung nutzen. Entwicklungsarbeiten in der Helmholtz-Gemeinschaft zielen darauf, diese Systeme effizienter und wirtschaftlicher zu machen.

Die Sonne liefert Energie im Überfluss. Mit der auf der Erde auftretenden Strahlungsenergie ließe sich der Energiebedarf der Menschheit theoretisch weit über zehntausendfach decken. Die Forschung ist gefordert, effiziente und kostengünstige Technologien zu entwickeln, um das enorme Potenzial dieser klima- und ressourcenschonenden Energie zu erschließen. Für die deutsche Industrie bietet Sonnenenergie attraktive Chancen in internationalen Märkten. Das in der Helmholtz-Gemeinschaft entwickelte DESERTEC Konzept eröffnet neue Perspektiven für die Nord-Süd-Kooperation: Es baut großenteils auf solarthermischen Kraftwerken auf und sieht vor, in Wüstenregionen erzeugten Solarstrom auch nach Europa zu übertragen.

### Strom zu jeder Zeit

Konzentrierende Solarsysteme benötigen direkte Sonnenstrahlung und eignen sich daher vor allem für trockene und sonnenreiche Gebiete. Die Wärme lässt sich in großen Speichern – etwa in geschmolzenem Salz oder in Spezialbeton – zwischenspeichern, so dass diese Kraftwerke die Möglichkeit bieten, auch bei bewölktem Himmel oder sogar in der Nacht Strom zu erzeugen. Zudem lässt

sich die Abwärme aus solarthermischen Kraftwerken zur Meerwasserentsalzung einsetzen, was gerade für trockene Gebiete interessant ist. Speziell in sich entwickelnden ariden Gebieten, wie in Nordafrika, können solarthermische Kraftwerke entscheidend dazu beitragen, den in den kommenden Jahrzehnten stark steigenden Strom- und Wasserbedarf nachhaltig zu decken.

Mit einer weltweit installierten elektrischen Kapazität von rund 650 Megawatt befinden sich konzentrierende Solarsysteme derzeit noch in einer frühen Entwicklungsphase, vergleichbar mit fossilen Kraftwerken im frühen 20. Jahrhundert. Es ist noch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten, was die grundlegenden Prozesse, die eingesetzten Bau- und Prozessmaterialien, den optimierten Betrieb und die Integration in vorhandene Versorgungsstrukturen betrifft. Forscherinnen und Forscher der Helmholtz-Gemeinschaft befassen sich mit innovativen Konzepten und Technologien, um die Kosten für konzentrierende Solarsysteme deutlich zu senken und ihren Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung wesentlich zu steigern.

Die Helmholtz-Gemeinschaft besitzt über 30 Jahre Erfahrung mit solarthermischen Kraftwerken und ist in diesem Bereich weltweit

Spiegelfeld des Solarturmkraftwerks auf der  
Plataforma Solar de Almería in Spanien (links).  
*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*

Parabolspiegel bündeln die Sonnenstrahlen auf  
das vor dem Spiegel angebrachte Absorberrohr  
(rechts).  
*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*



führend. Sie verfügt über hervorragende Kompetenzen auf allen relevanten Forschungs- und Entwicklungsfeldern: thermische Prozesstechnik und Gasturbinen, Speichertechnik und keramische Werkstoffe für Hochtemperaturanwendungen, Windkanäle und Strömungssimulation für Heliostat- und Kollektorfelder, Satellitenfernerkundung sowie Systemanalysemodelle.

### Höhere Temperaturen für mehr Effizienz

Um die Stromgestehungskosten zu senken, müssen konzentrierende Solarsysteme höhere Temperaturen erreichen. Dadurch steigt die Kreislauffeffizienz, so dass weniger Kollektoren pro erzeugte Kilowattstunde erforderlich sind, vergrößert sich die Kapazität eines Wärmespeichers bei gleichbleibendem Volumen, treten bei Trockenkühlung weniger Effizienzverluste auf und lässt sich bei Hybridbetrieb der fossile Brennstoff besser ausnutzen. Wesentliche Entwicklungen der Helmholtz-Gemeinschaft sind daher auf höhere Temperaturen ausgerichtet, sowohl bei den bereits eingesetzten Parabolrinnenkraftwerken als auch bei innovativen Ansätzen wie Turmkraftwerken, Fresnel-Kollektoren oder Dish-Stirling-Systemen. Dazu untersuchen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler neue Wärmeträgermedien wie Salz, Schwefel, Gas und Gas-Partikel-Strömungen.

### Langzeitexperimente in Südspanien

Die Helmholtz-Gemeinschaft verfügt über eine eigene Infrastruktur zur Solarenergie und kooperiert eng mit Partnern, um größere Anlagen nutzen zu können. In Köln betreibt sie einen hoch konzentrierenden Sonnenofen sowie Teststände für solarthermische Prozesse; in Jülich steht ein Solarturm für Experimente zur Hochtemperaturtechnik bereit. Der Standort Almería in Südspanien bietet zahlreiche in deutsch-spanischer Kooperation aufgebaute Forschungsanlagen. Während die deutschen Anlagen der Technologieentwicklung im Labormaßstab dienen, eignet sich das sonnig-heiße Almería ideal für Langzeitexperimente unter realen Bedingungen.

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Helmholtz-Gemeinschaft zu solarthermischen Kraftwerken sind am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) angesiedelt.



Freiluft-Prüfstand: Messung an einem Absorberrohr.  
*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*

### SOLARTHERMISCHE KRAFTWERKE

Solarthermische Kraftwerke wandeln die von der Sonne ausgehende Strahlungsenergie in thermische Energie um. Durch Konzentration der Solarstrahlung lassen sich Temperaturen von 400 bis zu 1000 Grad Celsius erreichen. Solche solarthermischen Kraftwerke (Concentrating Solar Power - CSP) besitzen entweder parabolförmige Spiegel, welche die Strahlung auf ein Rohr fokussieren (Parabolrinnenkraftwerk), oder viele ebene Spiegel, die alle auf einen Punkt gerichtet werden (Turmkraftwerk), oder lineare Fresnel-Kollektoren aus langen Panels flacher Spiegel. Die konzentrierte thermische Energie lässt sich in einem Dampfkraftwerk oder mit einem Stirlingmotor zunächst in mechanische Energie und dann mit einem Stromgenerator in elektrische Energie umwandeln.

## SONNENSTROM VOM FEINSTEN

Vom Sonnenlicht zum Strom: Photovoltaik besitzt großes technisches und wirtschaftliches Potenzial und wird künftig wesentlich zu einer nachhaltigen Energieversorgung beitragen. Helmholtz-Forscherinnen und -Forscher entwickeln Dünnschicht-Solarzellen, die Material einsparen, den Energieaufwand in der Produktion verringern und damit auch Kosten senken.

Die Sonne schickt in einer Stunde mehr Energie auf die Erde, als die Menschen in einem Jahr verbrauchen. Eine Möglichkeit, diese Energie zu nutzen, bietet die Photovoltaik: Solarzellen wandeln Sonnenlicht direkt in Strom um. Als wichtigste Komponente enthalten Solarzellen eine lichtabsorbierende Halbleiterschicht. Diese besteht heute meist aus Scheiben hochreinen Siliziums, so genannten Wafern. Die Herstellung der Wafer ist allerdings mit großem Material- und Energieaufwand verbunden. Deshalb arbeiten Helmholtz-Wissenschaftler an einer neuen Generation von Solarzellen mit einer hauchdünnen lichtabsorbierenden Schicht – weniger als ein Hundertstel so dick wie ein Siliziumwafer.

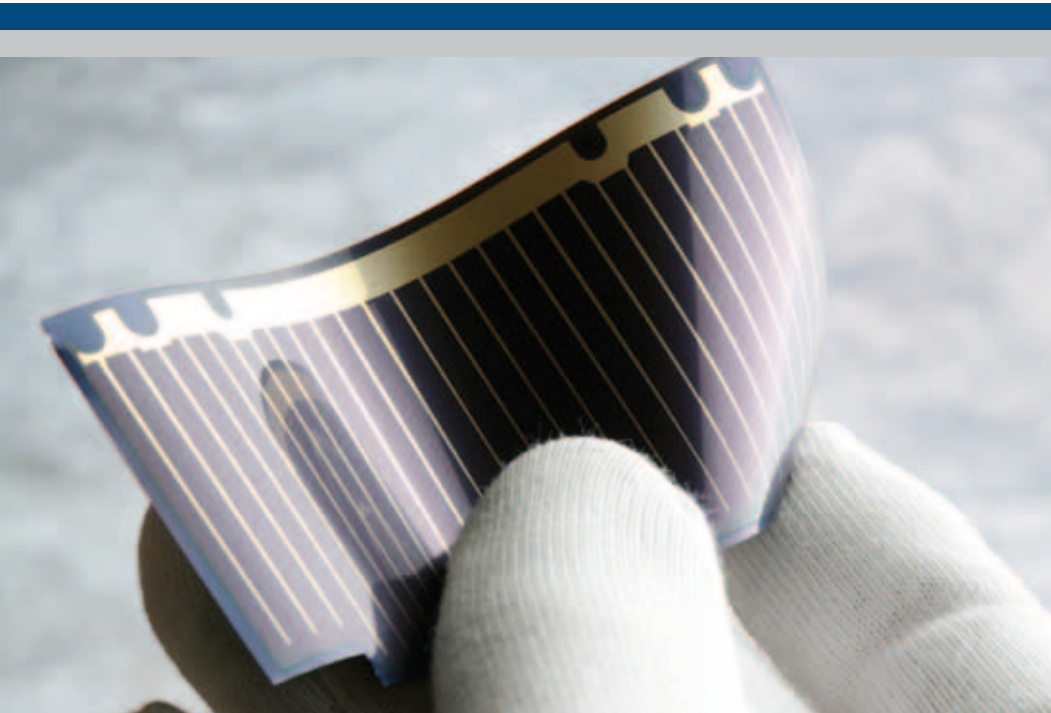
Diese Dünnschicht-Solarzellen sparen erheblich Material ein, und ihre Herstellung benötigt weniger Energie. Statt einzelner Solarzellen lassen sich komplette Module in einem Prozessdurchlauf fertigen. All dies senkt die Kosten. Hauchdünne Schichten in Kombination mit geeigneten Trägermaterialien wie Glas oder Folien erschließen außerdem neue Anwendungen und eröffnen beispielsweise in der Architektur neue Gestaltungsmöglichkeiten. Die Forschungsarbeiten der Helmholtz-Gemeinschaft sind darauf ausgerichtet, Dünnschicht-Solarzellen noch effizienter und deren Produktion noch kostengünstiger zu machen. Dabei setzen die Wissenschaftlerinnen

und Wissenschaftler für die lichtabsorbierende Schicht nicht nur Silizium, sondern auch andere Halbleiter wie Chalkopyrite ein.

### Licht besser ausgenutzt

Dünnschicht-Solarzellen auf der Basis von amorphem (ungeordnetem) Silizium sind schon auf dem Markt. Ein Helmholtz-Team forscht an mikrokristallinem Siliziumcarbid – einem Material aus winzigen Kristallen, die je zur Hälfte aus Silizium- und Kohlenstoffatomen bestehen. Siliziumcarbid ist durchsichtig und stabil und eignet sich ideal als Fensterschicht der Solarzelle, das heißt für die Seite, von der das Sonnenlicht einfällt: Es verringert die Lichtreflexion, so dass die Solarzelle das Licht besser ausnutzen kann.

Um spezifische optische Eigenschaften und die Absorption von Licht unterschiedlicher Wellenlängen zu erreichen, kombinieren Helmholtz-Forscher amorphes und mikrokristallines Silizium in einer Solarzelle. Darüber hinaus arbeiten sie daran, noch eine dritte Schicht zu integrieren, beispielsweise eine Legierung aus Silizium und Germanium, um einen noch größeren Teil des Sonnenspektrums zu nutzen. Einen noch höheren Wirkungsgrad versprechen



Flexible Dünnschicht-Solarzelle für die Weltraumfahrt (links).  
Helmholtz-Zentrum Berlin

Beschichtungskammer für ultradünne Solarzellen (rechts).  
Helmholtz-Zentrum Berlin



Zellen, deren Halbleitermaterial in einer geordneten, kristallinen Struktur vorliegt. Kristalline Silizium-Dünnschichten sind daher ein weiteres zentrales Thema.

### Effiziente Absorption

Neben Silizium forscht die Helmholtz-Gemeinschaft an weiteren umweltfreundlichen Halbleitern. Zu diesen gehören die Chalkopyrite, eine Gruppe von halbleitenden Verbindungen mit einer typischen Kristallstruktur, die der Diamantstruktur ähnelt. Für die Photovoltaik sind besonders Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) und Kupfer-Indium-Disulfid (CIS) interessant. Die Chalkopyrite absorbieren Licht deutlich effizienter als Silizium, so dass für Solarzellen extrem dünne Schichten genügen. Auf der Basis der Helmholtz-Forschungen betreibt ein Unternehmen in Berlin-Adlershof bereits eine Fabrik für CIS-Solarzellen mit einer Kapazität von 200 Megawatt jährlich.

Die Helmholtz-Forschung zur Dünnschicht-Photovoltaik umfasst die gesamte Wertschöpfungskette der Solarzellen- und Solarmodultechnologie: von den physikalischen und materialwissenschaftlichen Grundlagen über die Fertigungsverfahren bis hin zur Herstellung in industrierelevantem Maßstab. Dabei arbeiten exzellente Physiker, Chemiker, Materialwissenschaftler und Elektrotechniker interdisziplinär zusammen.

### Brennstoffe aus Sonnenlicht

Über die reine Stromerzeugung hinaus werden auch solare Brennstoffe und Energiespeichermaterialien künftig zu einer nachhaltigen Energieversorgung beitragen. Helmholtz-Wissenschaftler erzeugen Wasserstoff in einem monolithischen, das heißt aus einem Stück bestehenden Materialsystem, das einen halbleitenden Absorber und einen Katalysator in einer Struktur vereint. Die mit Sonnenlicht erzeugte chemische Energie lässt sich speichern und auch für mobile Anwendungen nutzen.

An der Forschung zur Dünnschicht-Photovoltaik sind das Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie und das Forschungszentrum Jülich beteiligt. Kooperationen mit namhaften Industriepartnern sowie das gemeinsam mit der Technischen Universität Berlin betriebene PVcomB (Kompetenzzentrum Dünnschicht- und Nanotechnologie für Photovoltaik Berlin) gewährleisten kurze Wege von der Forschung in die Industrie.



Dünnschicht-Module an einer Gebäudefassade.  
Helmholtz-Zentrum Berlin

### PHOTOVOLTAIK

Die direkte Umwandlung von Solarenergie in elektrische Energie beruht auf dem so genannten photovoltaischen Effekt: Im halbleitenden Absorbermaterial der Solarzelle werden durch einfallendes Sonnenlicht bewegliche elektrische Ladungsträger erzeugt. Diese Ladungsträger werden durch zwei unterschiedliche Kontaktschichten an der Vorder- und an der Rückseite des Absorbers voneinander getrennt. Damit lässt sich eine elektrische Spannung an den Kontakten abgreifen. Kommt ein elektrischer Verbraucher dazu, schließt sich der Kreis – es fließt Strom.





Bioenergie

## SPEICHERFÄHIG UND VIELSEITIG EINSETZBAR

Unter den erneuerbaren Energien zeichnet sich Biomasse dadurch aus, dass sie grundlastfähig ist, sich wirtschaftlich speichern und vielseitig einsetzen lässt. Die Forschung in der Helmholtz-Gemeinschaft konzentriert sich vor allem auf biogene Reststoffe außerhalb der menschlichen Nahrungskette – wie Stroh und Holzabfälle, die sich zu hochwertigen Kraftstoffen verarbeiten lassen.

Fossile Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas besitzen eine hohe Energiedichte; sie lassen sich relativ leicht erschließen, transportieren und auch mobil einsetzen. Aus vielen Bereichen wie Straßenverkehr und Luftfahrt sind sie derzeit kaum wegzudenken. Die Ressourcen sind jedoch begrenzt, und die Nutzung bringt klimawirksame CO<sub>2</sub>-Emissionen mit sich. Fossile Energieträger enthalten Kohlenstoff. Dieser ist auch in Biomasse verfügbar. Allerdings setzt Biomasse bei ihrer Verbrennung nur so viel CO<sub>2</sub> frei, wie die Pflanze zuvor aus der Atmosphäre aufgenommen hat. Biomasse schont daher das Klima. Unter den erneuerbaren Energien zeichnet sich Biomasse – wie auch Geothermie – durch Grundlastfähigkeit aus. Darüber hinaus lässt sie sich bei vertretbaren Kosten speichern, transportieren und vielseitig verwenden.

### Effiziente Biogasanlagen

Die Helmholtz-Forschung konzentriert sich vor allem auf die energetische Nutzung von Biomasse, die außerhalb der Nahrungskette des Menschen liegt, das heißt auf die Verwertung von Rest- und Abfallstoffen. Dabei geht es zunächst darum, bereits bekannte Prozesse

zu optimieren und ihren Wirkungsgrad zu erhöhen. In Europa dominiert derzeit die Biogaserzeugung. Biogas bietet den Vorteil, dass sich zu seiner Verteilung die vorhandenen Infrastrukturen – Strom- und Gasnetze – nutzen lassen. Jedoch lässt die Energieausbeute bei heutigen Biogasanlagen noch zu wünschen übrig. Das liegt unter anderem daran, dass die der Gasentstehung zugrunde liegenden mikrobiellen Prozesse noch nicht ausreichend verstanden sind und sich daher auch nicht gezielt beeinflussen lassen. Daher richten sich die Forschungsarbeiten von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der Helmholtz-Gemeinschaft darauf, diese Prozesse genauer zu erfassen, um sie gezielt steuern zu können. Die Ergebnisse werden eine neue Generation von Biogasanlagen ermöglichen.

### Sprit aus Stroh

Ein weiterer Schwerpunkt der Forschung liegt auf synthetischen Biokraftstoffen. In der bioliq<sup>®</sup>-Pilotanlage bei Karlsruhe entstehen BtL-Kraftstoffe (Biomass to Liquid – flüssige Kraftstoffe aus Biomasse) aus Stroh und Holzabfällen. Das Konzept umfasst mehrere Prozessschritte: Zunächst wird die trockene Biomasse in regional

Ernte schnell wachsender Baumarten wie Pappeln oder Weiden auf einer Kurzumtriebs-  
plantage (links).

*Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung*

Erste Stufe der bioliq®-Pilotanlage (rechts).

*Karlsruher Institut für Technologie*



verteilten dezentralen Anlagen durch Schnellpyrolyse in ein Zwischenprodukt aus Koks und Öl umgewandelt. Die Energiedichte dieser Suspension ist mehr als zehnmals so hoch wie die der Ausgangsstoffe. Da die dezentrale Energieverdichtung Transportwege und CO<sub>2</sub>-Emissionen einspart, trägt dieser Schritt wesentlich zur Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit des Verfahrens bei.

Anschließend wird die Suspension zu zentralen Großanlagen transportiert und verarbeitet, das heißt zunächst in einem Flugstromvergaser zu Synthesegas umgewandelt und dann zu maßgeschneiderten Kraftstoffen synthetisiert. Die Suspension eignet sich auch gut als handelbares Zwischenprodukt, das sich für verschiedene Zwecke weiterverarbeiten lässt. So ist es denkbar, ganze Prozessketten, die heute auf Rohöl basieren, künftig auf biogenen Reststoffen aufzubauen. Das bioliq®-Konzept lässt sich sowohl auf der Rohstoff- als auch auf der Anwenderseite hervorragend auf andere Bereiche übertragen. Mit der Anlage, in der bis Ende 2011 sämtliche Prozessschritte bis hin zum flüssigen Kraftstoff realisiert sind, verfügt die Helmholtz-Gemeinschaft über eine in Deutschland einzigartige Pilotanlage für Biokraftstoffe der zweiten Generation, die in ganz Europa und darüber hinaus lebhaftes Interesse weckt. Die wissenschaftlichen Fragen zu Aufbau und Betrieb der Anlage bearbeiten die Helmholtz-Forscher in Kooperation mit zahlreichen Partnern aus dem In- und Ausland.

### Ökonomische und ökologische Aspekte

In der Helmholtz-Gemeinschaft ist die Entwicklung dieser Technologien eingebettet in eine technische, ökonomische und ökologische Gesamtbewertung, die sich von der Fläche für den Biomasseanbau bis hin zum Einsatz der Bioenergie erstreckt. Denn neue Technologien werden sich nur dann durchsetzen, wenn sie technische Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Umweltvorteile in sich vereinen.

Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur energetischen Nutzung von Biomasse sind am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ in Leipzig angesiedelt. Die Wissenschaftler arbeiten forschungsbereichsübergreifend zusammen, vor allem was das Thema nachhaltige Bioökonomie betrifft.



Aus Stroh als landwirtschaftlichem Rest- und Abfallstoff lässt sich Bioenergie gewinnen.

*Karlsruher Institut für Technologie*

### BIOMASSE

Biomasse umfasst die gesamte durch Pflanzen und Tiere anfallende organische Substanz. Sie entsteht durch Photosynthese: Pflanzen absorbieren Lichtenergie mithilfe von Farbstoffen, wandeln sie in chemische Energie um und synthetisieren damit aus energiearmen anorganischen Stoffen energiereiche organische Verbindungen. Tiere nehmen die von Pflanzen gebildete Biomasse mit der Nahrung auf.

Der Mensch nutzt Biomasse sowohl stofflich – für Nahrungsmittel, Futtermittel, chemische Grundstoffe, Werkstoffe und Wirkstoffe – als auch energetisch. So lassen sich Strom und Wärme in Verbrennungsanlagen und Kraftwerken direkt aus Biomasse erzeugen. Darüber hinaus lässt sich Biomasse indirekt über chemische Energieträger wie Biogas, Kraftstoff oder Wasserstoff verwerten.

## STROM UND WÄRME AUS DER TIEFE

Erdwärme ist immer und überall verfügbar, unabhängig von Tages- und Jahreszeit, Klima und Wetter. Sie liefert nicht nur Wärme, sondern auch grundlastfähigen Strom, ist dabei nahezu unerschöpflich und fast emissionsfrei. In der Helmholtz-Gemeinschaft entstehen Lösungen für eine wirtschaftliche und nachhaltige Nutzung der Energie aus der Tiefe.

Heute schon gehört die Erdwärme zu den weltweit meistgenutzten regenerativen Energien. In rund 40 Jahren könnte sie nach Schätzungen des Weltklimarats IPCC weltweit 160 Gigawatt elektrische und mehr als 300 Gigawatt thermische Leistung grundlastfähig bereitstellen. Das entspricht etwa dem 7,5-Fachen der Bruttostromerzeugungskapazität der Kernkraftwerke in Deutschland und dem 1,5-Fachen des deutschen Jahresenergieverbrauchs 2007 für Raumwärme und Warmwasser. Auch in Deutschland besitzt die Geothermie großes Potenzial.

Geothermische Anlagen nutzen heimische Energie und schaffen daher Versorgungssicherheit unabhängig von Importen. Sie beanspruchen wenig Fläche und emittieren im Vergleich zur Verbrennung fossiler Energieträger einen Bruchteil der Menge an CO<sub>2</sub>. Eine verstärkte Grundlastversorgung mit Strom und Wärme durch Geothermie trägt daher wesentlich dazu bei, die in Europa und weltweit angestrebten Klimaschutzziele zu erreichen.

### Geologisch repräsentativ: Groß Schönebeck

Forscherinnen und Forscher der Helmholtz-Gemeinschaft untersuchen in Großanlagen neue Verfahren, welche die Erdwärmenutzung auch hierzulande wirtschaftlich und wettbewerbsfähig machen.

Dabei spielen Experimente an Referenzstandorten eine Schlüsselrolle. Der Standort Groß Schönebeck im Norddeutschen Becken beispielsweise gilt als geologisch repräsentativ für weite Teile Mitteleuropas. Dort erfolgreich eingesetzte Verfahren lassen sich auf Regionen ähnlicher Geologie übertragen.

Das In-situ-Forschungslabor Groß Schönebeck stellt die weltweit einzige Einrichtung zur Untersuchung sedimentärer geothermischer Lagerstätten unter natürlichen Bedingungen dar. Dort werden neue Bohrlochmessverfahren eingesetzt sowie technische Systemkomponenten im Betrieb getestet und weiterentwickelt. Zwei Forschungsbohrungen erschließen wasserführende Horizonte zwischen 3,9 und 4,3 Kilometern bei Temperaturen um 150 Grad Celsius. Diese Temperatur ist mindestens erforderlich, um Erdwärme effizient in Strom umzuwandeln. Dazu strömt im Untergrund bereits vorhandenes oder von über Tage zugeführtes Wasser durch das heiße Gestein, nimmt dessen Wärme auf und transportiert sie zur Bohrung.

### Stimulation unter hohem Druck

Da die natürliche Durchlässigkeit des Gesteins meist gering ist, muss es stimuliert, das heißt künstlich aufgebrochen werden, damit das Wasser besser zirkulieren kann. Die Stimulation, bei der



große Mengen Wasser unter hohem Druck über eine Bohrung in den Untergrund verpresst werden, schafft ein weitverzweigtes Rissystem im Gestein. Dieses Verfahren ist Teil des Konzepts Enhanced Geothermal Systems (EGS), das darauf abzielt, Lagerstätten wirtschaftlich nutzbar zu machen. Es verbessert die Ergiebigkeit geothermischer Reservoire und senkt die Risiken bei der Lagerstättensuche.

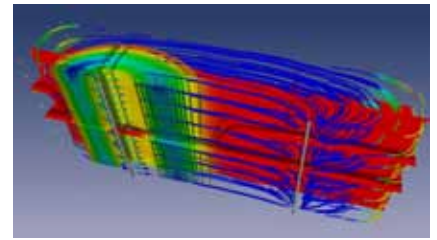
Stromerzeugung aus Erdwärme verlangt neben einem nachhaltigen Thermalwasserkreislauf ein Kraftwerk über Tage und zwei Bohrungen. Über die erste Bohrung wird das Wasser aus der Tiefe gefördert; nach der thermischen Nutzung im Kraftwerk wird es über die zweite Bohrung in den Speicher zurückgeleitet. Das Wasser gibt über Tage seine Wärme über einen Wärmetauscher an ein schon bei geringen Temperaturen siedendes Arbeitsmittel ab; dieses wiederum treibt in einem Sekundärkreislauf den Generator zur Stromerzeugung an. Ein solches Verfahren, das organische Flüssigkeiten mit niedrigem Siedepunkt einsetzt, heißt Organic Rankine Cycle (ORC).

### Stromproduktion bei niedriger Temperatur

Die Stimulation macht die Bohrungen in Groß Schönebeck so produktiv, dass der Betrieb eines Kraftwerks am Standort aus energiewirtschaftlicher Sicht sinnvoll erscheint. Derzeit baut die Helmholtz-Gemeinschaft auf dem Gelände eine Forschungsanlage zur Stromerzeugung auf. Verfahrenstechnische und energiewirtschaftliche Untersuchungen sowie die numerische Simulation der miteinander gekoppelten thermo-hydro-mechanisch-chemischen Prozesse (THMC) ermöglichen systemtechnische Weiterentwicklungen.

Eine andere derzeit in Karlsruhe aufgebaute Großversuchsanlage dient dazu, den auf ORC basierenden Niedertemperatur-Kraftwerkprozess weiterzuentwickeln. Diese Anlage erlaubt es, die beteiligten Kreisläufe zu variieren und zu optimieren. Beide Standorte – Karlsruhe und Groß Schönebeck – bieten hervorragende Möglichkeiten, alle Modellierungen zu validieren, so dass diese Instrumente sich verlässlich in die Planungen integrieren lassen.

Forschungen zur Geothermie betreiben das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ in Potsdam, das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ in Leipzig und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT).



3D-Visualisierung einer Simulation thermischer, hydraulischer und mechanischer Prozesse in einer geothermischen Lagerstätte.

*Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung*

## GEOTHERMIE

Der Begriff Geothermie bezieht sich sowohl auf Erdwärme als auch auf ihre Untersuchung, Erschließung und Nutzung.

Die im zugänglichen Teil der Erdkruste gespeicherte Wärme stammt teils von der Restwärme aus der Erdentstehungszeit, teils aus radioaktiven Zerfallsprozessen in der Erdkruste. Im Durchschnitt wird die Erdkruste in der Tiefe alle 33 Meter um ein Grad Celsius wärmer. Die Wärme gelangt durch Wärmeleitung und Konvektion aus tieferen Teilen der Erde in erreichbare Tiefen.

Oberflächennahe Geothermie nutzt die Wärme des Bodens zwischen einigen Metern und wenigen hundert Metern Tiefe direkt zum Heizen und Kühlen. Tiefe Geothermie erschließt Wärme von deutlich über 100 Grad Celsius, die sich nicht nur direkt als Wärme, sondern auch zur Stromerzeugung nutzen lässt. Dafür bedarf es in der Regel mindestens 3000 Meter tiefer Bohrungen.



Das Geothermiekraftwerk Hellisheiði nahe Reykjavik (links).

*Karlsruher Institut für Technologie*

Einbau der Verrohrung in der Bohrung des Geothermielabors Groß Schönebeck (rechts).

*Deutsches GeoForschungsZentrum*



Fusion

## SONNENFEUER FÜR DIE ERDE

Fusion lässt Sonne und Sterne leuchten. Wenn es gelingt, diese Energiequelle auf der Erde zu nutzen, ist die Versorgung der Menschheit mit Strom und Wärme auf lange Sicht gesichert. Weltweit arbeiten Wissenschaftler an komplexen Technologien für künftige Fusionskraftwerke – die Helmholtz-Gemeinschaft ist an führender Stelle mit dabei.

Noch in diesem Jahrhundert wird der weltweite Strombedarf voraussichtlich auf das rund Sechsfache ansteigen. Die Ressourcen an fossilen Energieträgern sind begrenzt: Erdöl und Erdgas werden den Bedarf nur noch für eine gewisse Zeit decken. Zudem ist es wegen des steigenden CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre vorgesehen, ihre Nutzung zu reduzieren. Durch Brückentechnologien wie die Kernspaltung von Uran oder die Speicherung von Kohlenstoff in der Erde bleiben noch einige Jahrzehnte Zeit, um die Nutzung regenerativer Energiequellen wie Sonne und Wind sowie Technologien für intelligente Stromnetze und Speicher auszubauen. Aber keine der heute bekannten Technologien wird den prognostizierten Bedarf allein decken können.

Eine Möglichkeit, die wachsende Weltbevölkerung künftig wirtschaftlich, sicher und umweltverträglich mit Strom und Wärme zu versorgen, besteht darin, den gleichen Energieumwandlungsprozess zu nutzen wie die Sonne und andere Sterne: Die Kernfusion ist als Energiequelle fast unerschöpflich. In der Sonne läuft die Verschmelzung von Atomkernen quasi automatisch ab – auf der Erde bedarf es dazu hochkomplexer Technologien. Doch der Aufwand lohnt sich. Wenn es gelingt, das Sonnenfeuer auf die Erde zu holen, bietet sich die Chance, eine der größten Herausforderungen für die Zukunft zu meistern.

In experimentellem Maßstab ist die Kernfusion auf der Erde längst gelungen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler arbeiten nun weltweit auf Fusionskraftwerke hin. Die deutsche Fusionsforschung ist am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching und Greifswald sowie am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und am Forschungszentrum Jülich angesiedelt und ist Teil der europäisch koordinierten und geförderten Fusionsforschung (EURATOM). Stark arbeitsteilig aufgestellt, sind die genannten Einrichtungen auf zahlreichen Gebieten der Plasmaphysik ebenso wie in vielen Bereichen der Fusionstechnologie international führend.

### Brennstoffe aus Wasser und Mineralien

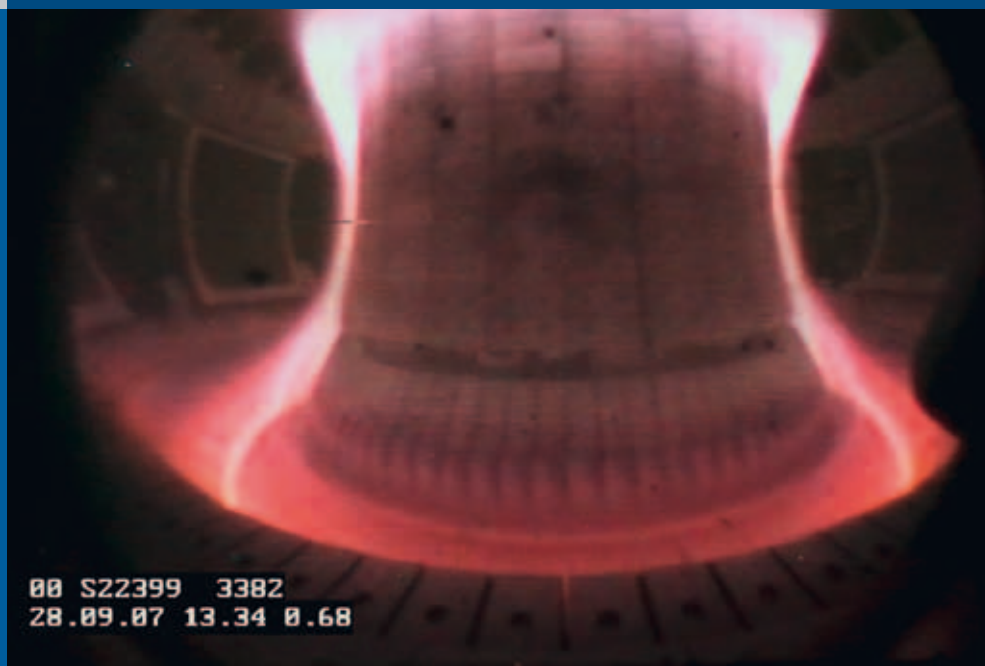
Die Brennstoffe für die Fusion sind weltweit fast unbegrenzt verfügbar – sie finden sich in Wasser und Mineralien. Für ein irdisches Fusionskraftwerk eignen sich die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium am besten. Deuterium ist in natürlichem Wasser enthalten; Tritium kommt zwar wegen seiner Halbwertszeit von nur zwölf Jahren in der Natur kaum vor, lässt sich aber aus Lithium erbrüten. Dieses wiederum lässt sich aus Mineralien, Sole oder Meerwasser extrahieren. Eine Badewanne voll Wasser und das Lithium einer verbrauchten Notebook-Batterie könnten eine Familie für 50 Jahre

Blick in das Plasmagefäß der größten deutschen Fusionsanlage ASDEX Upgrade in Garching bei München (links).

*Max-Planck-Institut für Plasmaphysik*

Ultra-dünn, aber extrem heiß ist das Plasma, das mit ASDEX Upgrade untersucht wird (rechts).

*Max-Planck-Institut für Plasmaphysik*



mit Strom versorgen. Kernfusion funktioniert allerdings nur bei immens hohen Temperaturen. Die Brennstoffe liegen dann im vierten Aggregatzustand vor – als Plasma, das heißt ionisiertes Gas. Nur so überwinden die Atomkerne ihre gegenseitige Abstoßung und verschmelzen miteinander. Auf der Erde bedarf es dazu einer Temperatur von über 100 Millionen Grad Celsius – sechs Mal so heiß wie im Innern der Sonne. Der Druck des Plasmas ist allerdings viel geringer als im Sonneninneren. Während dort einige Milliarden Atmosphären herrschen, genügen in einem irdischen Fusionsplasma etwa zwei Atmosphären.

### Sauber und sicher

Fusion ist eine saubere Energiequelle: Bei ihrer Nutzung entstehen keine CO<sub>2</sub>-Emissionen und keine langlebigen radioaktiven Abfälle. Zwar ist Tritium ein radioaktives Element, und die Wände eines Fusionskraftwerks werden durch die bei der Fusion erzeugten schnellen Neutronen aktiviert. Aber die dadurch verursachte Radioaktivität klingt relativ schnell ab, so dass es keines geologischen Endlagers bedarf. Fusion ist auch eine sichere Energiequelle: Zu einer Kernschmelze oder Explosion kann es nicht kommen, denn das Kraftwerk kann aus physikalischen Gründen nicht außer Kontrolle geraten. Bei einer Abweichung von den Betriebsbedingungen bricht die Energiefreisetzung sofort ab. Zudem herrscht in der Brennkammer eines Fusionskraftwerks nahezu ein Vakuum; sie enthält immer nur die kleine Menge an Brennstoff, die für den laufenden Betrieb erforderlich ist.

### Grundlastfähig und nachhaltig

Im Unterschied zu den klassischen regenerativen Energien wie Solarenergie, Wind- und Wasserkraft zeichnet sich die Fusion durch eine extrem hohe Energiekonzentration aus. Sie ist keinen tages- und jahreszeitlichen oder wetterbedingten Schwankungen unterworfen,

### TOKAMAK UND STELLARATOR

Die Fusionsforschung konzentriert sich gegenwärtig auf zwei Kraftwerkskonzepte: Tokamak und Stellarator. In beiden Kraftwerkstypen schließt ein ringförmiges und verdichtetes Magnetfeld das Plasma ein. Anlagen vom Typ Tokamak stellen einen Teil des einschließenden magnetischen Felds durch einen im Plasma fließenden elektrischen Strom her. Derzeit sind weltweit die meisten Anlagen Tokamaks. Bei Anlagen vom Typ Stellarator sind es ausschließlich äußere Spulen, die das Magnetfeld erzeugen. Damit lassen Stellaratoren gerade dort Stärken erwarten, wo Tokamaks Schwächen zeigen: Stellaratoren eignen sich für den Dauerbetrieb, während Tokamaks ohne Zusatzmaßnahmen nur gepulst, das heißt mit regelmäßigen kurzen Unterbrechungen arbeiten. Der Testreaktor ITER ist ein Tokamak. Wenn der Experimentierbetrieb an Wendelstein 7-X erfolgreich verläuft, könnte auch ein Stellarator zu den ersten Demonstrationskraftwerken gehören.

lässt sich überall einsetzen und verbraucht wenig Fläche. Daher eignet sie sich optimal für die Grundlastversorgung von Ballungsräumen und Großindustrie. Auch in einer stark von erneuerbaren Energien dominierten Stromwirtschaft fänden Fusionskraftwerke ihren Platz – nicht zuletzt als Puffer für die von der Witterung abhängigen Wind- und Sonnenkraftwerke. Die Fusion würde sich damit ideal in einen zukünftigen Energiemix einfügen.

Die fusionsorientierte Plasmaphysik ist in den vergangenen Jahrzehnten weltweit beträchtlich vorangekommen. Dies zeigt der Anstieg der erreichten Fusionsleistung von wenigen Milliwatt in den siebziger Jahren bis auf 16 Megawatt, wie sie vor einigen Jahren kurzzeitig beim Experiment des europäischen Kooperationsprojekts JET (Joint European Torus) in Culham/Großbritannien erreicht wurden. Damit ist die Fusionsleistung deutlich schneller gestiegen, als sich beispielsweise die Zahl der Schaltkreise auf Computerchips gemäß dem Mooreschen Gesetz – Verdoppelung alle 18 Monate – entwickelt hat. JET hat dabei annähernd den Break-even-Point



Wissenschaftler des KIT entwickeln Hochleistungsgyrotrons für die Mikrowellenheizung von Fusionsplasmen (links).

*Karlsruher Institut für Technologie*

In Greifswald entsteht derzeit das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X. Es soll Dauerbetrieb ermöglichen (rechts).

*Max-Planck-Institut für Plasmaphysik*

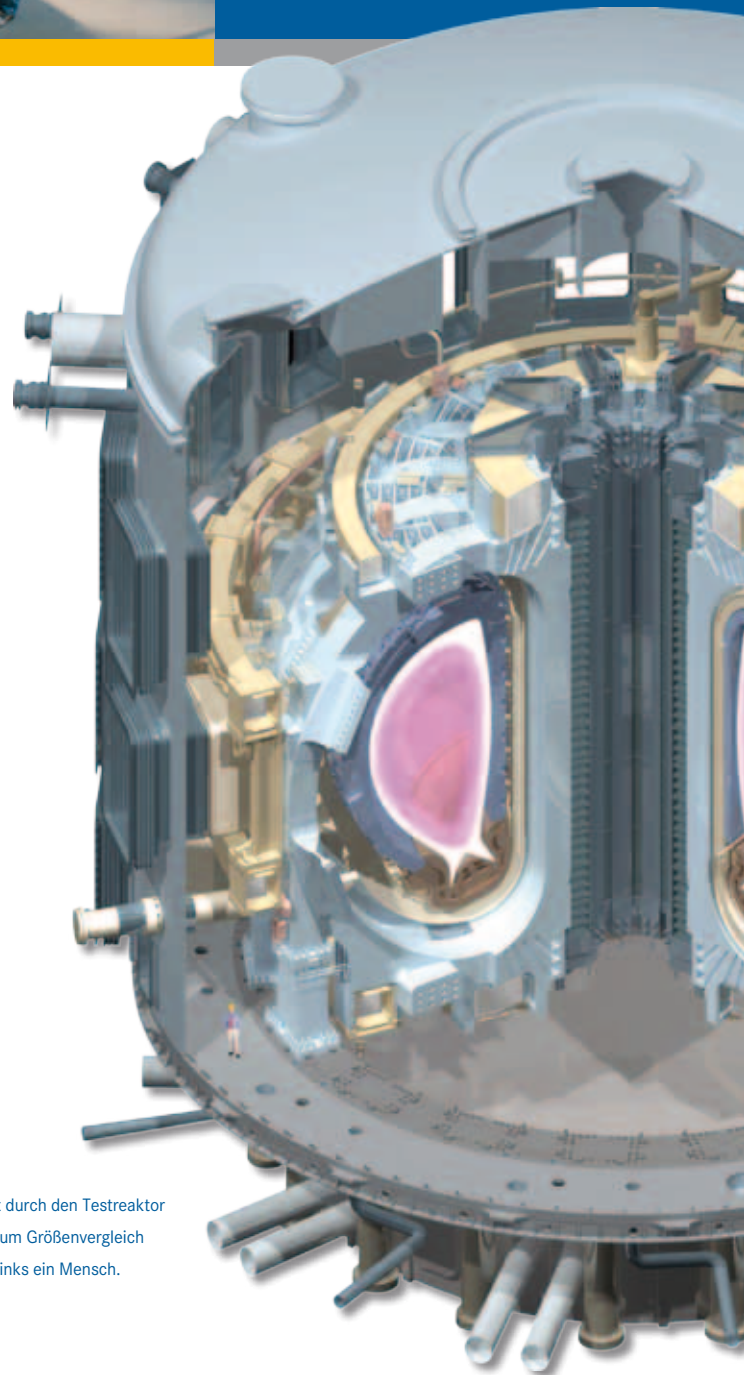
erreicht, das heißt, die eingesetzte Heizleistung entspricht der freigesetzten Fusionsleistung. Insgesamt ist die Forschung nur noch eine Größenordnung vom Zielwert für ein brennendes Plasma entfernt.

### Internationaler Testreaktor ITER

Aktuelles Großprojekt ist der zurzeit in Cadarache/Südfrankreich entstehende internationale Testreaktor ITER. Dabei handelt es sich, wie auch bei JET, um eine Anlage vom Typ Tokamak. ITER soll erstmals ein energielieferndes Plasma erzeugen und 500 Megawatt Fusionsleistung freisetzen – das Zehnfache der eingesetzten Heizleistung. Überdies soll ITER wesentliche Komponenten von Fusionskraftwerken im Betrieb testen. Die mit ITER gesammelten Erfahrungen werden dann in das nächste große Projekt einfließen: Der Demonstrationsreaktor DEMO soll als erstes Fusionskraftwerk über längere Zeit elektrischen Strom erzeugen.

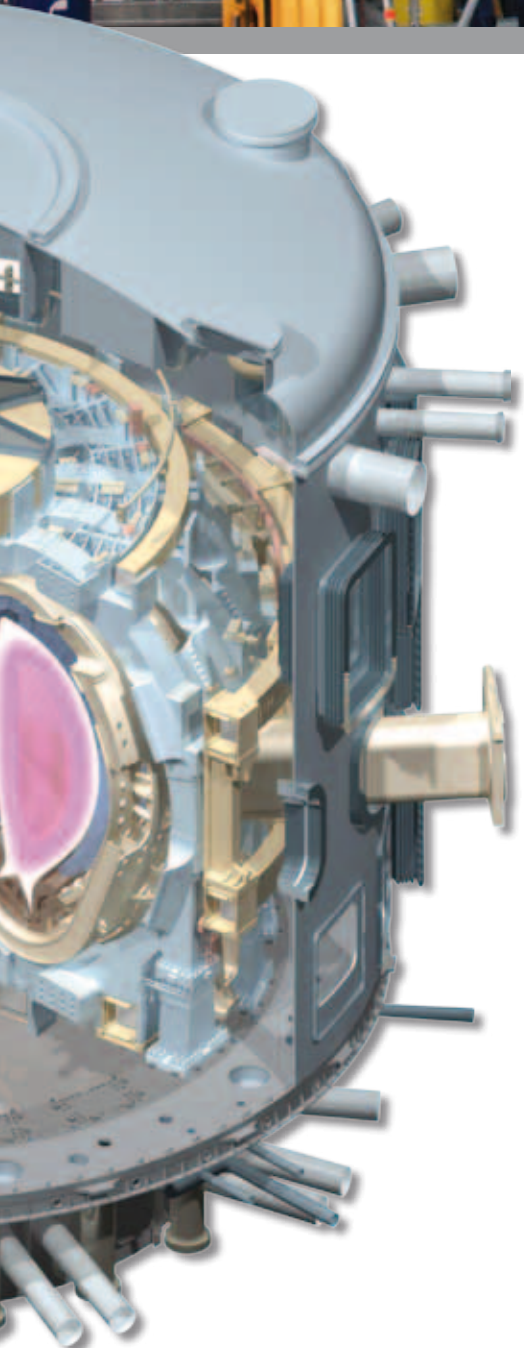
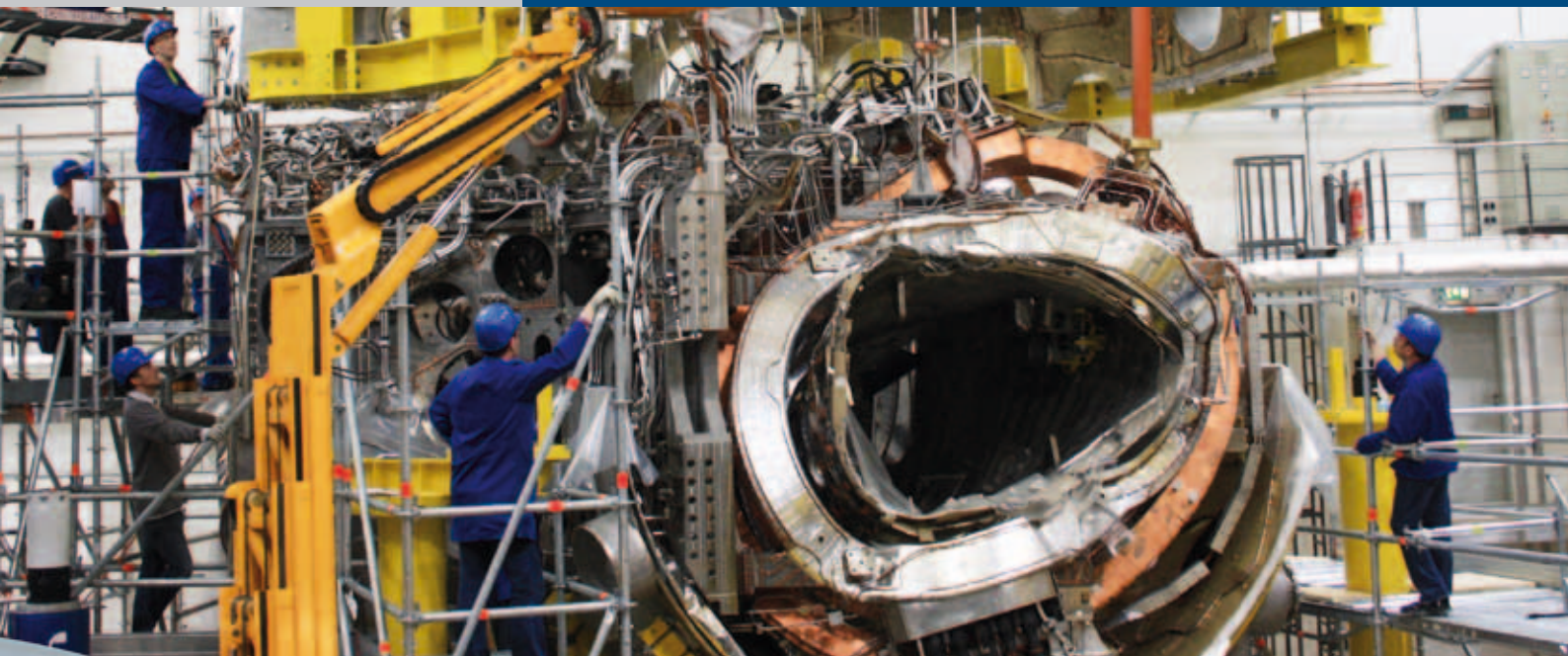
Forscherinnen und Forscher der Helmholtz-Gemeinschaft haben wesentliche Grundlagen für die Planung von ITER erarbeitet, tragen nun zum Bau der Anlage bei und werden auch am wissenschaftlichen Betrieb beteiligt sein. Mithilfe der kleineren Fusionsanlage ASDEX Upgrade in Garching erarbeiten sie geeignete Betriebsweisen, aber auch Heiz- und Messmethoden für das ITER-Plasma. Die Auslegung von ITER bringt zahlreiche Herausforderungen mit sich, vor allem bei der Entwicklung der Komponenten, die mit dem Plasma in Kontakt kommen. Die Helmholtz-Wissenschaftler entwickeln dazu neue Materialien, Beschichtungen und Verbindungen, bestimmen ihre thermischen und mechanischen Eigenschaften und testen sie unter fusionsrelevanten Bedingungen.

Damit sich das ultradünne Plasma nicht an materiellen Wänden abkühlen kann, schließen starke Magnetfelder es in einem immateriellen Käfig nahezu berührungsfrei ein. In der Helmholtz-Gemeinschaft entstehen dafür supraleitende Magnetspulen sowie Stromzuführungen, die den Betriebsstrom auf die Spulen übertragen. Eine weitere



Schnitt durch den Testreaktor ITER. Zum Größenvergleich unten links ein Mensch. *ITER*





wesentliche Aufgabe ist, Konzepte für das so genannte Blanket zu entwickeln. Das Blanket umschließt das Plasma als äußere Hülle und erfüllt drei Aufgaben: Es wandelt die Neutronenenergie aus der Fusionsreaktion in nutzbare Wärme um, erbrütet den Brennstoff Tritium durch das Einfangen von Neutronen in Lithium und schirmt die supraleitenden Magnete gegen Neutronen- und Gammastrahlung ab. Thermische Effizienz und Leistungsdichte des Blankets bestimmen Leistung und Wirtschaftlichkeit eines Fusionskraftwerks wesentlich mit. In Europa werden vorrangig zwei Brut-Konzepte verfolgt: Helium Cooled Pebble Bed (HCPB), entwickelt in Karlsruhe, und Helium Cooled Lithium Lead (HCLL), entwickelt vom Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) in Frankreich. Beide Konzepte sollen in ITER erprobt werden.

### Großexperiment Wendelstein 7-X

Ein besonderer Schwerpunkt des deutschen Fusionsforschungsprogramms liegt auf dem von der Helmholtz-Gemeinschaft errichteten Großexperiment Wendelstein 7-X in Greifswald. Es handelt sich dabei um eine Anlage vom Typ Stellarator – eine Alternative zum Typ Tokamak. Wendelstein 7-X wird nach der Fertigstellung die weltweit größte Anlage ihrer Art sein und soll die Kraftwerkseignung der Stellaratoren demonstrieren. Kernstück ist ein System aus siebenzig supraleitenden Magnetspulen. Ihre eigenwilligen Formen sind das Ergebnis ausgefeilter Optimierungsrechnungen: Sie sollen einen besonders stabilen und wärmeisolierenden magnetischen Käfig für das Plasma erzeugen. Mit ihrer Hilfe will Wendelstein 7-X das wesentliche Plus der Stellaratoren vorführen – den Dauerbetrieb. Zur Stromversorgung dieser Spulen haben Helmholtz-Wissenschaftler in Jülich ein System von elektrischen Versorgungsleitungen mit supraleitenden Komponenten entwickelt. Die supraleitenden Stromkabel müssen bei einer Temperatur von minus 269 Grad Celsius dauerhaft Hochspannung bis zu 13 000 Volt und extrem starke mechanische Kräfte aushalten.

Um die Brennstoffe zu einem Plasma mit einer Temperatur von über 100 Millionen Grad Celsius zu erhitzen, benötigt eine Fusionsanlage eine starke externe Heizung. Dazu dienen Mikrowellenröhren, so genannte Gyrotrons. Helmholtz-Forscher in Karlsruhe entwickeln und bauen eine Mikrowellenheizung für Wendelstein 7-X, bestehend aus zehn 140-Gigahertz-Gyrotrons mit einer Heizleistung von insgesamt zehn Megawatt, einer optischen Übertragungsleitung sowie einer flexiblen optischen Einkopplung der Mikrowellenleistung in das Plasma mit Spiegeln. Die Heizleistung dieses Systems entspricht der von rund 12 000 Küchenmikrowellenherden.

## MEHR STROM – WENIGER TREIBHAUSGAS

Wärme- und Umweltschutz müssen keine unvereinbaren Gegensätze sein. Die Helmholtz-Gemeinschaft arbeitet an Technologien und Konzepten, den Wirkungsgrad von thermischen Kraftwerken zu erhöhen und die CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Atmosphäre zu verringern.

Thermische Kraftwerke sind die wichtigsten Stromlieferanten und werden es auf absehbare Zeit bleiben. Beim Verbrennen der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas entsteht allerdings das klimawirksame Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>). Um die Klima- und Umweltfreundlichkeit thermischer Kraftwerke zu verbessern, verfolgt die Helmholtz-Gemeinschaft verschiedene, einander ergänzende Ansätze: Wirkungsgrad erhöhen, CO<sub>2</sub>-Emissionen verringern, alternative Brennstoffe einsetzen. Die Arbeiten reichen von der Entwicklung der Materialien in atomaren Dimensionen bis hin zur ökologischen und ökonomischen Analyse der neuen Kraftwerke. Mit den entsprechenden Technologien und Konzepten befassen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Forschungszentrum Jülich, am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und am Deutschen GeoForschungs-Zentrum GFZ in Potsdam.

Wohin mit dem Kohlenstoffdioxid? CCS heißt die Antwort – CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Dioxide Capture and Storage). Auch und besonders in den sich schnell entwickelnden und kohleabhängigen Schwellenländern bietet CCS die Möglichkeit, klimawirksame Emissionen zu verringern. Die Idee ist, CO<sub>2</sub> aus den Abgasen der Kraftwerke herauszutrennen und auf Dauer unterirdisch einzuschließen. Es gibt bereits Kohlekraftwerke, bei denen CO<sub>2</sub> mithilfe von Laugen aus den Abgasen herausgewaschen wird. Aber dieses

Verfahren ist aufwendig, benötigt viel Platz und vermindert vor allem den Wirkungsgrad der Kraftwerke erheblich. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Helmholtz-Gemeinschaft verfolgen einen Weg, auf dem deutlich weniger Energie verloren geht: Sie setzen neuartige Membranen ein, um das CO<sub>2</sub> abzufangen.

### Membran statt Waschlauge

Dafür gibt es drei Möglichkeiten. Das Post-Combustion-Verfahren besteht darin, die Abgase nach der Verbrennung über eine CO<sub>2</sub>-durchlässige Membran zu schicken, die das Treibhausgas aussiebt. Mithin ersetzt die Membran die beim herkömmlichen Verfahren eingesetzte Waschlauge. Dieses Verfahren ist als einziges dazu geeignet, bestehende Kraftwerke nachzurüsten.

Schon vor der Verbrennung setzt das Pre-Combustion-Verfahren an: Kohle wird mit reinem Sauerstoff verbrannt; dabei entsteht ein Gemisch aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid. Letzteres wird mit Wasserdampf zu CO<sub>2</sub> umgesetzt, wobei weiterer Wasserstoff entsteht. Membranen trennen das CO<sub>2</sub> ab, so dass fast reiner Wasserstoff für die Gasturbine verfügbar ist. Bei dessen Verbrennung entsteht nur Wasser.



Eine dritte Möglichkeit ist die Oxyfuel-Technologie: Eine Membran trennt den Stickstoff aus der Luft ab; übrig bleibt fast reiner Sauerstoff. Er wird mit CO<sub>2</sub> verdünnt, damit die Verbrennungstemperaturen nicht gar zu weit nach oben steigen. Mit diesem Gasgemisch wird die Kohle verbrannt. Das Endprodukt ist hochkonzentriertes CO<sub>2</sub>. Derzeit prüfen die Helmholtz-Forscher alle drei Verfahren und entwickeln Materialien für die Membranen. Diese müssen präzise Trennung, ausreichende Durchflussmengen und hohe Selektivität gewährleisten sowie extremen Belastungen durch Temperatur, Druck und chemische Prozesse standhalten.

Ist das CO<sub>2</sub> abgetrennt, wird es unterirdisch gespeichert. In einem Pilotprojekt in Ketzin/Brandenburg erkunden Helmholtz-Wissenschaftler geeignete Gesteinsstrukturen. Bis jetzt haben sie rund 35 000 Tonnen CO<sub>2</sub> in eine salzwasserführende Gesteinsschicht eingespeist, um die dabei ablaufenden physikalischen, chemischen, geologischen und biogeochemischen Prozesse zu untersuchen. Zusätzlich entwickeln, erproben und vergleichen die Forscher verschiedene Überwachungs- und Beobachtungskonzepte.

### Neue Materialien für höhere Temperaturen

Materialien spielen eine Schlüsselrolle, wenn es darum geht, höhere Temperaturen zu erreichen, um den Wirkungsgrad der Kraftwerke zu steigern. Wissenschaftler der Helmholtz-Gemeinschaft untersuchen das Verhalten von Hochleistungs-Chromstählen und testen komplexe Legierungen auf Nickelbasis. Zudem entwickeln sie Korrosionsschutzschichten und Wärmedämmschichten aus Keramik für Kraftwerkskomponenten. Durch Hochtemperaturwerkstoffe und -komponenten soll der Wirkungsgrad von Kraftwerken bei kohlebasierten Prozessen auf 60 Prozent, bei kombinierten Gas- und Dampfturbinenprozessen auf 70 Prozent steigen.

Parallel arbeiten die Helmholtz-Forscher an Verfahren zur energieeffizienten Brennstoffumwandlung und nachfolgenden Gasreinigung sowie zur Mitverbrennung heterogener Ersatzbrennstoffe in Kraftwerken. Dabei geht es unter anderem um die Brennstoffaufbereitung, etwa die mechanische und thermische Vorbehandlung von Ersatzbrennstoffen, um Hochdruckvergasung, um Modellierung und Messung der Partikelbildung bei Verbrennungs- und Vergasungsvorgängen sowie um Mehrstoffbrenner in der Kraftwerksbrennkammer.



Die Helmholtz-Allianz MEM-BRAIN entwickelt Membranen zur Abscheidung von Kohlendioxid.  
Forschungszentrum Jülich

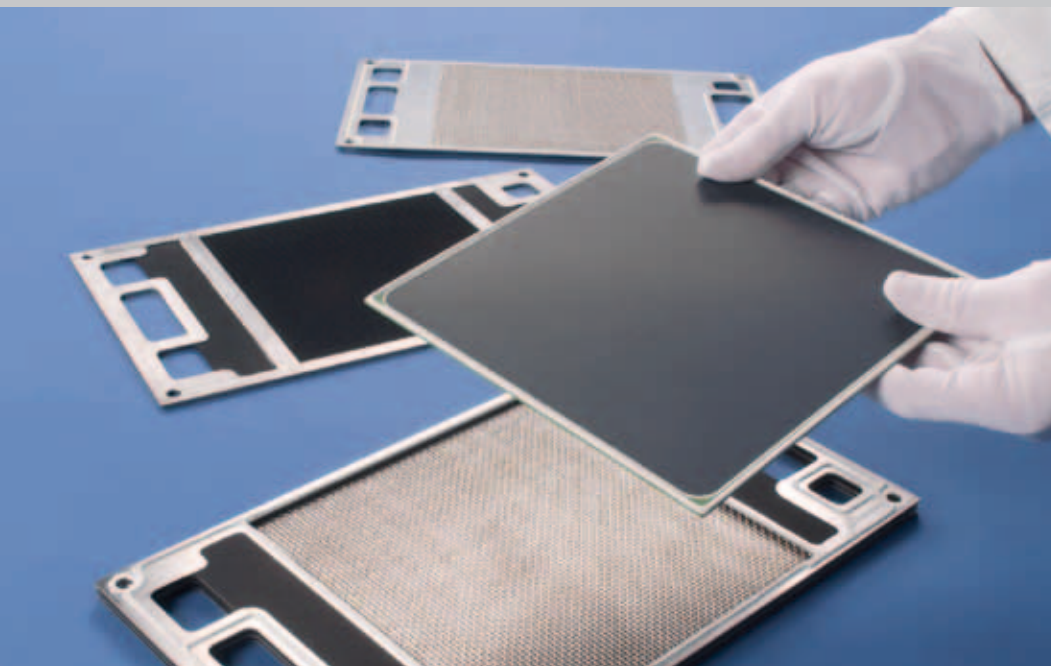
### THERMISCHE KRAFTWERKE

Wärmekraftwerke wandeln thermische Energie teilweise in elektrische Energie um. Das geschieht in zwei Schritten: Eine Kraftmaschine wandelt die Wärme in nutzbare Bewegungsenergie, ein Generator wandelt diese dann in elektrische Energie. Die erforderliche Wärme wird meist im Kraftwerk durch Verbrennen von chemischen Energieträgern erzeugt. Zu den effizientesten Bauarten gehört das Gas- und Dampf-Kombinationskraftwerk, das die Prinzipien des Gasturbinenkraftwerks und des Dampfkraftwerks verbindet.

Mit Radialverdichtern lässt sich Kohlendioxid verlustarm verdichten (links).  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Aufnahme einer Flamme in einer optischen Brennkammer (rechts).  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt





Einzelne Brennstoffzellen werden zu einem Stapel - einem sogenannten Stack - zusammengesetzt (links).

*Forschungszentrum Jülich*

Erstarrte gläserne Tropfen, aus denen Dichtungsmaterial für Festoxid-Brennstoffzellen hergestellt wird (rechts).

*Forschungszentrum Jülich*

Dezentrale Energiebereitstellung

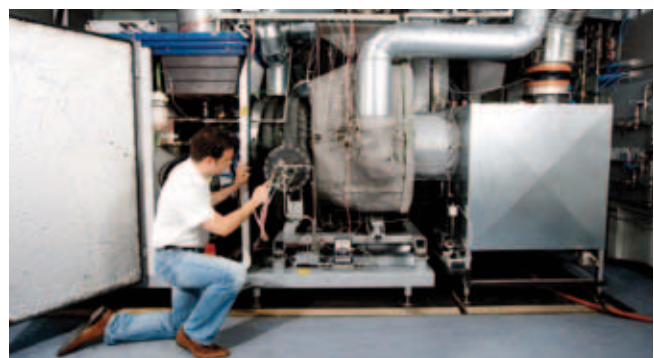
## AUF KURZEN WEGEN ZUM VERBRAUCHER

Dezentrale Anlagen stellen Strom und Wärme verlustarm bereit, erreichen einen hohen Nutzungsgrad und fördern den Einsatz erneuerbarer Energien. Forscherinnen und Forscher der Helmholtz-Gemeinschaft entwickeln effiziente Verbrennungssysteme, Mikro-gasturbinen-Blockheizkraftwerke und Brennstoffzellen.

Um den weltweit wachsenden Strombedarf nachhaltig zu decken, müssen dezentrale kleinere Anlagen die zentral positionierten Großkraftwerke ergänzen. Während Großkraftwerke sich durch ihren hohen elektrischen Wirkungsgrad auszeichnen, erreichen dezentrale Anlagen einen hohen Gesamtnutzungsgrad, da sich in ihrem Umfeld auch die anfallende Wärme nutzen lässt. Auch die zunehmende Erschließung lokaler Energieträger wie Biomasse macht dezentrale Anlagen ökonomisch und ökologisch attraktiv. Verluste, wie sie auf langen Beförderungs- und Übertragungswegen auftreten, lassen sich so vermeiden.

### Strom und Wärme aus einer Anlage

Bereits heute gibt es Systeme, die hohen elektrischen Wirkungsgrad und umfassende Wärmenutzung vereinen: Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Kleine KWK-Anlagen, so genannte Blockheizkraftwerke (BHKW) sind auch für Erdgas oder Biogas verfügbar. Neue Konzepte, wie Hybridkraftwerke aus Brennstoffzellen und Mikro-gasturbinen, versprechen noch höhere Wirkungsgrade. Gegenwärtige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zielen auf einen sicheren und zuverlässigen Betrieb sowie eine hohe Effizienz bei minimaler Emission von CO<sub>2</sub> und anderen Schadstoffen. Wissenschaftlerinnen



Versuchsstand zur Optimierung einer Mikro-gasturbine.

*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*

und Wissenschaftler der Helmholtz-Gemeinschaft befassen sich vor allem mit Brennstoffen, Verbrennungssystemen und -prozessen, Mikro-gasturbinen-BHKW und Brennstoffzellen.

Was Brennstoffe für dezentrale last- und brennstoffflexible Kraftwerksfeuerungen betrifft, geht es vor allem um Verfahren zur energieeffizienten Umwandlung sowie um die Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffgemischen in der Kraftwerkstechnik. Wichtige Themen sind Brennstoffaufbereitung, Prozesse zur Hochdruckvergasung,



Hochtemperatur-Hochdruck (HTHP) -Gasreinigung und HTHP-Filtration, alternative Brennstoffe und Mehrstoffbrenner in der Kraftwerksbrennkammer.

Mikrogasturbinen-basierte BHKW, die unter anderem auch für einen schadstoffarmen Betrieb mit alternativen und synthetischen Gasen ausgelegt sind, zeichnen sich gegenüber heute verfügbaren Motor-BHKW durch Vielseitigkeit und geringeren Wartungsbedarf aus. Helmholtz-Forscher übertragen vorhandenes Know-how zur Optimierung von Kraftwerksturbinen auf Mikrogasturbinen. Überdies arbeiten sie daran, eine Mikrogasturbine mit einer Brennstoffzelle zu koppeln – eine Kombination, die einen elektrischen Wirkungsgrad oberhalb von 65 Prozent verspricht.

### Power aus Brennstoffzellen

Brennstoffzellen wandeln chemische Energie direkt in elektrische Energie um und liefern sauberen Strom für vielfältige stationäre und mobile Anwendungen. Helmholtz-Wissenschaftler entwickeln sowohl Hochtemperatur-Brennstoffzellen, die Erdgas verwenden, als auch Niedertemperatur-Brennstoffzellen, die Wasserstoff oder Methanol umsetzen. Für den stationären Einsatz sind vor allem Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC) geeignet, die bei Temperaturen von 600 Grad Celsius und höher betrieben werden. Die Helmholtz-Forscher entwickeln neue Werkstoffe und Zellkonzepte, arbeiten an industrienahen Fertigungstechniken, bauen und untersuchen Prototypen. Simulationsmodelle helfen, Prozesse in Brennstoffzellen zu optimieren, um Systemwirkungsgrade über 60 Prozent zu erreichen. Eine der größten Herausforderungen der Brennstoffzellenentwicklung besteht darin, Alterungsvorgänge zu verlangsamen, um die Einsatzdauer zu verlängern, was vor allem bei der stationären Stromversorgung relevant ist.

Für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten steht eine leistungsfähige Infrastruktur bereit. So verfügt die Helmholtz-Gemeinschaft über industrienaher Fertigungsanlagen, aufwendige Analyseinstrumente und Teststände für Brennstoffzellen. Derzeit entsteht ein Demonstrations-Hybridkraftwerk mit Mikrogasturbine und Brennstoffzelle.

In der Helmholtz-Gemeinschaft arbeiten das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), das Forschungszentrum Jülich und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) an Technologien zur dezentralen Energiebereitstellung.

### ENERGIE AUS DEZENTRALEN ANLAGEN

Dezentrale Energiebereitstellung umfasst einen Leistungsbereich von wenigen Kilowatt bis zu einigen Megawatt. Die Anlagen speisen den erzeugten Strom in ein übergeordnetes Netz ein oder arbeiten als netzunabhängige Inselanlagen. Gleichzeitig lässt sich die anfallende Wärme nutzen. Lokal vorhandene Energieträger wie Biomasse, Methan oder Wasserstoff lassen sich vor Ort verwerten.

Als dezentrale Anlagen fungieren vor allem Brennstoffzellen und Gasmotor-Blockheizkraftwerke. Die Kleinanlagen lassen sich auch zu virtuellen Kraftwerken zusammenschließen, etwa Brennstoffzellenkraftwerke, Mikrogasturbinen oder Motor-Blockheizkraftwerke mit Photovoltaik- oder Windkraftanlagen und geeigneten Speichertechniken.

## WENIGER IST MEHR

Energie effizienter nutzen ist leichter, als das Energieangebot zu vergrößern. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Helmholtz-Gemeinschaft erarbeiten Lösungen für höhere Energieeffizienz in vielen Bereichen – beispielsweise für Stromnetze, in der Bauindustrie oder bei der Fertigung von Fahrzeug-Leichtbauteilen.

Die Energieeffizienz zu steigern trägt entscheidend dazu bei, die wachsende Nachfrage nach Energie zu decken, die Kosten zu senken, die Abhängigkeit von Importen zu verringern, die Ressourcen zu schonen und das Klima zu schützen. Deutschland nimmt bei der Erforschung und Entwicklung von einschlägigen Technologien einen Spitzenplatz ein. In der Helmholtz-Gemeinschaft befassen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit Lösungen für höhere Effizienz auf sämtlichen Stufen der Energieversorgung. So entwickeln sie für die Stromerzeugung innovative Materialien, mit denen sich Kraftwerke bei höheren Temperaturen betreiben lassen, sowie verbesserte Brennstoffzellen. Für die Verteilung und Anwendung von Energie erarbeiten sie verschiedene Effizienztechnologien und -konzepte.

### Stromtransport ohne Widerstand

Ein Schwerpunkt liegt auf der Supraleitung zum verlustarmen Transport von elektrischer Energie. Supraleiter sind Materialien, die unterhalb einer bestimmten Temperatur ihren elektrischen Widerstand verlieren. Sie leiten Strom, ohne dass ein Teil der elektrischen Energie in Wärme gewandelt wird und für die beabsichtigte Nutzung verloren geht. Daher können sie dazu beitragen, zwei aktuellen Herausforderungen in der Stromversorgung zu begegnen: Erstens

gehen immer mehr dezentrale Erzeuger ans Netz, und der Anteil erneuerbarer Energien steigt. Einige dieser Energiequellen, wie Sonne und Wind, unterliegen jedoch zeit- und wetterbedingten Schwankungen. Dadurch wird es schwieriger, Frequenz und Spannung zu stabilisieren. Zweitens gilt es, das Stromnetz instand zu halten und veraltete Teile zu erneuern. Helmholtz-Forscher arbeiten an supraleitenden Betriebsmitteln, neuen Netzstrukturen, Lösungen zum verlustarmen Betrieb von Magneten mit hohen Magnetfeldern, Supraleitern zur Induktionsheizung sowie Konzepten zum Asset-Management, das heißt zur Instandhaltung der Netze und Sicherung der Stromversorgung.

### Grüner Zement

Weitere Projekte der Helmholtz-Gemeinschaft fokussieren auf industrielle Prozesse. Durch innovative Materialien, kürzere Zykluszeiten, Prozessintensivierung, Integration von Verfahrensschritten sowie intelligente Energie- und Stoffverbünde lässt sich die Effizienz solcher Prozesse deutlich steigern. Mit Blick auf die Bau- und Baustoffindustrie ist es Helmholtz-Forschern gelungen, ein hochwertiges hydraulisches Bindemittel namens Celiment zu entwickeln, dessen Herstellung im Vergleich zu herkömmlichem Zement weniger Rohstoffe benötigt, mit wesentlich niedrigeren Temperaturen auskommt,



Energie einspart und bis zu 50 Prozent weniger CO<sub>2</sub> freisetzt. Der „grüne Zement“ lässt sich wie Portlandzement mit Wasser, Sand und Kies zu Beton verarbeiten. Um das im Labor erprobte Verfahren zu einem industriell nutzbaren Produktionsprozess weiterzuentwickeln, errichtet die Helmholtz-Gemeinschaft gemeinsam mit einem Industriepartner im Rahmen einer Unternehmensausgründung eine Celitement-Pilotanlage in Karlsruhe. Das Potenzial für den Klimaschutz ist enorm: Derzeit stammen fünf bis sieben Prozent der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emission aus der Zementproduktion – der Flugverkehr ist demgegenüber für rund zwei Prozent des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verantwortlich.

### Kurzer Prozess dank Mikrowellen

Ebenfalls mit einem Industriepartner entwickelt und vermarktet die Helmholtz-Gemeinschaft eine Linie von energieeffizienten Mikrowellensystemen unter dem Namen HEPHAISTOS. Die Mikrowellen härten hochwertige Leichtbauwerkstoffe, besonders kohlenstofffaserverstärkte Verbundwerkstoffe (CFK), in einem kalten Ofen aus. Dadurch lassen sich weit verbreitete Produktionsprozesse energieeffizienter gestalten und erheblich beschleunigen. HEPHAISTOS erlaubt unter anderem, große CFK-Bauteile für Automobile und Flugzeuge ohne Autoklaven zu fertigen. Bei den fertigen Produkten sparen die Leichtbauteile Gewicht ein, wodurch wiederum der Treibstoffverbrauch sinkt. Doch nicht nur Automobil- und Luftfahrtindustrie, sondern auch Maschinen- und Anlagenbau, Bauindustrie, Windenergie-technik, Textilindustrie, Medizintechnik und weitere Branchen können von der Mikrowellentechnologie profitieren. Das HEPHAISTOS Experimental Centre (HEC) in Karlsruhe erschließt neue Anwendungsfelder.

In der Helmholtz-Gemeinschaft befassen sich das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit Technologien zur effizienten Verteilung und Anwendung von Energie.

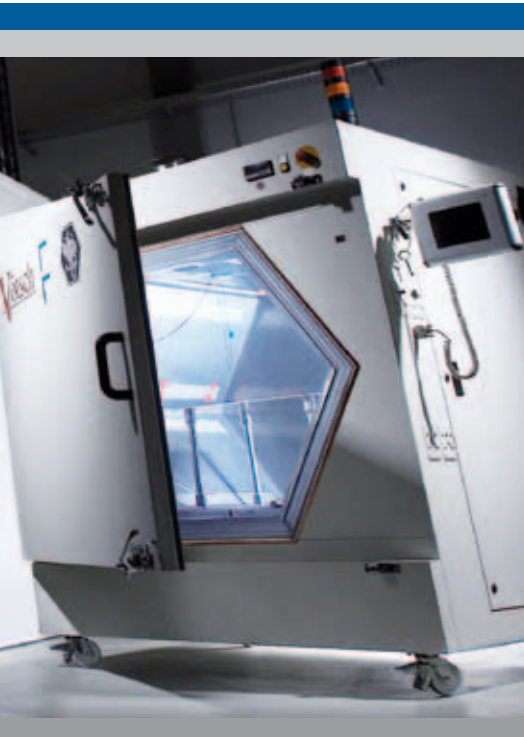


Versuchsanlage zur ressourcenschonenden Zementherstellung.

Karlsruher Institut für Technologie

### ENERGIEEFFIZIENZ

Energieeffizienz bezieht sich auf das Verhältnis zwischen eingesetzter Energie und erreichtem Nutzen. Je geringer der Energieeinsatz, der für einen gewünschten Nutzen erforderlich ist, desto höher die Energieeffizienz. Dies betrifft alle Stufen der Energieversorgung – von der Erschließung und Förderung über Umwandlung, Speicherung und Verteilung bis hin zur Endanwendung.



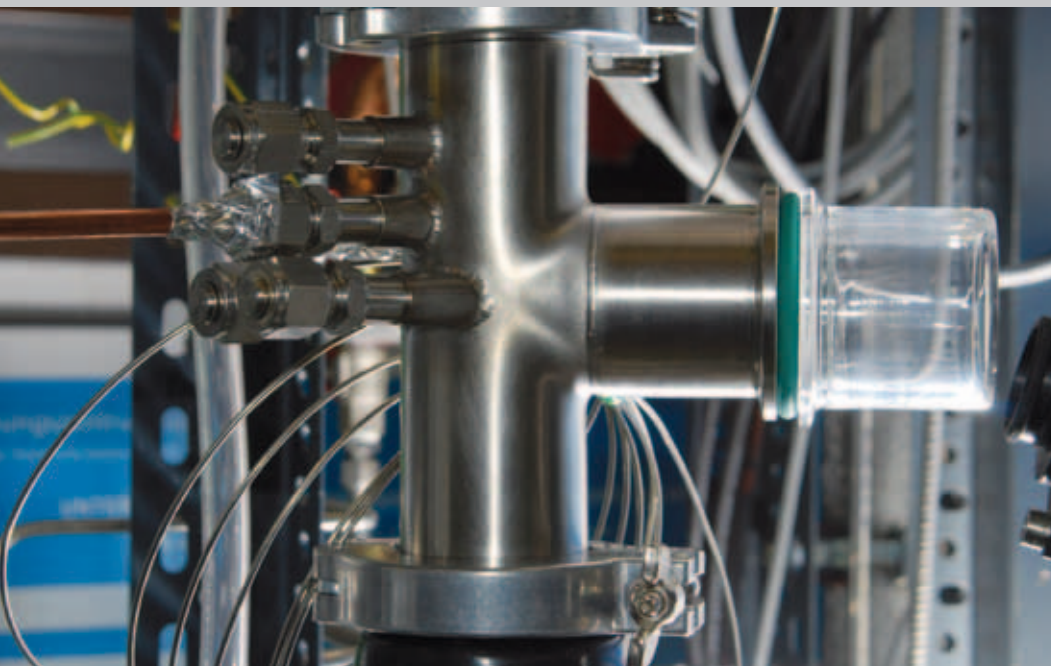
HEPHAISTOS, die größte Mikrowellen-Prozessanlage der Welt (links).

Karlsruher Institut für Technologie

Energieeffizient hergestellter hochwertiger Zement (rechts).

Karlsruher Institut für Technologie





Heatpipe-gekühltes Katalysatorelement für die Wasserstoffrekombination (links).

*Forschungszentrum Jülich*

Drucktank-Explosionslabor für Sicherheitsexperimente mit Wasserstoff (rechts).

*Karlsruher Institut für Technologie*

Nukleare Sicherheitsforschung

## HOHE STANDARDS

Sicherheit der Kernreaktoren und Strahlenschutz stehen im Fokus der nuklearen Sicherheitsforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft. Im Sinne der gesellschaftlichen Vorsorgeforschung befassen sich die Forscherinnen und Forscher mit der sicherheitstechnischen Anlagenauslegung, mit der Analyse hypothetischer Störfälle sowie mit präventiven Maßnahmen.

Die Forschung der Helmholtz-Gemeinschaft zur nuklearen Sicherheit dient zum einen der Sicherheit der Kernreaktoren, zum anderen dem Strahlenschutz. Dank exzellenter wissenschaftlicher und technischer Expertise sowie einer einzigartigen Infrastruktur mit aufwendigen Großversuchsanlagen werden die Ergebnisse und die Fachkompetenz europa- und weltweit nachgefragt. Die Arbeiten sind am Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf, am Forschungszentrum Jülich und am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) angesiedelt. Fast alle Arbeiten sind in internationale Kooperationen integriert. Um die Kompetenz in der Kerntechnik auch künftig zu sichern, engagiert sich die Helmholtz-Gemeinschaft intensiv in der Ausbildung und Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Dazu dienen unter anderem gemeinsam mit universitären Partnern und der Industrie eingerichtete Nachwuchsgruppen und Juniorprofessuren sowie die beiden nationalen Kompetenzverbände Kerntechnik und Strahlenschutz.

### Sicherheit der Kernreaktoren

Um heute und in Zukunft einen hohen Sicherheitsstandard der Kernkraftwerke zu gewährleisten, befassen sich Helmholtz-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler intensiv mit sicherheitstechnischen

Fragen zur Reaktor- und Anlagenauslegung im Normalbetrieb sowie zu Phänomenen und Prozessen bei Auslegungsstörfällen und auslegungsüberschreitenden Störfällen. Zweck dieser Arbeiten ist unter anderem, Maßnahmen zur Störfallprävention und zur Begrenzung der Auswirkungen schwerer Störfälle auf die Anlage selbst zu entwickeln. Dabei dient unter anderem das in der Helmholtz-Gemeinschaft entwickelte Reaktordynamikprogramm DYN3D der detaillierten Analyse hypothetischer Störfälle. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Beherrschung von betriebs- und unfallbedingten Wasserstofffreisetzungen in Leichtwasserreaktoren, wie etwa bei der Kontrolle von Radiolysegas in Siedewasserreaktoren.

Im Rahmen des so genannten QUENCH Vorhabens (Quenching – Abschrecken) untersuchen Forscher das Hochtemperatur-Materialverhalten von Reaktorkomponenten in der frühen Phase eines möglichen schweren Störfalls. Dabei geht es besonders um das Wiederfluten, das heißt Einleiten von Wasser in den überhitzten Reaktorkern als Schutzmaßnahme zum Absenken der Temperatur und zur Wärmeabfuhr. Darüber hinaus befassen sich die Forscher mit den radiologischen Folgen von kerntechnischen Unfällen sowie mit Möglichkeiten, den externen Notfallschutz zu verbessern.





Von wachsendem Interesse sind Strömungen flüssiger Metalle, wie sie in Schnellen Reaktoren der Generation IV sowie in Transmutationsanlagen zur Verbrennung hochradioaktiver Abfälle eingesetzt werden. Für den sicheren Betrieb solcher Anlagen erarbeitet die Helmholtz-Gemeinschaft zum Beispiel Methoden zur Überwachung der Strömung von flüssigem Natrium oder von Blei-Wismut. Sie entwickelt dazu Lösungen wie die kontaktlose Magnetfeldtomografie und Ultraschallverfahren, mit denen sich die dreidimensionalen Geschwindigkeitsfelder in der Strömung auch bei Temperaturen bis 600 Grad Celsius messen lassen. Ein weiteres wichtiges Thema ist die Detektion von Gasblasen in flüssigen Metallen.

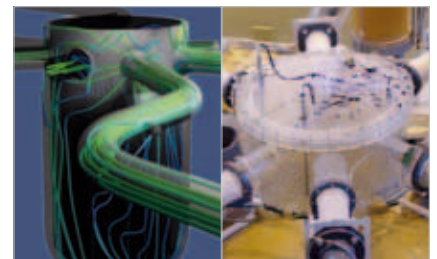
Zur Berechnung von Mehrphasenströmungen, die bei unterstellten Störfällen auftreten könnten, entwickeln die Helmholtz-Forscher theoretische Modelle für grundlegende Phänomene in dreidimensionalen Mehrphasensystemen und überprüfen sie in großskaligen Experimenten mit weltweit einzigartiger Messtechnik.

Bei der Material- und Komponentensicherheit von Kernreaktoren steht die Analyse von bestrahlten Reaktorwerkstoffen im Vordergrund. Forscher untersuchen beispielsweise austenitischen Reaktorstahl aus dem stillgelegten Kernkraftwerk Greifswald bruchmechanisch in heißen Zellen. Mithilfe von modernsten strukturanalytischen Verfahren, wie sie nur in der Helmholtz-Gemeinschaft verfügbar sind, klären sie dabei die werkstoffphysikalischen Mechanismen der strahlungsbedingten Materialalterung auf.

### Strahlenschutz

In der Strahlenschutzforschung entwickeln Helmholtz-Wissenschaftler Verfahren, um Strahlendosen hochpräzise und personenbezogen zu ermitteln. Außerdem empfehlen sie Maßnahmen zum Strahlenschutz bei Radionukliden in der Umwelt oder in Nahrungsmitteln, bei Strahlenexposition in der Medizin sowie zum Notfallschutz nach möglichen kerntechnischen Stör- und Unfällen.

Als Echtzeit-Entscheidungshilfesystem für den Fall einer radioaktiven Freisetzung aus kerntechnischen Anlagen dient das in der Helmholtz-Gemeinschaft entwickelte System RODOS (Real-time Online DecisiOn Support) für den operationellen Einsatz im europäischen Raum. Es lässt sich an nationale und regionale Gegebenheiten anpassen und ist inzwischen auf nichtnukleare Anwendungen erweitert worden.



Eine Simulation zur Kühlmittel-Vermischung in Druckwasserreaktoren wird an der Versuchsanlage ROCOM überprüft.

*Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf*

### GENERATION IV

Eine internationale Kooperation mit Beteiligung der Europäischen Union widmet sich unter dem Namen „Generation IV International Forum“ der Erforschung und Entwicklung zukünftiger kerntechnischer Reaktorsysteme. Diese sollen nicht nur Strom erzeugen, sondern beispielsweise auch Prozesswärme und Wasserstoff bereitstellen sowie der Meerwasserentsalzung dienen. Die Anlagen der Generation IV müssen höchste Anforderungen an Sicherheit, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit erfüllen. Sie werden es ermöglichen, den Brennstoffkreislauf zu schließen und die Mengen hochradioaktiven Abfalls zu verringern.

## SICHERHEIT AUF LANGE SICHT

Bei der Nutzung der Kernenergie fallen radioaktive Abfälle mit langlebigen Radionukliden an. Die Sicherheit von Mensch und Umwelt erfordert es, diese Abfälle dauerhaft von der Biosphäre zu isolieren. In der Helmholtz-Gemeinschaft erarbeiten Wissenschaftler Lösungen für eine langfristig sichere Entsorgung.

Die Forschungen der Helmholtz-Gemeinschaft zur nuklearen Entsorgung richten sich auf das Charakterisieren und Immobilisieren hochradioaktiver Abfälle, das Reduzieren der Radiotoxizität und damit des Gefährdungspotenzials sowie die Langzeitsicherheit von Endlagern. Dank umfassender Expertise und einer aufwendigen Infrastruktur mit einzigartigen analytischen und experimentellen Möglichkeiten sind die Arbeiten international hoch anerkannt. Projekte laufen am Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf, am Forschungszentrum Jülich und am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Die Helmholtz-Gemeinschaft trägt wichtige nationale und internationale Netzwerke und Projekte zur Entsorgungsforschung mit, etwa zur Weiterentwicklung des nuklearen Brennstoffkreislaufs oder zu Techniken und Methoden der internationalen Kernmaterialüberwachung (Safeguards).

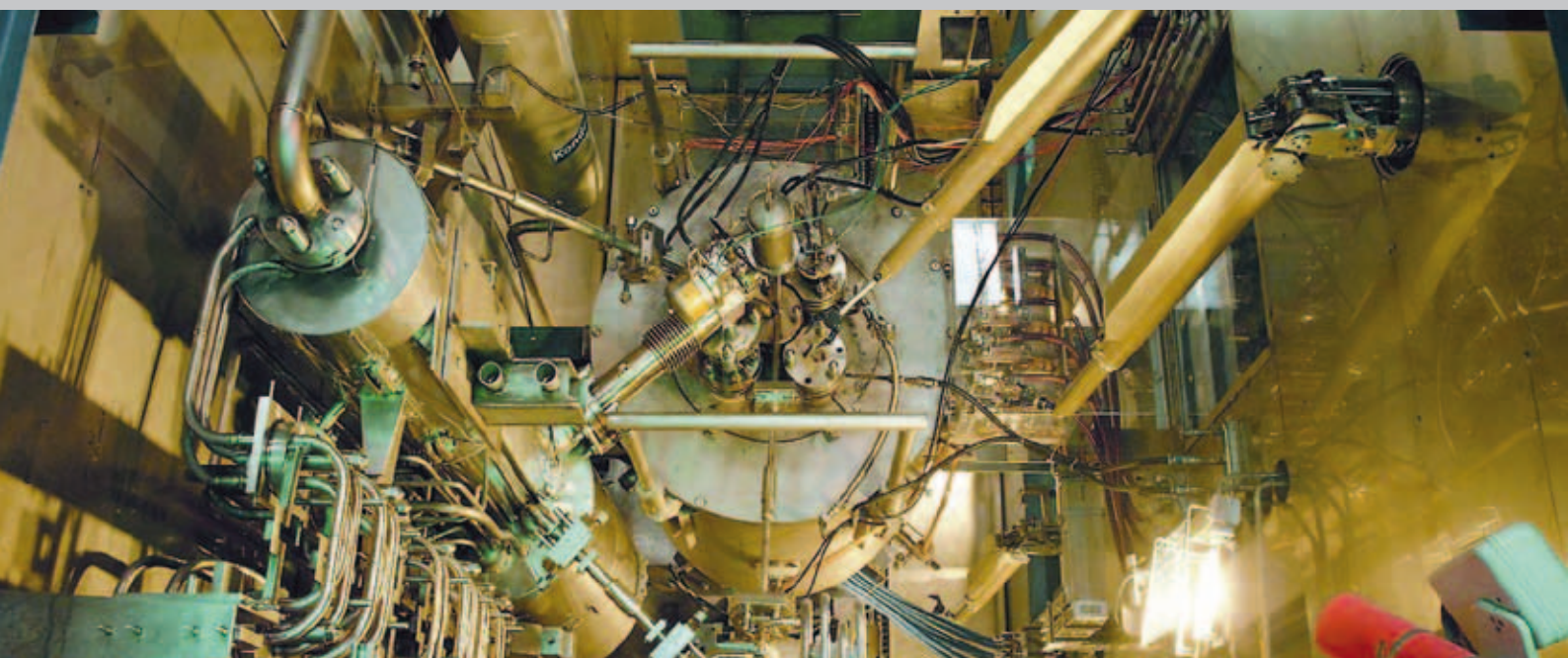
### Charakterisierung und Immobilisierung hochradioaktiver Abfälle

Zur Immobilisierung von hochradioaktiven flüssigen Abfällen aus der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen haben Forscher der Helmholtz-Gemeinschaft ein spezielles Verglasungsverfahren entwickelt. Dabei wird die Abfalllösung direkt in einen mit Hochtemperaturkeramik ausgekleideten Schmelzofen eingespeist, in dem eine Glasschmelze elektrisch auf rund 1200 Grad Celsius erhitzt

wird. Anschließend wird die Glasschmelze mit den gebundenen Abfällen in Kokillen genannte Edelstahlbehälter gefüllt. Diese Technologie bildet die Basis für die Verglasungseinrichtung Karlsruhe (VEK) und lässt sich in weiteren Projekten einsetzen. Als alternatives Konzept prüft die Helmholtz-Gemeinschaft das Einbringen der besonders gefährlichen Actiniden in keramische Materialien.

Im Projekt Nukleargraphit entwickeln Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Konzepte zur Endlagerung und Wiedergewinnung von Reaktorgraphit. Bei Laborversuchen zum Dekontaminieren von radioaktivem Graphit gelang es, die Proben weitgehend von Spalt- und Aktivierungsprodukten zu befreien. Möglich ist dies dank chemischer Reagenzien, die mit den betreffenden Radionukliden flüchtige oder lösliche Verbindungen bilden, ohne die Graphitmatrix anzugreifen.

Zur zerstörungsfreien Charakterisierung radioaktiver Abfälle erarbeiten Helmholtz-Forscher ein Verfahren, das auf der sogenannten Prompt-Gamma-Neutronen-Aktivierungs-Analyse (PGNAA) basiert. Das System besteht aus einem Neutronengenerator zur Neutronenbestrahlung des Messobjektes, einem Germanium-Detektor zum Nachweis der aus dem Messobjekt emittierten Prompt-Gammastrahlung und einer Graphitmesskammer als Neutronenreflektor und -absorber.



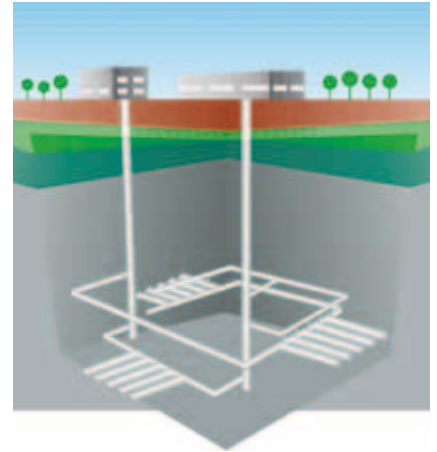
## Reduzierung der Radiotoxizität

Arbeiten zur Reduzierung der Radiotoxizität umfassen experimentelle und theoretische Untersuchungen zu Partitioning und Transmutation (P&T). Bei dieser Strategie geht es darum, langlebige Radionuklide aus radioaktiven Abfällen abzutrennen (Partitioning) und in so genannten beschleunigergetriebenen Transmutationsanlagen zu kurzlebigen Radionukliden oder stabilen Elementen umzuwandeln (Transmutation). Wenn es gelingt, die Langzeitradiotoxizität der hochradioaktiven Abfälle um bis zu drei Größenordnungen zu verringern, könnte sich mit der Strahlungsdauer auch die Einlagerungszeit in ein Endlager von geologischen auf historische Zeiträume von weniger als tausend Jahren verkürzen.

## Sicherheit von Endlagern

Die Endlagerung aller radioaktiven Abfälle ist in tiefen geologischen Formationen vorgesehen. Ziel ist, die Abfälle sicher einzuschließen und dauerhaft von der Biosphäre zu isolieren. Forscher der Helmholtz-Gemeinschaft erarbeiten die Grundlagen für einen chemisch und geochemisch fundierten Langzeitsicherheitsnachweis. Im Zentrum der Arbeiten stehen die Actiniden, die das Radiotoxizitätspotenzial hochradioaktiver Abfälle nach dem Abklingen des Großteils der Spaltprodukte über Hunderttausende von Jahren bestimmen, sowie die langlebigen Spaltprodukte. Die Wissenschaftler untersuchen die physikalisch-chemischen Prozesse, die sich in einem Endlager zur effektiven Rückhaltung von Radionukliden nutzen lassen.

Für Voraussagen zur Mobilität von Radionukliden über große Zeiträume ist es erforderlich, die relevanten Prozesse auf molekularer Ebene zu verstehen und thermodynamisch zu bestimmen. Die Arbeiten verbinden grundlegende Untersuchungen zur Chemie der Actiniden und langlebigen Spaltprodukte mit anwendungsorientierten Untersuchungen unter naturnahen Bedingungen, etwa in Untertagelabors. Neben Salzgestein prüfen die Wissenschaftler in Deutschland vor allem Tonformationen auf ihre Eignung für nukleare Endlager. Außer den rein geochemischen Interaktionen sind auch die vielfältigen Einflüsse von biologischen Systemen zu beachten, beispielsweise die Reaktion von Bakterien oder Pilzen auf die Präsenz von radioaktiven Substanzen.



Schema eines nuklearen Endlagers.

*Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf*

## RADIONUKLIDE

Radionuklide sind instabile Atomarten, deren Kerne radioaktiv zerfallen, wodurch sie sich in weitere instabile oder stabile Nuklide umwandeln. Dabei entsteht ionisierende Strahlung. Jedes Radionuklid hat eine charakteristische physikalische Halbwertszeit, von der es abhängt, wie lang der Stoff radioaktiv ist. Zu den langlebigen Radionukliden gehören die Actiniden – vierzehn Elemente von Thorium ( $Z=90$ ) bis Lawrencium ( $Z=103$ ), die im Periodensystem der Elemente dem Actinium folgen.

Blick von oben in die Pilotverglasungsanlage (links).

*Karlsruher Institut für Technologie*

Radiochemie: Sicheres Arbeiten in der Handschuhbox (rechts).

*Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf*





Testanlage für Hochtemperatur-Wärmespeicher mit Salzmedien (links).

*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*

Im variablen Speicherteststand HOTREG lassen sich unterschiedliche Materialien auf ihre Eigenschaften als Wärmespeicher untersuchen (rechts).

*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*

Speichertechnologie

## ENERGIE AUF ABRUF

Energiespeicher sind zentrale Komponenten für eine nachhaltige Energiewirtschaft und unabdingbar für die breite Nutzung erneuerbarer Energien. Die Helmholtz-Gemeinschaft entwickelt elektrochemische, chemische, elektrische, thermische und mechanische Speicher.

Der Ausbau erneuerbarer Energien bringt große Herausforderungen für das Energiesystem mit sich. Nur ein Teil der regenerativen Quellen ist konstant; andere – wie Sonne und Wind – fluktuieren abhängig von Jahreszeit, Tageszeit und Witterung. Nur wenn es gelingt, diese Fluktuationen aufzufangen, das heißt Angebot und Nachfrage auszugleichen, lassen sich regenerative Energien in großem Umfang nutzen. Speicher spielen dabei eine Schlüsselrolle.

Energiespeicher können auch den Betrieb von Kraftwerken optimieren, vor allem bei dezentralen kleineren Kraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung: Um einen höheren Wirkungsgrad zu erreichen sowie den Erlös aus dem Stromverkauf zu maximieren, ist es häufig sinnvoll, Erzeugung und Nutzung zu entkoppeln. Darüber hinaus erhöhen Energiespeicher die Effizienz in vielen Bereichen; beispielsweise ermöglichen sie zahlreiche Prozessoptimierungen in der Industrie.

### Elektrochemische Energiespeicher

Die Anforderungen an Energiespeicher hängen zum einen von der Energieform, zum anderen vom Einsatzbereich ab. Stationäre Speicher müssen große Energiemengen bereithalten; bei mobilen Speichern kommt es unter anderem auf Ladedauer, Gewicht und Platzbedarf an.

Bei der Entwicklung von elektrochemischen Speichern kann die Helmholtz-Gemeinschaft auf hervorragende Kompetenzen aus der Materialforschung und der Brennstoffzellenentwicklung zurückgreifen. Ein Schwerpunkt liegt auf Lithium-Ionen-Batterien, die sich als stationäre Energiespeicher sowie für mobile Einsätze eignen. Um die Energiedichte und Lebensdauer solcher Batterien zu steigern, arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unter anderem an neuen Materialien für Elektroden. So untersuchen sie mit dreidimensionalen Nanostrukturen versehene keramische Werkstoffe. Elektroden aus derartig strukturierten Materialien können deutlich mehr Lithium aufnehmen als konventionelle Elektroden und speichern daher deutlich mehr Energie. Auch der Aufladevorgang wird beschleunigt.

Kurze Ladedauer, hohe Kapazität und Zyklenfestigkeit, das heißt die Zahl der Auflade-Entlade-Zyklen, die der Speicher übersteht, sind besonders wichtig für Batterien in Elektroautos. Denkbar ist, dass diese Fahrzeuge künftig nicht nur der Fortbewegung dienen, sondern auch zum Lastmanagement der Stromnetze beitragen, indem sie überschüssigen Strom aufnehmen, zwischenspeichern und bei Bedarf zurückspeisen.



### Chemische und elektrische Energiespeicher

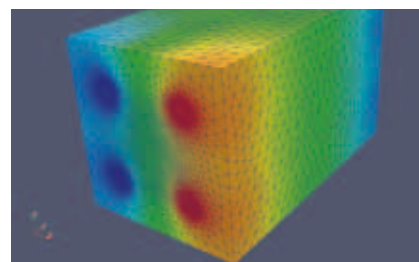
Die Aktivitäten der Helmholtz-Gemeinschaft zu chemischen Energiespeichern sind breit gefächert. Was Wasserstoff betrifft, reichen sie von Prozessen zur Bereitstellung, Speicherung und Nutzung des Wasserstoffs bis hin zu Fragen der Wasserstoffsicherheit. Andere Arbeiten richten sich auf synthetische Kraftstoffe und solar erzeugte Kraftstoffe als Energiespeicher. Als kurzzeitige Speicher für elektrische Energie entwickeln die Forscher neue Doppelschichtkondensatoren (Supercaps). Diese zeichnen sich durch hohe Kapazität, kurze Ladedauer, hohe Zyklenzahl sowie exzellente Wirkungsgrade aus.

### Thermische und mechanische Energiespeicher

Was die thermische Energiespeicherung betrifft, haben die Helmholtz-Forscher unter anderem neue Lösungen zur Speicherung von Niedertemperaturwärme aus Solarkollektoren entwickelt. Derzeit stehen innovative Technologien für Hochtemperaturspeicher in solarthermischen Kraftwerken oder Industrieprozessen sowie Konzepte zur saisonalen Speicherung thermischer Energie in Aquiferen im Fokus. Außerdem entwickeln die Wissenschaftler innovative numerische Methoden und Software zur Simulation von thermodynamischen Prozessen in porösen Medien.

Gemeinsam mit Industriepartnern arbeitet die Helmholtz-Gemeinschaft an einem neuen Druckluftspeicher für den Netzausgleich: Bei Stromüberschuss wird Luft in elektrischen Kompressoren verdichtet und in unterirdische Salzkavernen geleitet; bei Strombedarf wird der Kavernenspeicher entladen und für den Turbinenbetrieb genutzt. Dieser sogenannte adiabate Druckluftspeicher arbeitet deutlich effizienter als herkömmliche Anlagen, indem er die bei der Beladung entstehende Verdichtungswärme zwischenspeichert und nutzt, um die Druckluft vor der Entladung in der Turbine auf hohe Temperaturen zu erhitzen.

Auf den verschiedenen Gebieten der Energiespeicherung forschen das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), das Forschungszentrum Jülich, das Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ in Leipzig, das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ in Potsdam, das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP).



Simulation der Wasserdruckverteilung in einem Feststoffspeicher.

*Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung*

### ENERGIESPEICHER

Speicher halten Energie für eine spätere Nutzung bereit. Sie lassen sich nach der Energieform einteilen. Einige Beispiele:

- elektrochemisch: galvanische Zelle (Batterie, Akkumulator)
- chemisch: Wasserstoff, synthetische Kraftstoffe
- elektrisch: Kondensator, supraleitender magnetischer Energiespeicher
- thermisch: Wärmespeicher, Fernwärmespeicher
- mechanisch: Schwungrad, Feder, Pumpspeicherkraftwerk, Druckluftspeicher

Die Energieform beim Aufladen und Entladen kann von der gespeicherten Energieform abweichen. So wird einem Akkumulator beim Aufladen elektrische Energie zugeführt und in chemische Energie umgewandelt; diese wird in elektrische Energie zurückgewandelt, wenn ein Verbraucher angeschlossen ist.

## STROM STATT SPRIT

Elektrisch angetriebene Fahrzeuge können dazu beitragen, erneuerbare Energien zu fördern und die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu reduzieren. Sie bieten damit die Chance, motorisierte individuelle Mobilität auch bei steigender Nachfrage zu erhalten. Die Helmholtz-Gemeinschaft arbeitet an Batterien, Brennstoffzellen und der Bereitstellung von Wasserstoff für Elektroautos.

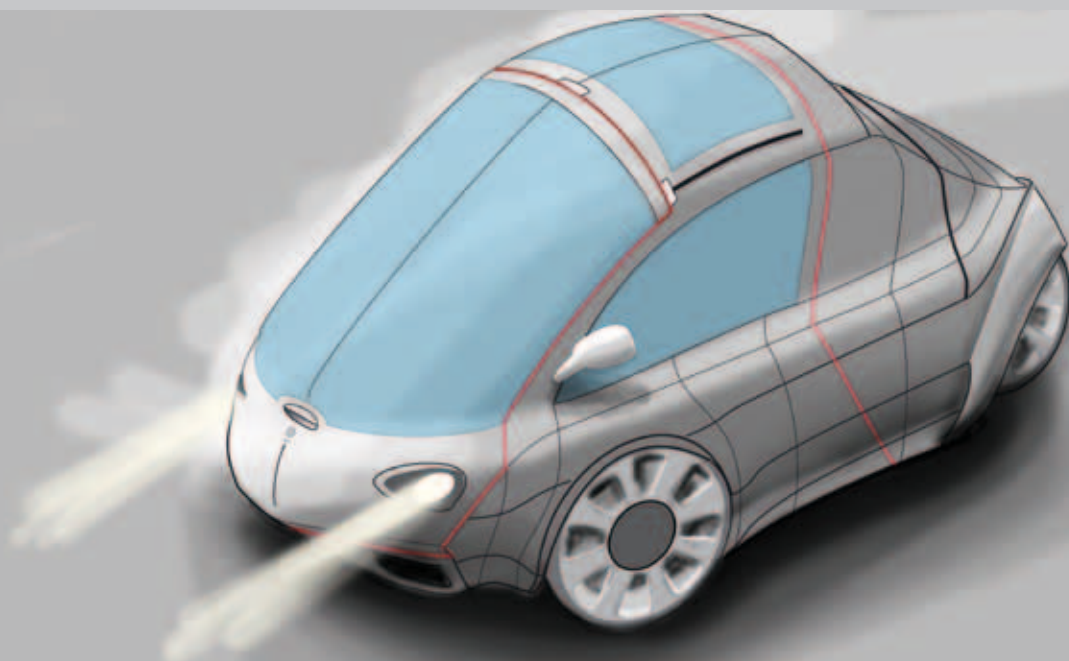
Elektrofahrzeuge können ganz verschiedene Ausgangsenergiequellen nutzen, auch und besonders erneuerbare Energien. Lastschwankungen im Stromnetz lassen sich durch Integration der Fahrzeuge als mobile Energiespeicher ausgleichen. Diesen Vorteilen stehen derzeit noch die relativ hohen Kosten, die begrenzte Reichweite und der für den Aufbau entsprechender Infrastrukturen erforderliche Aufwand gegenüber. Wie weit sich die Elektromobilität durchsetzen wird, hängt wesentlich von der Weiterentwicklung der Energiespeicher ab. Dabei kommt es auf Ladedauer, Kapazität, Gewicht, Zuverlässigkeit, Lebensdauer und nicht zuletzt auf die Kosten an.

Neben der Verbesserung der Batterien stehen Forschung und Entwicklung vor den Aufgaben, Antriebe zu optimieren, Ladestationen und Lademanagementsysteme zu implementieren, die Schnittstellen zwischen Fahrzeug und Stromnetz zu gestalten und Konzepte für die Abrechnung zu entwickeln. Dabei ist die gesamte Kette der Energieversorgung von der Umwandlung über Speicherung und Verteilung bis zur Endanwendung zu betrachten. Überdies geht es darum, Elektroautos zweckoptimiert zu konzipieren und in das Umfeld konventioneller Verkehrsmittel zu integrieren.

Auf die Elektromobilität bezogene Arbeiten in der Helmholtz-Gemeinschaft befassen sich vor allem mit der Energiebereitstellung unter den Aspekten Umwandlung, Speicherung und Sicherheit, das heißt mit Brennstoffzellen, Batterien und der Bereitstellung von Wasserstoff. Dafür stehen verschiedene Prüfstände, Laboratorien und Technika bereit. Um Möglichkeiten und Auswirkungen der Elektromobilität ganzheitlich zu erfassen, verfolgt die Helmholtz-Gemeinschaft auch systemanalytische Ansätze. Es gilt, Technologien, Konzepte und Management verkehrsträgerübergreifend zu betrachten und zu bewerten.

### Brennstoffzellen mit längerer Lebensdauer

Der Entwicklung von Brennstoffzellen profitiert von umfangreichem Know-how zur Elektroden- und Elektrolyt-Entwicklung, zur Diagnostik während des Betriebs und zur Integration in mobile Systeme. Ein Schwerpunkt liegt auf der Untersuchung von Alterungsvorgängen, die sich als allmähliches Nachlassen der Leistung auswirken. Das Verständnis dieser Degradationsmechanismen erlaubt es, Konzepte,



Strukturen und Komponenten gezielt zu verbessern und die Lebensdauer der Brennstoffzellen zu verlängern. Ergänzend arbeiten die Helmholtz-Forscherinnen und -Forscher an der On-board-Erzeugung von Wasserstoff aus marktgängigen Kraftstoffen, um die Bordstromversorgung in Fahrzeugen, die auch künftig auf konventionelle, flüssige Kraftstoffe angewiesen sein werden, mit Brennstoffzellen effizienter und sauberer zu gestalten.

Zum Erzeugen von Wasserstoff konzipieren Helmholtz-Forscher thermochemische Kreisprozesse, in denen Wasserdampf mithilfe von konzentrierter Solarstrahlung gespalten wird. Eine weitere Möglichkeit, Wasserstoff bereitzustellen, ist das Reformieren von Mitteldestillaten zu einem wasserstoffreichen Gasgemisch. Auch die Speicherung von Wasserstoff ist Gegenstand der Forschung, wobei Fragen der Sicherheit eine große Rolle spielen.

### Neue Generation von Batterien

Kompetenzen aus der Elektrochemie von Brennstoffzellen lassen sich auch bei der Entwicklung von Batterien der nächsten Generation einsetzen. An den vom Bundesforschungsministerium geförderten Elektrochemie-Kompetenzverbänden Nord und Süd, in denen Universitäten und Forschungseinrichtungen mitarbeiten, ist die Helmholtz-Gemeinschaft umfassend beteiligt. Ziel ist, leistungsfähige, sichere und kostengünstige Batterien beispielsweise auf Lithiumbasis zu entwickeln, dabei Ladezeiten zu verkürzen sowie Speicherdichten und Lebensdauer zu verbessern. Weitere Themen sind neue Konzepte für den Hybridbetrieb von Brennstoffzellen und Batterie sowie Doppelschichtkondensatoren (Supercaps), die sich schnell laden lassen und kurzfristig hohe Leistungen bereitstellen.

Die Projekte der Helmholtz-Gemeinschaft zur Elektromobilität sind am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), am Forschungszentrum Jülich und am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) angesiedelt.

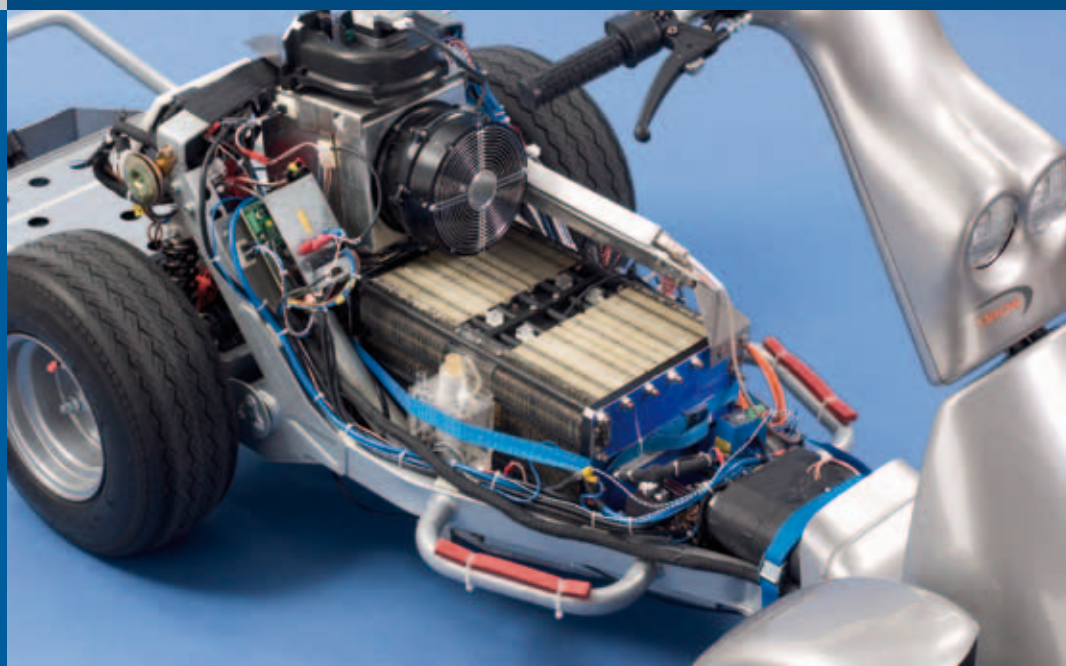
### ELEKTROAUTO

Im motorisierten Individualverkehr bilden elektrisch betriebene Automobile eine Alternative zu diesel- oder benzinbetriebenen Fahrzeugen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, den Elektroantrieb mit Energie zu versorgen. Die gängigsten sind aufladbare Akkumulatoren sowie Brennstoffzellen, welche die elektrische Energie aus einem chemischen Energieträger wie Wasserstoff oder Methanol erzeugen. Hybridelektrofahrzeuge werden von mindestens einem Elektromotor und einem weiteren Energiewandler angetrieben.

Elektroautos können auch als mobile Energiespeicher dienen: Die Idee ist, die Fahrzeuge in ein intelligentes Stromnetz zu integrieren, damit sie die gerade nicht benötigte Energie aufnehmen, zwischenspeichern und bei Bedarf zurückspeisen. So gleicht Elektromobilität Lastschwankungen aus und fördert den Einsatz von Energie aus fluktuierenden regenerativen Quellen wie Sonne und Wind.

Modulares Fahrzeugkonzept als Basis zukunftsfähiger Individualmobilität (links).  
*Karlsruher Institut für Technologie*

Im Prototyp JuMOVE treibt allein die Brennstoffzelle den Elektromotor an (rechts).  
*Forschungszentrum Jülich*





Forschen am Energiemix der Zukunft (links).  
*Karlsruher Institut für Technologie*

Nächtliches Lichternetz über Europa (rechts).  
*NASA*

Technologie, Innovation und Gesellschaft

## BLICK FÜRS GANZE

Wie kann der Energiemix der Zukunft aussehen? Welche neuen Technologien werden sich auf der Angebots- und auf der Nachfrageseite langfristig durchsetzen – und warum? Was erwartet die Gesellschaft von der Forschung? Diesen Fragen widmet sich die **Energiesystemanalyse**.

Wohin sich das Energiesystem entwickeln wird, hängt nicht nur von Energieforschung und -technologien ab, sondern auch von Schlüssel-disziplinen wie Materialforschung und Nanowissenschaft sowie von externen Faktoren wie beispielsweise dem demographischen Wandel sowie der Nachfrage und Akzeptanz in Wirtschaft und Gesellschaft. Um ein ganzheitliches Bild zu gewinnen, untersuchen Helmholtz-Forscherinnen und -Forscher die gesamte Kette der Energieprozesse von der Erschließung und Umwandlung über Speicherung und Verteilung bis hin zur Endanwendung und erfassen die ökologischen, ökonomischen, politischen, sozialen und ethischen Aspekte neuer Technologien.

Diese Arbeiten im Programm „Technologie, Innovation und Gesellschaft“ der Helmholtz-Gemeinschaft zielen darauf, Einzeltechniken und Energiesysteme unter dem Leitbild der nachhaltigen Entwicklung zu bewerten, Innovationsstrategien zu entwickeln, zur gesellschaftlichen Meinungsbildung beizutragen sowie Entscheidungen in Politik und Wirtschaft wissenschaftlich fundiert zu unterstützen. Die Projekte sind angesiedelt am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ in Leipzig, am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und am Forschungszentrum Jülich.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Helmholtz-Gemeinschaft befassen sich intensiv mit den sogenannten Energiezukünften – Prognosen, Szenarien, Visionen und Strategien in Bezug auf das Energiesystem von morgen. Zentrale Fragen sind, wie solche Zukünfte zustande kommen und wie sie Entscheidungen beeinflussen. Die Forscher ermitteln die erkenntnistheoretischen Grundlagen von Aussagen über die Zukunft, um schließlich Zukünfte nach dem Konzept der nachhaltigen Entwicklung zu bewerten. Ziel ist, gesellschaftliche Entscheidungs- und Gestaltungsprozesse transparenter zu machen. Bei diesen Forschungen arbeiten Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaftler interdisziplinär mit Philosophen, Sozial- und Politikwissenschaftlern zusammen.

### Systemanalytische Arbeiten

Systemanalytische Arbeiten zum Thema Energie konzentrieren sich derzeit auf Biomasse, Mikroalgen, elektrochemische Energiespeicher, Kohlenstoffmanagement, Querschnitts- und Effizienztechnologien, hocheffiziente fossile Kraftwerke und CO<sub>2</sub>-Abscheidung, nukleare Entsorgung sowie die Integration erneuerbarer Energien in die Stromversorgung. So untersuchen die Wissenschaftler Technologien zur





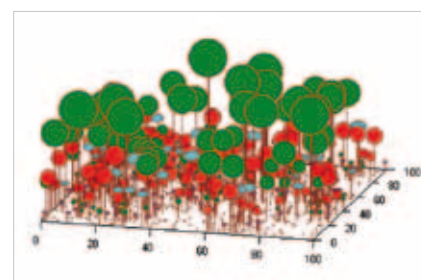
Bereitstellung von Kraftstoffen aus Biomasse und vergleichen sie mit konkurrierenden Verfahren, etwa für fossile Energieträger.

Mikroalgen gelten als vielversprechende künftige Biomasseproduzenten: Sie stellen keine Ansprüche an die Bodenqualität, können kontinuierlich geerntet werden und weisen hohe Öl- und Proteinerträge auf. Die für ihr Wachstum erforderlichen Nährstoffe lassen sich teilweise aus Sekundärquellen beziehen, etwa aus Abwässern oder Abgasen von Kraftwerken. Helmholtz-Forscher analysieren verschiedene Methoden, aus und mit Mikroalgen Energie bereitzustellen, und erarbeiten Richtlinien für nachhaltige Prozessketten und Produkte auf Mikroalgenbasis.

Arbeiten zur elektrochemischen Energiespeicherung richten sich auf den jeweiligen Lebenszyklus von zukünftigen Speichern, um einen umfassenden Blick auf die ökologischen Nachhaltigkeitswirkungen zu erhalten. Zudem untersuchen Helmholtz-Forscher potenzielle Chancen und Risiken von Innovationen in diesem Bereich.

Unter den Querschnitts- und Effizienztechnologien stehen derzeit die thermoelektrische Stromerzeugung sowie die Mikroverfahrenstechnik im Fokus der Forschung. Außerdem befassen die Wissenschaftler sich mit Technologien, welche die Energieeffizienz von Gebäuden und Siedlungen verbessern. Bei fossilen Kraftwerken geht es um Methoden für künftige Entscheidungen, die einerseits die energetische Effizienz, andererseits die Kosten sowie die Umweltauswirkungen neuer Werkstoffe erfassen – die energetisch effizienteste Lösung ist nicht automatisch auch die umweltfreundlichste. In Bezug auf die nukleare Entsorgung untersuchen Helmholtz-Forscher mit sozialwissenschaftlichen Verfahren gesellschaftliche Auseinandersetzungen und verhandlungsorientierte Formen des Konfliktmanagements, um Beiträge zu einer konstruktiven Konfliktbewältigung zu erarbeiten.

Wissenschaftler der Helmholtz-Gemeinschaft behandeln auch die kostenoptimale Integration großer Anteile erneuerbarer Energien in eine zukünftige Stromversorgung. Dabei berücksichtigen sie einen Verbund von solarthermischen Kraftwerken im Mittelmeerraum, Windkraft in der Nordsee und Pumpspeicher in Norwegen. Die Ergebnisse dieser Analyse nutzen sie, um für die mittel- und langfristige Entwicklung des gesamten deutschen Energiesystems Leitszenarien zu erstellen, aus denen dann aktuelle Handlungsempfehlungen für die Bundesregierung abgeleitet werden.



Simulation von Biomasse in einem artenreichen Waldsystem.

*Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung*

## ENERGIESYSTEMANALYTISCHE MODELLE

Die Analyse von Energiesystemen und ihrer Wechselwirkungen mit technischen, ökologischen, politischen, sozialen und ökonomischen Entwicklungen bedient sich zum Teil computerbasierter Modelle. Diese bilden Relationen zwischen technischen, ökonomischen und/oder umweltrelevanten Größen ab, die für die jeweilige Forschungsfrage relevant sind. Zu unterscheiden sind Simulationsmodelle, die mögliche Entwicklungen in bestimmten Szenarien zeigen, und szenarienbasierte Optimierungsmodelle, die den (kosten-)günstigsten Weg zu vorgegebenen Zielen unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen ermitteln. Beide Verfahren führen zu spezifischen Energiezukünften, die eine große Rolle in der wissenschaftlichen, politischen und öffentlichen Debatte über die Zukunft der Energieversorgung spielen.

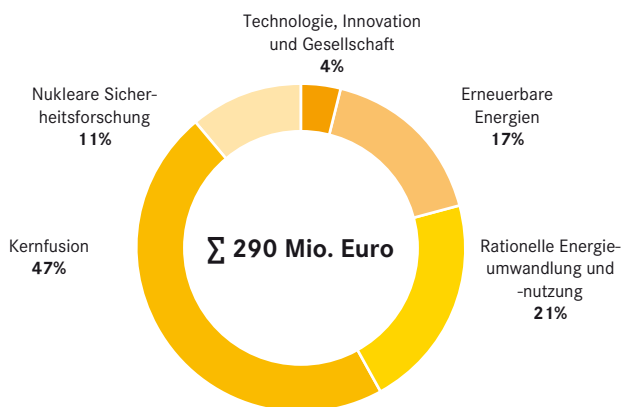
# DER HELMHOLTZ-FORSCHUNGSBEREICH ENERGIE

## Daten und Fakten

Fünf strategisch ausgerichtete Forschungsprogramme (Förderperiode 2010-2014)

- Erneuerbare Energien
- Rationelle Energieumwandlung und Energienutzung
- Kernfusion
- Nukleare Sicherheitsforschung
- Technologie, Innovation und Gesellschaft (gemeinsam mit dem Forschungsbereich Schlüsseltechnologien)

**Die Struktur des Forschungsbereichs Energie**  
**Senatsempfehlung für die Grundfinanzierung 2010:**  
**290 Mio. Euro**  
(inkl. der anteiligen programmungebundenen Forschung)



Grundfinanzierte Kosten	290
Erneuerbare Energien	50
Rationelle Energieumwandlung und -nutzung	61
Kernfusion	137
Nukleare Sicherheitsforschung	32
Technologie, Innovation und Gesellschaft	10

Gesamtpersonal, einschließlich Infrastrukturpersonal, entsprechend 3807 FTE (Full-time equivalents/Vollzeitäquivalente)

Wissenschaftler entsprechend 1106 FTE, davon 773 grundfinanziert, 333 drittmittelfinanziert

424 betreute Doktoranden

1061 Publikationen in ISI-zitierten Fachzeitschriften (Institute for Scientific Information)

77 erteilte Patente

819 Kooperationen mit der Wissenschaft

540 Kooperationen mit der Wirtschaft

(Stand 2009, falls nicht anders angegeben)

## Beteiligte Zentren und Ansprechpartner

### Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)

Dorothee Bürkle  
Telefon +49 2203 601-3492  
dorothee.buerkle@dlr.de

### Forschungszentrum Jülich

Dr. Anne Rother  
Telefon +49 2461 61-4661  
a.rother@fz-juelich.de

### Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB)

Hannes Schlender  
Telefon +49 30 8062-42414  
hannes.schlender@helmholtz-berlin.de

### Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)

(ab 01.01.2011)  
Dr. Christine Bohnet  
Telefon +49 351 260-2450  
c.bohnet@fzd.de

### Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ

Doris Böhme  
Telefon +49 341 235-1269  
doris.boehme@ufz.de

### Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungs-Zentrum GFZ

Franz Ossing  
Telefon +49 331 288-1040  
ossing@gfz-potsdam.de

### Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Dr. Joachim Hoffmann  
Telefon +49 7247 82-2860  
joachim.hoffmann@kit.edu

### Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)

Isabella Milch  
Telefon +49 89 3299-2607  
info@ipp.mpg.de

## Bildnachweis

Markus Schön, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Materialforschung III (Titelseite unten links)

Markus Steuer, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Seite 6)

Solarfassade des Verwaltungsgebäudes der Sulfurcell Solartechnik GmbH (Seite 9 oben)

Witt (Seite 9 unten)

André Künzelmann, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (Seite 10)

Norihiro Watanabe und Björn Zehner, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (Seite 13 oben)

R. Weisflog, Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf (Seite 27 unten)

Wenqing Wang und Olaf Kolditz, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (Seite 29 Mitte)

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Produktentwicklung (Seite 30 unten)

## Impressum

### Inhaltlich Verantwortlicher

Prof. Dr. Eberhard Umbach  
Vizepräsident der Helmholtz-Gemeinschaft  
für den Forschungsbereich Energie

### Redaktion

Dr. Isolde Arzberger, Dr. Wolfgang Breh, Dr. Vinzenz Brendler,  
Friederike Danneil, Dr. Katharina Eulenburg, Dr. Frank Messner,  
Franz Ossing, Dr. Stephan Saupe, Julia Sieber, Erhard Zeiss

### Texte

Dr. Sibylle Orgeldinger

### Gestaltung

DER PUNKT GmbH, Karlsruhe

### Druck

Karl Elser Druck GmbH, Mühlacker

Copyright © by  
Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren  
Geschäftsstelle Berlin  
Anna-Louisa-Karsch-Straße 2  
10178 Berlin

November 2010

