

# Brains and Tools

- Perspektiven
- Energie
- Erde und Umwelt
- Gesundheit
- Struktur der Materie
- Verkehr und Weltraum
- Schlüsseltechnologien
- Nachwuchs





# Impressum

Jahresheft 2004

**Herausgeber** Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V.

**Redaktion** Dr. Anne Rother, Helmholtz-Gemeinschaft (verantwortlich)  
Antje Schillo, Redaktionsbüro Königswinter (Koordination)  
E-Mail: antje.schillo@t-online.de

**Gestaltung** axeptDESIGN, Berlin  
Internet: www.axeptdesign.de

**Druck** Königsdruck GmbH, Berlin  
  
Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren  
Kommunikation und Medien  
Leitung: Dr. Hinrich Thölken  
Postfach 20 14 48, 53144 Bonn  
Ahrstraße 45, 53175 Bonn  
Telefon: (02 28) 3 08 18-21  
Telefax: (02 28) 3 08 18-40  
E-Mail: info@helmholtz.de  
  
Büro Berlin  
im Wissenschaftsforum am Gendarmenmarkt  
Markgrafenstraße 37, 10117 Berlin  
Internet: www.helmholtz.de

ISSN 1431-1348

**Bildnachweise** Titelbild: Prototyp des Plasmagefäßes der Fusionsanlage Wendelstein 7-X in Greifswald  
Foto: Peter Ginter

Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (11, 40, C. Wille/38, H. Bäsemann/39, D. Steinhage/41);  
Deutsches Elektronen-Synchrotron (73, 74, 75, 76, 77, 97, 98); Deutsches Krebsforschungszentrum (51, 52, 100,  
101, 106); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (17, 18, 19, 20, 88/89, 90); Forschungszentrum  
Jülich (26, 28, 29, 30, 31, 32, 33); Forschungszentrum Karlsruhe (95); Gesellschaft für Biotechnologische  
Forschung (Bierstedt 4, 46-71, 59, 60, 61, 63, 65; Gunzer 62; Rohde 64); GeoForschungsZentrum  
Potsdam (42, 43, 44, 45); GKSS-Forschungszentrum Geesthacht (35, 36, 37); GSF-Forschungszentrum für  
Umwelt und Gesundheit (57, 58); Gesellschaft für Schwerionenforschung (78, 80, 81, 82); Hahn-Meitner-Institut  
Berlin (83, 84, 85, 86, 87); Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (22, 23, 24); UFZ-Umweltforschungszentrum  
Leipzig-Halle (46, 47, 48, 49).

Ägyptisches Museum München (83, 85); AKG (69); axept (16/17, 53), Grafiken (93, 94); D. Burton/Wildlife (106);  
CERN (92, 93, 94); creativ collection (3); dpa (68); Peter Ginter (Titel, 21); Dietmar Gust (71); HGF (7, 104);  
Ilja C. Hendel/Visum (54/55); Michael Kneffel (34); Kölner Museum (83); Lechleiter/Camacho, University of  
Texas, San Antonio (103, 105); Medienzentrum des Universitätsklinikums Heidelberg (13, 14, 15); Robert  
Michael/ddp (12); Robin Moyer/Das Fotoarchiv (9); Leitgib/mediacolors (5); Thomas Oberländer,  
Helios-Klinikum Berlin (5); PhotoDisc (3-6, 8-12, 66-68, 91); Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule  
Aachen (26); RWE SCHOTT Solar (25); Manfred Scharnberg/Visum (47); Sabine Sauer/images.de (67);  
Marc Steinmetz/Visum/plus 49 (15 oben, 95); Wissenschaft im Dialog. Kinder auf der MS Chemie (79).

# Inhalt

## Vorwort des Präsidenten der Helmholtz-Gemeinschaft

Seite

7

## Perspektiven

Durch engere Kooperation einen Qualitätssprung erreichen – das ist das Ziel neuer Modelle der Zusammenarbeit in der Helmholtz-Forschung. Wie solche Modelle funktionieren, zeigen Beispiele aus der Umwelt- und der Gesundheitsforschung.



AWI | DLR | GFZ | GKSS | **Dem „System Erde“ auf der Spur**  
Vernetzte Wissenschaft schafft neue Perspektiven für die Beobachtung der Erde.

9

DKFZ und Universitätsklinikum Heidelberg | **Geballte Kompetenz im Kampf gegen den Krebs**  
Das Heidelberger Comprehensive Cancer Center versammelt Forschung und Klinik unter einem Dach – so entsteht eine zentrale Anlaufstelle für Tumorpatienten.

13

## Energie

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bei Helmholtz suchen Lösungen für die Energieversorgung der Zukunft. Energiegewinnung sauberer zu machen und zusätzliche Energiequellen zu erschließen, dies sind wichtige Themen ihrer Forschung.



DLR | **Was passiert im Feuer?**  
Mit modernsten Methoden wollen Forscher das uralte Rätsel Verbrennung lösen. Ihre Vision dabei: Energie gewinnen ohne Schadstoffe.

Seite

16

IPP | **Treffpunkt Garching**  
Die Fusionsanlage ASDEX Upgrade – ein europäisches Forschungsinstrument.

21

FZJ | **Das Ziel: Solarstrom zum kleinen Preis**  
Dünnschicht-Solarzellen aus Silizium arbeiten immer effizienter.

25

## Erde und Umwelt

Ob auf dem Acker oder im All, ob im Labor, am Rechner oder im Eis – Forscherinnen und Forscher bei Helmholtz nutzen modernste Geräte und Methoden, um Erde und Umwelt besser zu verstehen.

### FZJ | **Den Dialog zwischen Pflanzen und Boden belauschen**

In Jülich soll ein Kompetenzzentrum für nicht-invasive Methoden der Umweltforschung entstehen.

30

### GKSS | **Datenflut erwünscht**

Mit Hilfe einer Kombination von Messung und Modellierung wollen Forscher Einflüsse auf das Ökosystem Wattenmeer besser und früher erkennen.

34

### AWI | **Zu Land und aus der Luft – Umweltforschung in der Arktis**

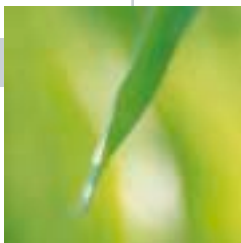
Die Werkzeuge ändern sich – die globale Bedeutung der Arktis für die Umweltforschung bleibt.

38

### GFZ | **Unsichtbar und einflussreich – der Geodynamo**

Forscher erkunden das Magnetfeld der Erde. Die Phänomene, auf die sie dabei stoßen, reichen vom Wetter im All bis zu den Strömungen der Meere.

42



## Gesundheit

Von Mausmodell bis Echtzeitvisualisierung: Helmholtz-Gesundheitsforscher setzen moderne Werkzeuge und Methoden ein. Besser zu begreifen, wie Krankheiten entstehen, um neue Ansätze für Prävention, Diagnose und Therapie zu entwickeln – das ist ihr Ziel.

### UFZ | **Luft unterm Mikroskop**

Leipziger Wissenschaftler untersuchen, wie winzigste Partikel zu feindlichen Invasoren in der Lunge werden.

46

### DKFZ | **Einfach präziser!**

Die virtuelle Patientenleber hilft Chirurgen bei der Operation.

50

### GSF | **Sprich mit mir**

Virtuelle Realität: So heißt der Schlüssel zu einer besseren Kommunikation zwischen Mediziner und Computer.

53

### GBF | **Weltweit dringend gesucht: Neue Impfstoffe**

Um Erkenntnisse erfolgreich umzusetzen, müssen Forschung und Pharmaindustrie enger zusammenarbeiten. Die Brückenbauer sitzen in Braunschweig.

59

### GBF | **Von Mäusen und Menschen**

Die genetische Veranlagung für Infektionen wird an Mäusen aufgeklärt.

61

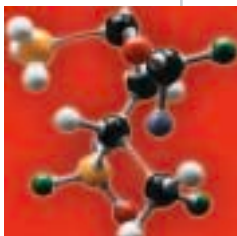
### MDC | **Wie weit soll die Selbstbestimmung reichen?**

Ethische und gesellschaftliche Herausforderungen der Genomforschung.

66



## Struktur der Materie



Was die Welt im Innersten zusammenhält, das erkunden Forscherinnen und Forscher bei Helmholtz. Für ihre Experimente nutzen Physiker modernste Großgeräte und leistungsfähige Anlagen. Davon profitieren auch andere Disziplinen, zum Beispiel die Kulturwissenschaften.

### DESY | **Lichtschnelle Elektronen im Gleichtakt**

Am Photoinjektor-Teststand PITZ entstehen die Elektronenquellen der Zukunft.

### GSI | **Grenzwertig!**

Forscher in Darmstadt untersuchen einzelne Atome superschwerer Elemente. Ihre Arbeit könnte die Chemie auf Neuland jenseits des Periodensystems führen.

### HMI | **Das geht der Kunst unter die Haut**

Mit hochenergetischen Protonenstrahlen enträtseln Wissenschaftler Geheimnisse alter Werke.

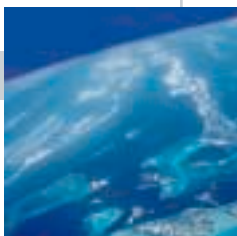
Seite

72

78

83

## Verkehr und Weltraum



Luftfahrtforschung bei Helmholtz – das ist Präzisionsarbeit vom Feinsten.

### DLR | **Zentimeterarbeit auf die Sekunde**

Wenn ein Flugzeug mit der Nase steil in den Himmel zeigend landet, ... stecken Hightech und Kreativität dahinter. Auch Software aus Braunschweig spielte bei der Premiere eine wichtige Rolle.

Seite

88

## Schlüsseltechnologien



Schlüsseltechnologie-Forschung liefert Problemlösungen für verschiedene Disziplinen. Beispiel Elementarteilchenphysik. Ein neues weltweites Computernetzwerk soll helfen, die Datenflut aus modernsten Teilchenbeschleunigern auszuwerten.

### FZK | **Gigantisches Gitter über den Globus**

Grid-Computing ist das Modell für den Datenaustausch der Zukunft.

Seite

91

## Nachwuchs

Forschung braucht junge Talente. Begabte junge Wissenschaftler für die Forschung gewinnen, kreative Köpfe fördern und den Besten die besten Chancen bieten: Drei Ansätze aus Helmholtz-Zentren zeigen, wie das gelingen kann.

### DESY | **Physik praktisch**

In der Internationalen Sommerschule gewinnen Studierende Einblick in die Arbeit der Forscher.

### MDC | **Früher flügge**

Mit Helmholtz-Stipendien für Nachwuchsforscher werden in Berlin Postdoktoranden gefördert.

### DKFZ | **Dickere Bretter bohren**

Ein Tenure Track-Modell in Heidelberg bietet jungen Forscherinnen und Forschern die Chance, schon früh in der Karriere mit Perspektive zu arbeiten.

**Auszeichnungen** für den Nachwuchs.

Seite

96

98

99

101

## Exzellent ...

### **Die Muster im Lebendigen lesen**

Erwin-Schrödinger-Preis für interdisziplinäre Forschung.

**Wissenschaftliche Auszeichnungen** für Helmholtz-Forschung.

Seite

103

106

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c + (\rho_{leak} + \rho_{chan} \frac{e^{-(1-g)}}{c + \beta_1(1+\beta_0)}) - \gamma_r \rho_{max} \frac{c^2}{k_r^2 + c^2} - \gamma_{in} \frac{c}{k_{in} + c}$$

Buchstaben, Ziffern, Zeichen:  
 Eine partielle Differentialgleichung, aufgeschrieben von Dr. Martin Falcke, Physiker am Hahn-Meitner-Institut in Berlin. Die Gleichung steht im Zentrum eines mathematischen Modells, das beschreibt, wie sich Kalziumsignale in Zellen fortbewegen. Eine wichtige Erkenntnis, denn diese Signale spielen eine große Rolle bei menschlichen Aktionen: Bewegung, Schwitzen, Denken zum Beispiel. Mehr dazu auf Seite 103.

# Vorwort



*Gebt mir einen Hebel, der lang genug, und einen Angelpunkt, der stark genug ist, dann kann ich die Welt mit einer Hand bewegen, hat Archimedes gesagt.*

Solche Hebel und Angelpunkte, das waren für die Wissenschaftler früherer Zeiten zum Beispiel Mikroskope und Teleskope, die fast zeitgleich in der Renaissance auftauchen und mit denen die Naturwissenschaft im modernen Sinne beginnt. Hebel und Angelpunkte heutiger Naturwissenschaft, Werkzeuge moderner Forschung, stellen wir Ihnen in diesem Heft vor: Beschleunigeranlagen zum Beispiel, mit denen Physiker kleinste Teilchen auf höchste Energien bringen, um die elementaren Bauteile und Formkräfte unserer Welt zu erkunden. Satelliten, die aus Hunderten Kilometern Höhe ein genaueres Bild des Planeten zeichnen, als es das menschliche Auge aus nächster Nähe je könnte und sogar Kräfte aufspüren, die tief im Innern der Erde wirken. Versuchsanlagen, die Experimente bei extremen Temperaturen und Druckverhältnissen erlauben, Flugzeuge und Schiffe, die Wüsten und Polarregionen genau vermessen, immense Rechnerkapazitäten, die in den Dimensionen von Heim-PCs nicht mehr zu beschreiben sind ... und vieles mehr.

Tools sind aber nur die eine Hälfte der Forschung, die andere sind immer die Brains. Ohne sie geht gar nichts: Forscherinnen und Forscher, die aus Geräten intelligente Werkzeuge formen, zeichnen unser Bild von der Welt, erweitern unseren Horizont des Verstehens und verändern unser Leben. Menschen machen die Helmholtz-Forschung: Sie entwickeln Experimente, Messverfahren und Methoden, entwerfen Modelle und nutzen Simulationen – um zu begreifen, was die Welt im Innersten zusammenhält, um Lebensprozesse und Ökosysteme zu verstehen und um technischen Fortschritt zu erzielen. Menschen sind es letztlich, die bessere Flug-

zeuge bauen, denen es gelingt, immer präziser und früher vor Naturkatastrophen zu warnen, die neue Impfstoffe entwickeln oder den Computereinsatz in der Medizin revolutionieren. Auch von ihnen erzählt dieses Heft.

Auftrag der Helmholtz-Gemeinschaft ist strategisch-programmatisch ausgerichtete Spitzenforschung. Um diesen hohen Anspruch einzulösen, setzt die Gemeinschaft auf Brains und Tools. Unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler arbeiten mit teilweise weltweit einzigartigem Großgerät. Velerorts sind Geräte und Infrastruktur der Helmholtz-Forschungszentren Kristallisationspunkte für nationale und internationale Forschungs Kooperationen und ein Motor für die Entwicklung von Hochtechnologie.

Werkzeuge, Köpfe und Orte der Helmholtz-Forschung: In unserem Jahresheft lernen Sie einige kennen.

Ich wünsche Ihnen fesselnde und unterhaltende Lektüre.

**Prof. Dr. Walter Kröll**

Präsident der Helmholtz-Gemeinschaft



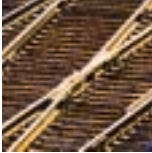
## Gemeinsam mehr erreichen



Neue Perspektiven für die Erforschung komplexer Systeme durch mehr Kooperation und Vernetzung – wie funktioniert das? Zum Beispiel so wie in Heidelberg. Hier entsteht ein Comprehensive Cancer Center. Die Kooperation des Deutschen Krebsforschungszentrums mit dem Universitätsklinikum Heidelberg tritt mit dem Ziel an, Patienten besser zu betreuen und zugleich wichtige Erkenntnisse für die Krebsforschung zu gewinnen. Ein anderes Beispiel, diesmal aus dem Helmholtz-Forschungsbereich Erde und Umwelt, ist das Forschungsnetzwerk Integriertes Erdbeobachtungssystem. Hier verbinden gleich vier Helmholtz-Zentren ihre Kompetenzen und Ressourcen, um eine neue Qualität der wissenschaftlichen Erdbeobachtung zu erreichen.

Die beiden Projekte entstammen zwar verschiedenen Gebieten der Forschung bei Helmholtz, hier Krebsforschung, dort Umweltmonitoring. Beide Modelle unterscheiden sich auch deutlich in der organisatorischen Konstruktion. Es verbindet sie jedoch die Überzeugung, dass engere Zusammenarbeit – ob über die Grenzen von Disziplinen, von Instituten oder Organisationen hinweg – Forscherinnen und Forscher schneller zu besseren Ergebnissen führt. Neue Modelle der Kooperation und Vernetzung entstehen in der Helmholtz-Gemeinschaft daher nicht zufällig: Sie sind Strategie. Denn nur wer gemeinsam mit starken Partnern die großen Fragen von Wissenschaft, Gesellschaft und Wirtschaft anpackt, dessen ist sich die Gemeinschaft sicher, kann zu ihrer Lösung wesentlich beitragen. ■



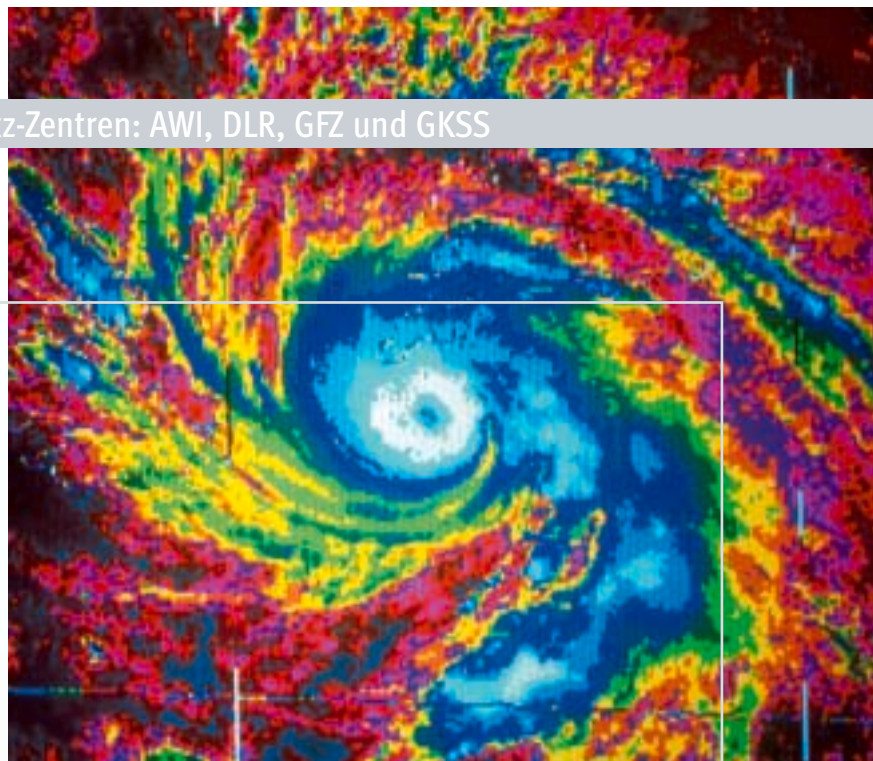


# Dem „System Erde“ auf der Spur

Vernetzte Wissenschaft schafft neue Perspektiven für die Beobachtung der Erde.

Ein gemeinsamer Beitrag aus vier Helmholtz-Zentren: AWI, DLR, GFZ und GKSS

Bei Katastrophen stehen die Menschen zusammen. Sie reichen sich die Sandsäcke von Hand zu Hand, als im Sommer 2002 Hochwasser die Dörfer und Städte an der Elbe bedroht. Helmholtz-Wissenschaftler unterstützten damals das Management der Schutz- und Hilfsmaßnahmen im Katastrophengebiet. Sie stellten Messdaten und Bilder mit wichtigen Informationen für die Bewältigung der Krise bereit. Von verschiedenen Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft kamen Satellitenaufnahmen, Situationsanalysen und aktuelle Abfluss- und Schadstoffwerte. Die Vernetzung verschiedener wissenschaftlicher Informationen ist besonders wertvoll, um den Ablauf solcher Katastrophen zu verstehen und wirksam gegensteuern zu können. Die Helmholtz-Gemeinschaft nahm diese Erfahrung zum Anlass für ein zukunftsweisendes Modell: Sie hat ihre Kapazitäten im Forschungsnetzwerk „Integriertes Erdbeobachtungssystem“ (Helmholtz-EOS) gebündelt.



*Aus sicherer Entfernung überwiegt die Faszination:  
Die Infrarot-Satelliten-Aufnahme eines Taifuns zeigt deutlich,  
wie die unterschiedlich warmen Luftschichten sich verwirbeln.*

Die Erde ist ein komplexes System, in dem zum Beispiel die Sphären von Land und Wasser, Klima und Leben dynamisch aufeinander wirken. Für die Erkundung dieses Systems verfügen die Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft über herausragende wissenschaftliche Kompetenz und exzellente Großgeräte. Satelliten kreisen im Orbit, Forschungsschiffe stoßen bis in die Polarregionen vor, computerbasierte Modelle machen die

## Integrated Earth Observing System



Das Forschungsnetzwerk „Integrated Earth Observing System“ (Helmholtz-EOS) bearbeitet drei große Forschungsthemen:

- Eis und Ozean  
Sprecher: Prof. Dr. Peter Lemke, AWI
- Prozesse der Landoberfläche  
Sprecher: Prof. Dr. Stefan Dech, DLR
- Katastrophenmanagement  
Sprecher: Dr. Bruno Merz, GFZ

Prof. Dr. Jörn Thiede (AWI), Prof. Dr. Wolfgang Kaysser (GKSS), Prof. Dr. Achim Bachem (DLR) und Prof. Dr. Rolf Emmermann (GFZ) als Vorstände der vier beteiligten Zentren bilden zusammen mit den Sprechern der drei Forschungsthemen einen Lenkungsausschuss, der das Netzwerk leitet. Helmholtz-EOS finanziert sich aus den programmatischen Ressourcen der angeschlossenen Zentren. Die Koordination des Netzwerks liegt beim DLR.

In einem „Helmholtz PhD-Programm“ sollen zwölf Doktorandenstellen ausgeschrieben werden, finanziert je zur Hälfte durch Helmholtz-EOS und durch Mittel aus dem Impuls- und Vernetzungsfonds des Helmholtz-Präsidenten. Außerdem werden an den Standorten der beteiligten Zentren „Summer Schools“ entstehen.

### Weitere Informationen vermittelt:

Dr. Wolfgang Mett  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
in der Helmholtz Gemeinschaft  
Linder Höhe, 51147 Köln  
Tel.: 02203-601-4105  
E-Mail: wolfgang.mett@dlr.de

Vorhersage künftiger Entwicklungen möglich. Dem EOS-Forschungsnetzwerk gehören das Alfred-Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI), das GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) sowie das Geo-Forschungszentrum Potsdam (GFZ) an. Gemeinsam arbeiten sie an drei großen Forschungsthemen: Eis und Ozean, Prozesse der Landoberfläche sowie Katastrophenmanagement.

### Wie viel Eis ist wirklich da?

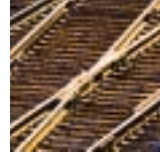
Die Eisbären magern ab. Im November 2003 ging die Meldung durch die Presse, dass die arktischen Raubtiere nicht mehr genug geschlossenes Meereis für die Robbenjagd vorfinden. Schmilzt das Polareis? Vielen Medien zufolge ist das längst eine ausgemachte Sache. Und der Grund steht für sie auch schon fest: die Klimakatastrophe, verursacht durch Kohlendioxidemissionen.

Eis spielt eine große Rolle für das Klima auf unserem Planeten. Es macht gut zehn Prozent der Erdoberfläche aus, ob auf dem Land, ob auf dem Wasser. Deswegen ist es wichtig zu wissen, ob weltweit sowie im regionalen Rahmen mehr Eis schmilzt, als neues entsteht. Diese so genannte Massenbilanz ist eines der Ziele des Forschungsnetzwerks.

Professor Heinrich Miller geht gern aufs Eis. „Für mich ist das immer wieder spannend, und ich versuche, mir dafür Zeit zu nehmen, so oft es geht“, sagt der Leiter des Instituts für Polar- und Meeresforschung am AWI. Die Arktis, weiß er, ist ein komplexes und variables System. Ausdehnung und Dicke des Eises schwanken. Und wenn – wie im Sommer 2000 – ein Schiff freies Wasser am Nordpol meldet, bleibt Miller gelassen: „Das kommt immer wieder mal vor und ist kein Grund zur Panik.“

Am Südpol beispielsweise ist es selbst im Sommer minus 30 Grad kalt. Wenn die Erde wärmer wird, kann die Luft in der Antarktis mehr Wasserdampf halten. Dann schneit es dort mehr. Und dann wächst das Eis, statt zu schmelzen. Am Nordpol hingegen herrschen im Sommer Temperaturen um Null Grad. Deswegen kann dort selbst eine geringfügige Klimaveränderung dazu führen, dass die Ausdehnung des arktischen Meereises schrumpft.

In ausgewählten Testregionen gehen die Helmholtz-Wissenschaftler jetzt direkt der Massenbilanz des Eises auf den Grund. Sie erkunden, ob durch Niederschläge ebenso viel Eis neu entsteht, wie an den Eiskanten abbricht und



## Perspektiven

*Die "Polarstern" ist das wichtigste Werkzeug der deutschen Polarforschung: Seit 1982 war sie 32-mal auf Expeditionsfahrten in der Arktis und Antarktis unterwegs. Das leistungsfähigste Polarforschungsschiff der Welt, ausgestattet mit neun wissenschaftlichen Labors, ist fast 320 Tage im Jahr auf See. Es kann selbst eineinhalb Meter dickes Eis noch mit einer Geschwindigkeit von etwa fünf Knoten durchfahren.*

als Eisberge ins Meer hinaustreibt. Dazu bohren die Forscher das Eis an – die Bohrkern geben ihnen Auskunft darüber, wie viel Schnee dort in den zurückliegenden 100 Jahren gefallen ist. Sie bestimmen die Geschwindigkeit, mit der das Eis fließt, und seine Dicke an der Abbruchkante zum offenen Meer. Unterstützt werden sie durch Daten aus Messgeräten in Flugzeugen und Satelliten. Zum Beispiel wird ein neuartiges Radaraltimeter im Satelliten CryoSat in den kommenden Jahren die Höhe des Festlandeseis sowie die Dicke des Meereiseis messen können.

„Unser Ziel ist es, das ganze Daten-Gemisch zusammenzubringen“, erläutert Miller. „Damit werden wir rechnergestützte Modelle entwickeln, mit denen sich die Massen-Entwicklung des Eises fundiert prognostizieren lässt.“

### Warum werden Trockengebiete zu Wüsten?

Heiß statt eisig ist es in vielen Trockengebieten der Erde, die etwa ein Drittel der Landfläche ausmachen. Aber ganz ähnlich wie die Polarregionen reagieren auch die Trockengebiete sensibel auf Klimaveränderungen und menschliche Eingriffe. Gerade hier leben viele Menschen von bescheidener Land- und Weidewirtschaft unter schwierigsten Bedingungen. „Die Frage, wie in solch anfälligen Lebensräumen auch nachhaltig die natürlichen Ressourcen wie Boden, Wasser und biologische Vielfalt gesichert werden können, ist eine der Forschungsaufgaben, denen wir uns im EOS widmen“, erläutert Professor Stefan Dech, Direktor des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums des DLR. „Durch Fernerkundung aus dem Weltraum können wir etwa beobachten, ob und warum bestimmte Trockenräume zu Wüsten werden und wann Gegenmaßnahmen zu ergreifen sind.“ Oft kommt es beispielsweise vor, dass gerade diese Gebiete landwirtschaftlich oder durch Überweidung zu stark genutzt werden. Die damit verbundene Verödung des Landes ist auf entsprechend verarbeiteten Satellitenbildern zu erkennen. „Eine wirkliche Herausforderung für uns stellt aber auch die Frage der Aufnahme von Kohlenstoff aus der Atmosphäre durch die Vegetation dar. Hier müssen wir Satellitenmessungen und Ökosystemmodelle sinnvoll miteinander verbinden“, erläutert Dech weiter. Dies sei freilich eine höchst schwierige Aufgabe. „Wenn uns dies in der erforderlichen Genauigkeit gelingt, sind wichtige Beiträge in Form un-

abhängiger Daten zur Verifizierung der Kyoto-Beschlüsse zu erwarten.“

Um die Daten aus den unterschiedlichen Sensoren der Satelliten auch praktisch nutzen zu können, sind viele komplizierte Arbeitsschritte nötig. „Für uns besteht ein großer Teil der Arbeit darin, die Daten so aufzubereiten, dass andere Wissenschaftler, Behörden oder Firmen sie für ihre konkreten Zwecke anwenden können“, erläutert Dr. Harald Mehl, ebenfalls vom DLR. Die Wissenschaftler entwickeln mathematische Verfahren für die Aufbereitung der Daten, deren Gültigkeit sie durch Überprüfungen vor Ort feststellen. Mehl: „Wir gehen aber auch ins Gelände, um die Qualität der Algorithmen zu kalibrieren.“ Beispielsweise untersuchen die Forscher die Bodenzusammensetzung – Ton, Sand, Humus – sowie die Dichte und Beschaffenheit der Vegetation.

Mit Hilfe kalibrierter und kontinuierlich überprüfter Satellitendaten definieren die Wissenschaftler Ist-Zustände für ihre Testregionen und entwickeln Modelle, die Prognosen zulassen. „Geht zum Beispiel die Desertifikation weiter? Ist der Prozess gestoppt? Sind Gegenmaßnahmen nötig?“ Mit den Antworten auf solche Fragen, so Dech, „ist es möglich, lokale Entscheidungsträger frühzeitig über Grad und Ausmaß der Gefährdung zu informieren.“

Besonders massive Veränderungen der Natur ruft der Mensch dort hervor, wo Städte wachsen. In Schwellen- und Entwicklungsländern entstehen zum Teil völlig un-

geordnet so genannte Mega-Cities mit Millionen von Einwohnern. Die kombinierten Möglichkeiten der Helmholtz-Zentren erlauben es, die per Satellitenerkundung festgestellte Struktur städtischer Räume beispielsweise mit der Belastung der Atmosphäre durch Emissionen in Beziehung zu setzen. „Unser Ziel ist es, Prozesse und ihre treibenden Faktoren zu erkennen und zu analysieren“, erklärt Mehl. Daraus lassen sich dann wiederum Empfehlungen an die örtlichen Entscheidungsträger ableiten.



*Das Jahrhunderthochwasser im Sommer 2002 hat weite Teile Dresdens überflutet.*

## **Wann steigt das Wasser?**

Solche Empfehlungen spielen für den dritten Forschungsbereich des Netzwerkes Erdbeobachtung eine zentrale Rolle: das Katastrophenmanagement. Denn Vorsorge ist der beste Schutz vor Erdbeben und Vulkanausbrüchen, Waldbränden und Hochwasser. Zum Beispiel beobachten die Helmholtz-Forscher hochwassergefährdete Regionen an Flüssen und Küsten. Sie versuchen, wie Dr. Bruno Merz vom GFZ Potsdam erläutert, „Szenarien durchzurechnen und Wahrscheinlichkeiten zu prognostizieren.“

Ein Ziel der gemeinsamen Arbeit im Helmholtz-Forschungsnetzwerk ist es, Hochwasser früher vorhersagen zu können. Die vereinigte Expertise der beteiligten Helmholtz-Zentren soll beispielsweise in die aktuelle

Diskussion um ein nationales Hochwasservorsorgeprogramm oder auch ein übergreifendes europäisches Szenario einfließen. Aus ihren Daten entwickeln die Wissenschaftler außerdem Computer-Modelle für die großen Fluss-Systeme Deutschlands und der angrenzenden Länder. Ihr Ziel ist es, „diese Modelle für Vorhersagen in Echtzeit tauglich zu machen“, erklärt Merz. So ließen sich beispielsweise auch dann aussagekräftige Daten bekommen, wenn die Hochwasserschwelle bereits heranrollt. „Die heutigen technischen Messeinrichtungen an den Flüssen versagen dann meistens“, weiß Merz. „Die Pegel werden einfach weggeschwemmt.“

Die Erfahrung bei der wissenschaftlichen Zusammenarbeit während des Elbe-Hochwassers hat sich ausgezahlt, urteilt Merz. „Das konzertierte Zusammenwirken von Fernerkundung, Risikoanalyse und Vorhersage ergibt eine neue Qualität der wissenschaftlichen Erkenntnis.“ Für Wissenschaftler, für Politiker, für Versicherungsunternehmen und andere Firmen sowie für die Medien sind damit wesentlich bessere Informationen möglich als früher.

Der Vorteil des Forschungsnetzwerkes Erdbeobachtung liegt in der Bündelung der Stärken: Das DLR ist stark in der Fernerkundung, das AWI in der Verbindung von Fernerkundungsdaten mit Prozess-Studien in Polarregionen und Ozeanen. Die Stärke des GFZ liegt darin, die Fernerkundung für die Risikoanalyse zu nutzen. Und die des GKSS im Einsatz der Fernerkundung für die Küstenräume. Gemeinsam bieten die vier Helmholtz-Zentren so eine ganz neue Perspektive zur Lösung von Problemen, die den menschlichen Lebensraum berühren.

**Thomas Finkemeier**

Wissenschaftsjournalist, Düsseldorf



# Geballte Kompetenz im Kampf gegen den Krebs

Das Heidelberger Comprehensive Cancer Center versammelt Forschung und Klinik unter einem Dach – so entsteht eine zentrale Anlaufstelle für Tumorpatienten.

Ein Beitrag aus dem Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg

In Zukunft müssen sich Krebspatienten in Heidelberg nur noch eine Adresse merken: Anstatt von ihrem Haus- oder Facharzt in eine spezielle Fachklinik überwiesen zu werden, steht ihnen seit Juli 2003 eine zentrale Anlaufstelle offen: das Comprehensive Cancer Center (CCC), ein Kooperationsprojekt des Universitätsklinikums Heidelberg, der Heidelberger Thoraxklinik und des Deutschen Krebsforschungszentrums. Das CCC tritt mit dem Ziel an, durch enge Zusammenarbeit zwischen Klinik und Forschung den größtmöglichen Vorteil für seine Patienten zu erreichen.



*Das Otto-Meyerhof-Zentrum der Universität Heidelberg. Hier bietet das CCC vorläufig Sprechstunden für Krebspatienten an, die bald auf alle Krebsarten ausgedehnt werden sollen.*

mend, dass sich die Spezialisten der verschiedenen onkologischen Disziplinen intensiv austauschen. Für den einzelnen Facharzt heißt es daher umdenken: Nicht er allein ist für die Behandlung eines Patienten verantwortlich, sondern er ist auf das Fachwissen verschiedener Kolleginnen und Kollegen angewiesen.

**D**ie Zeiten, da die Behandlung einer Krebserkrankung nur aus der chirurgischen Entfernung des Tumors bestand, gehören der Vergangenheit an. Heute sind so genannte Sandwich- oder multimodale Therapien die Regel: Von vornherein werden verschiedene Verfahren kombiniert – Operation, Bestrahlung und medikamentöse Therapie –, um die Wirksamkeit der Behandlung zu erhöhen. So kann eine ergänzende Strahlentherapie nach einer Operation im Umfeld des operierten Bereichs zurückgebliebene Tumorreste zerstören; eine medikamentöse, „systemische“ Therapie soll mögliche kleinste Metastasen im ganzen Körper vernichten. Ein Paradebeispiel für dieses multimodale Vorgehen ist die Behandlung von Brustkrebs. Solche komplexen Behandlungsabläufe erfordern zuneh-

## **Im Zentrum: die interdisziplinäre Tumorambulanz**

Auf diesen Austausch setzt die interdisziplinäre Tumorambulanz, das Herzstück des CCC. Hier werden Patienten empfangen und untersucht, hier werden ihre diagnostischen Daten zentral dokumentiert. Die verschiedenen Fachkliniken haben eigene Beratungszeiten im CCC – die Spezialisten kommen hier zum Patienten und nicht umgekehrt.

*Moderne Krebstherapie kombiniert oft verschiedene Verfahren.  
Im CCC kommen die beteiligten Spezialisten zum Patienten – nicht umgekehrt.*



DKFZ

Um den individuellen Therapieplan festzulegen oder noch weitere diagnostische Schritte in die Wege zu leiten, wird jeder Patient einer interdisziplinären Tumorkonferenz vorgestellt. Dabei beraten sich Chirurgen, Radiologen und Internisten, je nach Erfordernis auch zusammen mit Kollegen aus weiteren Fachkliniken wie zum Beispiel der Frauen- oder der Hals-Nasen-Ohrenklinik. Das Ergebnis dieser Konferenz ist ein qualitätsgesicherter Therapieplan nach den höchsten Standards. Weitere Termine, etwa für zusätzliche diagnostische Untersuchungen oder für die Behandlung, werden von Mitarbeitern des CCC für den Patienten vereinbart.

Die Tumorambulanz koordiniert nicht nur die Behandlung der Patienten, sie bietet außerdem unter demselben Dach ein umfassendes Informations- und Beratungsangebot. Falls erforderlich, können die Patienten humangenetische Beratung und psychosoziale Betreuung in Anspruch nehmen. Ernährungsberaterinnen informieren über Umstellungen des Speisezettels, die möglicherweise nach bestimmten Therapien nötig werden. Raucher werden motiviert und unterstützt, ihr Suchtverhalten aufzugeben.

## **Eng verknüpft: Klinik und Forschung**

Den einmaligen Charakter des CCC macht jedoch nicht allein die interdisziplinäre Tumorambulanz aus. Entscheidend ist vielmehr die enge Verknüpfung von hochkarätiger Forschung und Patientenversorgung, die es in dieser Form in Deutschland noch nicht gibt. Ergebnisse aus der Grundlagenforschung gezielt in klinische Anwendungen zu übersetzen, entspricht dem Selbstverständnis der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in der Helmholtz-Gemeinschaft. Das CCC schafft die ideale Struktur dafür.

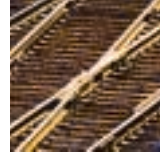
Das Deutsche Krebsforschungszentrum bringt Kompetenz aus zwei anwendungsnahen Forschungsbereichen in das CCC ein. Im Bereich „Experimentelle Diagnostik und Therapie“ sollen vor allem neue Strategien gegen bösartige Tumoren entwickelt werden, die das bestehende Spektrum von Chirurgie, Bestrahlung und Chemotherapie ergänzen. Dazu suchen die Wissenschaftler in Tumorzellen nach Molekülen, die neue

Angriffsstellen für gezielt entwickelte Wirkstoffe bieten. Immuntherapien zielen darauf ab, das körpereigene Abwehrsystem des Patienten beim Kampf gegen den Krebs zu unterstützen. Mit Zelltherapien versuchen die Forscher, Zellen als trojanische Pferde in den Tumor einzuschleusen.

Aufgabe des zweiten Bereichs, der „Präventiven Onkologie“, ist vor allem die Ursachenforschung. Welche Faktoren aus Beruf und Umwelt, welcher Ernährungsstil, welche Gen-Ausstattung tragen zur Entwicklung einer Krebserkrankung bei? Das CCC mit seiner großen Anzahl von Krebspatienten bietet eine ideale Basis für solche epidemiologischen Untersuchungen, mit denen Risikofaktoren dingfest gemacht werden sollen, um sie in Zukunft – wenn möglich – zu vermeiden. Der Krebsentstehung durch Vermeiden von Risikofaktoren vorzubeugen, wird als primäre Prävention bezeichnet. Unter sekundärer Prävention verstehen die Fachleute die Früherkennung von Krebsvorstufen, die noch geheilt werden können. Bekannte Beispiele hierfür sind der Hämo-cult-Test oder die Mammographie. Für die meisten Krebsarten jedoch fehlen noch aussagekräftige massentaugliche Tests, so genannte Screeningverfahren. Die Entwicklung solcher Verfahren gehört zu den weiteren Aufgaben des Bereichs „Präventive Onkologie“.

Auch und gerade in Heidelberg kooperieren Forschung und Klinik bereits seit langem in einzelnen Projekten. Um in der Zusammenarbeit zwischen diesen beiden „Welten“ Synergieeffekte zu erreichen, stellt das CCC geeignete Schnittstellen zur Verfügung.

Für epidemiologische Studien können Wissenschaftler auf die anonymisierten Daten aus einem klinischen Krebsregister sowie



## Perspektiven



*Die interdisziplinäre Tumorkonferenz. Sie entwickelt den individuellen Therapieplan.*

aus einer zentralen Bild- und Datenbank zugreifen. Eine Tumor- und Serumbank stellt den Forschern für zell- und molekularbiologische Tests Blut- und Gewebeprobe zur Verfügung.

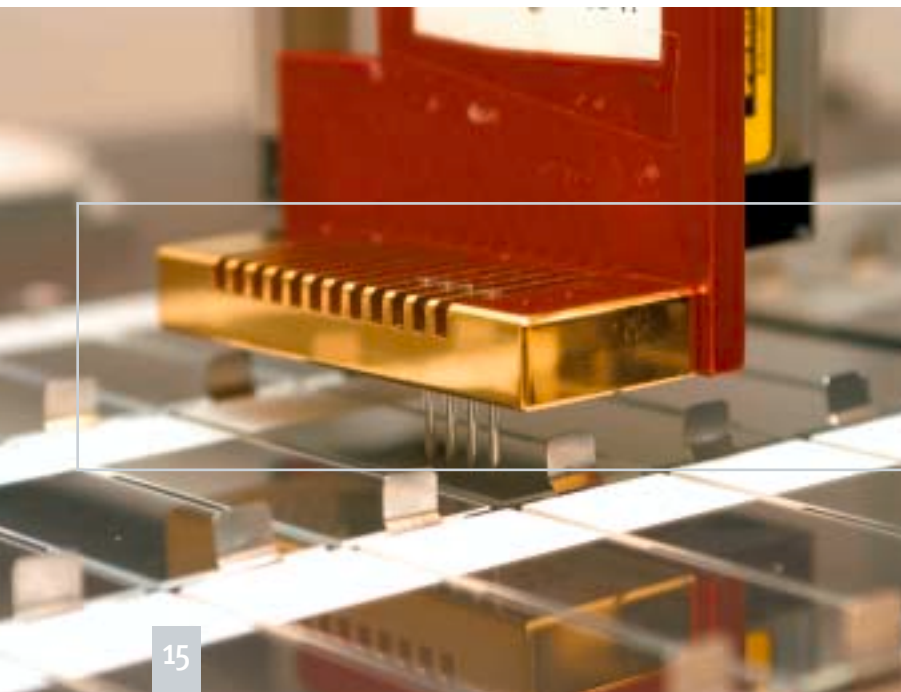
### **Wichtiges Ziel: schneller zu neuen Therapien**

Für viele Krebserkrankungen existiert bis heute noch keine zufrieden stellende Therapie. Haben Wissenschaftler einen Erfolg versprechenden neuen Behandlungsansatz entwickelt, drängt daher die Zeit: Er sollte so schnell wie möglich die klinische Prüfung durchlaufen, um im Erfolgsfall allen Kranken zur Verfügung zu stehen. Ein „Zentrum für Klinische Studien“ im CCC berät Ärzte und Wissenschaftler bei der Planung und Durchführung der aufwändigen Studien und hilft, geeignete Patienten zu finden, die den jeweiligen Prüfkriterien entsprechen. So bekommen viele der Heidelberger Krebspatienten die Chance, bereits frühzeitig im Rahmen einer Studie von innovativen Therapien und der damit verbundenen umfassenden medizinischen Versorgung zu profitieren.

Schon heute werden jährlich mehr als 8.000 Tumorpatienten in Heidelberger Kliniken behandelt. Die Attraktivität des CCC wird in Zukunft noch zusätzliche Patienten nach Heidelberg ziehen. Das CCC bietet sich als Adresse an, um vor dem Beginn einer Therapie eine zweite oder dritte

Meinung einzuholen. Bereits während der ersten Aufbauphase bietet das CCC im Otto-Meyerhof-Zentrum Sprechstunden für Patienten mit Leukämien und bösartigen Erkrankungen des Lymphsystems sowie mit Pankreastumoren an. Spätestens in der dritten Aufbauphase, Ende 2007, wenn alle Heidelberger Fachkliniken im CCC kooperieren, soll das Angebot auf alle Krebsarten ausgeweitet werden.

Hochkarätige onkologische Forschung, modernste Therapieangebote und ein umfassendes Beratungsangebot für Patienten wie der Krebsinformationsdienst oder die Psychoonkologische Beratung sind in Heidelberg seit langem schon fest etabliert. Durch die Zusammenfassung der einzelnen Komponenten im Comprehensive Cancer Center wird Heidelberg noch schlagkräftiger im Kampf gegen den Krebs.



*Forschung im CCC: Präzisionsroboter stellen DNS-Chips her. Mit solchen Chips identifizieren Wissenschaftler tumorrelevante Gene.*

### **Dr. Sibylle Kohlstädt**

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit  
Deutsches Krebsforschungszentrum  
Heidelberg



# Was passiert im Feuer?

Mit modernsten Methoden wollen Forscher das uralte Rätsel Verbrennung lösen. Ihre Vision dabei: Energie gewinnen ohne Schadstoffe.

Ein Beitrag aus dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Schon seit der Altsteinzeit vor mehr als 300.000 Jahren gebraucht der Mensch das Feuer. Dennoch sind viele grundlegende Fragen der Verbrennung nach wie vor ein Geheimnis der Flammen. Die Forschung hofft jetzt allerdings auf deutliche Fortschritte: Mit modernen Lasermessmethoden, Computersimulationen und Brennkammerexperimenten rücken die Wissenschaftler dem Feuer zu Leibe. Erstmals in der Geschichte der Verbrennungsforschung können damit die physikalisch-chemischen Vorgänge im Einzelnen beobachtet, analysiert und verstanden werden. Entstehen sollen auf diese Weise Konzepte für eine schadstofffreie Verbrennung. Denn Schadstoffe aus der Verbrennung in Heizungen, im Verkehr oder in der Industrie summieren sich zu einer ernsthaften Bedrohung für Umwelt und Gesundheit.

### *Uralt und hochmodern: Verbrennung hat Zukunft*

**D**as rote Licht über der Tür zum Labor signalisiert den Forschern beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Vorsicht beim Eintreten. Stark gebündelte Laser kreuzen quer durch den Raum und zielen schließlich mitten durch die Fenster einer Brennkammer. Die für das Auge unsichtbaren Schnitte durch die Flamme werden mit Kamera und Rechner aufgezeichnet. Wechselseitiger Einsatz von Lasertechnik, Brennkammer und Simulationen am Rechner – so betreiben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Institut für Verbrennungstechnik in Stuttgart moderne Verbrennungsforschung.

Verbrennung gehört zu den ältesten Technologien des Menschen überhaupt. Und noch immer werden mehr als 80 Prozent der weltweit eingesetzten Primärenergie durch Verbrennung in eine nutzbare Energieform umgewandelt. Ob Heizung von Gebäuden, Antrieb von Autos und Flugzeugen oder Herstellung von Glas, Stahl und Strom – immer sind Verbrennungsprozesse beteiligt. Auch wenn alternative Energieformen aus der Nutzung von Sonne, Wind und Wasser an Bedeutung gewinnen werden. An der zentralen Rolle der Verbrennung für die Energieversorgung wird sich in den nächsten Jahrzehnten nichts Wesentliches ändern.



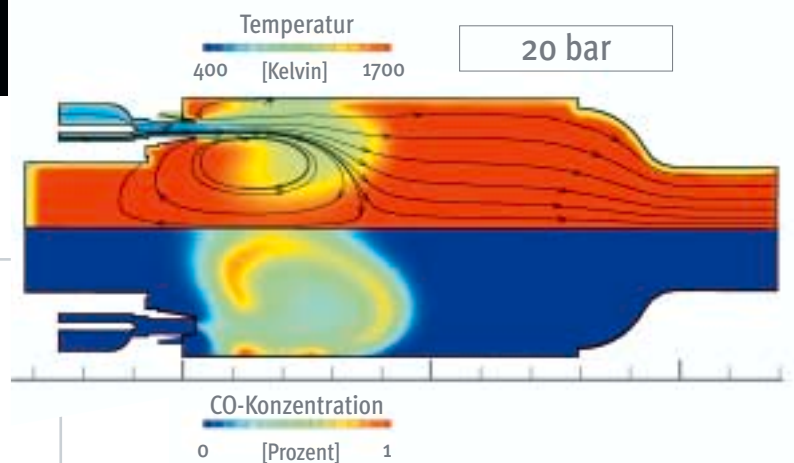




dings einen Durchbruch: Numerische Methoden zur Simulation von Strömungs- und Verbrennungsprozessen, so ihre Überzeugung, werden künftig die ineinander verwickelten Vorgänge in Flammen weitgehend aufklären.

Betrachtet man die Abläufe in einer Brennkammer näher, erkennt man eine Vielzahl von unterschiedlichen, sich überlagernden Vorgängen. Gleichzeitig laufen physikalische Prozesse wie etwa turbulente Mischungsvorgänge und eine riesige Zahl von chemischen Reaktionen ab. Um extrem schadstoffarme Verbrennungskonzepte zu entwickeln, müssen die Forscherinnen und Forscher dieses chaotische Zusammenspiel verstehen und beherrschen.

*Berechnete Temperaturverteilung in einer Versuchsbrennkammer. Brennstoff und Luft treten vorgemischt durch eine Düse in die Brennkammer ein. Der Verlauf der Strömung wird durch die eingezeichneten Linien angedeutet.*



Verbrennung hat Geschichte und Perspektive: Trotzdem ist sie in den Augen der Wissenschaftler keine ausgereifte Technologie. Im Gegenteil. Gerade die bei der Verbrennung entstehenden Schadstoffe werden erst seit vergleichsweise kurzer Zeit als Problem identifiziert und erforscht. Für Professor Dr. Manfred Aigner, Leiter des DLR-Instituts für Verbrennungstechnik in Stuttgart, ist deshalb „das Potenzial für eine weitere Minderung der Schadstoffe bei weitem noch nicht ausgeschöpft“. Das liegt auch daran, dass die beteiligten physikalisch-chemischen Prozesse „noch nicht im Detail verstanden oder gar berechenbar sind“.

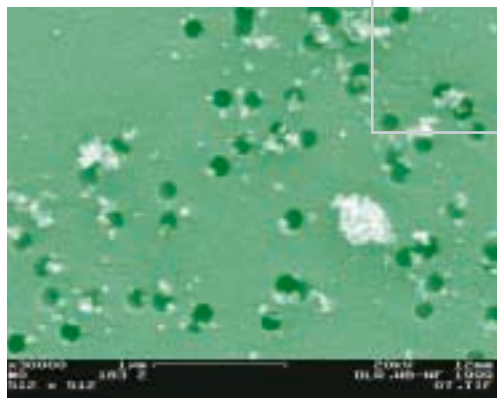
### Das Chaos entwirren ... und berechnen

Von der Berechnung der komplizierten Vorgänge, die sich in einer Brennkammer abspielen, versprechen sich die Wissenschaftler jetzt aller-

Sie beginnen nicht bei Null: In den zurückliegenden 20 Jahren wurden in der Technologie der schadstoffarmen Verbrennung bereits wesentliche Fortschritte erzielt. Welche Schwierigkeiten die Forschung dabei bewältigen muss, zeigt das Beispiel Stickoxide. Sie werden hauptsächlich durch den Kraftfahrzeugverkehr produziert und sind – zusammen mit den Kohlenwasserstoffen – zum großen Teil für den Sommersmog und das gefährliche Ozon verantwortlich. In Kraftwerken konnten durch die Einführung der so genannten mageren Vormischverbren-



# Energie



Aus dem Brennraum abgesaugte Rußpartikel – im Bild als weiße Partikel dargestellt – unter dem Elektronenmikroskop.

DLR

nung bei Gasturbinen die Stickoxidemissionen ( $\text{NO}_x$ ) von bis zu 500 parts per million (ppm) auf weniger als 25 ppm im Dauerbetrieb reduziert werden. Bei der mageren Verbrennung wird der Luftanteil am Mischungsverhältnis mit dem Brennstoff erhöht und somit die Spitzentemperatur bei der Verbrennung gesenkt. Und genau darum geht es: Denn niedrigere Temperaturen bedeuten niedrigeren  $\text{NO}_x$ -Ausstoß. In den nächsten Jahren will die Forschung Stickoxidemissionen von weniger als zehn ppm („single digit“) erreichen.

## Instabile Verbrennung birgt Lebensgefahr

Das Potenzial, um dieses ehrgeizige Ziel zu erreichen, bietet ihr die magere Vormischverbrennung. Luft und Brennstoff werden dabei noch vor Eintritt in die Brennkammer miteinander vermischt. Dieses Verbrennungskonzept ist allerdings sehr anfällig für instabile Vorgänge. Und solche Verbrennungsinstabilitäten können sehr starke Druckpulsationen, verbunden mit unerträglichem Lärm, auslösen. Im Extremfall führt das Phänomen sogar zu einem Erlöschen der Flammen. In der Praxis

## Im Innern der Brennkammer

Das in die Brennkammer einströmende Brennstoff-Luftgemisch wird zunächst gezündet und verbrannt. Die dabei entstehenden Abgase strömen durch die Brennkammer, fließen teilweise zurück, vermischen sich wieder mit dem neu einströmenden Brennstoff und zünden ihn. Beobachten Forscher in dem so genannten turbulenten Strömungsfeld der Brennkammer ein beliebiges Element, dann erkennen sie zufällige Schwankungsbewegungen, die zu einer besseren Vermischung der einzelnen Stoffe beitragen. Gleichzeitig zu diesem Vermischungsvorgang laufen chemische Reaktionen der beteiligten Stoffe ab, die zur Bildung von Schadstoffen führen können. ■

sind die Folgen fatal: Wenn bei einem Kraftwerk die Flamme erlischt, steht der Betrieb in der Gasturbine still, es entsteht erheblicher wirtschaftlicher Schaden. Der gleiche Vorgang bei einem Flugzeug, also ein Absterben der Triebwerke, wäre für alle Beteiligten sogar lebensgefährlich. Bis heute können Forscher noch keine Gasturbinen-Brennkammer mit magerer Vormischverbrennung entwickeln, bei der in der Praxis die gefürchteten Verbrennungsschwingungen bereits im Voraus beim Design mit Sicherheit ausgeschlossen werden können. Im Flugzeug ist diese Technik deshalb aus Sicherheitsgründen noch gar nicht im Einsatz.

## Aus Daten werden Modelle

Mit numerischen Verfahren zur Verbrennungssimulation wollen Wissenschaftler die komplizierten Zusammenhänge in der Brennkammer nun abbilden. Wie zuverlässig und stabil brennt die Flamme bei welcher Mischung von Brennstoff und Luft? Wie läuft die Mischung innerhalb der Brennkammer ab? Zu welchem Zeitpunkt, bei welcher Temperatur und an welcher Stelle in der Flamme treten Schadstoffe auf? Wie verteilt sich die Temperatur innerhalb der Flamme und der Kammer? Und wie stark ist dabei die Belastung der Brennkammerwände? Diese und viele weitere Fragen wollen sie im Rechenmodell abbilden und aufklären.

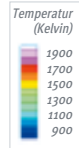
Für diese Berechnung bauen die numerischen Verfahren auf so genannten Computational Fluid Dynamics-Verfahren (CFD) auf. Diese liefern zunächst das turbulente Strömungsfeld, also den Strömungsablauf innerhalb der Brennkammer. Um damit die turbulente Mischung und Verbrennung sowie die Temperaturverteilung berechnen zu können, brauchen die Forscher Basis-



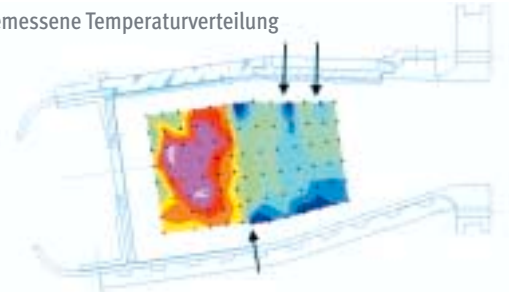


# Energie

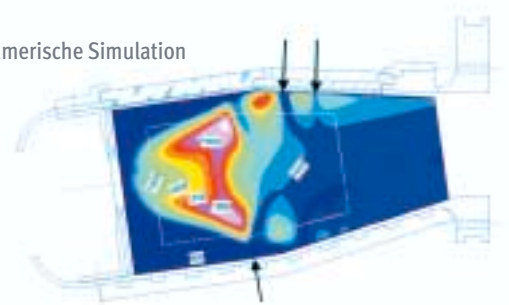
Gemessene und numerisch berechnete Temperaturverteilung (zeitlich gemittelt) in einer Flugtriebwerksmodell-Brennkammer. Das obere Bild zeigt gemessene Werte, das untere eine numerische Simulation.



Gemessene Temperaturverteilung



Numerische Simulation



daten über die komplizierten physikalisch-chemischen Reaktionen, die in der Brennkammer ablaufen: Diese Daten ermitteln sie in so genannten Stoßwellenrohren oder speziellen Reaktoren. Mehrere hundert Reaktions-schritte, Reaktionspartner und Zwischenprodukte sind durchaus typisch. Zudem variieren die Wissenschaftler die wesentlichen Einflussfaktoren für die Verbrennung wie Druck und Temperatur.

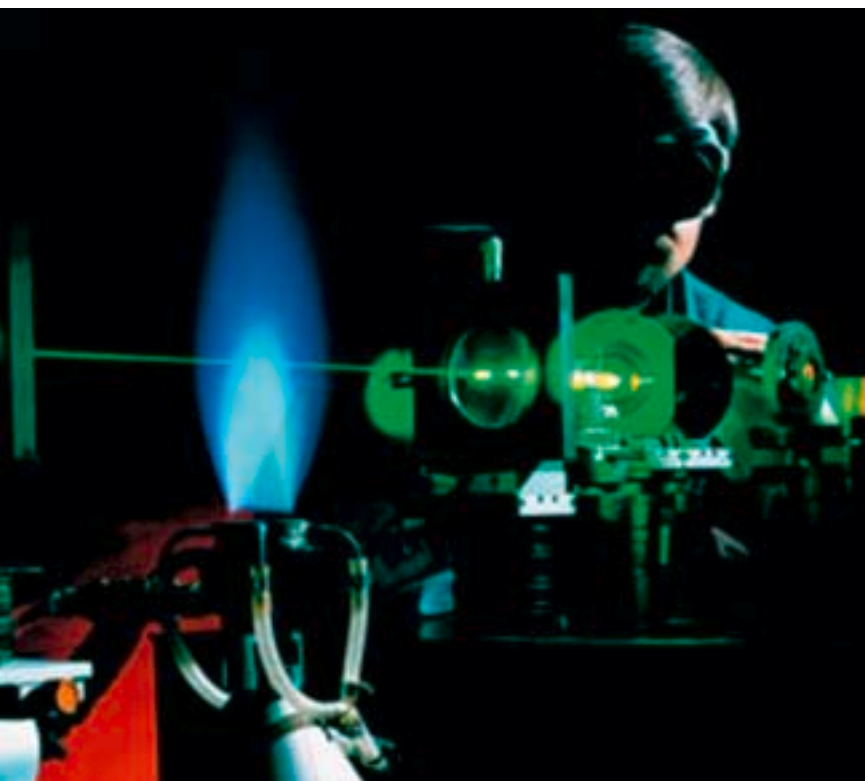
Die aus den Daten erzeugten Modelle für Reaktionen und turbulente Mischvorgänge müssen im nächsten Schritt vereinfacht werden. Denn selbst Superrechner können den notwendigen Rechenaufwand noch nicht bewältigen. Für viele Anwendungen basiert die Modellierung der Verbrennung zu diesem Zweck auf der vereinfachenden Annahme „gemischt ist gleich verbrannt“. Das bedeutet, die Forscher betrachten nur den zeitlichen Ablauf der Mischung von Luft und Brennstoff; die chemischen Reaktionen hingegen nehmen sie als unendlich schnell ablaufend an.

## Neue Herausforderung: Schadstoffen zu Leibe rücken

In der Vergangenheit hat dieses Vorgehen ausgereicht. Denn lange Zeit konzentrierten sich die Ingenieure bei der Entwicklung von Verbrennungssystemen ausschließlich auf Stabilität und guten Ausbrand. Wichtig

für Motoren, Heizungen oder Kraftwerke war vor allem eine Flamme, die zuverlässig brennt, dabei den Brennstoff möglichst vollständig verbraucht und keine Rückstände wie Asche oder Kohlenwasserstoffe hinterlässt. Doch selbst wenn eine Quote von 99,5 Prozent Ausbrand erreicht wird, stellen die restlichen 0,5 Prozent unverbrannter Rückstände immer noch eine hohe Schadstoffemission dar. Denn selbst sehr kleine Restkonzentrationen von Schadstoffen in Abgasen können sich durch den enormen Energieverbrauch moderner Gesellschaften schnell zu einer erheblichen Belastung der Umwelt summieren.

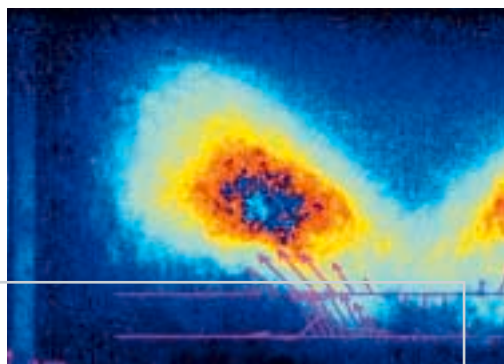
Gasförmige Stickoxide, Schwefeloxide, Kohlenmonoxide und unverbrannte Kohlenwasserstoffe, zudem partikelförmige Stoffe wie Ruß: Besonders betroffen von diesen Schadstoffen sind Personen mit Erkrankungen der Atemwege wie Asthmatiker, zudem ältere Menschen und Kinder. Solche Stoffe schädigen aber auch Vegetation und Gebäude.



Mit dem laserspektroskopischen Verfahren kann die Temperatur- oder Teilchenverteilung in turbulenten, reaktiven Strömungen gemessen werden.



## Energie



Messungen der OH-Konzentrationsverteilung zusammen mit der gemessenen Geschwindigkeitsverteilung für eine Doppeldrall-Laborflamme. Die Farben sind ein Maß für die OH-Konzentration, die von außen nach innen zunimmt. OH ist ein so genanntes Verbrennungsradikal, das im Verlauf der Verbrennung eine Verbindung zu  $H_2O$  oder  $CO_2$  eingeht. Die Pfeile geben die Richtung der Strömung an; ihre Länge entspricht der Geschwindigkeit.

DLR

Wer der Bildung dieser Stoffe auf den Grund gehen will, kann im Modell die vereinfachende Annahme „gemischt ist gleich verbrannt“ nicht mehr ohne weiteres treffen. Denn jetzt sind die chemischen Reaktionsabläufe in ihrem zeitlichen Ablauf der entscheidende Parameter. Stickoxide oder Ruß bilden sich beispielsweise relativ langsam. Das muss bei der Berechnung berücksichtigt werden. Zudem hängt die Schadstoffbildung extrem stark von der Temperatur ab. Schon geringe Fehler in der numerisch berechneten Temperaturverteilung können daher große Fehler in der Berechnung der Schadstoffbildung nach sich ziehen. Die Wissenschaftler gehen von einer typischen Ungenauigkeit bei der Simulation von etwa 100 bis 200 Grad Celsius aus. Bei Temperaturen von 2.000 Grad oder darüber erscheint dies zunächst nicht gravierend. Aber schon Unterschiede innerhalb der Flamme von 50 Grad können die Stickoxidbildung verdoppeln.

Triebwerkstypische Verbrennungsabläufe werden mit der Doppeldrall-Laborflamme untersucht. Bei dieser Flamme treten zwei Luftströme ein.

### Fernziel im Visier: Verbrennung ohne Schadstoffe

Rechnerkapazität für eine zuverlässige Schadstoffberechnung ist mit dem heutigen Stand der Technik noch nicht erreicht. Und auch die



Methode der Vereinfachung bietet keine schnelle Lösung, weil dadurch naturgemäß wiederum Ungenauigkeiten entstehen. In so genannten Validierungsexperimenten werden deshalb heute die Temperaturen und die Zusammensetzungen der Gemische in den Flammen mit Lasern gemessen und später mit den gerechneten Werten verglichen. Auch dies ist keine schlichte Aufgabe: Genaue Messungen mit Temperaturen zwischen 1.200 bis über 2.000 Grad Celsius sind nämlich äußerst diffizil. Erst seit etwa 20 Jahren werden Verfahren entwickelt, um unter schwierigen technischen Bedingungen wie hohem Druck und hohen Temperaturen zuverlässige Informationen zu liefern, ohne dabei den Verbrennungsablauf – etwa durch eingeführte wassergekühlte Sonden – zu stören. Mit einigen dieser optischen Messmethoden können die Wissenschaftler nicht nur an einzelnen Punkten messen, sondern gleichzeitig ganze Schnittebenen durch Flammen führen. Aus solchen Messungen gewinnen sie Daten über Geschwindigkeitsfelder und Flammenstrukturen, mit deren Hilfe sie die ablaufenden Prozesse viel genauer verstehen können. Lasermessungen sind daher nicht nur für die Überprüfung, sondern auch für die Weiterentwicklung der Rechenmodelle äußerst wertvoll.

Wie lange es noch dauern wird, bis die Rechner Verbrennung in ihrem gesamten komplexen Ablauf darstellen können, sehen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler noch nicht genau ab. Für Manfred Aigner jedenfalls ist bereits „die Vision einer nahezu schadstofffreien Verbrennung denkbar“. Um dieses Ziel zu erreichen, wird die rote Lampe über der Labortür im Stuttgarter Institut für Verbrennungstechnik noch viele Male leuchten.

**Dr. habil. Berthold Noll**

DLR-Institut für Verbrennungstechnik, Stuttgart

**Dipl.-Ing. Bernhard Milow**

DLR-Programmbeauftragter Energie, Köln

**Dipl.-Betriebswirt (FH) Harald Pandl**

DLR-Öffentlichkeitsarbeit, Stuttgart

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt



# Treffpunkt Garching

Die Fusionsanlage ASDEX Upgrade – ein europäisches Forschungsinstrument.

Ein Beitrag aus dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching

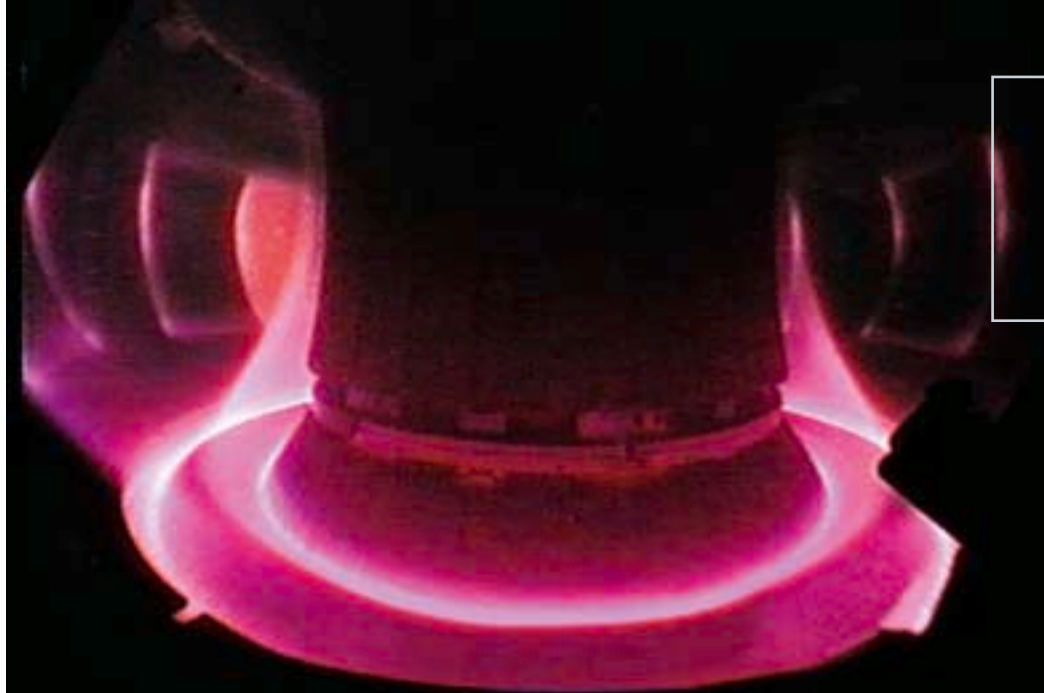


Forscherinnen und Forscher aus ganz Europa arbeiten inzwischen am größten deutschen Fusionsexperiment, dem ASDEX Upgrade in Garching bei München, das vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) betrieben wird. Zurzeit gilt ihre Aufmerksamkeit zum Beispiel so genannten „neoklassischen Tearing-Moden“. Denn so schön der Name auch ist – die Tearing-Moden haben äußerst unangenehme Eigenschaften: Sie zerstören die Stabilität des Plasmas.

**E**in Kernfusionskraftwerk soll – ähnlich wie die Sonne – Energie aus der Verschmelzung von Atomkernen gewinnen. Um das Fusionsfeuer zu zünden, muss der Brennstoff, ein Wasserstoff-Plasma, auf Temperaturen von über 100 Millionen Grad aufgeheizt werden. Das gelingt nur, indem man dieses Plasma in Magnetfeldern „einschließt“ und auf diese Weise wärmeisoliert. Kommen Temperatur und Druck des Plasmas aber in die Nähe der Zündwerte, treten unglücklicherweise Instabilitäten – eben jene Tearing-Moden – auf, die den magnetischen Einschluss begrenzen. Ein ernstes Problem auf dem Weg zu einem wirtschaftlichen Kraftwerk!

Ein Problem daher auch für ITER. Der von Europa, Japan, Russland, den USA, China und Südkorea gemeinsam vorbereitete Testreaktor ITER (lat.: der Weg) soll zeigen, dass es physikalisch und technisch möglich ist, durch Kernverschmelzung Energie zu ge-

*Für Fusion brauchen die Forscher stabiles Plasma. Mit diesem Gerät an ASDEX Upgrade wird die Plasmatemperatur gemessen.*



winnen. Wenn dieses weltumspannende Großprojekt nach vieljähriger Vorbereitung realisiert ist, dann wird sich das europäische Fusionsprogramm – zu dem das IPP gehört – auf den Betrieb weniger, jedoch europaweit genutzter Anlagen konzentrieren müssen. Mit seiner ausgefeilten Diagnostik und der ITER-ähnlichen Geometrie spielt ASDEX Upgrade dabei eine entscheidende Rolle. So ist etwa sein flexibles Heizsystem mit allen drei für ITER vorgesehenen Plasma-Heizverfahren einmalig in Europa.

Es ist also nahe liegend, dass eine europäische Gruppe unter der Leitung des IPP damit beauftragt wurde, das „Tearing-Moden-Problem“ für ITER zu lösen. Beteiligt sind Wissenschaftler der Universität Stuttgart und Forscher der Fusionszentren in England, den Niederlanden und Frankreich.

### **Magnetischer Kurzschluss**

Die erste Frage, der sich die Forscherinnen und Forscher widmeten: „Warum entstehen überhaupt Tearing-Moden?“ Beim Bau eines Magnetfeldkäfigs für das Plasma nutzen die Fusionsforscher die Tatsache, dass die geladenen Plasmateilchen – Ionen und Elektronen – von elektromagnetischen Kräften auf Schraubenschraubenbahnen um magnetische Feldlinien gezwungen werden. Von einem geeignet geformten Magnetfeld wie auf Schienen geführt, können die schnellen Teilchen so von den Wänden des Plasmagefäßes ferngehalten werden. Für einen

„dichten“ Käfig müssen die Feldlinien innerhalb des ringförmigen Plasmagefäßes geschlossene, ineinander geschachtelte Flächen aufspannen – wie die ineinander liegenden Jahresringflächen eines Baumstamms. So werden Feldkomponenten vermieden, die die Plasmateilchen nach außen auf die Wände führen und so die hohen Zündtemperaturen unerreichbar machen würden. Auf den magnetischen Flächen sind Dichte und Temperatur jeweils konstant, während von Fläche zu Fläche – vom heißen Zentrum nach außen – Dichte, Temperatur und damit auch der Plasmadruck abnehmen.

Soweit das Prinzip. Wären da nicht die Instabilitäten: Sie verformen das einschließende Magnetfeld; schlimmstenfalls bricht die Plasmaentladung sogar ganz ab. Die Forscher konnten zeigen, dass im vormalig symmetrischen Plasmaring blasenartige Störungen entstehen mit eigener, in sich geschlossener Magnetfeldstruktur: magnetische „Inseln“, ausgelöst durch das Ansteigen des Plasmadrucks bei hoher Plasmatemperatur. Wenn solche Inseln entstehen, reißen die magnetischen Feldlinien auf und verbinden sich mit den Feldlinien benachbarter magnetischer Flächen. Es kommt zu einem „Kurzschluss“ der Feldlinien, der einen schnellen Energieaustausch von innen nach außen ermöglicht: Damit beschränken die Instabilitäten den erreichbaren Plasmadruck. Die Leistungsausbeute eines späteren Kraftwerks würde stark darunter leiden.

Heißer als 100 Millionen Grad und in Magnetfelder eingeschlossen: das Plasma in der Fusionsanlage ASDEX Upgrade.

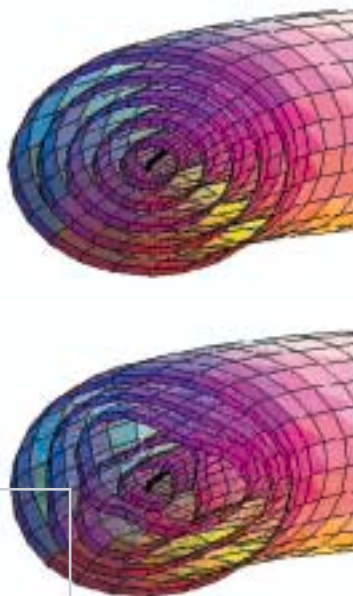


## Mikrowellen gegen Inseln

Wie die Plasmatheoretiker vorrechnen, liegt die Grenze für den noch erlaubten Plasmadruck umso niedriger, je größer die Anlagen sind – bei ITER zehnmal niedriger als bei dem kleineren ASDEX Upgrade. In einem Kraftwerk schienen die Tearing-Moden daher unvermeidlich. Umso größer war das Aufsehen, als es an ASDEX Upgrade 1999 erstmals gelungen ist, die Bildung dieser magnetischen Inseln zu unterbinden. Die Forscher haben Mikrowellen in die Mitte einer entstehenden Insel eingestrahlt und so lokal einen elektrischen Strom erzeugt, der die Insel auflöst, die Magnetfeldstörung unterdrückt und den Plasmadruck wieder ansteigen lässt.

Erste Ideen zu dieser Methode hatten Experimentalphysiker Mitte der 90er Jahre, stimuliert von theoretischen Arbeiten in Princeton. Auch im IPP kümmerte sich zunächst die Abteilung Plasmatheorie um die Analyse der hochkomplexen Vorgänge im Plasma. Die Frage der Experimentatoren: „Kann unser Verfahren funktionieren?“ sollten sie vor der Investition in technische Ausrüstung rechnerisch klären. Nach ermutigendem Resultat wurde 1997 das System der Mikrowellenheizung fertig gestellt, 1999 stellten sich erste experimentelle Ergebnisse ein. Durchschlagenden Erfolg hatte man dann ein Jahr später, als es gelang, eine Insel gänzlich wegzupusten. Bestätigt werden konnte die neue Methode kurz danach in den USA und in Japan an den Fusionsexperimenten DIII-D sowie JT-60 Upgrade.

Im Jahr 2003 ist es nun an ASDEX Upgrade gelungen, eine besonders störende Tearing-Mode zu stabilisieren. Sie begrenzt nicht nur den Plasmadruck, sondern bricht sogar den gesamten Plasmastrom ab. Zur Stabilisierung genühten – präzise in die richtige Stelle eingestrahlt –



*Eine Tearing-Mode entwickelt sich: Die anfänglich symmetrisch ineinander geschachtelten magnetischen Flächen (oben) verformen sich. Dadurch können sich die Flächen an einigen Stellen berühren (unten) – es entstehen magnetische Inseln.*

knapp zwei Megawatt Mikrowellenleistung, nicht mehr als zehn bis zwanzig Prozent der gesamten Heizleistung. Damit könnte also ein attraktives Instrument zur Kontrolle magnetischer Inseln gefunden sein. Weitere Untersuchungen mit einer auf vier Megawatt aufgestockten Mikrowellenheizung sollen in den nächsten Jahren zeigen, dass die Methode kraftwerkstauglich ist.

## Europäische Öffnung

„Die aus ganz Europa hinzu gewonnene Expertise“, so freut sich Professor Hartmut Zohm vom ASDEX Upgrade-Team, „ist eine große Bereicherung, die auch in Zukunft aufregende neue Resultate erhoffen lässt.“ Die europäischen Forscher, die ASDEX Upgrade für ihre Experimente nutzen, sind an den Entscheidungen über das wissenschaftliche Arbeitsprogramm der Anlage beteiligt. Dem Programmkomitee gehören deshalb auch externe Wissenschaftler an: Zehn der insgesamt 19 Mitglieder kommen aus Instituten in Dänemark, Deutschland, Großbritannien, der Schweiz, Österreich, Ungarn, Italien, Portugal, Irland und Finnland. Auch in die Diskussionsgremien, in denen die Programmvorschläge erstellt werden, in die Zusammenkünfte der thematisch orientierten Arbeitsgruppen sowie in das wöchentliche Treffen zur kurzfristigen Programmplanung sind externe Teilnehmer – häufig per Videokonferenz und Internet – eingebunden. So lässt sich die verstärkte internationale Koordination mit flexibler Programmplanung in Einklang bringen. Das Verfahren trägt inzwischen reichlich Früchte: Von den mehr als 150 Experimentenvorschlägen, die dem Programmkomitee für die vergangene Experimentier-Kampagne eingereicht wurden, stammte ein Fünftel von den europäischen Partnern.

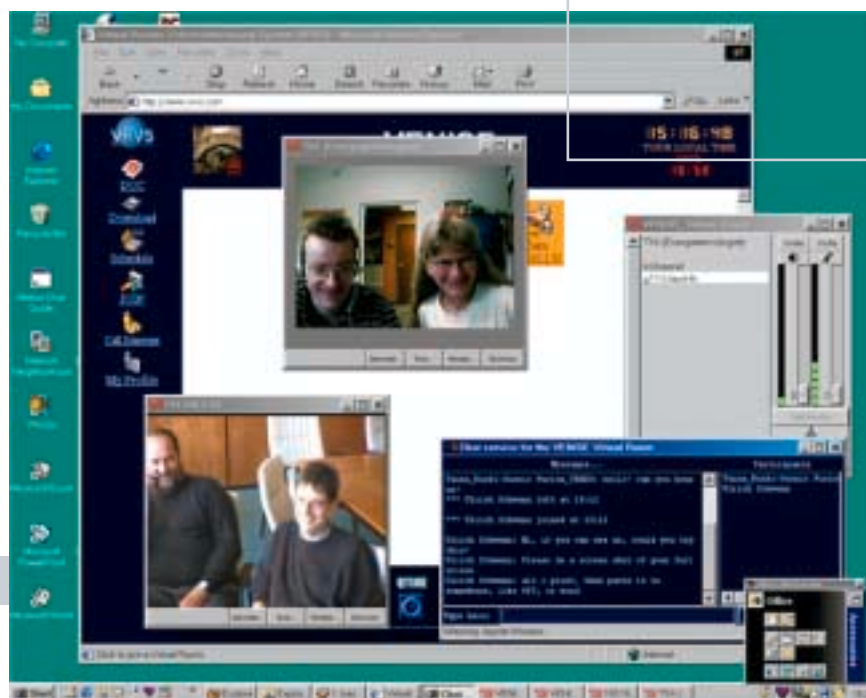
## Isabella Milch

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit  
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik,  
Garching, Greifswald



Unterhaltung per Internet: Video-konferenz zwischen Helsinki und Garching. Rechts oben Dr. Taina Kurki-Suonio.

## Interview



Die Physikerin Dr. Taina Kurki-Suonio vom Institute for Advanced Energy Systems der Technischen Universität Helsinki in Finnland hat zwei der insgesamt fast 40 für 2004 eingegangenen externen Projektvorschläge für ASDEX Upgrade eingereicht.

einem ausgefeilten Monte-Carlo-Rechenverfahren, das die Bewegung der geladenen Plasmateilchen in der realistischen Geometrie von ASDEX Upgrade nachvollzieht. Meine finnischen Kollegen von der Materialforschung untersuchen, wie Wärmeschutzkacheln, die sie in das Plasmagefäß von ASDEX Upgrade einbauen, durch das Plasma verändert werden.

### Warum arbeiten Sie an ASDEX Upgrade?

*Finnland hat, wie auch andere kleinere Länder in Europa, keine eigene Fusionsanlage. Für die finnischen Plasmaphysiker ist es deshalb sehr interessant, an ASDEX Upgrade zu forschen. Die europaweite Zusammenarbeit funktioniert hier sehr flexibel und ohne große Reibungsverluste. Und die Möglichkeiten, unsere Experimentierwünsche und Programmvorstellungen zu verwirklichen, sind wirklich beachtlich.*

### Forschen aus der Ferne – geht das?

*Tatsächlich halte ich mich während meiner Arbeiten für ASDEX Upgrade vor allem in Finnland auf. Der Informationsaustausch läuft dann über E-Mail, Internet oder Telefon. Meine Messdaten hole ich mir elektronisch aus der Datenbank in Garching. Und an den Treffen des ASDEX Upgrade-Teams zur Besprechung der Wochenpläne oder an der langfristigen Programmplanung kann ich per Videokonferenz teilnehmen. Natürlich sind auch persönliche Kontakte wichtig, deshalb komme ich für mindestens vier Wochen im Jahr aus Helsinki nach Garching. Umgekehrt besuchen uns auch die deutschen Kollegen in Finnland.*

### Woran arbeiten Sie an ASDEX Upgrade?

*Mein Thema ist die rechnerische Interpretation der Experiment-Ergebnisse. Speziell untersuche ich, wie sich schnelle Ionen im Magnetfeld verhalten. Dabei geht es um die Verbesserung der Wärmeisolation und um die Wandbelastung bei ASDEX Upgrade und auch später bei ITER. Dabei nutzen wir die erhebliche Rechnerleistung, über die wir in Finnland verfügen. Wir arbeiten mit*

Das Gespräch führte Isabella Milch.





# Das Ziel: Solarstrom zum kleinen Preis

Dünnschicht-Solarzellen aus Silizium arbeiten immer effizienter.

Ein Beitrag aus dem Forschungszentrum Jülich

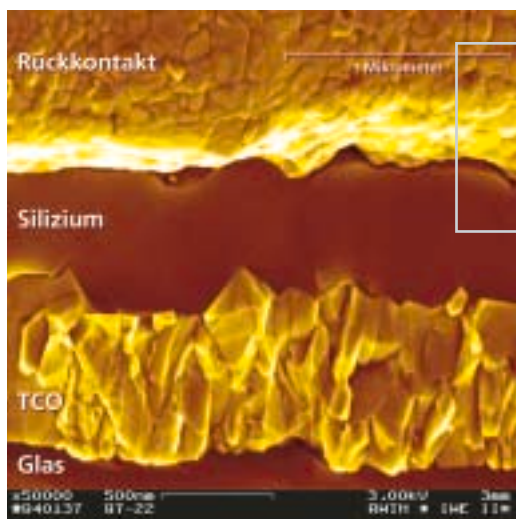
Am Ende steht immer eine Zahl: der Wirkungsgrad. Er verrät, wie viel Prozent des Sonnenlichts eine Solarzelle in elektrischen Strom umwandelt. Diesen Wirkungsgrad zu verbessern – daran arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Instituts für Photovoltaik des Forschungszentrums Jülich. Doch das ist nicht alles: Gleichzeitig müssen die Solarzellen noch möglichst billig sein und sich nicht nur im Labor, sondern auch im „wahren Leben“ bewähren. Um das zu erreichen, verfolgen die Jülicher Wissenschaftler einen „Komplettansatz“: Ihre Arbeit beginnt bei der Suche nach neuen Materialien und ist erst mit dem anwendungsreifen Solarmodul beendet. Die besten Jülicher Module erreichen inzwischen einen Wirkungsgrad von zehn Prozent – ein kommerzielles Solarmodul aus amorphem Silizium bringt heutzutage etwa sieben Prozent.

*Für Anwendungen in der Architektur sind Dünnschicht-Solarzellen aus Silizium bereits jetzt wirtschaftlich: Das Paul-Löbe-Haus in Berlin gilt als derzeit größte gebäudeintegrierte Dünnschicht-Solaranlage der Welt.*



Solarzellen wandeln Sonnenlicht direkt in Strom, unerschöpflich, sauber. Dass ihnen trotzdem der große Durchbruch noch nicht gelungen ist, liegt an den Herstellungskosten. Sie machen den Strom aus der Sonne im Vergleich zu dem aus anderen Quellen auf kurze Sicht oft unrentabel. In Jülich arbeiten Forscher deshalb an kostengünstigeren Dünnschicht-Solarzellen. Sie verwenden zwar das gleiche chemische Element – Silizium – als „Lichtschluckler“, brauchen aber keine aufwändig hergestellten Siliziumkristalle wie herkömmliche Solarzellen, sondern nutzen zwei weitaus preiswertere Varianten: amorphes und neuerdings mikrokristallines Silizium.

„Unser Ziel ist ein technologisch ausgereifter Prototyp, industrienah und kostengünstig hergestellt“, erklärt Dr. Bernd Rech vom Jülicher Institut für Photovoltaik. Gemeinsam mit seinen Kollegen hat er eine neue Anlagenserie aufgebaut. Seit Anfang 2003 entstehen hier aus „nackten“ Glasschei-



Schichtaufbau einer Dünnschicht-Solarzelle, aufgenommen mit einem Elektronenmikroskop.

FZJ

In der Silizium-Beschichtungsanlage werden hochwertige Silizium-Schichten für Dünnschicht-Solarzellen hergestellt – auf bis zu 30 mal 30 Zentimeter großen Glaträgern. Diese Arbeiten sind eine wichtige Voraussetzung für die spätere industrielle Fertigung.

ben bis zu 30 mal 30 Zentimeter große Solarmodule. „Wir befassen uns aber nicht nur mit Herstellungsverfahren. Gleichzeitig entwickeln und untersuchen wir neue Materialien für unsere Solarzellen“, erläutert der kommissarische Institutsleiter Dr. Wolfhard Beyer. „Materialforschung und Technologieentwicklung gehen dabei immer Hand in Hand.“

### Unordentlich aber preiswert: amorphes Silizium

Amorphes Silizium, das Material, das die Jülicher Forscher für ihre Dünnschicht-Solarzellen verwenden, schluckt den sichtbaren Teil des

Sonnenlichts in einer weniger als einen Mikrometer dünnen Schicht ungefähr so gut wie ein hundertmal dickerer Silizium-Wafer in herkömmlichen Zellen. Das spart Material und damit Kosten.

Im amorphen Silizium herrscht unter den Atomen große Unordnung, und es gibt viele Defekte. Experten sprechen von offenen Bindungen. Um hieraus effektive Solarzellen zu bauen, braucht es daher noch eine weitere Zutat: Wasserstoff. Er soll die offenen Bindungen im amorphen Silizium möglichst gleichmäßig absättigen. „Der Wasserstoff macht aber noch viel mehr“, erklärt Wolfhard Beyer, „er baut sich ins Silizium-Netzwerk ein, erzeugt bestimmte Strukturen im amorphen Silizium, wandert durchs Material und unter bestimmten Bedingungen aus diesem heraus. All das wirkt sich auf die elektronischen und optischen Eigenschaften der Silizium-Schichten aus.“ Diesen Einfluss des Wasserstoffs haben die Jülicher Photovoltaik-Forscher deshalb genau unter die Lupe genommen. So haben sie beispielsweise herausgefunden, dass überschüssiger Wasserstoff ungleichmäßig im Material eingebaut wird und dabei Hohlräume erzeugt. Die aber wirken sich nachteilig auf die Eigenschaften der Silizium-Schicht aus.

### Mehr ist manchmal weniger

Dieses Wissen fließt in den Herstellungsprozess der amorphen Silizium-Schichten mittels so genannter Plasma-unterstützter Gasphasenabscheidung (PECVD) ein. Dabei werden die Schichten auf einem Träger, beispielsweise aus Glas, Metall oder Kunststoff, aufgebracht. Ähnlich wie in einer Leuchtstoffröhre wird dazu ein Gas in einer Vakuumkammer durch hohe Frequenzen angeregt. Dadurch brechen die Gasmoleküle





## Glossar Solarzellen

### Solarzellen aus kristallinen Siliziumscheiben:

Ihr Wirkungsgrad beträgt bis zu 17 Prozent in der Anwendung, wenn einkristallines Silizium benutzt wird. Silizium ist in diesen Zellen gleichzeitig Halbleiter- und Trägerschicht. Das führt zu einem relativ hohen Materialbedarf. Verwendet man multikristallines Silizium, können die Zellen kostengünstiger produziert werden, der Wirkungsgrad nimmt aber ab. Diese mono- und multikristallinen Solarzellen dominieren heute den Weltmarkt.

### Dünnschicht-Solarzellen aus Silizium:

Die Halbleiterschichten in Dünnschicht-Solarzellen sind kaum ein Hundertstel so dick wie die Siliziumscheiben in der klassischen Solarzelle. Sie werden bei niedrigen Temperaturen großflächig auf kostengünstige Substrate wie Glas oder Plastik aufgebracht und bestehen aus amorphem oder mikrokristallinem Silizium. Das spart Material- und Produktionskosten. Die Wirkungsgrade lagen bei Anwendungen bislang unter zehn Prozent.

### Dünnschicht-Solarzellen aus anderem Halbleitermaterial:

Neben Dünnschicht-Solarzellen aus Silizium gibt es auch solche, die auf Cadmiumtellurid und Kupferindiumdiselenid als Halbleitermaterial basieren. Ihre Wirkungsgrade liegen in der Anwendung bereits bei bis zu zehn Prozent. Die Prozesstemperaturen bei der Herstellung sind höher als bei Solarzellen aus amorphem und mikrokristallinem Silizium.

### Neue Wege

Solarzellenforscher versuchen darüber hinaus, die Wirkungsgrade mit vielen Tricks weiter zu verbessern:

In **Stapelzellen** werden unterschiedliche Halbleitermaterialien übereinander geschichtet, um ein breiteres Strahlungsspektrum zu nutzen. Die theoretische Obergrenze für den Wirkungsgrad steigt so von gut 30 auf bis zu 80 Prozent.

In **Farbstoffsolarzellen** werden Farbstoffe als lichtabsorbierende Schicht genutzt, der Ladungsträgertransport erfolgt in einem Elektrolyten.

In **Konzentratorzellen** wird Licht durch Spiegel- und Linsensysteme auf die Solarzellen fokussiert. Mit dieser Methode wurde bereits ein Wirkungsgrad von knapp 37 Prozent mit dreifach gestapelten Solarzellen erreicht. Diese Solarzellen sind sehr teuer, durch die Konzentration ist die benötigte Solarzellenfläche aber bis zu einem Faktor 1.000 kleiner.

Und bei den **Bifacial-Zellen** kann das Licht von beiden Seiten in die Solarzelle einfallen. So kann auch diffuses Licht, das von hinten in die Solarzelle einfällt, genutzt werden.

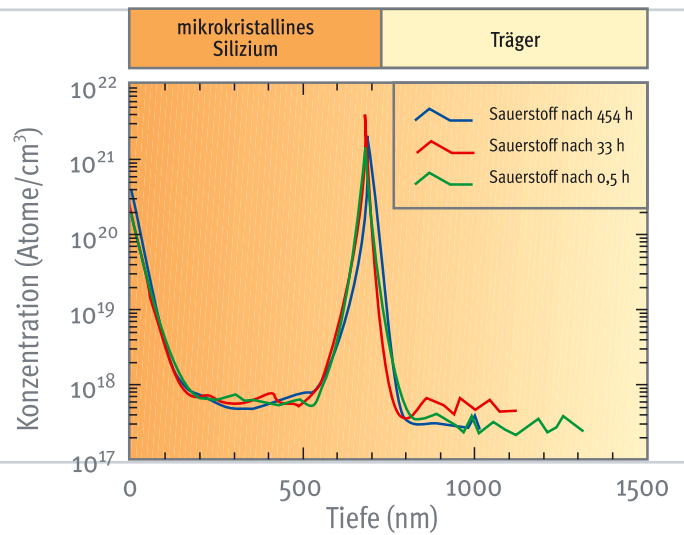
auf, und die Bruchstücke docken an der Oberfläche des Trägers an. Atomlage für Atomlage wachsen so hochwertige Schichten für Solarzellen heran. Als gasförmige Siliziumquelle nutzen die Forscher Silan (= Siliziumwasserstoff,  $\text{SiH}_4$ ). Reines Silan führt allerdings dazu, dass etwa zehn Prozent Wasserstoff in die fertige Schicht eingebaut werden. Das ist viel mehr, als zur Absättigung aller freien Silizium-Bindungsstellen nötig wäre. Die Folgen sind bekannt: unerwünschte Hohlräume.

Um dem entgegenzusteuern, „verdünnen“ die Wissenschaftler das Silan mit reinem Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ). Obwohl sie nun insgesamt mehr Wasserstoff in ihrer Apparatur haben, wird in die wachsende Silizium-Schicht – wie gewünscht – weniger Wasserstoff eingebaut. „Dieses scheinbar paradoxe Verhalten lässt sich leicht erklären“, verrät Wolfhard Beyer. „Der reine Wasserstoff, den wir zugeben, wird nämlich nicht primär in die wachsende Silizium-Schicht eingebaut. Er verbindet sich vielmehr mit den Wasserstoffatomen an der Oberfläche der Schicht und zieht sie so aus dem Verkehr.“ Über die zugegebene Wasserstoffmenge können die Wissenschaftler die Schichten immer weiter optimieren. Weitere Stellschrauben sind etwa der Druck, bei dem die Silizium-Schichten heranwachsen, oder die Temperatur des Trägers. Immer wenn sie einen Parameter ändern, überprüfen die Wissenschaftler, wie sich der Wasserstoff unter den neuen Bedingungen verhält. Bleibt er stabil im Silizium-Netzwerk verankert oder wandert er heraus? Bilden sich unerwünschte Hohlräume oder verteilt sich der Wasserstoff gleichmäßig? Mit verschiedenen analytischen Methoden können die Forscher diese Fragen beantworten.



Mit der Sekundärionen-Massenspektrometrie nehmen die Wissenschaftler Tiefenprofile von mikrokristallinen Silizium-Schichten auf, die unter verschiedenen Bedingungen hergestellt und anschließend an Luft gelagert wurden. In eine kompakte Schicht kann kein Sauerstoff eindringen (links): Die drei Kurven nach 0,5, 33 und 454 Stunden zeigen im mikrokristallinen Bereich der Probe keinen Anstieg in der gemessenen Konzentration der Sauerstoffatome.

Eine poröse, mikrokristalline Silizium-Schicht läuft dagegen mit Sauerstoff voll (rechts): Die Konzentration der Sauerstoffatome steigt im gleichen Bereich der Probe mit der Zeit an.



FZJ



Dr. Bernd Rech und Dr. Tobias Repmann zeigen eins der neuen Jülicher Solarmodule.

### Dieser Youngster altert nicht: mikrokristallines Silizium

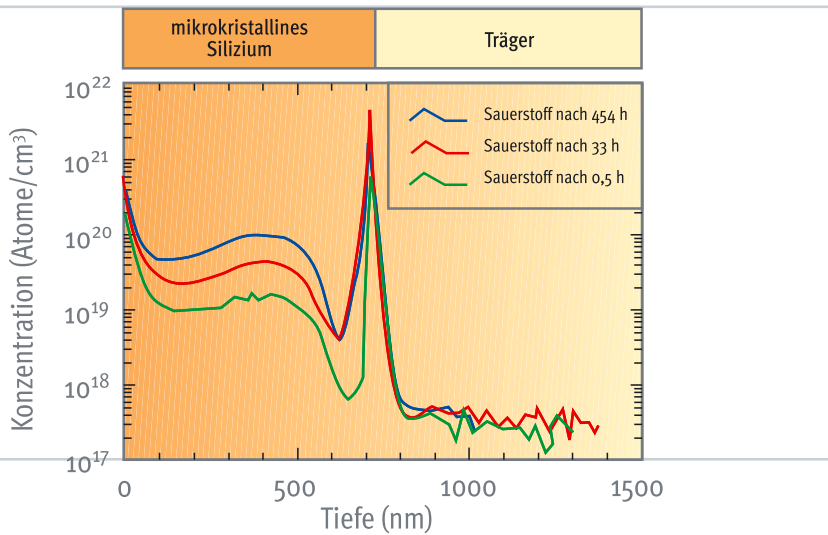
So effizient amorphes Silizium das Sonnenlicht schluckt, auch hier stoßen die Forscher auf einen Nachteil: Unter dem Einfluss von Sonnenlicht altert das Material, der Wirkungsgrad der Solarzelle nimmt ab. Jetzt schlägt die Stunde der anderen in Jülich verwendeten Siliziumvariante, des mikrokristallinen Siliziums. Der Neuling bei den Dünnschicht-Solarzellen zeigt diese Lichtalterung nicht. Zudem nutzt er auch die Anteile des Sonnenlichts, die sein amorphes Pendant nicht beachtet.

Im mikrokristallinen Silizium treten winzige Kristallite auf, die untereinander völlig regellos angeordnet sind. Bei der Herstellung spielt wieder einmal der Wasserstoff eine entscheidende Rolle. Das Mischungsverhältnis zwischen Silan und Wasserstoff entscheidet nämlich, ob amorphe oder mikrokristalline

Schichten entstehen. Aber die Tücke liegt im Detail: Unter bestimmten Bedingungen wächst ein sehr poröses mikrokristallines Material mit vielen Hohlräumen heran, das besonders anfällig für die unerwünschte Reaktion mit Sauerstoff oder Luftfeuchtigkeit ist – es wird oxidiert. „Hohlräume in schlecht präpariertem Material laufen geradezu mit Sauerstoff voll“, beschreibt Wolfhard Beyer die Beobachtung seines Teams. Aus ihren Arbeiten mit Wasserstoff in amorphem Silizium wissen die Forscher andererseits, was zu tun ist. Sie müssen die Abscheidungsbedingungen so wählen, dass sich erst gar keine Hohlräume bilden. „Dabei versiegeln wir praktisch die Grenzen zwischen den kleinen Kristalliten mit amorphem Material“, erklärt Wolfhard Beyer. „So entsteht eine kompakte Struktur, in die kein Sauerstoff mehr eindringen kann.“

### Silizium allein macht noch keine Solarzelle

Eine Dünnschicht-Solarzelle braucht mehr als nur optimal präpariertes Silizium. Sie besteht vielmehr aus mehreren dünnen Schichten: Durch eine erste Schicht aus transparentem und leitfähigem Oxid (TCO = transparent conductive oxide) fällt das Sonnenlicht auf die Silizium-Schicht. Hier



wird es geschluckt, und die dabei erzeugten Ladungsträger werden nach außen abtransportiert – fertig ist der Solarstrom. Die Zelle wird abgeschlossen mit einer metallischen Rückkontakt-Schicht. Es hat sich bewährt, mehrere Solarzellen übereinander zu stapeln. So steigt der Wirkungsgrad, wenn in einer Tandemzelle eine Solarzelle aus amorphem und die andere aus mikrokristallinem Silizium besteht: Diese Zellen nutzen das Sonnenlicht besser aus als jedes Material für sich allein.

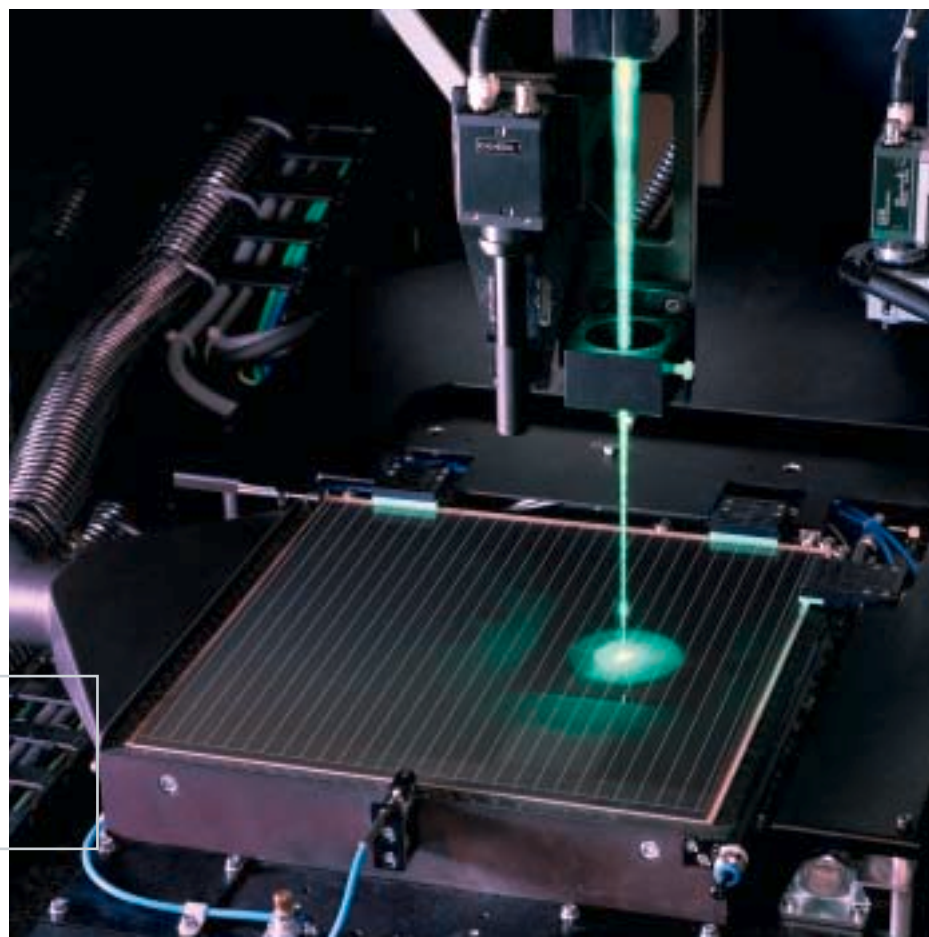
In einer ersten Stufe haben die Jülicher Wissenschaftler einzelne kleine Tandem-Solarzellen auf Glasscheiben hergestellt und deren Wirkungsgrad optimiert. Im nächsten Schritt wollen sie große Solarmodule herstellen, in denen viele einzelne Solarzellen in Serie geschaltet sind. Die komplette Prozesstechnologie dafür haben die Forscher bereits fertig gestellt: Einzelne Schichten werden dabei mit verschiedenen Verfahren nacheinander auf einem Glaträger abgeschieden. Ein Laser schneidet sie jeweils gleich nach dem Abscheiden in versetzte Streifen. Im fertigen Solarmodul entstehen so automatisch viele in Serie geschaltete Zellen – ein weiterer Vorteil der Dünnschicht-Technologie. Denn im Gegensatz zu herkömmlichen Modulen, bei denen einzelne kristalline Solarzellen erst gefertigt und dann verbunden werden, ist „die Verschaltung bei der Dünnschicht-Technologie bereits in die Herstellung integriert“, wie Bernd Rech erklärt.

Mit der neuen Fertigungsstraße können die Jülicher Forscher bis zu 30 mal 30 Zentimeter große Solarmodule herstellen. Jetzt müssen sie die hohen Wirkungsgrade, die sie bei den kleinen Einzelzellen erreicht haben, auf industrielle Größen übertragen. Die ersten Ergebnisse sind vielversprechend: Zehn mal zehn Zentimeter große Module schaffen inzwischen einen stabilen Wirkungsgrad von zehn Prozent! Und Bernd Rech ist optimistisch, dass durch die Kombination von neuen Materialien mit ausgefeilter Prozesstechnologie auch die großen Dünnschicht-Module Erfolgsmodelle werden – mit niedrigen Herstellungskosten bei hohem Wirkungsgrad.

Und so steht am Ende wieder eine Zahl.

## Dr. Renée Dillinger

Öffentlichkeitsarbeit  
Forschungszentrum Jülich



*Vollautomatisiert teilt ein Laser eine Dünnschicht-Solarzelle in schmale Streifen. So entstehen großflächige Solarmodule.*

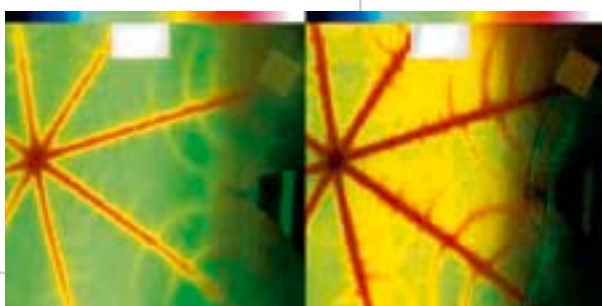
# Den Dialog zwischen Pflanzen und Boden belauschen

In Jülich soll ein Kompetenzzentrum für nicht-invasive Methoden der Umweltforschung entstehen.

Ein Beitrag aus dem Forschungszentrum Jülich

Spannende Dinge spielen sich oft im Verborgenen ab. Wie sieht es im Inneren einer Pflanze aus, wenn sie wächst? Was passiert mit Schadstoffen, die in Böden und Grundwasser gelangen? Um in das Innerste von Pflanzen und Böden zu schauen, ohne sie zu zerstören, stellen Forscherinnen und Forscher lebende Pflanzen unter Dauerbeobachtung oder setzen einen Acker unter Strom. Einzigartig ist die Vielfalt ihrer nicht-invasiven „Werkzeuge“, welche die Wissenschaftler entwickeln, um Pflanzen und Böden zu „durchleuchten“. Ihre Techniken und ihr Know-how auf diesem Gebiet wollen die Umweltforscher in Jülich jetzt in einem Kompetenzzentrum bündeln. Davon sollen auch Wissenschaftler anderer Organisationen profitieren.

*Die lebende Pflanze im Visier: Die Wissenschaftler setzen ein Blatt unterschiedlicher Wärmestrahlung aus und können mit Hilfe der Bildsequenz-Analyse den Wassergehalt und seine Verteilung im Blatt berechnen. Auf dem linken Bild ist das Blatt hoher Wärmestrahlung ausgesetzt, auf dem rechten Bild niedriger Wärmestrahlung.*



**P**rofessor Ulrich Schurr, Leiter des Instituts Phytosphäre, wirft einen Blick in die Zukunft. „Pflanzen werden sich in 50 Jahren anders entwickeln als heute. Bis zum Jahr 2050 wird – verursacht durch den Menschen – der Kohlendioxid-Gehalt in der Atmosphäre auf 450 parts per million (ppm) ansteigen“, prognostiziert er. „Damit wird er sich seit der vorindustriellen Zeit fast verdoppelt haben.“

Für Pflanzen ist Kohlendioxid überlebenswichtig, sie bauen daraus während der Photosynthese energiereiche Zuckerverbindungen auf. Aber ab einer Konzentration von 450 ppm sind die Pflanzen gesättigt, die Photosynthese lässt sich nicht weiter steigern. Damit fehlt zukünftig der „biogene sink“, also die Fähigkeit der Bio-

sphäre, zusätzlichen Kohlenstoff zu speichern. Das heißt: Das Treibhausgas Kohlendioxid reichert sich vermehrt in der Atmosphäre an. „Wir brauchen Pflanzen, die auch ein Überangebot von Kohlendioxid nutzen können und vermehrt Erträge liefern“, erklärt Ulrich Schurr die Motivation für diese Forschungen.

## Einblick ohne Eingriff

Dazu müssen die Umweltforscher aber zunächst untersuchen, was in Pflanzen passiert, wenn sich Umweltbedingungen verändern. Wie passen sie sich an, um beispielsweise einen heißen und trockenen Sommer zu überleben? Was beeinflusst sie in ihrem Wachstum und wie beeinflussen sie wiederum ihre Umgebung? Fragen dieser Art lassen sich unter dem Mikroskop an abgetrennten und zerstörten Pflanzenteilen nicht beantworten. Die Wissenschaftler sind daher auf der Suche nach neuen Methoden.



Den Blättern der Maispflanze wird Kohlendioxid angeboten, das mit dem kurzlebigen Isotop  $^{14}\text{C}$  radioaktiv markiert ist und von der Pflanze aus der Luft aufgenommen wird. Mit Radioaktivitäts-Detektoren verfolgen die Forscher an der lebendigen Pflanze den Weg des Kohlenstoffs von den Blättern bis zur Wurzel. Nach zwei Stunden ist keine Radioaktivität mehr vorhanden.

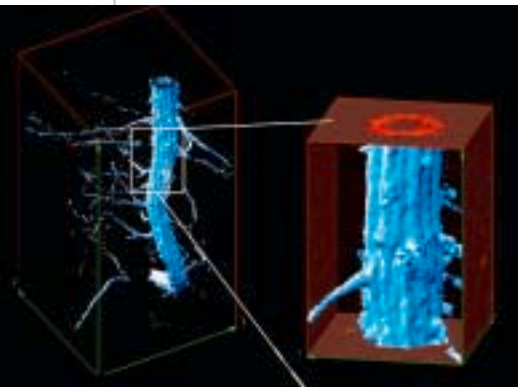
„Wir wollen die intakte Pflanze untersuchen, ohne sie zu zerstören oder ihre Umwelt durch die Messung zu beeinträchtigen“, erläutert Ulrich Schurr. „Dazu kombinieren wir, in enger Zusammenarbeit mit den Kollegen vom Institut Agrosphäre und einer Reihe anderer Institute des Forschungszentrums, eine Vielzahl von Strategien.“ Eine Kooperation mit Zukunft, die zu völlig neuen Einsichten führen wird. Die Wissenschaftler betrachten die Pflanze aber nicht isoliert. „Wir wollen das System Pflanze und Boden als Ganzes verstehen und untersuchen, wie sich Pflanzen und der Boden in ihrer Struktur und Funktion an unterschiedliche Umweltbedingungen anpassen“, formuliert Professor Harry Vereecken, Leiter des Instituts Agrosphäre, eines der gemeinsamen Forschungsziele. Dabei untersuchen die Forscher einzelne Pflanzen ebenso wie große Versuchsfelder. Im geplanten Kompetenzzentrum werden Biologen, Agrarwissenschaftler, Molekularbiologen, Physiker, Chemiker, Geophysiker und Informatiker ihre vorhandenen Techniken kombinieren und weiterentwickeln, um zentrale Fragen der Biogeosystem-Forschung zu beantworten. Ihr Know-how und die Ausstattung in den einzelnen Instituten sollen künftig auch externe Forscher nutzen.

### **Auch Pflanzen brauchen Sport**

Was genau aber können die Forscher in Jülich mit Hilfe ihrer besonderen Methoden erkennen? Zum Beispiel die Dynamik von wachsenden Pflanzen. Dazu setzen Ulrich Schurr und seine Mitarbeiter die Bildsequenz-Analyse ein: Eine Kamera macht Tag und Nacht Aufnahmen von einem

wachsendem Blatt. Diese Bildfolgen werden mit maßgeschneiderten Computerprogrammen ausgewertet. Auf diese Weise ermitteln die Wissenschaftler quantitative Daten, etwa zum Wachstum, zum Wassertransport oder zur Zellteilungsaktivität, die ihnen wichtige Informationen liefern. „Früher wurde die Längenzunahme von Gräsern mit einem Längenmessgerät erfasst, aber die Wachstumszone der Blätter an der Blattbasis konnte nicht analysiert werden“, erklärt Ulrich Schurr. Die Bildsequenz-Analyse zeigt, dass das Blatt zunächst an der Basis am stärksten wächst. Zugleich können die Wissenschaftler mit dieser Methode sichtbar machen, dass Pflanzen keineswegs regungslos an ihrem Standort verharren. Fortwährend bewegen sie ihre Blätter und Stängel in verschiedene Richtungen. „Pflanzen brauchen Sport“, kommentiert Ulrich Schurr den Bewegungsdrang seiner Untersuchungsobjekte. „Wenn sie gezwungen sind, in einer Position zu verharren, wachsen sie schlechter. Vermutlich finden sie so während des Wachstums ihre richtige Position.“

Außerdem macht die Methode sichtbar, dass Blätter und Wurzeln beim Wachsen vollkommen unterschiedlich gesteuert werden. Blätter besitzen eine „innere Uhr“ und wachsen vor allem nachts. Ändern sich die Umweltbedingungen, ändert sich ihre Wachstumsaktivität zunächst nicht. Wurzeln wachsen dagegen rund um die Uhr. Nur so können sie schnell reagieren, wenn sich in ihrer Umgebung das Nährstoffangebot ändert.



*Pflanzen in der Röhre: Im Magnet-Resonanz-Tomographen wird die Wurzel einer Distel dreidimensional dargestellt.*

FZJ

## **Pflanzen in der Röhre**

Ein anderes Beispiel für die Jülicher Methoden, Pflanzen ihre „Lebensgeheimnisse“ zu entlocken, ist die Magnet-Resonanz-Tomographie. Für Hirnforscher ist es heute schon selbstverständlich, mit modernen bildgebenden Verfahren sichtbar zu machen, was sich im Schädelinneren abspielt – ohne chirurgischen Eingriff. Zu manchen Zeiten sind im Jülicher Institut für Medizin jetzt aber keine Menschen in der Röhre des Magnet-Resonanz-Tomographen (MRT) zu finden, sondern Pflanzen. In dreidimensionalen Bildern offenbart sich hier den Wissenschaftlern der Blick auf die zellulären Strukturen. So können sie etwa beobachten, wie Wasser und Nährstoffe in den Leitbahnen fließen. Ulrich Schurr und Harry Vereecken sehen aber noch mehr: Nämlich wie Wurzeln in Böden mit unterschiedlichem Wasser- und Nährstoffgehalt wachsen. Viele Fragen lassen sich mittels dieser Methode, die gerade erst mit dem Medizin-Nobelpreis ausgezeichnet wurde, aufklären. Deshalb wün-

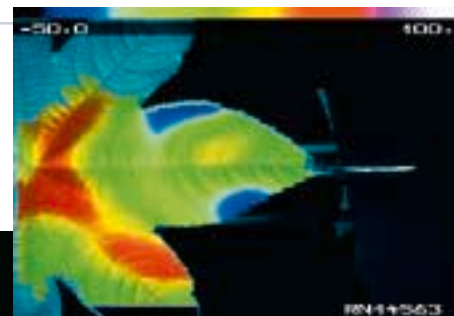
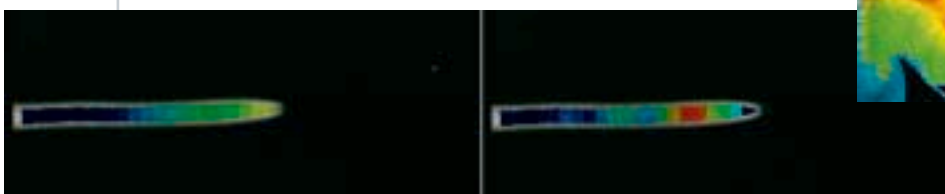
schen sich die Umweltforscher für ihr zukünftiges Kompetenzzentrum einen eigenen Magnet-Resonanz-Tomographen, genau passend für ihre Untersuchungsobjekte Pflanze und Boden.

Ein weiteres wichtiges Instrument im „Werkzeugkasten“ der Jülicher Umweltforscher ist das so genannte „Plant Tomographic Imaging System“ (PlanTIS). Es soll in dreidimensionalen Bildern zeigen, wohin sich Kohlenstoff und andere Nährstoffe in der Pflanze bewegen. Die entsprechenden Verfahren entwickeln die Wissenschaftler gemeinsam mit den Mathematikern und Ingenieuren vom Jülicher Zentralinstitut für Elektronik (ZEL). „Wir bilden die Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Technik“, erklärt Professor Horst Halling, Leiter des Zentralinstituts, die Kooperation. „Unsere Leistungen sind besonders dann gefragt, wenn es sich um komplexe Problemstellungen handelt, die technische Innovationen verlangen und für die kommerzielle Lösungen nicht verfügbar sind.“

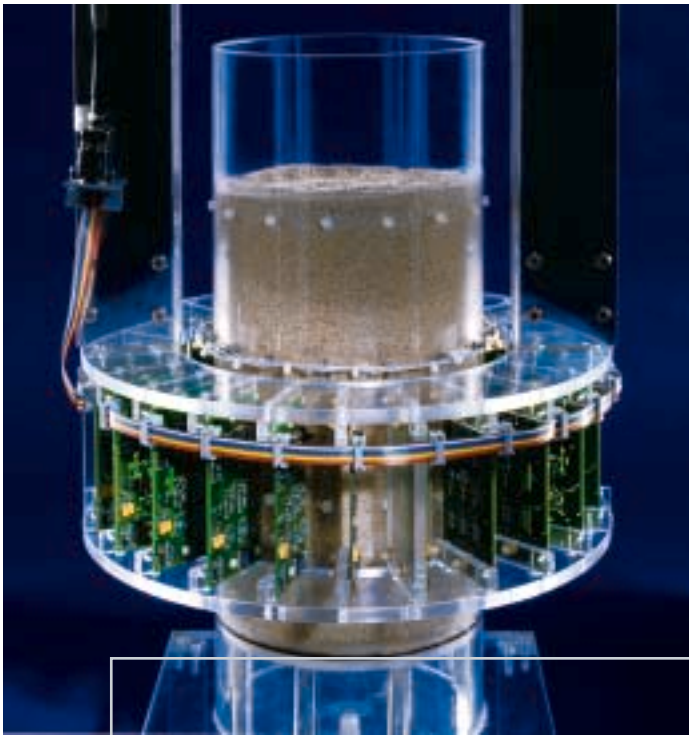
## **Achtung: Acker unter Strom**

Nicht allein in Pflanzen, auch im Boden beobachten Forscher in Jülich mit Hilfe nicht-invasiver Methoden Prozesse, die bisher unsichtbar waren. Die Jülicher Agrosphärenforscher haben zwar schon reichlich Erfahrung, wenn es um die Frage geht, was mit Fremdstoffen wie Pflanzenschutz- oder Düngemitteln im Boden und Grundwasser geschieht. Denn bereits seit zehn Jahren untersuchen sie mittels zahlreicher Bohrun-

*Mit der Bildsequenz-Analyse kann das Wachstum von Blättern oder Wurzeln analysiert werden. Unten links im Bild wurde eine Wurzel in einer Phase geringen Wachstums beobachtet, daneben eine Wurzel in einer Phase hohen Wachstums, gut erkennbar an der roten Zone im vorderen Drittel des Bildes. Die Angaben auf der Farbskala am oberen Rand des Blatt-Bildes verstehen sich als Wachstum in Prozent.*







Ein Ring mit Magnetfeldsensoren fährt an der Testsäule entlang und liefert in drei Raumrichtungen Informationen aus dem Inneren. Ändert sich zum Beispiel der Wassergehalt an einer Stelle in der Säule, beobachten die Wissenschaftler eine Veränderung im Magnetfeld eines eingespeisten elektrischen Stroms und kommen so verborgenen Prozessen auf die Spur.

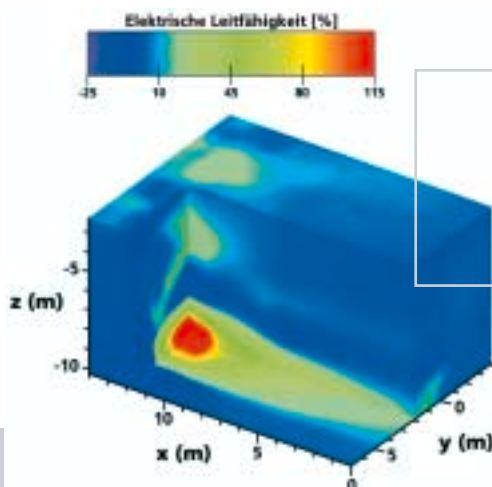
gen, die bis zu 15 Meter in die Tiefe eines Versuchsfeldes reichen, wie gelöste Stoffe mit dem Grundwasser transportiert werden. „Aber auch 100 Bohrungen helfen uns nicht weiter, wenn wir kontinuierliche Informationen brauchen und nicht nur Stichproben an einzelnen Orten“, erklärt Harry Vereecken.

Daher tüfteln Vereeckens Mitarbeiter schon lange an nicht-invasiven Verfahren, mit denen der Boden durchleuchtet werden kann: So wollen sie verfolgen, wie sich beispielsweise eine Schadstoffwolke im Grundwasser ausbreitet. Die Forscher setzen mittels Elektroden den Acker unter Strom und messen das elektrische Potenzial an vielen Stellen. So erhalten sie ein Gesamtbild des Untergrunds.

„Die Geoelektrische Tomographie ist keine neue Methode“, erklärt Harry Vereecken. „Geophysiker erkunden damit Bodenstrukturen. Wir

nutzen die Methode jedoch, um Informationen über den Transport von Stoffen im Boden zu erhalten.“ Die Wissenschaftler injizieren dazu eine Salzlösung in den Boden – stellvertretend für einen Schadstoff – und verfolgen kontinuierlich den Weg der wandernden Salzwolke, die sich durch ihre hohe elektrische Leitfähigkeit verrät. Doch damit nicht genug. Zusätzlich sollen Magnetfeldsensoren zum Einsatz kommen, die neben der elektrischen auch die magnetische Antwort auf die angelegte Spannung abfragen. Mit der „Magneto-Electrical Resistivity Imaging Technique“ – kurz MERIT – erhoffen sich die Agrosphärenforscher schärfere Bilder. Zurzeit testen sie diese Technik am Lysimeter, einem Zylinder aus Stahl oder Kunststoff mit ausgestochenem Bodenblock darin. Dieser Acker im Miniaturformat, der herkömmlich bepflanzt und mit Pflanzenschutzmitteln behandelt werden kann, wird mittels Elektroden unter Strom gesetzt.

Auch hier waren wieder die Technikspezialisten vom ZEL im Einsatz. Sie entwickelten einen Ring mit Magnetfeldsensoren, der am Lysimeter außen entlang fahren kann und Informationen über Bodenstruktur, Bodenfeuchte und Transportwege für Schadstoffe innerhalb des Erdblocks liefert. Die Messdaten werden in mathematische Modelle eingespeist. „Langfristig wollen wir mit diesen Methoden Vorhersagen treffen, wie sich Schadstoffe im Boden ausbreiten“, beschreibt Harry Vereecken die Perspektive.



Acker unter Strom: Dreidimensionale Darstellung der realen Ausbreitung einer in den Boden injizierten Salzwolke. Die Farbskala stellt die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit dar. Anhand der Farbverteilung sieht man, wie die Wolke durch den Boden wandert.

Dipl.-Biol. Annette Stettien

Öffentlichkeitsarbeit, Forschungszentrum Jülich



*Auf diesem Falschfarbenbild des Landsat-Satelliten sind die trocken gefallenen Wattflächen durch ihre hellere Farbe gut zu erkennen. Überlagert sind die Konzentrationsmessungen des Algenährstoffs Ammonium entlang einer Fahrt im Watt im August 2000. Größere Kreise bedeuten höhere Konzentration. Es ist deutlich zu sehen, dass die Konzentration in Richtung auf das Festland zunimmt. Ökosystemmodelle müssen in der Lage sein, diese und andere wichtige Eigenschaften des Wattenmeers zu beschreiben.*

# Datenflut erwünscht

Mit Hilfe einer Kombination von Messung und Modellierung wollen Forscher Einflüsse auf das Ökosystem Wattenmeer besser und früher erkennen.

Ein Beitrag aus dem GKSS-Forschungszentrum in Geesthacht

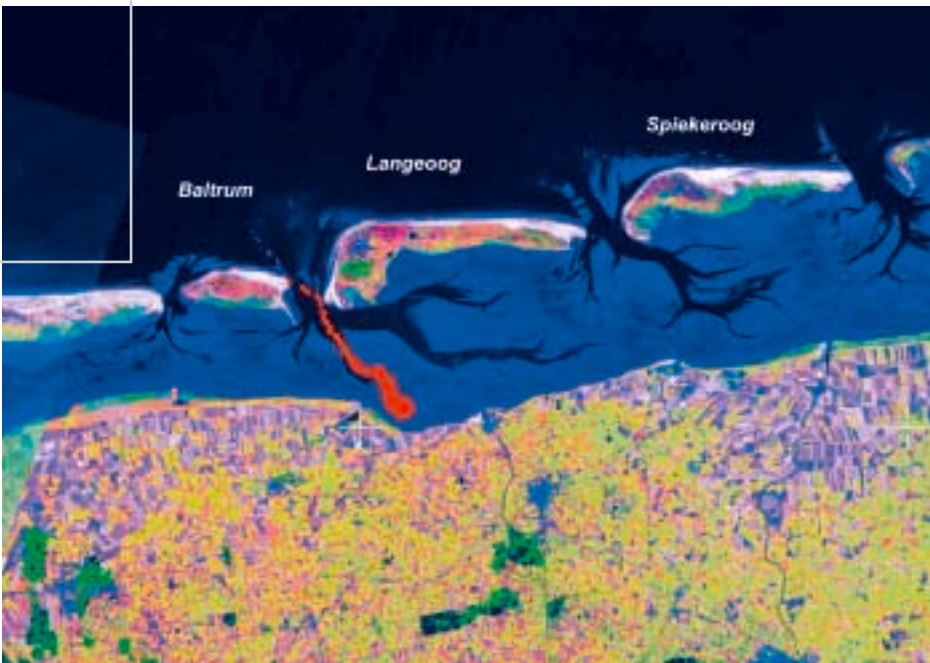
Im Frühjahr 1996 machten Wissenschaftler an der deutschen Nordseeküste eine Besorgnis erregende Entdeckung; die Wattoberfläche war über weite Strecken schwarz verfärbt. Hintergrund dieser „Schwarzen Flecken“: Die sauerstofffreie Bodenschicht – sonst in größeren Tiefen gelegen – reichte plötzlich bis an die Oberfläche. Solche Sauerstoffmangel-Situationen gab es seither auch in der Deutschen Bucht und der Ostsee. Forscherinnen und Forscher des GKSS-Forschungszentrums entwickeln jetzt ein Ökosystemmodell Wattenmeer. Es soll den Behörden helfen, die Situation in der Küstenregion besser zu kontrollieren.

**S**auerstoffmangel tritt auf, wenn das Wasser durch den Einfluss von Temperatur und Salz geschichtet ist, sodass Tiefenwasser nicht an die Oberfläche gelangen kann, um Sauerstoff „nachzutanken“. Durch bakterielle Zehrung kann der Sauerstoffgehalt dann so weit absinken, dass die Überlebensgrenze für Fische – zwei bis drei Milligramm pro Liter – unterschritten wird und die Fische sterben.

Im Wattboden ist die Situation noch etwas anders: Wenn es trocken fällt, wird der Sauerstoff von der Atmosphäre geliefert und von Lebewesen verbraucht, die auf oder direkt unter der Oberfläche leben, so dass der Boden in einigen Zentimetern Tiefe immer sauerstofffrei ist. Neu ist, dass die sauerstofffreie Schicht inzwischen manchmal bis an die Oberfläche reicht und das Watt schwarz verfärbt. 1996 starben dadurch viele Muscheln, Wattwürmer und viele andere Lebewesen, die in der Nähe der Wattoberfläche leben.

In den letzten Jahren konnten Wissenschaftler bereits aufklären, warum schwarze Flächen im Wattenmeer auftauchen. Außer dem sehr kalten Eis-Winter 1995/96 und dem frühen Auftreten der Algen-Frühjahrsblüte – ausschlaggebend für die Situation im Frühling 1996 – spielt generell die hohe Belastung des Wassers durch die Nährstoffe Phosphor und Stickstoff eine große Rolle. Deshalb ist es eine zentrale Aufgabe der zuständigen Behörden wie dem Bundesamt

*So deutlich wie diese Algen präsentieren sich andere Faktoren, die Aufschluss über Qualität und Sauerstoff-Gehalt des Wattenmeeres geben, den GKSS-Forschern nicht.*



*Zur Überwachung der Gewässerqualität in der Nähe der Küste müssen Dauermessstationen, Fernerkundung, Ferry Box-Messungen und Ökosystemmodellierung ineinander greifen. Hier wird gerade eine Sonde zur Bestimmung von physikalisch-chemischen Wassereigenschaften ausgebracht.*

für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), das Auftreten und die räumliche Verteilung dieser Nährstoffe im Jahresverlauf zu überwachen. Auch die neue europäische Wasserrahmenrichtlinie, die in nationales Recht umgesetzt werden muss, schreibt vor, dass eine definierte Wasserqualität in allen deutschen Binnen- und Küstengewässern eingehalten werden muss.

Um diese Aufgabe zu erfüllen, brauchen die Behörden möglichst umfassende Informationen darüber, wie sich Wasserinhaltsstoffe und Kleinlebewesen verteilen. Bei der klassischen Nährstoffmessung fährt ein Schiff regelmäßig einen bestimmten Kurs ab und nimmt dabei Wasserproben, die im Labor analysiert werden. Diese Methode ist relativ aufwändig, ermöglicht keinen Überblick über ein größeres Gebiet und liefert Ergebnisse nur mit zeitlicher Verzögerung.

### Neue Methoden liefern Meer-Werte

Deshalb arbeiten das GKSS-Forschungszentrum Geesthacht und andere Forschungseinrichtungen in Norddeutschland daran, die Messmethoden zu verbessern und die Ergebnisse zu einem Gesamtbild zusammenzuführen. Was bedeutet das konkret?

Seit mehreren Jahren werden physikalische Wasserparameter wie Temperatur, Trübung, Schwebstoffgehalt und Leitfähigkeit im deutschen Wattenmeer mit Hilfe von fest installierten Messpfählen gemessen. Die Daten, die Rückschlüsse auf den Qualitätszustand des Wassers erlauben, werden über Funk zu einer Station am Festland geschickt. Von dort aus gehen sie über Telefonleitung zur Auswertung zum GKSS.

Wichtige Informationen liefert auch der neue Umweltsatellit ENVISAT, der seit März 2002 die Erde in 800 Kilometern Höhe umrundet. Aus Satellitenaufnahmen im Bereich des sichtbaren Lichtes können Wissenschaftler unter anderem die Konzentration des Pflanzenfarbstoffs Chlorophyll im Wasser ableiten und daraus auf die Menge der insgesamt vorhandenen Algen schließen. Solche Satellitenszenen bieten einen Überblick über die Chlorophyll-Verteilung in einem großen Gebiet, das ist ihr Vorteil. Der Nachteil: Sie können dabei nur die oberste Wasserschicht erfassen. Ein weiterer Schritt, um sich ein genaueres und umfassenderes Bild vom



Zustand der Nordsee zu machen: Zu Beginn des Jahres 2002 hat GKSS auf der Fähre Cuxhaven-Harwich ein besonderes Messsystem eingebaut: die so genannte „Ferry Box“. Damit werden automatisch die wichtigsten Gewässerqualitätsparameter gemessen – unter anderem Nährstoffkonzentrationen und Algenklassen. Auf diese Weise erhalten die Wissenschaftler Nährstoffdaten entlang des Schiffskurses der Fähre, der 40 Kilometer vor der Küste parallel zum ostfriesischen Wattenmeer verläuft.

Für die ersten beiden der genannten Methoden müssen die Forscherinnen und Forscher so genannte Validierungsmessungen durchführen, um die Ergebnisse der neuen Methoden zu bestätigen. Im Fall der



Für ein Ökosystemmodell ist die übliche Aufteilung des Gebietes (Nordsee, Wattenmeer) in Gitterpunkte zu aufwändig. Daher unterteilt man das Gebiet in Boxen (auf dem Bild als schwarze Linie zum Meer hin erkennbar), innerhalb derer sich die Wassereigenschaften

möglichst wenig ändern. Das Verhalten des Ökosystems wird dann so bestimmt, dass zunächst der Austausch von Wasser und Wasserinhaltsstoffen zwischen den Boxen berechnet wird (dazu braucht man ein hydrodynamisches Modell). Anschließend wird die Entwicklung der biologischen Vorgänge (Phytoplanktonwachstum, bakterielle Zersetzung etc.) innerhalb der Boxen berechnet. Üblich ist dabei ein Zeitschritt von einem Tag. Die Abbildung zeigt die Boxeneinteilung im Watt hinter den Inseln Norderney, Baltrum, Langeoog und Spiekeroog (von links). Die Farben geben die mittlere Wassertiefe innerhalb der Boxen an.

GKSS

Das Flachwasserschiff „Ludwig Prandtl“ im Einsatz. Wegen des geringen Tiefgangs ist die „Prandtl“ für Messungen im Wattenmeer besonders gut geeignet. Der Container auf dem Achterdeck enthält das Nasslabor sowie Kühlschränke und -truhen für die Probenaufbewahrung.



Parameter ableiten. Die Fähre schließlich liefert zwar eine Fülle von Daten, aber nur entlang einer Linie.

## Was Modelle für das Ökosystem leisten

Um ein Gesamtbild zu erzeugen, versuchen die Wissenschaftler, Ökosystemmodelle zu entwickeln, die zum einen die vorhandenen Messdaten intelligent interpolieren können, weil sie das normale Verhalten des Ökosystems Nordsee „kennen“. Zum anderen setzen die Forscher auch deshalb auf Modelle, weil sie mit diesem Instrument Vorhersagen erstellen können. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass das Verhalten des Ökosystems im Großen und Ganzen bekannt ist.

Für die offene Nordsee gibt es schon vielversprechende Ansätze: Hier hat zum Beispiel eine Forschergruppe, an der neun Meeresforschungsinstitute beteiligt waren, das European Regional Seas Ecosystem Model (ERSEM) entwickelt. Dieses Modell hat sich in der Forschergemeinschaft etabliert; es kann für die letzten 40 Jahre den sich verändernden Zustand der Nordsee beschreiben. Wenn es gelingt, ein solches Modell mit den verschiedenen neu gewonnenen Daten zu füttern, wenn es diese Daten assimiliert, dann kommt man dem Überblick über die Gesamtsituation bereits nahe.

Fernerkundung per Satellit muss beispielsweise geklärt werden, wie die vom Satelliten gemessene Farbe mit der Chlorophyllkonzentration zusammenhängt. Für diese Messungen nutzen die Forscherinnen und Forscher hauptsächlich das GKSS-eigene Flachwasserschiff Ludwig Prandtl.

Aber Validierung ist nur der erste Schritt. Der zweite und entscheidende ist, diese sehr verschiedenen Messgrößen zusammenzufassen und mit den „klassisch“ erhobenen Proben zu vergleichen. Denn nur dadurch entsteht ein Überblick über die ökologische Gesamt-Situation im Wattenmeer und in der Deutschen Bucht. Zumal jede einzelne Methode für sich genommen Mängel aufweist: Messpfähle beispielsweise liefern zwar Daten mit hoher zeitlicher Auflösung, aber nur an einem Punkt. Satelliten erfassen zwar simultan ein großes Gebiet, aber daraus lassen sich nur wenige



*Die Sandbänke vor der Insel Spiekeroog verlagern sich ständig; die Insel würde ohne die Stabilisierungsmaßnahmen des Menschen dauernd ihre Gestalt verändern. Das Wattenmeer ist ein hoch dynamisches System, dem Wechsel von Ebbe und Flut, Tag und Nacht, Stürmen und Regen ausgesetzt. Alle diese Einflussfaktoren gilt es, bei einer Ökosystemmodellierung in geeigneter Weise zu berücksichtigen.*

## Ein Modell für das Wattenmeer

Für das Wattenmeer ist die Situation allerdings noch nicht so weit gediehen: Zum einen gibt es dort vielfältige Einflüsse vom Festland, zum anderen werden zum Beispiel im niedersächsischen Teil nur wenige Stellen routinemäßig beprobt. Das Fernziel der Forscher ist zwar, ein Ökosystemmodell für die Nordsee und eines für das Wattenmeer miteinander zu verbinden. Dazu müssen sie allerdings zunächst ein Wattenmeer-Modell ganz neu entwickeln. Deshalb hat GKSS begonnen, mit den auf diesem Gebiet erfahrenen Universitäten Hamburg und Oldenburg zusammenzuarbeiten und richtet selbst eine Gruppe für Ökosystemmodellierung ein.

Die Wissenschaftler, die ein solches Modell entwickeln, fragen zuerst: Welchem Zweck soll es dienen? Dann entscheiden sie, welche zeitliche und räumliche Auflösung sie brauchen. Im Wattenmeer stellt sich beispielsweise die wichtige Frage: Muss die Tidebewegung berechnet werden? Oder können die Wasserverhältnisse über einen Tag gemittelt werden? Weil sich Veränderungen im ökologischen Zustand des Wattenmeeres normalerweise nicht in kurzen Zeiträumen abspielen, halten die Forscher einen Zeitschritt von einem Tag für gerechtfertigt.

Nach solchen grundlegenden Entscheidungen wird das Wattenmeer zunächst in eine Anzahl von Kompartimenten (Boxen) eingeteilt, deren Wassertiefe und biologische Besiedelung möglichst homogen sind. Dann wird der (tägliche) Wasseraustausch über die Grenzen der Kompartimente hinweg berechnet. Innerhalb jeder dieser Boxen wird dann der Ablauf von biochemischen Reaktionen über einen Tag ermittelt. Mit diesem Verfahren, das auch im Modell ERSEM zum Einsatz kommt, kann man die Entwicklung des Systems über eine längere Zeit nachvollziehen.

Wichtig ist allerdings, dass das Wattenmeermodell mit dem Nordsee-Modell verbunden wird und dass die Einflüsse auf das System bekannt sind. Solche Einflüsse sind Einträge vom Land her, Verwirbelung durch Stürme, Niederschlag und die biochemischen Umsetzungen im System.

## Vision:

### die große Vereinigung der Modelle

Die Vision, die die Wissenschaftler in den nächsten zehn Jahren verwirklichen wollen, ist ein gekoppeltes Modellsystem Nordsee/Watt. Weil eine solche nationale Aufgabe nicht von einer Forschungseinrichtung allein erfüllt werden kann, arbeitet das GKSS-Forschungszentrum mit den Universitäten Hamburg, Oldenburg und Kiel, dem Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven und dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zusammen. Das Modell soll die Daten aus Dauermessstationen, Fernerkundung und Ferry Box-Messungen integrieren und später vom BSH betrieben werden. Ein ehrgeiziges Vorhaben und, wenn es gelingt, ein großer Schritt nach vorn: Denn ein solches Modellsystem würde nicht nur einen schnellen Überblick über die augenblickliche ökologische Situation in Nordsee und Wattenmeer verschaffen. Es wäre auch in der Lage, Fragen zu beantworten wie: Reicht eine Verringerung der Stickstoffeinträge aus den Flüssen um 50 Prozent aus, um die Eutrophierung des Wattenmeers, also die Überdüngung mit der Folge der gefährlichen Sauerstoffzehrung, nachhaltig zu verringern? Und genügt ein solches Modell, um rechtzeitig vor Krisen wie den anfangs erwähnten Sauerstoffmangelsituationen zu warnen?

**Dr. Götz Flöser**

Institut für Küstenforschung  
GKSS-Forschungszentrum Geesthacht

## Zu Land und aus der Luft – Umweltforschung in der Arktis

Die Werkzeuge ändern sich – die globale Bedeutung der Arktis für die Umweltforschung bleibt.

Ein Beitrag aus dem Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven

Hohe nördliche Breiten, nur noch 1.000 Kilometer bis zum Nordpol: ein entbehrungsreiches Leben im ständigen Kampf gegen Kälte, Hunger und Eisbären. Mit solchen Widrigkeiten musste Carl Koldewey fertig werden, als er 1868 die erste deutsche Nordpolexpedition nach Grönland und Spitzbergen führte. Heute haben leistungsstarke Polarflugzeuge, GPS-Navigation und „State-of-the-art“-Messsysteme die zerbrechlichen Yachten, Hundeschlitten und Kompassse ersetzt. Geblieben ist die Bedeutung der Arktis für die globale Klimaentwicklung, als Motor für die Zirkulation der Weltmeere und Wettermaschine, die auch Nord- und Mitteleuropa beeinflusst.



*Das NDSC-Observatorium der deutsch-französi-  
schen Station in Ny-Ålesund mit dem grünen  
Laserstrahl der Lidar-Anlage, dessen reflektierte  
Signale die Aerosolverteilung in unterschied-  
lichen Höhen der Atmosphäre wiedergeben.*

**A**uch über hundert Jahre nach der An-  
kunft Koldeweys zieht es Wissenschaftler  
verschiedenster Fachrichtungen an die  
Westküste Spitzbergens, um die Prozesse zu  
erforschen, die Klima- und Umweltverände-  
rungen steuern. 1991 wurde dort die vom  
Alfred-Wegener-Institut für Polar- und  
Meeresforschung (AWI) betriebene Kolde-  
wey-Station eingeweiht, ein wichtiger Be-  
standteil des internationalen Forschungs-  
standorts Ny-Ålesund am Königsfjord von  
Spitzbergen. Seit Mai 2002 sind in Ny-Åle-  
sund die deutsche und die französische Sta-  
tion zu einer gemeinsamen Forschungs-  
plattform zusammengeschlossen. Einer ih-  
rer ersten großen Forschungsaufträge wird  
das Projekt ASTAR sein.



## ASTAR – Dicke Luft über den Polarregionen

Ziel des Atmosphärenprojektes ASTAR (Arctic Study of Tropospheric Aerosol, Clouds and Radiation) unter der Führung des AWI und des japanischen NIPR (National Institute of Polar Research Tokyo) ist unter anderem die Messung der „dicken Luft“ über der Arktis. Im Frühjahr 2004 wird die deutsch-französische Station Stützpunkt für die französischen, deutschen, japanischen und schwedischen Wissenschaftler sein, die die optischen, chemischen und mikrophysikalischen Eigenschaften des arktischen Aerosols untersuchen.

Aerosole sind Schwebstoffe in der Luft, die Sonneneinstrahlung aufnehmen oder reflektieren. Als Kristallisationskeime können sie außerdem die Entstehung von Wolken auslösen und so das Klima beeinflussen. Viele Aerosole stammen aus Industriegebieten und bilden im Frühjahr graue Wolken in der reinen Polarluft, den „Arctic Haze“.

In vergangenen Missionen konnten Forscher zeigen, dass in Luftschichten, in denen viele Aerosole auftreten, der Anteil an giftigen Schwermetallen drastisch zunimmt. AWI-Wissenschaftler fanden schon im Frühjahr 2000 heraus, dass in diesen Luftschichten die Konzentrationen der Schwermetalle Blei und Cadmium im Vergleich zur klaren Polarluft um das Drei- bis Fünffache erhöht sind. Die Atmosphärenchemiker und Physiker wollen mit dem auf drei Jahre angelegten Projekt ASTAR nun unter anderem detailliert Auskunft darüber geben, wie sich Aerosole in der Atmosphäre verteilen und ausdehnen.

An der deutsch-französischen Station in Ny-Ålesund hat man Erfahrung mit atmosphärischen und meteorologischen Beobachtungen: Seit fünfzehn Jahren steigen regelmäßig große, mit Helium gefüllte Ballons über den Laborgebäuden der Koldewey-Station empor und verschwinden, vom Winde verweht, in der Atmosphäre, wo sie in einer Höhe von etwa 30 Kilometern platzen. Während des Fluges senden die Schuhkartongroßen Messgeräte, die von den Ballons getragen werden, meteorologische und aerologische Daten über Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder die Ozonkonzentration der Atmosphäre zur Auswertung an die Koldewey-Station.

*Vor 150 Jahren kamen die ersten Forscher zum Nordpol. Seitdem hat sich vieles geändert. Die Schönheit des Polarlichts ist geblieben.*

Seit 1995 ist an der Station auch ein zweistöckiges Observatorium in Betrieb. Von dort können die Atmosphärenforscher die polare Atmosphäre vom Boden aus analysieren, zum Beispiel mit Hilfe eines so genannten Infrarotspektrometers, das Spurenstoffe in der Atmosphäre erfasst und mit einem Laser-„Radar“, das die Ozonkonzentration und den Aerosolgehalt in der Höhe bestimmt.

## Über den Wolken

Um die Klimawirkung der Aerosole und einige der für die Wolkenbildung entscheidenden Prozesse genauer zu untersuchen, wollen die Atmosphärenforscher nun aber selbst hoch hinaus – der Verteilung der klimawirksamen Schmutzpartikel auf der Spur.

Die beiden Forschungsflugzeuge „Polar 2“ und „Polar 4“, die seit 1983 vom AWI betrieben werden, machen's möglich. Die zweimotorigen Maschinen sind Sonderversionen des Mehrzweckflugzeuges Dornier 228/101: Sie haben Rad-Skifahrwerke, mit

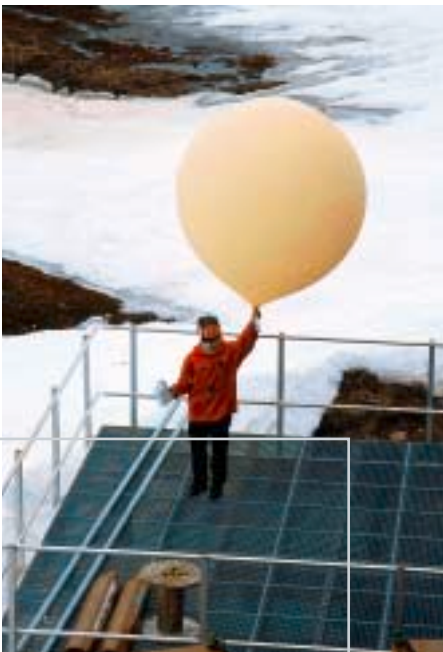
## Forschung aus der Luft

Die Forschungsflugzeuge „Polar 2“ und „Polar 4“ des AWI nehmen im Schnitt jedes Jahr an drei längeren wissenschaftlichen Kampagnen in Arktis und Antarktis teil, an denen neben dem AWI auch verschiedene Universitäten aus dem In- und Ausland beteiligt sind. Zuhause sind die beiden Flugzeuge seit November 2001 in Bremerhaven am Flughafen Luneort.

Die Polarflugzeuge werden hauptsächlich für geophysikalische und glaziologische Fragestellungen eingesetzt. So wurde zum Beispiel im Rahmen des europäischen Eiskern-Tiefbohrprojekts EPICA (European Project for Ice Core Drilling in Antarctica) in der Antarktis ein spezielles Eisdicken-Radar zur Vorerkundung eingesetzt, um die Eismächtigkeit und die interne Struktur des Eises in einem mehr als eine Million Quadratmeter großen Gebiet in Dronning Maud Land zu erfassen.



AWI



An der Koldewey-Station:  
Ein Ballon wird mit Helium befüllt,  
um eine Radiosonde bis in Höhen von  
30 Kilometern zu tragen.

Die Reichweite der Polarflugzeuge beträgt – je nach Ausrüstung und Passagierzahl – bis zu 3.500 Kilometer. Maximal 15 Passagiere können mitfliegen. Bei Messflügen sind es meist fünf Wissenschaftler oder Ingenieure und zwei Piloten, die mit Geschwindigkeiten bis zu 370 Kilometern pro Stunde die Weite der (Ant)-Arktis bezwingen. Für die Integration der Geräte in die Flugzeuge ist die Bremerhavener Firma Optimare Sensorsysteme AG zuständig.

Neben den wissenschaftlichen Einsätzen übernehmen die Polarflugzeuge – vorwiegend in der Antarktis – auch logistische Aufgaben. Zwar sind sie klein und haben eine vergleichsweise geringe Zuladung, aber gerade deshalb können sie auch auf Schnee- und Eisflächen landen, die für schwerere Maschinen ein Problem sind. Bei den deutschen Antarktis-Stationen „Neumayer“ und „Kohnen“ werden eigens für die Polarflugzeuge für jede Saison Landebahnen auf dem Eis angelegt. Für den Transferflug von Bremerhaven zur Neumayer-Station in die Antarktis braucht ein Polarflugzeug rund drei Wochen.

In Notfällen kann in den nahezu unbewohnten Polargebieten oft nur vom Flugzeug aus Hilfe geleistet werden. Auch dafür stehen die Polarflugzeuge des AWI bereit.

Weitere Details zu den Flugzeugen:

<http://www.awi-bremerhaven.de/Polar/flugzeuge-d.html>. ■





Nationen die Polarregionen zu erforschen, zeichnet sich heutige Forschung durch internationale Kooperationen aus. Aktuelles Beispiel ist die vom französischen Polarforschungsinstitut IPEV (Institut Polaire Francaise Paul Emile Victor) und dem deutschen AWI gemeinsam betriebene Polarforschungsplattform in Ny-Ålesund. Die Partner nutzen nicht nur Personal und Infrastrukturen wie Gebäude, Observatorien und Instrumente zusammen. Sie kündigen auch Forschungsmöglichkeiten gemeinsam

denen sie auf Betonbahnen oder Schneepisten starten und landen können, und die Maschinen arbeiten noch bei Temperaturen von bis zu minus 54 Grad Celsius. Wichtig in der kalten Polarluft!

Vom Flugzeug aus können die Wissenschaftler Verteilung und Eigenschaften der Aerosole mit Partikelzählern und speziellen Sonden direkt erfassen. Sie untersuchen die Reflexion der Sonnenstrahlung am hellen Meereis und deren Transport durch Luftschichten und Wolken. Die Ergebnisse sind wichtig für ein besseres Verständnis des Strahlungstransportes und somit auch des Treibhauseffektes. Mit einem anderen Spezialgerät, dem Meteopod, sind direkte Messungen von Luftströmungen in der polaren Atmosphäre möglich. Wind, der über das Meereis weht, wird durch Presseisrücken verwirbelt, und es entstehen Turbulenzen, die das weitere Wetter- und Klimageschehen beeinflussen. Die Bewegung von warmen Luftschichten in die Höhe (Konvektion) können die Forscher ebenfalls direkt messen. Die Daten fließen in aktuelle Klimamodelle ein.

### *Kooperation statt Konkurrenz*

Selbst wenn heftige Schneestürme über den Königsfjord auf Spitzbergen fegen, können die Piloten vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) die Forschungsflugzeuge sicher landen: Zwei Radarhöhenmesser helfen ihnen dabei. Technik, die den Pionieren der Polarforschung wie Carl Koldewey vor über hundert Jahren nicht zur Verfügung stand. Doch nicht nur die Ausrüstung hat sich geändert. Statt im Wettlauf der

an und kooperieren bei der Begutachtung von Forschungsprojekten. Auf diese Weise wollen sie die Zusammenarbeit deutscher und französischer Forscher in Spitzbergen verstärken.

Auch die Wissenschaftler des Projekts ASTAR setzen auf internationale Kooperationen. Nach den Aerosol-Messungen in der Arktis wollen sie 2006 ihre Untersuchungen in der Antarktis fortsetzen. Dann werden sie von der deutschen Neumayer-Station und der japanischen Station Syowa aus operieren. Zusätzliche bodengebundene Messungen sind an Dome C, einer französisch-italienischen Station, an der US-amerikanischen Amundsen Scott Basis und an dem italienischen Camp in der Terra Nova Bay geplant.

**Dr. Andreas Herber**  
**Dr. Roland Neuber**

Fachbereich Klimasysteme,  
Physikalische und chemische Prozesse in der Atmosphäre  
Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven

# Unsichtbar und einflussreich – der Geodynamo

Forscher erkunden das Magnetfeld der Erde.  
Die Phänomene, auf die sie dabei stoßen, reichen vom Wetter  
im All bis zu den Strömungen der Meere.

Ein Beitrag aus dem GeoForschungsZentrum Potsdam

Menschliche Sinne können es zwar nicht wahrnehmen – aber das Magnetfeld der Erde ist von höchster Bedeutung für die moderne Zivilisation. Denn das vom Geodynamo erzeugte Feld schützt die Erde vor hochenergetischer Strahlung aus dem Weltall. Umgekehrt gilt: Wenn sich das geomagnetische Feld verändert, kann dies gefährliche Auswirkungen auf der Erde haben. Der Forschungssatellit CHAMP des GeoForschungsZentrums Potsdam registriert mit modernster Messtechnik solche Veränderungen.

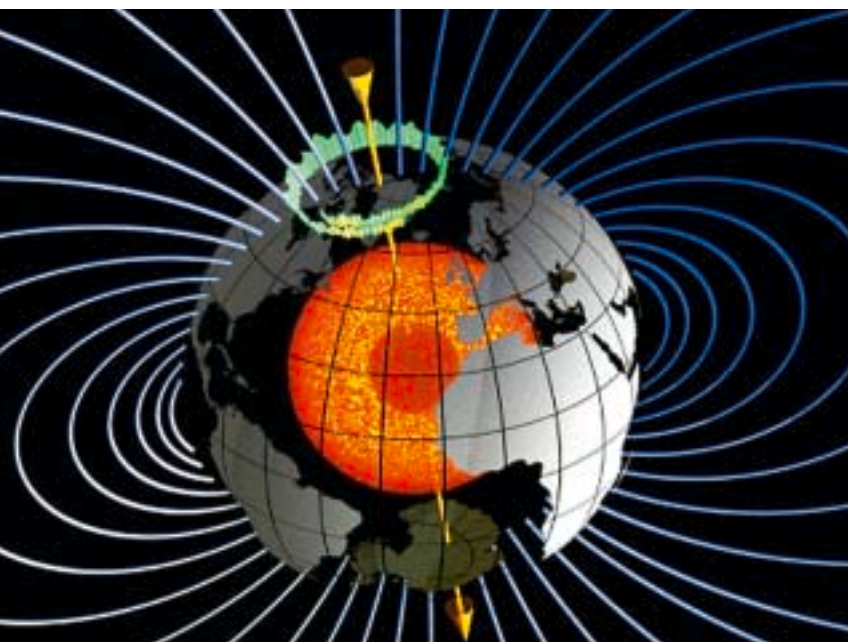
**A**lbert Einstein soll 1905, kurz nachdem er seine spezielle Relativitätstheorie abgeschlossen hatte, den Ursprung des geomagnetischen Feldes als eines der wichtigsten noch ungelösten Probleme der Physik bezeichnet haben. Das ist verständlich, wenn man be-

denkt, dass damals der Aufbau der Erde noch weitgehend unbekannt war und damit die Voraussetzung fehlte, um sich eine Vorstellung von den physikalischen Prozessen zu machen, die das Magnetfeld erzeugen. Heute wissen wir, dass sich der Geodynamo im flüssigen Teil des Erdkerns befindet.

Er besteht im Wesentlichen aus flüssigen Metallen, die unter bestimmten Bedingungen ein sich selbst erhaltendes Magnetfeld erzeugen.

Wie der Geodynamo genau funktioniert, ist allerdings immer noch ein aktuelles Forschungsthema, denn längst nicht alle Fragen der Forscherinnen und Forscher sind schon aufgeklärt.

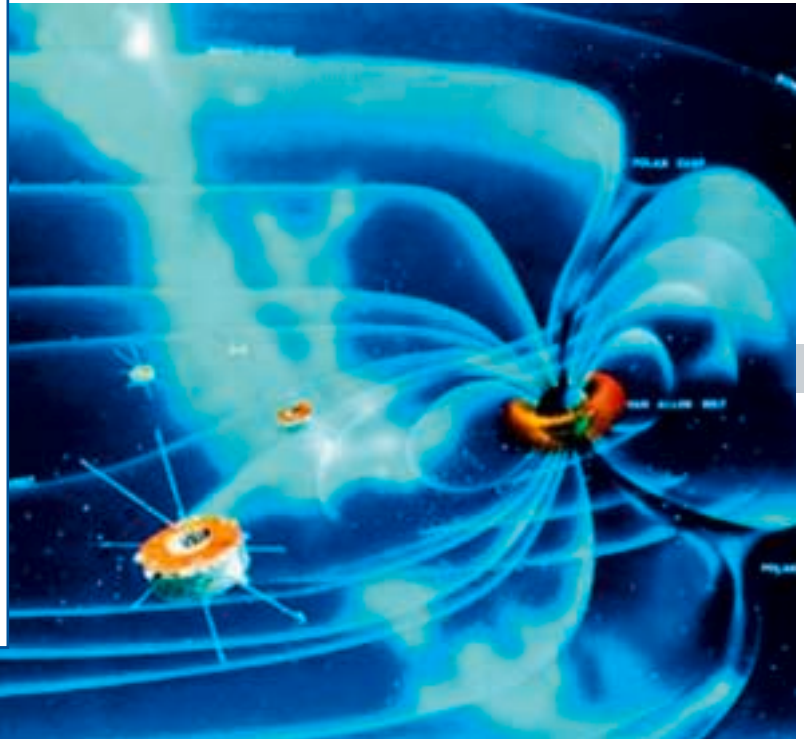
*Gut zu erkennen auf dieser schematischen Darstellung: Der rote Erdkern und die Feldlinien des Erdmagnetfeldes. Der grüne Ring steht für ein Polarlicht. Solche Lichter entstehen durch starke Sonneneruptionen. Vor den unschönen Folgen des Weltraumwetters schützt das Erdmagnetfeld.*



## Die Magnetosphäre – ein Kokon um die Erde



Die Magnetosphäre umfasst den Raum, innerhalb dessen das Erdmagnetfeld wirkt. Die Form des geomagnetischen Feldes ähnelt in Erdnähe der eines Stabmagneten, der entlang der Drehachse ausgerichtet ist. Befände sich die Erde in einem Vakuum, würde das Magnetfeld beliebig weit in den Raum hinaus reichen. Durch den anströmenden Sonnenwind bekommt die Magnetosphäre eine kometenförmige Gestalt, zusammengedrückt auf der Tagseite und weit herausgezogen auf der Nachtseite. Es bildet sich dabei eine wohldefinierte Grenzschicht zwischen Erdmagnetfeld und Sonnenwind, die so genannte Magnetopause. An normalen Tagen ist diese Magnetopause undurchlässig für den Sonnenwind. Während magnetischer Stürme gelangen jedoch erhebliche Mengen des Sonnenwindplasmas bis in die Magnetosphäre, und es kommt zu den bekannten Störungen. Nimmt die Feldstärke weiterhin ab, schrumpft die Magnetosphäre. Eines Tages könnten sich unsere Telekommunikationssatelliten in etwa 36.000 Kilometern Höhe dann ungeschützt im Sonnenwind befinden. ■



### Vom Satelliten registriert: Das Magnetfeld nimmt ab

Neue Erkenntnisse über das geomagnetische Feld hat der Forschungssatellit CHAMP des GeoForschungsZentrums Potsdam gebracht. Versehen mit empfindlichen Sensoren, die das magnetische Feld registrieren, umkreist er seit über drei Jahren mehr als 15-mal pro Tag die Erde. Schon nach kurzer Zeit lieferte er den Forschern eine nahezu lückenlose Kartierung der magnetischen Feldverteilung.

Allerdings ist das Magnetfeld, das er misst, alles andere als konstant: In der geologischen Vergangenheit wurde die Erde schon mehrfach regelrecht umgepolt, wurden Nord- und Südpol komplett vertauscht. Durch CHAMP können die Wissenschaftler solche Prozesse jetzt mit neuester Messtechnik verfolgen. Dabei haben sie entdeckt: Der magnetische Nordpol hat sich wieder auf den Weg gemacht. Von Kanada aus wandert er mit einer Geschwindigkeit von circa 50 Kilometern pro Jahr in Richtung Sibirien. Generell haben Polwanderungen eine unangenehme Begleiterscheinung – die Magnetfeldstärke nimmt kontinuierlich ab. Auch dieses Phänomen zeigt sich bei den aktuellen Messungen wieder; sie verzeichnen eine rasante Abnahme des Magnetfeldes im Bereich des südlichen Atlantik. Und das ist keine Nebensache, denn dadurch reduziert sich auch die Abschirmwirkung gegen gefährliche Strahlung aus dem All, mit möglicherweise ernstesten Konsequenzen für unseren Lebensraum.

### Leben im Wechselspiel der Kräfte

Das gemessene Magnetfeld ist keineswegs eine „einfache“ Größe, sondern die Summe von Beiträgen verschiedener Quellen. Eine anspruchsvolle Aufgabe für die Forscher ist es, diese Quellen auseinander zu halten. Ist die Zerlegung jedoch einmal gelungen, gewinnen sie wichtige Erkenntnisse über ganz verschiedene Phänomene, die vom Wechselspiel zwischen dem Magnetfeld der Erde und äußeren Einflüssen bestimmt sind.

Der menschliche Lebensraum befindet sich an der Schnittstelle zwischen den Auswirkungen der Prozesse im Erdinnern und den Einflüssen, die von außen auf die Erdoberfläche einwirken. In neuerer Zeit hat der Mensch seinen Lebensraum erheblich ausgeweitet. Mit Flugzeugen bewegt er sich bis

in zehn Kilometer Höhe. Die Satelliten, die aus dem täglichen Leben kaum noch wegzudenken sind, nutzen den Raum von mehreren 10.000 Kilometern über der Erde. Die Bedingungen, denen technische Systeme in diesen großen Höhen ausgesetzt sind, bezeichnet die Forschung als Weltraumwetter.

## Im kosmischen Teilchenschauer

Am Weltraumwetter zeigt sich das Wechselspiel zwischen dem Magnetfeld der Erde und äußeren Einflüssen besonders deutlich. Die Einflüsse von außen sind im Wesentlichen geladene Teilchen aus dem Weltraum, die meist mit sehr hohen Geschwindigkeiten auf die Erde zufliegen. Zwei wichtige Formen dieser Plasmaströme sind zum einen von der Sonne abgestrahlte, gelegentlich sehr starke Sonnenwinde, zum anderen die allgegenwärtige kosmische Strahlung. Geschützt wird die Erde vor diesen Teilchenschauern durch ihr Magnetfeld, das sie vor den anfliegenden geladenen Teilchen abschirmt. Sie werden dadurch zum weitaus größten Teil um die Erde herumgeleitet.

Die Auswirkungen des Weltraumwetters auf den Lebensraum sind abhängig von der Stärke des schützenden Magnetfeldes, aber auch von der Intensität der einwirkenden Strahlung und ihrer Beschaffenheit. Schäden, die durch das Weltraumwetter entstehen können, betreffen eine Vielzahl von technischen Systemen. Einen ganz unmittelbaren Effekt hat beispielsweise das Auftreffen eines schnellen Teilchens auf ein elektronisches Bauelement in einem Satelliten, was in der Regel eine Fehlfunktion oder den Ausfall zur Folge hat. Durchfliegt ein Satellit eine Wolke hoher Ladungs-

trägerdichte, kommt es zur statischen Aufladung und zu anschließender Funkentladung, auch dies kann Störungen oder Schäden in der Elektronik hervorrufen.

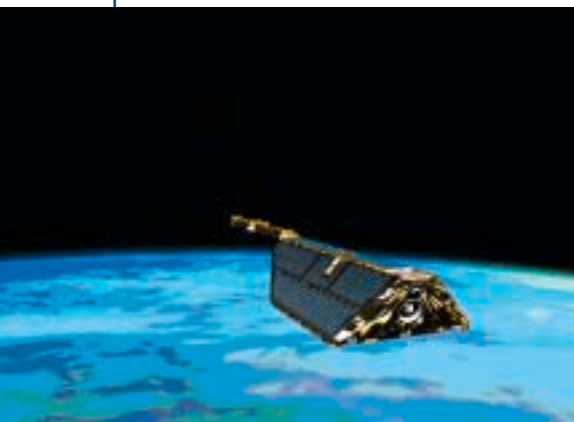
Aber nicht nur im All hat das Weltraumwetter spürbare Folgen, sondern teilweise auch am Boden. An Tagen mit starken Sonneneruptionen werden unvorstellbar große Massen geladenen Gases in den Weltraum geschleudert. Trifft eine solche Wolke die Erde, kommt es zu so genannten geomagnetischen Stürmen. Im Verlauf dieser Stürme entstehen die eindrucksvollen Polarlichter. Diese Lichter sind begleitet von mehreren Millionen Ampere starken elektrischen Strömen in der Ionosphäre. Als sekundärer Effekt werden auch Störströme in Überlandleitungen induziert. Mehrfach sind dadurch schon großräumige Stromausfälle ausgelöst worden.

Zwar können Forscher das Weltraumwetter nicht beeinflussen. Ihre Arbeit hilft jedoch, das Risiko, das vom Weltraumwetter ausgeht, genauer abzuschätzen. Dazu müssen sie beide Komponenten des Wechselspiels, das Magnetfeld und die Strahlung aus dem All, im Zusammenhang betrachten. Weil sich das Magnetfeld gegenwärtig beträchtlich verändert, brauchen sie insbesondere ein genaueres Verständnis der Vor-

gänge im geomagnetischen Feld, um bessere Vorhersagen über das Risikopotenzial für die kommenden Jahre machen zu können. Die Erkenntnisse, die sie dabei gewinnen, helfen ihnen auch, die technischen Systeme besser auf die Bedingungen abzustimmen, denen sie im All ausgesetzt sind.

GFZ

## CHAMP – Mission zum Planeten Erde



Nicht nur Missionen zu fernen Planeten liefern der Forschung spannende neue Erkenntnisse. CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) zeigt, dass man auch „erdnah“ Aufregendes herausfinden kann. CHAMP hat eine Form bekommen, die es ihm erlaubt, nach seinem Start am 15. Juli 2000 für mehrere Jahre im niedrigen Umlauf zu bleiben, ohne abzustürzen. Diese Bahn und der Einsatz empfindlicher Instrumente ermöglichen bei einer Reihe von Messgrößen, zum Beispiel dem Magnetfeld, eine bisher nicht erreichte Auflösung.

Hauptziele der CHAMP-Mission sind die genaue Vermessung des Gravitations- und Magnetfeldes der Erde sowie die Sondierung atmosphärischer Parameter. ■



## Der Ozean als Dynamo

Strömt Meerwasser durch das Erdmagnetfeld, so werden die positiven und die negativen Ionen der gelösten Salze durch die so genannten Lorentzkräfte in entgegengesetzte Richtungen abgelenkt. Es kommt zur Ladungstrennung, und es bauen sich elektrische Spannungen auf. Diese Spannungen verursachen Ströme in den relativ gut leitenden Sedimenten und Gesteinen des Meeresbodens. Es bilden sich globale Stromsysteme aus, welche bis in den Erdmantel hinab reichen. Diese elektrischen Ströme erzeugen ein sekundäres Magnetfeld, das in Satellitenhöhe zwar sehr schwach, etwa 10 ppm (parts per million) des geomagnetischen Feldes, aber mit CHAMP noch deutlich messbar ist. Durch den Vergleich mit Observatoriumsmessdaten können die ozeanischen Signale von anderen Variationen des Magnetfeldes abgetrennt und zur Kartierung von Ozeanströmungen genutzt werden. ■

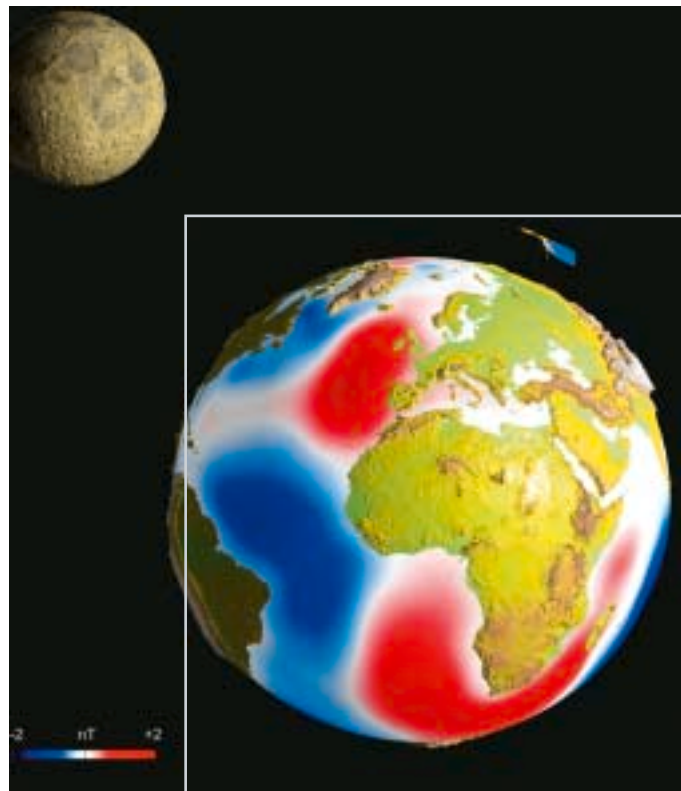
stimmen dabei erstaunlich genau mit den Messungen des Satelliten überein. Außerdem zeigen Modellrechnungen, dass sowohl El Niño/Southern Oscillation (ENSO)-Ereignisse im Pazifik als auch die Variabilität der Nordatlantischen Oszillation im Magnetfeld sichtbar sein sollten. Die Forscher sind daher zuversichtlich, dass ihnen die Magnetfeldmessungen mit CHAMP wichtige neue Informationen über Veränderungen der ozeanischen Zirkulation liefern werden.

### Magnetische Signatur der Meeresströmung

Ein anderes wichtiges Wechselverhältnis ist das zwischen Magnetfeld und ozeanischer Zirkulation. Meeresströmungen haben einen großen Einfluss auf das Erdklima. Zum Beispiel sind die gemäßigten Temperaturen bei uns direkt auf den Golfstrom zurückzuführen, der warmes Oberflächenwasser aus den Tropen nach Europa führt.

Wie Untersuchungen an Eisbohrkernen zeigen, gab es in der Vergangenheit immer wieder plötzliche Veränderungen in den ozeanischen Zirkulationen, die durch Modellrechnungen nur schwer vorhersagbar sind. Deshalb ist die globale Beobachtung der Meeresströmungen so wichtig. Dazu nutzen Forscher aufwändige Messungen durch Bojen, Treibkörper und Schiffe. Und besonders wichtig sind für ihre Arbeit die Aufzeichnungen erdnaheer Satelliten. Doch wie kann ein Satellit aus dem All die Strömungsgeschwindigkeit in tausend Metern Tiefe überhaupt erkennen?

Ähnlich wie sich ein Fluss in der Mitte aufwölbt, verzerren auch Meeresströmungen die Meeresoberfläche. Durch zentimetergenaue Radarmessungen der Ozeanhöhe lässt sich deshalb indirekt auf Strömungsgeschwindigkeiten schließen. Eine vielversprechende neue Möglichkeit zur direkten Strömungsbestimmung ergibt sich durch Magnetfeldmessungen vom Satelliten CHAMP aus. Dabei wird nicht die Meeresoberfläche beobachtet. Vielmehr registriert der Satellit Veränderungen im Magnetfeld der Erde, die mittelbar durch ozeanische Zirkulation verursacht werden. Auch Meeresströmungen bewegen sich innerhalb des Erdmagnetfeldes. Meerwasser als guter elektrischer Leiter baut dabei elektrische Spannungen auf, die zu Strömen führen. Daraus entsteht ein sekundäres Magnetfeld, das trotz seines sehr schwachen Signals von CHAMP aus gemessen werden kann. In ersten Versuchen konnte eine solche magnetische Spur, ausgelöst von periodischen Gezeitenströmungen, erfolgreich in den Magnetfeldmessungen von CHAMP nachgewiesen werden. Vorausberechnungen



*Diese Animation zeigt eine Momentaufnahme des in den Ozeanen durch Gezeitenströmungen induzierten Magnetfeldes, gemessen vom Satelliten CHAMP in 400 Kilometern Höhe. Wenn der Mond über Greenwich steht, verstärkt sich das Erdmagnetfeld in den roten Bereichen, in den blauen vermindert es sich.*

**Prof. Dr. Hermann Lühr**  
**Dr. Stefan Maus**

Sektion Edmagnetfeld  
GeoForschungsZentrum Potsdam



# Luft unterm Mikroskop

Leipziger Wissenschaftler untersuchen, wie winzigste Partikel zu feindlichen Invasoren in der Lunge werden.

Ein Beitrag aus dem Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle

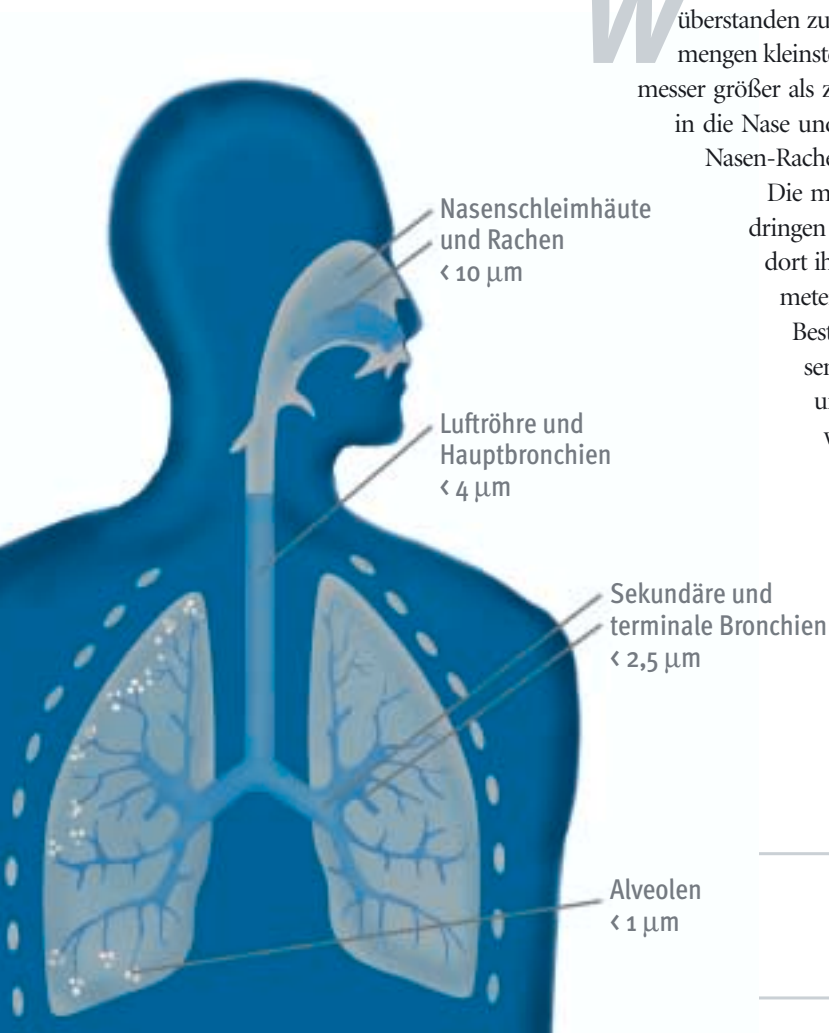
Wenn ein greller Sonnenstrahl ins Zimmer fällt, sieht man zahllose Staubteilchen im Licht wirbeln. Neben den Teilchen, die Forscherinnen und Forscher in Leipzig im Visier haben, würden diese Winzlinge jedoch wie Kolosse wirken: Im Projekt am UFZ-Umweltforschungszentrum spielen bis zu hundert Mal kleinere Partikel aus dem Staub unserer Atemluft die Hauptrolle.

**W**er Staub einatmet, muss husten oder niesen und scheint das Übelste damit überstanden zu haben. Doch weit gefehlt: In der Atemluft befinden sich Unmengen kleinster Partikel. Nur die wenigsten – nämlich solche, deren Durchmesser größer als zehn Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) ist – steigen dem Menschen spürbar in die Nase und werden größtenteils durch das Selbstreinigungssystem des Nasen-Rachen-Raumes wieder ausgeschieden.

Die meisten der schwebenden Teilchen sind wesentlich kleiner. Sie dringen mit der Atemluft tiefer in den Organismus ein und können dort ihr Unwesen treiben. Teilchen zwischen fünf und zehn Mikrometer werden noch im Bronchialbaum festgehalten, ihre ungelösten Bestandteile werden später wieder ausgeschieden. Teilchen, die wesentlich kleiner sind, gelangen jedoch bis in die Lungenbläschen und von dort, wenn sie nicht über die Atmung abtransportiert werden, über das Lymph-Blut-System in den Organismus.

## **Kleine Teilchen – großes Risiko**

Solche Aerosolpartikel können an der Entstehung von Atemwegserkrankungen und Allergien beteiligt sein. Sie stehen auch unter dem Verdacht, zu Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems beizutragen. Einigen der enthaltenen Substanzen wurden bereits Krebs auslösende oder erbgut-schädigende Wirkungen nachgewiesen. Von anderen Inhaltsstoffen ist bekannt, dass sie entzündlich wirken und so zu Erkrankungen beitragen.



*Kleinere Staubpartikel werden tief eingeatmet und verbleiben im Gegensatz zu den größeren zu höheren Anteilen im Körper.*



Trotzdem fielen die Partikel im Submikrometer- und Nanometerbereich bisher als Risikofaktoren für die Gesundheit im wahrsten Sinne des Wortes kaum ins Gewicht: Denn bislang wurde die Staubbelastung der Luft den Vorschriften der Gesundheitsbehörden gemäß als (Mikro-)Gramm im Kubikmeter gemessen. Dass die so ermittelte Belastung seit Jahren zurückgeht, ist angesichts der Befunde der UFZ-Forscher kein Grund zur Entwarnung. „Es ist zu bezweifeln, dass allein die Masse eine Aussage über Gesundheitsrisiken ermöglicht“, warnt denn auch der Initiator des Forschungsprojektes, Professor Olf Herbarth. Er leitet das Department Expositions- und Epidemiologie am UFZ und ist Sprecher des Zentrums für Umweltmedizin, einer Gemeinschaftseinrichtung des UFZ und der Universität Leipzig. „Weil die Wirkung der kleinsten Staubpartikel auf den menschlichen Organismus unterschätzt wird, werden sie auch bei Maßnahmen zur Luftreinhaltung weitgehend vernachlässigt. Deshalb

haben wir vor etwa acht Jahren beschlossen, uns mit diesem Problem zu beschäftigen“, erklärt Herbarth die Motivation des Teams. Schließlich kann der gesundheitsbewusste Mensch zwar einzelne Nahrungsmittel von seinem Speiseplan streichen oder den Kontakt mit bestimmten Materialien meiden. Was seine Atemluft betrifft, ist er seiner Umwelt aber meist alternativlos ausgeliefert. Und dabei ist Luft sein Haupt-„Lebensmittel“!

### Forscher auf Partikel-Fang

Doch wie – und wie genau – wird dieser bedeutsame „Hauch von Nichts“ untersucht? Dr. Ulrich Franck, Leiter der Arbeitsgruppe Aerosolexposition des UFZ: „Für unsere Testreihen müssen wir mit den meisten Messgeräten dorthin gehen, wo wir den Staub messen sollen.“ Luft lässt sich nämlich nicht beliebig einpacken und ins Labor holen, weil die zu untersuchenden Teilchen in der Hülle unter Umständen ihren Schwebzustand aufgeben und sich an den Behälterwänden anlagern würden. Also muss schon

*Sieht wenig spektakulär aus, bringt aber wichtige Ergebnisse: Die Messstation des Leibniz-Instituts für Troposphärenforschung und des UFZ ist hoch über einer dicht bebauten, verkehrsbelasteten Straße in Leipzig angebracht. Am Ort des Geschehens erfassen die Wissenschaftler in einer Echtzeitanalyse die Partikelzusammensetzung nach deren Größe.*





am „Tatort“ das Objekt der Messung so präpariert werden, dass es später unverändert unters Mikroskop gelegt oder chemisch untersucht werden kann. Um die winzigen Partikel aus der Luft unters Mikroskop zu bekommen, werden sie auf einem Kernporfilter oder elektrostatisch abgeschieden. Für chemische Untersuchungen werden größere Luftmengen durch Impaktoren gesogen, die riesigen Staubsaugern ähneln.

Um einen Überblick über die Größenverteilung von Partikeln bis in den Nanometerbereich zu bekommen, wird ein Kondensationspartikelzähler (CPC) verwendet, dem ein DMA (differential mobility analyzer) vorgeschaltet ist. Mit dem DMA werden die aufgeladenen Partikel entsprechend ihrer Größe – welche wiederum deren Beweglichkeit bestimmt – in einem Spannungsfeld getrennt. Der CPC zählt dann die unterschiedlich großen Teilchen. Wichtig für die Forscher, um ihre Herkunft zu enträtseln. „Erst wenn ich weiß, wie groß die Teilchen sind, weiß ich mehr über ihre Quelle“, erklärt Franck.

Das Ergebnis? Am Ende solcher Untersuchungen kennen die Forscher die elementare Zusammensetzung, die Quelle und die Häufigkeit der Feinstaub-Partikel. Im nächsten Schritt stellen sie die Gesundheitsfragen: Wie tief dringen die Partikel in die Lungenbläschen und eventuell auch in die Blutbahn ein? Welche Wirkung verursachen sie dort? Was bedeutet das für Expositionsforschung und Epidemiologie?

## „Frische“ Luft?

Eins wissen die Leipziger Wissenschaftler schon sicher: Die Belastungen in Innenräumen und an der vermeintlich „frischen“ Luft unterscheiden sich sehr. Und weil der Mensch in Mitteleuropa sich durchschnitt-

lich 85 Prozent des Tages in Innenräumen aufhält, gilt ihnen natürlich ganz besondere Aufmerksamkeit. Noch ein zweiter Punkt ist aus Sicht des atmenden Menschen wichtig: Mit jedem Atemzug durchströmt ihn ein Mix aus all den Substanzen, die in der Luft schweben. Das sind nicht nur Staubpartikel verschiedenster Herkunft, sondern auch flüchtige organische Verbindungen (VOC = volatile organic compounds), partikelgebundene organische Verbindungen wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), Schimmelpilzsporen, Milbenallergene und vieles mehr.

Dieser Mix ist bei Indoor- und Outdoor-Messungen unterschiedlich. Die Anreicherung der Innenraumluft allein mit flüchtigen organischen Verbindungen ist im Durchschnitt zehnmal so hoch wie die der Außenluft – Renovierungsgerüche oder neue Möbel sind oft die Übeltäter. Draußen dagegen belastet vor allem der Verkehr die Atemluft. Die Unterschiede hängen auch mit der Partikelgröße zusammen. Von den ganz kleinen Partikeln zwischen zehn und zwanzig Nanometern gibt es draußen zum Beispiel zehnmal mehr als drinnen.

## Hoffnung für „Otto-Normal-Atmer“

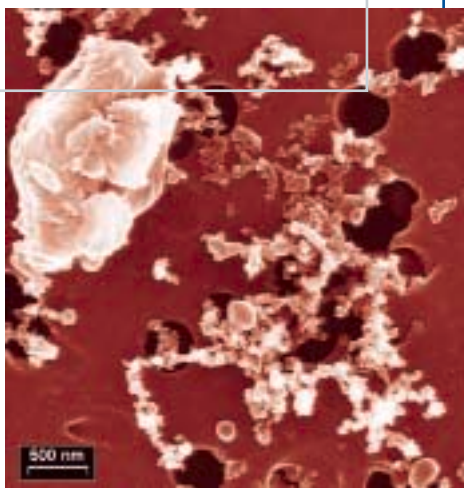
Welchen Nutzen kann sich „Otto-Normal-Atmer“ von diesen Ergebnissen erhoffen? Noch steht die Grundlagenforschung im Vordergrund, aber: „Wenn wir wissen, welche Staubpartikel auf welchem Wege in den Orga-



*Outdoor-Messungen werden indoor analysiert: Am Ende kennen die Wissenschaftler die Herkunft, die Häufigkeit und Zusammensetzung von Feinstaub-Partikeln.*



*Elektronenmikroskopische Aufnahme von Feinstaub. Die winzigen Partikel stehen unter dem Verdacht, an der Entstehung von Atemwegserkrankungen und Allergien sowie anderen Erkrankungen beteiligt zu sein.*



nismus eindringen; wenn wir wissen, welche Gesundheits-Risiken damit verbunden sind und wenn wir das alles auch messen und dokumentieren können, dann haben wir ein Etappenziel erreicht“, erläutert Herbarth. „Dann geht es darum, die kombinierten Wirkungen mit anderen luftgetragenen Schadstoffen zu ergründen.“

Anschließend ist der Gesetzgeber gefragt, der de facto bislang nur die großen Staubpartikel in seine Schadstoffverordnungen einbezieht. Auch Automobilhersteller könnten die Ergebnisse nutzen, um luftfreundlichere Autos zu entwickeln. Und nicht zuletzt könnten wir „Normalbürger“ lernen, wie wir ein besseres Indoorklima bekommen – sprich: wie wir zum Beispiel besser lüften.

**Marlis Heinz**

Wissenschaftsjournalistin, Leipzig

## Glossar

### Aerosole

Aerosole sind feinkörnige oder faserförmige luftgetragene Partikel einer festen, flüssigen oder halbflüssigen Substanz. Sie sind in der natürlichen Umwelt, beispielsweise als Erdkrustenpartikel oder Pollen, aber auch durch Partikelbildungsprozesse in der Atmosphäre vorhanden. Eine große Menge entsteht jedoch durch anthropogene Quellen, beispielsweise bei Verbrennungsprozessen.

### Milli – Mikro – Nano

Einen Millimeter kann sich ein Laie problemlos vorstellen, notfalls noch ein Zehntel davon. Doch dann wird es meist kritisch. Die im UFZ untersuchten Staubpartikel bewegen sich im Mikro- und Nanometerbereich, also in dem Bereich von Tausendstel bis Millionstel Millimeter, oder, wie es die Forscher ausdrücken, zwischen  $10^{-6}$  und  $10^{-9}$  Meter. Der Leistung von Licht-Mikroskopen ist in diesen Dimensionen eine natürliche Grenze gesetzt: Bei einer Auflösung von etwa 250 Nanometern, also ungefähr der halben Wellenlänge von sichtbarem Licht, können die „großen“ Lichtwellen den kleinen Gegenstand nicht mehr abbilden. Noch kleinere Teilchen werden mit dem Elektronenmikroskop untersucht. Es kann die 250-Nanometer-Grenze unterschreiten, weil in einem Hochspannungsfeld beschleunigte Elektronen wesentlich kürzere Wellenlängen als Licht haben.

### Elektronenmikroskop

Das Elektronenmikroskop wurde 1932 zum Patent angemeldet. Heute werden in der Wissenschaft hauptsächlich zwei Typen eingesetzt:

Das *Transmissions-Elektronenmikroskop (TEM)* funktioniert ähnlich wie das herkömmliche Lichtmikroskop: Das Objekt wird durchstrahlt und ein Abbild auf einem Leuchtschirm, einem Film oder mittels Kamera erzeugt. Nur steht beim TEM ein Elektronenstrahl an Stelle des Lichtes, und elektromagnetische Linsen ersetzen die Glaslinsen.

Bei der morphologischen Untersuchung der luftgetragenen Staubpartikel arbeiten die Wissenschaftler des UFZ vorrangig mit dem *Rasterelektronenmikroskop (REM, SEM)*. Das Präparat wird nicht von Elektronenstrahlen durchdrungen, sondern abgetastet. Die aus dem resultierenden Signal ableitbaren Informationen werden im Computer zu einem plastisch wirkenden Oberflächen-Abbild zusammengesetzt. Außerdem ist es möglich, mittels Röntgenmikroanalyse die Elementzusammensetzung einzelner Partikel zu bestimmen.





## Einfach präziser!

Die virtuelle Patientenleber hilft Chirurgen bei der Operation.

Ein Beitrag aus dem Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg

Wenn die Ärzte der Chirurgischen Uniklinik in Heidelberg eine Leberoperation planen, konsultieren sie die Informatiker des Deutschen Krebsforschungszentrums. Denn deren dreidimensionale Computermodelle vom Organ des Patienten erleichtern nicht nur die Planung, auch der Eingriff selbst wird einfacher.

**D**ass der Operateur nicht nur auf den Patienten, sondern auch an die Wand schaut, ist in diesem Fall kein Grund zur Sorge. Der Blick an die Wand neben dem Operations-tisch gehört für Chirurgen der Universitätsklinik Heidelberg fast zum Arbeitsalltag, zumindest dann, wenn sie Lebertumore entfernen. Denn hier ist ein großer Touchscreen-Monitor installiert, der ein dreidimensionales Computermodell der Patientenleber zeigt. Während der Operation kann sich der Arzt am Modell orientieren, die virtuelle Leber frei drehen und in das Organ hineinzoomen. Sogar die Stelle, an der er das Skalpell ansetzen soll, bekommt er auf Wunsch angezeigt.

Entwickelt wurde das Leber-Operationsplanungs-system LENA von Informatikern der Abteilung Medizinische und Biologische Informatik im Deutschen Krebsforschungszentrum in interdisziplinärer Zusammenarbeit mit den Tumorspezialisten der Universitätsklinik. Keine Leber gleicht der anderen; der Eingriff ist nicht einfach und erfordert präzise Planung. Schließlich muss der Chirurg wissen, was ihn erwartet, wenn er die Leber zu Beginn der Operation freilegt: Welche Beziehung hat

der Tumor zu den wichtigen Gefäßen in der Leber? Wo kann er schneiden, ohne große Leberareale von der Blutversorgung abzukoppeln, und welchen Sicherheitsabstand muss er einhalten? All diese Fragen soll die Software beantworten. „So wird erstmals die exakte Planung des Eingriffs möglich“, erklärt Chirurg Dr. Peter Schemmer.

### *Leber scheinchenweise*

Zur Vorbereitung werden die Patienten am Tag vor der Operation in einen Computertomographen (CT) geschoben. Das Gerät erzeugt scheinchenweise Querschnittsaufnahmen des kranken Organs. Traditionell verwendeten die Chirurgen die vielen kleinen CT-Aufnahmen sowohl für die Planung als auch während der Operation. Zusätzlich verließen sie sich beim Eingriff auf Echtzeitbilder der Leber, die per Ultraschall aufgenommen wurden. Allerdings stellt die Interpretation zweidimensionaler CT-Bilder hohe Anforderungen an das räumliche Vorstellungsvermögen des Chirurgen. So kam es, dass einer der Ärzte die Medizininformatiker im Krebsforschungszentrum bat, „die



*Operationsplanung in mehreren Schritten: Links betrachtet der Chirurg viele kleine Aufnahmen aus dem Computertomographen. Unten orientiert er sich an einer dreidimensionalen Bildschirmdarstellung.*



schönen CT-Bilder doch einmal in ein dreidimensionales Modell zu überführen“, wie sich Matthias Thorn, einer der Medizininformatiker, erinnert. Diese dreidimensionalen Modelle haben sich mittlerweile vielfach bewährt.

Für das neue Verfahren schickt der Radiologe die zweidimensionalen CT-Aufnahmen der Patientenleber als digitalen Datensatz an Matthias Thorn. Der Informatiker setzt die einzelnen Schichten am Computer zu einem dreidimensionalen Modell zusammen. Für die 60 bis 70 Aufnahmen mit einer Schichtdicke von jeweils drei Millimetern benötigt er nur etwa 30 Minuten.

### Präzisionsarbeit am Bildschirm

Entscheidend sind die weiteren Arbeitsschritte: Zunächst verschafft Thorn sich einen Überblick über das entstandene Lebermodell. Dann setzt er Markierungspunkte und lokalisiert den Tumor. Im nächsten Schritt ordnet er die Bildelemente den verschiedenen anatomischen Strukturen zu. Dabei hilft ihm, dass der Radiologe dem Patienten vor der Tomographie ein Kontrastmittel in die Blutbahn gespritzt hat. Deshalb unterscheiden sich die Blutgefäße am Bildschirm durch ihre Grautöne vom übrigen Lebergewebe. Thorn blendet alle anderen Graustufen aus, sodass nur noch die Gefäßbäume sichtbar sind. Per Mausklick beginnt die Software, ausgehend von der Pfortader, alle benachbarten Bildpunkte des Pfortaderbaums zu erkennen. Aus diesen Informationen wird das „Skelett“ der Gefäße extrahiert, das die Verzweigungsstrukturen ausfindig macht.

Schließlich trennt der Informatiker im Modell die Pfortader von den Lebervenenbäumen. Nach zehn Mausklicks ist alles erledigt. Anschließend berechnet das Programm die von den Blutgefäßen versorgten Funktionseinheiten der Leber, die bei jedem Patienten anders gestaltet sind. Dieser Schritt läuft absichtlich nicht vollautomatisch ab. „Automatik bedeutet Kontrollverlust“, erklärt Thorn. Im letzten Schritt berechnet LENA den zu entfernenden Teil der Leber und zeigt grafisch den optimalen Schnittverlauf an. Dabei berücksichtigt es einen ausreichenden Sicherheitsabstand zum umliegenden Gewebe.

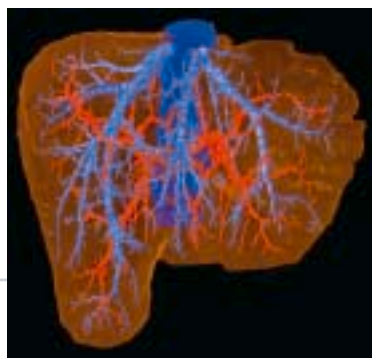
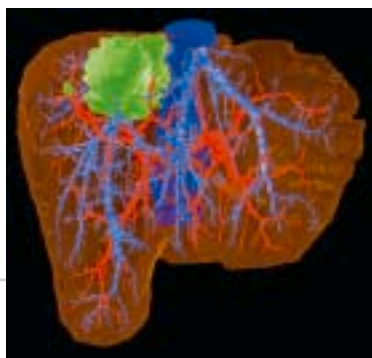
### Leber im Laptop

Ab jetzt ist Matthias Thorn ständig mit seinem Laptop unterwegs: Die Operation hat er präzise an der virtuellen Leber vorbereitet, die Umsetzung mit den Mitteln echter Chirurgie steht bevor. Zuerst muss er zum verantwortlichen Radiologen, der das 3D-Modell anhand der CT-Bilder beurteilt. Danach geht's zur Konferenz für die Operationsplanung. Dort unterstützt er mit der virtuellen Leber das Ärzteteam bei den Vorbereitungen. Die Tumor-Spezialisten diskutieren das 3D-Modell und die Vorschläge des Programms zum Operationsverlauf. Am Folgetag ist der Informatiker mit seinem Laptop dann im Operationssaal dabei, um die Qualität seiner Arbeit vor Ort zu überprüfen.

„Bei der ersten Operation wechselte der Operateur noch unsicher zwischen den vertrauten Schwarzweißbildern und dem ungewohnten 3D-Modell hin und her“, erinnert er sich an die Anfangszeit. Auch heute haben die Chirurgen noch die Möglichkeit, sich die



# Gesundheit



Die Bilder, die mit der DKFZ-Software auf der Basis von diagnostischen Daten entstehen, zeigen den Unterschied zwischen einer Leber mit Tumor (grün) und ohne; sichtbar sind die Lebervenen (blau) und die Portalvenen (rot).

schlecht“, staunte er, nachdem er einmal seine CT-Aufnahmen mit dem 3D-Modell verglichen hat. Heute ist er Chefarzt einer großen Universitätsklinik und möchte das neue Verfahren unbedingt an seine Klinik holen.

Dieser Wunsch könnte ihm bald erfüllt werden. „Wir haben das Verfahren Internet-tauglich gemacht und gehen Anfang 2004 online. Schrittweise werden wir es in den kommenden zwei Jahren als Online-Dienstleistung anderen chirurgischen Zentren anbieten“, erklärt Professor Hans-Peter Meinzer, Leiter der Abteilung Medizinische und Biologische Informatik im Deutschen Krebsforschungszentrum.

Die Medizininformatiker des DKFZ wurden für die Software „OrgaNicer“, die sie innerhalb des Projektes LENA zur computergestützten Operationsplanung für die Leberchirurgie entwickelt haben, mit dem doIT-Software-Preis 2003 ausgezeichnet.

**Dr. Michael Lang**

Wissenschaftsjournalist, Ludwigshafen

## DKFZ

CT-Aufnahmen im Monitor einblenden zu lassen. Doch „die neue Form der Operationsplanung hat sich bestens bewährt“, bestätigt Professor Markus Büchler, der Leiter der Chirurgischen Universitätsklinik. In den vergangenen zwei Jahren wurden für die Heidelberger Mediziner über 180 Leberoperationen mit Hilfe der virtuellen Realität geplant.

### Sicherheit für Spender

Inzwischen setzen die Ärzte das Verfahren auch bei der Lebertransplantation mit lebenden Spendern ein. Dabei wird einem verwandten beziehungsweise nahe stehenden Spender ein Teil seiner Leber entfernt und dem Empfänger eingesetzt. Mit Hilfe der 3D-Aufnahmen der Spenderleber kann der Chirurg entscheiden, ob das Organ für eine Transplantation geteilt werden kann. Die Software unterstützt den Arzt bei der Berechnung des Volumens, das unbedingt beim Spender verbleiben muss. Denn obwohl sich das Organ im Laufe eines Jahres fast vollständig regenerieren kann, darf der Chirurg höchstens 65 Volumenprozent des Gewebes entfernen.

Zurzeit versuchen die Heidelberger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, das 3D-Verfahren auch auf Nieren- und Bauchspeicheldrüsen-Operationen auszuweiten. Bei ihrem aktuellen Projekt arbeiten sie daran, sogar die Funktionsareale der Lunge darzustellen. Als Kontrastmittel für die Magnetresonanztomographie dient ihnen Helium.

Während vor allem jüngere Spezialisten wie Dr. Peter Schemmer dem neuen Verfahren aufgeschlossen gegenüberstehen, verlassen sich ältere Mediziner immer noch auf ihre gewohnten CT-Bilder. Matthias Thorn berichtet von einem Arzt, der das Computerverfahren ablehnte, solange er es nur vom Hörensagen kannte. „Nicht

## Innenwelten aus dem Rechner –



Was können Computer in der modernen Medizin leisten? Für den Arzt? Für den Patienten? Heute schon? Und morgen? Die Beiträge aus dem Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg und dem GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit in Neuherberg geben durch Einblick in Helmholtz-Forschungsprojekte exemplarische Antworten auf diese Fragen. In Heidelberg helfen elektro-



# Sprich mit mir

Virtuelle Realität: So heißt der Schlüssel zu einer besseren Kommunikation zwischen Mediziner und Computer.

Ein Beitrag aus dem GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit in Neuherberg bei München

In vielen Bereichen der Medizin sind rechnergestützte Anwendungen heute unverzichtbar. Mit ihrer Hilfe gewinnen, verarbeiten, analysieren, dokumentieren und archivieren Mediziner die verschiedensten Patientendaten. Eine echte Herausforderung, denn der Umgang mit komplexer Software und riesigen Datenmengen ist alles andere als einfach. Hilfe versprechen so genannte virtuelle Realitäten für die Medizin, wie sie am GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit entwickelt werden. Als neuartige Schnittstellen der Kommunikation von Mensch und Maschine sollen sie einen möglichst „natürlichen“ Umgang des Menschen mit technisch erzeugter Informationsflut ermöglichen. Ergebnisse der GSF-Forschung auf dem Gebiet der bildgebenden Verfahren sind vielversprechend.

## neue Software für die Medizin

nische Organmodelle nach den individuellen „Maßen“ des Patienten bereits heute, Leber-Operationen in der Uniklinik mit höchster Präzision vorzubereiten. Und in Neuherberg wollen Forscherinnen und Forscher mit Hilfe modernster elektronischer Datenverarbeitung das Innere des Körpers sogar als regelrechte virtuelle Welt erschaffen, in der sich Radiologen und Chirurgen dann auch während einer Operation bewegen könnten. ■





*Datenhelm und Datenhandschuh – solche Peripheriegeräte sind wichtig, damit Menschen intuitiv mit dem Computer kommunizieren können.*



GSF

**B**ildgebende Verfahren in der Medizin sind ein Paradebeispiel dafür, was rechnergestützte Anwendungen in der Medizin heute leisten: Moderne Systeme wie Röntgencomputer- und Magnetresonanztomographie liefern immer detailliertere Aufnahmen in immer höherer Auflösung und in immer kürzerer Zeit. Die Konsequenz: Eine Flut von Daten stürzt auf den Arzt ein, der obendrein auch noch die komplexen Datenverarbeitungssysteme bedienen muss. Leider sind adäquate Schnittstellen für diese moderne Kommunikation zwischen Mensch und Maschine noch Mangelware. Deshalb suchen Forscherinnen und Forscher nach Verfahren der Visualisierung und Techniken der Interaktion, die auf die speziellen Bedürfnisse der Medizin und der Menschen in der Medizin eingehen. Ihre Hoffnungen konzentrieren sich dabei auf Methoden, die mit künstlich erzeugten Bild-, Ton- und oft auch Tastwelten arbeiten, so genannten virtuellen Realitäten. Und die Ergebnisse geben ihnen Recht: Wissenschaftler der GSF haben eine Mensch-Maschine-Schnittstelle entwickelt, die die Vorzüge der virtuellen Realität für die Medizin nutzbar macht.

Konkret geht es dabei um eine neue Art der Interaktion zwischen Mensch und Maschine, die dem Mediziner den Zugang zu den dreidimensionalen (3D) Bilddaten der Tomographie erleichtert. Sie hat mehrere Vorteile. Erstens: Die stereoskopische Darstellung in Echtzeit, das heißt die realitätsnahe Visualisierung. Sie hilft dem Arzt, räumliche Strukturen und Zusammenhänge zu erkennen. Zweitens: Sowohl Ergebnisse der Bildanalyse wie das ursprüngliche Datenmaterial können simultan visualisiert werden. Damit sinkt das Risiko, Informationen zu verlieren. Drittens: Innovative, an die menschlichen Sinnesleistungen angepasste Peripheriegeräte wie Datenhelme und intuitive Formen der Mensch-Maschine-Kommunikation – etwa über die Blickrichtung – erlauben dem Arzt, sich ganz auf seine ei-



Genau da setzen die Forscher an: Ihr Ziel ist, aus den Daten virtuelle Realität zu erzeugen, innerhalb derer die Mediziner sich frei bewegen und agieren können. Damit wollen sie zugleich beweisen, dass neue Techniken gewohnte Arbeitsabläufe nicht unbedingt verändern müssen. Virtuelle Realität in der Medizin unterscheidet sich jedoch erheblich von traditionellen Anwendungsbereichen wie Architektur oder Flugsimulation. Nicht zuletzt, weil das Datenvolumen extrem groß ist: Medizinische Szenen mit segmentierten Gefäßen, Knochen, Organen oder Tumoren können einige Millionen Volumenbildderivate umfassen. Und obwohl etwa in der Chirurgie eine hohe Bildwiederholungsrate extrem wichtig ist, dürfen die Systeme, um sie zu erreichen, nicht auf Details verzichten: Auch feinste Strukturen können nämlich von Bedeutung sein, wenn sie pathologischen Charakter haben. Schließlich erfordern klinische Anwendungen oftmals die verzögerungsfreie Echtzeitvisualisierung – 15 Bilder pro Sekunde sind das Minimum. Leicht einzusehen am Beispiel der Chirurgie, wo der arbeitende Arzt sofort sehen muss, wie sich sein Eingriff auswirkt.

Um dem Arzt die gesamten Patienten-Bildinformationen in Echtzeit zur Verfügung zu stellen, sind an Hard- und Software besondere Ansprüche zu stellen, die derzeit nur Hochleistungsgeräte und PC-Cluster aus mehreren gekoppelten Rechnern erfüllen. Zudem taugen die üblichen Interaktionsgeräte wie Bildschirm, Maus und Tastatur nicht dazu, eine natürliche Mensch-Maschine-Kommunikation zur dreidimensionalen Datenverarbeitung aufzubauen. Die Forscher versuchen daher, neue Peripheriegeräte in die virtuelle Umgebung zu integrieren, die eine bessere Anpassung der Software an die menschlichen Sinne erlauben. Die Geräte sollten vor allem einen hohen Immersionsgrad bieten, den Arzt also möglichst stark in die virtuelle Umgebung einbinden. Solche Anwendungen, bei denen der Mediziner völlig in die künstliche audiovisuelle Welt eintaucht, arbeiten mit besonderen Sichtsystemen wie Datenhelmen, mit Stereo- oder Panoramaprojektion.

gentlichen Aufgaben zu konzentrieren. Denn die neue Kommunikation mit der Maschine ist möglichst genau an menschliche Verarbeitungs- und Reaktionsmöglichkeiten angepasst.

### *Neue Welten schaffen für die Medizin*

Bisher werden tomographische Bilddaten meist Schicht für Schicht erzeugt, bearbeitet und ausgewertet. Einen Eindruck davon gewinnt jeder Patient, der sich einer Computertomographie unterzieht. Bei solchen Aufnahmen in Einzelschnitten verzichtet man im herkömmlichen Verfahren auf die 3D-Darstellung, die es dem Arzt wesentlich einfacher machen würde, räumliche Strukturen zu erkennen. Neue Ansätze wie in Heidelberg sind noch selten. Auch was die Interaktionsmöglichkeiten des Arztes, das schnelle und sichere Erkennen des Krankheitsbildes und seine Möglichkeit, intuitiv zu reagieren angeht, haben bislang gebräuchliche Bildanalyse-systeme wenig zu bieten. Denn die Rechenmethoden zur Bildanalyse, die Algorithmen, sind nur selten darauf ausgerichtet, aus den diskreten Aufnahmen Dreidimensionalität zu erzeugen.



## Mensch und Umwelt – die Blaupause für Kommunikation

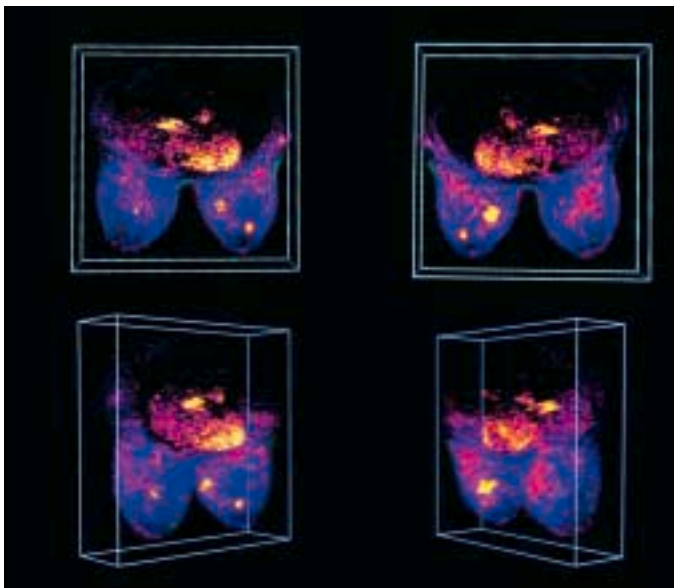


Fast ununterbrochen erhalten, verarbeiten und speichern wir Informationen aus unserer Umwelt: Wir sehen, hören, riechen, schmecken und fühlen. In der Interaktion mit der Umwelt sind unsere Sinnesorgane, informationstechnisch betrachtet, die „Eingangskanäle“, wobei der Gesichtssinn mit Abstand die größte Rolle spielt. Als „Ausgangskanäle“ dienen vor allem Hände und Sprache, außerdem Mimik, Körpergestik oder Blickrichtung. Riesige Datenmengen strömen permanent auf die menschlichen Rezeptoren ein, um aufgenommen, von den Nerven weitergeleitet und vom zentralen Nervensystem verarbeitet zu werden. Kämen sie ungefiltert im Gehirn an, wäre es heillos überfordert. Deshalb wird die eingehende Datenmenge vor der eigentlichen Verarbeitung deutlich reduziert: auf 10 bis 100 bits pro Sekunde.

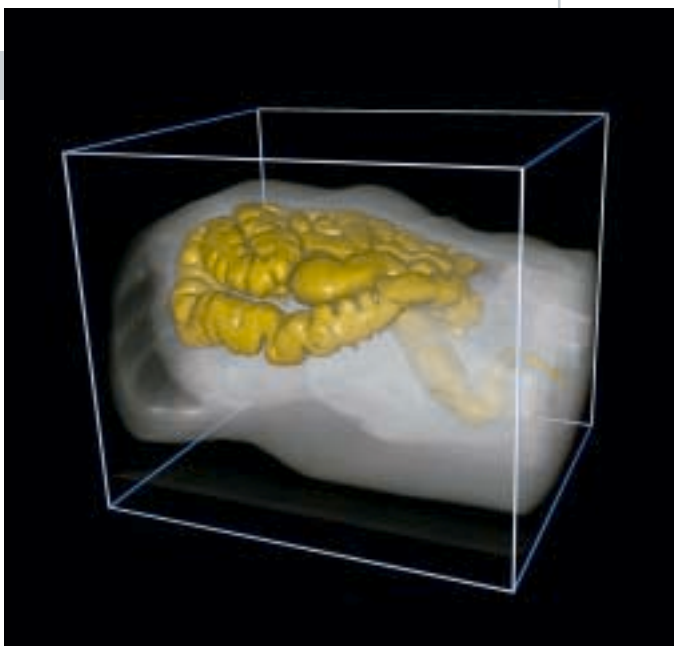
### Mensch und Maschine – natürliche Kommunikation nachbauen

Volle Leistungsfähigkeit erlangt der Mensch nur dann, wenn alle Sinne geordnet zusammenspielen. Genau das wollen Forscher durch neue Ansätze für die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine erreichen. Die Lösung nennen sie multimodale Mensch-Maschine-Kommunikation, Fachterminus für eine möglichst natürliche Interaktion zwischen Mensch und Maschine, die sich an den menschlichen Fähigkeiten orientiert. Der Aufwand für das scheinbar Einfache ist immens, die Anforderungen an die Technik sind extrem hoch. Damit multimodale Kommunikation funktioniert, müssen sich die einzelnen Modalitäten sinnvoll ergänzen. Das bedeutet zum Beispiel: Solche Kommunikationssysteme müssen mit komplementären Informationen arbeiten. Das ist etwa dann der Fall, wenn die Maschine Zeigegesten auf ein Objekt „versteht“ und gesprochenen Kommandos „gehört“. Menschenangepasste Kommunikationssysteme müssen zugleich gezielt mit redundanten Informationen arbeiten, damit die Rückkopplung sicher ist. Dem entspricht etwa ein System, das parallel visuelle und akustische Warnhinweise gibt. Außerdem muss der Anwender zwischen diversen Möglichkeiten wählen und wechseln können, die Informationen der Maschine aufzunehmen und auf sie zu antworten. Die Basis für diese neue Form der Interaktion von Mensch und Maschine bildet virtuelle Realität, also eine computer-generierte künstliche Welt, die der Wirklichkeit möglichst nahe kommt. Im Idealfall bemerkt der Anwender keinen Unterschied zwischen realer und virtueller Umgebung und kann sich ganz auf seine Arbeit konzentrieren. ■





*Pathologische Veränderungen an der weiblichen Brust lassen sich mit der dynamischen Kernspinnmammographie genauer lokalisieren. Die Visualisierung wird mit Menüs, Datenhandschuh und Gestikanalyse vorgenommen. Die so genannte hybride 3D-Darstellung (Bild unten) ermöglicht einen Blick in den gesamten Bauchraum und gleichzeitig auch auf die Oberfläche des Darmes.*



chung der weiblichen Brust. Die GSF-Wissenschaftler haben zusammen mit dem DKFZ und dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) ein hochkomplexes Verfahren entwickelt, bei dem die Ergebnisse der Gewebeuntersuchung in unterschiedliche Farben übersetzt werden. Diese Farbkodierungen werden mit dem anatomischen 3D-Bild der Brust verbunden. Um damit zu arbeiten, benutzt der Mediziner eine Space Mouse, die er nicht auf einer Fläche, sondern im Raum bewegt. Mit ihrer Hilfe kann er das simulierte Untersuchungsobjekt drehen und zoomen. Außerdem trägt er einen Datenhandschuh, der die Interaktion mit der virtuellen Realität ermöglicht. Der Handschuh auf der einen Seite, in die virtuelle Umgebung integrierte Steuermenüs auf der anderen Seite: Beides zusammen ermöglicht es, dass die Gesten des Arztes auf der Seite des Systems „ankommen“ und die Bildwelt auf sein Eingreifen reagiert. Der Mediziner kann also das dreidimensionale, farbige Bild beliebig im Raum inspizieren.

Erste Ergebnisse zeigen, dass sich damit pathologische, insbesondere multiple Veränderungen besser darstellen lassen. Und dass der Arzt krankhafte Veränderungen des Gewebes genauer lokalisieren kann. Das erleichtert die gezielte Gewebeentnahme für eine Biopsie und, falls nötig, das Planen der Therapie.

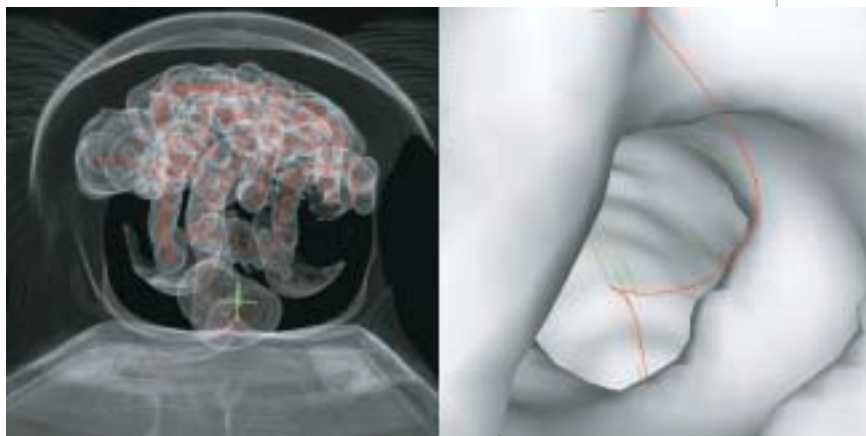
## Unterwegs im Körper

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GSF-Instituts für Medizinische Informatik konzentrieren sich darauf, mit solchen neuen Mensch-Maschine-Schnittstellen die radiologische Diagnostik zu verbessern. Ein Schwerpunkt ihrer Arbeit ist die morphofunktionale Visualisierung, bei der der Arzt sich in die künstlich erzeugte Welt versenkt, um Veränderungen in der Gestalt und Struktur etwa von Gewebe zu identifizieren und zu analysieren. Ein zweiter Schwerpunkt ist die virtuelle Endoskopie (Spiegelung), zum Beispiel des Darms. Bei beiden Methoden werden große Mengen an Bilddaten aus der Mehrzeilenröntgencomputer- beziehungsweise Kernspinn-Tomographie effektiv und effizient bearbeitet.

Was bedeutet das genau? Ein Beispiel für die morphofunktionale Visualisierung ist die Magnetresonanz-Mammographie zur Untersu-



# Gesundheit



*Die einzelnen Prozessschritte bei einer virtuellen Koloskopie. Zur besseren Übersichtlichkeit dient die transparente Darstellung des gesamten Darmlumens. Der Navigationspfad (rot, rechts) durch den Dickdarm steuert die virtuelle Kamera, die die Innenansichten des Darmes berechnet.*

GSF



*Das Abstandsprofil der Darmwand vom Navigationspfad (links) gibt Hinweise zur Lokalisation vermutlicher Polypen oder bösartiger Veränderungen im Darm. Rechts das korrespondierende Bild zur virtuellen Koloskopie.*

Zweites Beispiel: Virtuelle Endoskopie. Tomographische Schichtaufnahmen mit digitaler Bildanalyse werden dabei so bearbeitet, dass der Mediziner dank der visuellen Simulation gleichsam durch das Untersuchungsobjekt hindurchreisen kann. Davon profitiert vor allem die virtuelle Endoskopie des Dickdarms. Sind das 3D-Modell der Darmwand, die Zentrallinie und das Dickdarmprofil berechnet, kann die virtuelle Untersuchung beginnen. Die GSF-Wissenschaftler setzen sich dazu Datenhelme auf oder verwenden Stereoprojektionssysteme, um sich in Echtzeit durch die 3D-Darstellung zu bewegen. Als Navigationshilfe dient dabei die aus den Aufnahmen ermittelte Zentrallinie durch den Darm. Die vir-

tuelle Kamera fährt an der Zentrallinie, der „Fahrtroute“, entlang und berechnet dreidimensionale Innenansichten der Darmwand. Über komplexe Computergraphikverfahren entsteht ein mit Schatten und Spiegelungen versehenes Oberflächenbild, ein realistischer Eindruck des Darms – von innen. Diese topologische Karte der Darmwand weiter zu vervollkommen, ist jetzt das Ziel der GSF-Forscherinnen und -Forscher. So wollen sie beispielsweise erreichen, dass man mit Hilfe virtueller Endoskopie Darmpolypen automatisch aufspüren kann.

Mammographie und Endoskopie, beide Beispiele verdeutlichen, welche großen Chancen sich durch Methoden erzielen lassen, die aus medizinischen Daten virtuelle Realität erzeugen: Schonendere und genauere Untersuchung, schnellere und präzisere Diagnose und davon abgeleitet passgenauere Therapie sind die wichtigsten Vorteile. Auf diese Weise sinken auch die Behandlungskosten: Virtuelle Realität in der Medizin ist daher nicht zuletzt angesichts der Kostenexplosion im Gesundheitswesen ein wichtiges Forschungsgebiet.

**Priv. Doz. Dr. Dr. Karl-Hans Englmeier**

Institut für Medizinische Informatik  
GSF-Forschungszentrum für Umwelt und  
Gesundheit, Neuherberg bei München

**Dipl.-Biol. Sibylle Kettembeil**

Wissenschaftsjournalistin, München

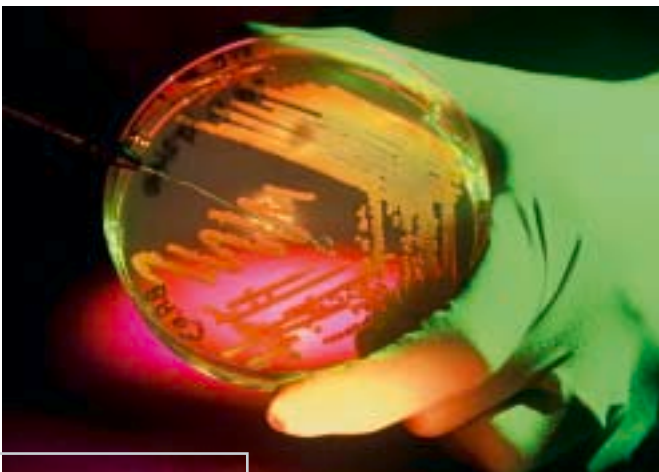


# Weltweit dringend gesucht: Neue Impfstoffe

Um Erkenntnisse erfolgreich umzusetzen, müssen Forschung und Pharmaindustrie enger zusammenarbeiten. Die Brückenbauer sitzen in Braunschweig.

Ein Beitrag aus der Gesellschaft für Biotechnologische Forschung in Braunschweig

Deutschland soll ein erfolgreicher Standort für Impfstoffentwicklung werden: Das ist das ehrgeizige Ziel der Vakzine Projekt Management GmbH (VPM). Sie organisiert und finanziert bundesweit die präklinische und klinische Entwicklung von Impfstoffen – vom Labor bis zum klinischen Nachweis der Wirksamkeit, dem „proof of concept“.



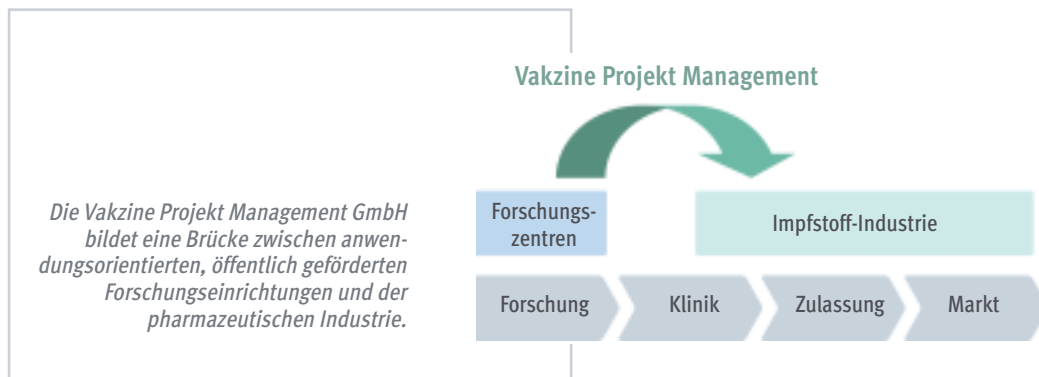
*Mit einer Impfhöhle werden Bakterien auf einer Petrischale zur weiteren Vermehrung in einer Flüssigkultur abgenommen.*

**E**rfolgreiche Entwicklungsergebnisse, insbesondere der klinischen Phase I/II, wird das Unternehmen durch die Gründung von Spin-Offs oder durch Lizenzvereinbarungen mit Industriepartnern verwerten. „Die VPM bildet eine Brücke zwischen staatlich geförderter Forschung und der Pharmaindustrie. Wir begleiten unsere Partner bei allen erforderlichen Schritten auf dem Weg bis zur Zulassung“, erläutert VPM-Geschäftsführer Dr. Albrecht Läufer. „Aus diesen Kooperationen werden wir ein German Vaccine Consortium formen – ein deutsches Konsortium für die Impfstoffentwicklung.“

## *Die Entwicklung von Impfstoffen beschleunigen*

Läufer möchte die VPM schnell zu einem in der Impfstoff-Szene anerkannten Management-Partner etablieren, der Forschungsergebnisse effizient in eine praktische Anwendung überführt. Das Unternehmen will sich auch als attraktiver Partner für Investoren beweisen, die – staatlich oder privatwirtschaftlich – in die Entwicklung vorbeugender oder therapeutischer Impfstoffe ebenso investieren wollen wie in die Diagnostik und neue Technologieplattformen.

Das Projektmanagement-Unternehmen ist im August 2002 aus einem bisher einzigartigen Konzept des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und der Gesellschaft für Biotechnologische Forschung (GBF) zum Technologietransfer und zur Erfindungsverwertung entstanden. Das Ziel: die Entwicklung von Impfstoffen beschleunigen und Deutschland als Forschungs- und Entwicklungsstandort von Impfstoffen stärken. Das BMBF unterstützt das Projekt in der Startphase mit 25 Millionen Euro.



Hauptgesellschafter der VPM sind die „Deutsche Stiftung Impfstoffforschung“ und der Förderverein der GBF. Diese Eigentümerstruktur garantiert, dass die Erlöse wieder in die Impfstoffforschung und -entwicklung fließen. Ein Stiftungskuratorium von hochrangigen Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik steht der VPM beratend zur Seite.

## Großer Bedarf in der Medizin

Weltweit wird immer noch ein Drittel aller Todesfälle durch Infektionen verursacht. Die Weltgesundheitsorganisation WHO hat AIDS, Tuberkulose und Malaria als die größten Killer identifiziert – eine wirksame Schutzimpfung existiert für diese und viele andere Krankheiten bisher nicht. „Die Bedrohung ist nicht auf die Dritte Welt beschränkt: In Krankenhäusern sind bereits Keime aufgetreten, gegen die alle gängigen Antibiotika wirkungslos sind“, sagt Läufer. Forschungsergebnisse hätten zudem gezeigt, dass Zusammenhänge zwischen Infektionen und chronischen Krankheiten bestünden, zum Beispiel Asthma oder Allergien, aber auch Krebs und Herzerkrankungen.

Die gestiegene Lebenserwartung führt zu einem größeren Risiko, an lebensbedrohlichen Infektionen zu erkranken, denn im Alter lässt die Leistungsfähigkeit des Immunsystems stark nach. Die zunehmende Mobilität erhöht zudem die Wahrscheinlichkeit, dass Krankheiten erneut auftreten, die man bereits besiegt glaubte, und dass neue Krankheiten sich in Windeseile über alle Kontinente ausbreiten. Ein Beispiel ist die Lungenkrankheit SARS (Severe Acute Respiratory Syndrome).

## Wirtschaftliche Chancen nutzen

„Der klinische Bedarf an Impfstoffen ist groß. Zudem zeigen uns Molekularbiologie und Genomforschung neue Wege zur Beeinflussung des Immunsystems“, so Läufer. „Durch therapeutische Impfstoffe ergeben sich faszinierende Möglichkeiten, zum Beispiel für die Krebsbehandlung – eine Entwicklung, die erst am Anfang steht.“ Deshalb erwarten Experten, dass der Markt für Impfstoffe überdurchschnittlich expandieren wird. Fachleute rechnen mit einer jährlichen Wachstumsrate von über 20 Prozent in Deutschland bis zum Jahr 2010. Weltweit wird für diesen Zeitpunkt eine Marktgröße von über elf Milliarden Euro prognostiziert.

Läufer sieht daher große Chancen für die Impfstoff-Offensive: „Eine von der GBF im Auftrag des BMBF erstellte Studie zeigt, dass es an deutschen Universitäten und Forschungszentren eine sehr gute Impfstoffforschung gibt. Aber noch ist der Abstand zur klinischen Entwicklung groß. Diese Lücke wollen wir schließen und damit Deutschland wieder als attraktiven Standort für die Impfstoffentwicklung positionieren.“

Ende 2003 konnte die VPM, zusammen mit der Gesellschaft für Biotechnologische Forschung als Träger des Projekts, die ersten beiden Lizenzvereinbarungen unter Dach und Fach bringen: Zum einen die Entwicklung eines Derivats des Beta-Interferons, das zur Behandlung der Multiplen Sklerose und für antiviralen Einsatz entwickelt werden soll. Die in Deutschland und den USA bereits patentierte Substanz wurde vom Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik, Stuttgart, Abteilung Gentechnik in Hannover, erforscht. Zum anderen wird die VPM zusammen mit dem Institut für Virologie der Universität Mainz einen Impfstoff gegen Cytomegalie-Viren (CMV) entwickeln; der Fokus liegt zunächst auf der Vermeidung CMV-bedingter schwerer Nebenwirkungen nach Transplantationen, später auf der Prävention CMV-bedingter embryonaler Schädigungen. Weitere Vertragsabschlüsse stehen unmittelbar bevor.

GBF

*Die Vakzine Projekt Management GmbH stellt sich vor (vordere Reihe von links): Dr. Bernd Eisele, Dr. Albrecht Läufer, Ingeborg Jacobi, Bernd Strohwalde, (hinten) Dr. Leander Grode*



**Dipl.-Biol./Dipl.-Journ. Thomas Gazlig**

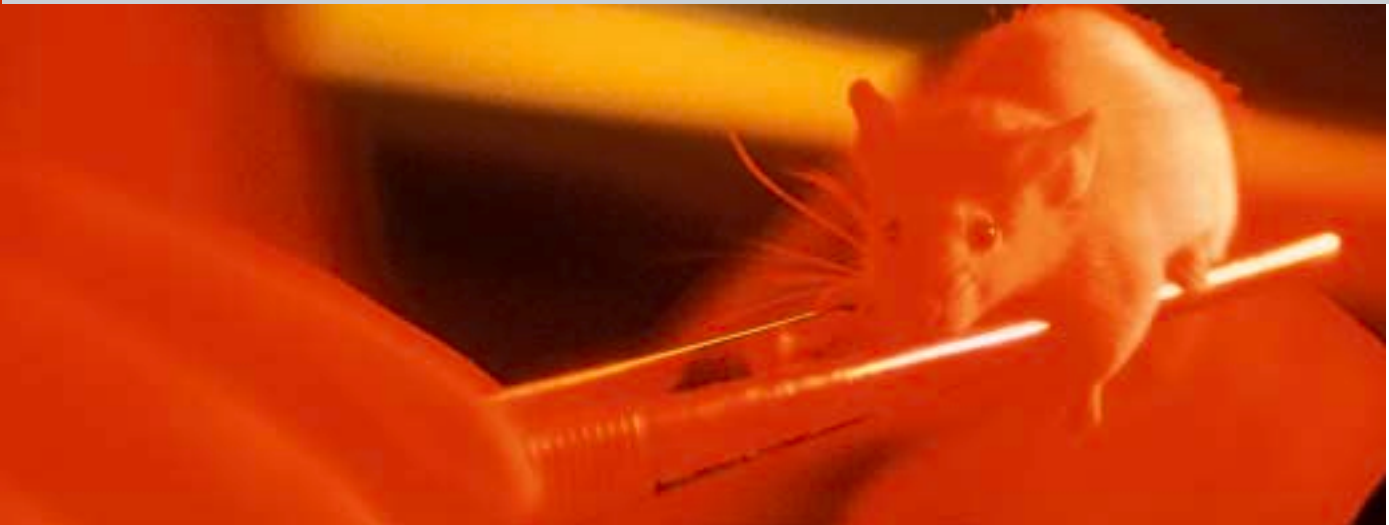
Leiter Presse- und Öffentlichkeitsarbeit  
Gesellschaft für Biotechnologische Forschung, Braunschweig



# Von Mäusen und Menschen

Die genetische Veranlagung für Infektionen wird an Mäusen aufgeklärt.

Ein Beitrag aus der Gesellschaft für Biotechnologische Forschung in Braunschweig



Es gibt Variationen im genetischen Material, die den Menschen gegenüber Krankheiten besonders empfindlich oder aber besonders widerstandsfähig machen. Diese genetische Prädisposition wollen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Gesellschaft für Biotechnologische Forschung in Braunschweig aufklären, um neue Ansätze für die Prävention und Therapie von Infektionskrankheiten zu entwickeln. Da sich die Gene und Krankheitsbilder von Menschen und Mäusen sehr ähneln, arbeiten die Forscher mit der Maus als Modell.

**A**ls blinder Passagier in einer Ladung orientalischer Gewürze gelangte die Pest im Jahr 1347 nach Genua. Bereits im nächsten Jahr erreichte der „schwarze Tod“ England. Auf Grund der Geschwindigkeit, mit der sich die Pest ausbreitete, wurde sie als Fluch Gottes angesehen. Wer überlebte, schien auserwählt zu sein. Wahrscheinlich aber hatten die Auserwählten nur das Glück, mit den „richtigen“ Genen auf die Welt gekommen zu sein.

## *Im Einzelfall immun*

Ein ähnliches Phänomen wurde Ende der Neunzigerjahre auch für den AIDS-Erreger entdeckt: Es gibt „Langzeitüberlebende“, die der Krankheit ohne eine spezielle Behandlung trotzen. Sie fragen zu Recht: Wie ist das möglich? Warum ich?

*Der Moment der Erkenntnis bei der Immunabwehr: Eine so genannte Dendritische Zelle (grün) „unterhält“ sich mit fünf T-Zellen (orange), eine sechste ist im Anmarsch. Die hellen Stränge drumherum sind das künstliche Kollagen-System. T-Zellen sind die Träger der zellvermittelten Immunität. Als so genannte Killerzellen zerstören sie körperfremde Zellen, als Helferzellen sind sie an der Produktion von Antikörpern beteiligt.*

GBF



Das HI-Virus befällt genau die Immunzellen, die zu seiner Bekämpfung erforderlich sind. Um in diese Zellen zu gelangen, heftet es sich an bestimmte Moleküle auf der Zelloberfläche: das zentrale Immunzell-Erkennungsmolekül CD4 und Hilfsrezeptoren. Bei den „Langzeitüberlebenden“ ist einer dieser Hilfsrezeptoren, CCR5 genannt, in mutierter Form auf der Oberfläche der Immunzellen vorhanden. Dem Virus wird der Einlass in die Zellen erschwert, und als Folge bildet sich das volle Krankheitsbild langsamer oder gar nicht aus.

Ähnliche Phänomene wurden zum Beispiel auch bei Pocken, Tuberkulose oder Malaria sowie Krebs und Erkrankungen des Herzkreislauf- oder Nervensystems beobachtet. Allerdings sind unsere Gene nur ein Faktor: Der Krankheitsverlauf kann ebenso von Er-

nährung, Alter oder Lebensumständen sowie vom Erreger selbst beeinflusst werden. „Wir vermuten, dass sich eine genetische Prädisposition für alle Infektionskrankheiten finden lässt“, erklärt Professor Rudi Balling, wissenschaftlicher Geschäftsführer der Gesellschaft für Biotechnologische Forschung (GBF) in Braunschweig. Schwerpunkt des Helmholtz-Zentrums ist die Erforschung der grundlegenden Mechanismen von Infektionen mit dem Ziel, neue Ansätze für die Diagnose, Prävention und Therapie von Infektionen zu entwickeln. „Aus ethischen Gründen können wir das natürlich nicht am Menschen testen. Daher forschen wir an Modellsystemen wie der Maus, um dann die Ergebnisse auf den Menschen zu übertragen.“

## ***Mensch und Maus sind sich genetisch sehr ähnlich***

Doch ist das überhaupt möglich? Verfügt nicht jede Tierart über ein eigenes Reservoir an Pathogenen? „Wie das Beispiel SARS (Severe Acute Respiratory Syndrome) gezeigt hat, sind sich viele Infektionsmechanismen bei Mensch und Tier ähnlich, auch wenn sie nicht identisch sind“, sagt Balling. Bei der Lungenentzündung SARS sind die Erreger – so genannte Coronaviren – vom Tier auf den Menschen übergesprungen. Wahrscheinlich kommen die Viren in ihren ursprünglichen Wirten, vermutlich asiatischen Schleickatzen, seit vielen tausend Jahren vor. Die Tiere werden auf Märkten in China als Spezialität angeboten. Ein verändertes Virus dürfte bei der Zubereitung den ersten Patienten infiziert haben. Ein Beispiel dafür, dass der menschliche Einfluss neue, gefährliche Infektionskrankheiten hervorbringen kann, die sich auf Grund der großen Mobilität schnell weltweit verbreiten können.

Um menschliche Erkrankungen wie SARS erforschen zu können, hat sich die Maus als wichtigstes Tiermodell etabliert. „Es lohnt sich, einmal die Größenunterschiede zwischen Maus und Mensch zu vergessen und die Organsysteme zu vergleichen: Auch die Maus hat ein Herz, das dem



*Mann und Maus: Nur ein paar Hundert der etwa 30.000 Gene von Professor Rudi Balling unterscheiden ihn von seinem Versuchstier.*

des Menschen im Aufbau gleicht. Sie hat eine Lunge, Nieren, eine Leber sowie rote und weiße Blutkörperchen. Natürlich ernährt sich eine Maus anders und lebt in einer anderen Umwelt“, sagt Balling. Wer sich allerdings einmal die Krankheiten von Mausmutanten ansehe und sie mit menschlichen Krankheitsbildern vergleiche, werde in vielen Fällen große Ähnlichkeiten und häufig komplette Übereinstimmungen erkennen. Auch die Übereinstimmung der Gene von Maus und Mensch ist frappierend: Von den 30.000 Genen gibt es nur ein paar Hundert, die ausschließlich in der Maus oder im Menschen vorkommen.

### **Das Genom wird verändert**

Um nun herauszufinden, welche Gene eine Krankheit beeinflussen, muss man diese verändern können. In den Achtzigerjahren wurde die Methode der „Transgenen Mäuse“ entwickelt: Mit Hilfe von dünnen Glaskapillaren gelang es, Erbmaterial, das zuvor aus einer Maus isoliert und in Bakterien vervielfältigt wurde, in den Kern einer befruchteten Maus-Eizelle zurück zu injizieren. Das Erbmaterial baute sich dann in das Genom ein. Leider ließ sich der Ort, wo sich das Transgen ansiedelte, nicht beeinflussen.

Diese Schwierigkeit ist überwunden. Die so genannte „Homologe Rekombination“ ermöglicht es, Erbmaterial im Genom gezielt zu platzieren. Beispielsweise kann man eine „mutierte“ DNA (deoxyribonucleic acid = Desoxyribonukleinsäure) anbieten, diese gegen die normale DNA-Sequenz austauschen und so den Informationsgehalt von Genen gezielt verändern. Allerdings ist die Häufigkeit, mit der das gelingt, sehr gering.

Hier kommen die „embryonalen Stammzellen“ ins Spiel, über die in letzter Zeit so viel diskutiert wird. Dabei geht es nicht um menschliche embryonale Stammzellen, sondern um die der Maus. Gleich nach dem Verschmelzen von Eizelle und Spermium teilt sich die befruchtete Eizelle zu

einem Zweizeller, dann einem Vierzeller, einem Achtzeller und so weiter. Nachdem mehr als 32 Zellen entstanden sind, trennen sich die Schicksale der Zellen: Sie entwickeln sich zum Beispiel zu Nerven-, Herz- oder Leberzellen. Bis dahin gleichen sich die Zellen und haben noch das Potenzial, alle Zelltypen zu produzieren. Deshalb werden sie embryonale Stammzellen genannt. Nach dem 32-Zell-Stadium bildet sich eine Gruppe von Zellen im Inneren des frühen Embryos aus, die so genannten „Innere-Zellmasse-Zellen“, die ebenfalls noch zur Bildung aller Organe und sogar der Keimzellen beitragen können.

Anfang der Achtzigerjahre gelang etwas Erstaunliches: Es wurde möglich, diese Innere-Zellmasse-Zellen in der Petrischale zu züchten und zu vermehren. Damit konnten nun die etablierten Methoden eingesetzt werden, das Genom von Zellen zu verändern. Fügt man veränderte Stammzellen den Innere-Zellmasse-Zellen eines anderen frühen Embryos hinzu, so vermischen sie sich mit diesen und werden Bestandteil des jetzt



von zwei Zellquellen abstammenden Embryos, der so genannten Chimäre. Entwickeln sich die zugefügten Zellen zu Keimzellen, so tragen die Nachkommen der Chimäre zu hundert Prozent die Erbanlagen der externen Stammzellen.

Dieses Verfahren, das ist der entscheidende Fortschritt, ermöglicht es Forscherinnen und Forschern, aus den Hunderttausenden von Zellen in der Petrischale am Anfang des Prozesses eine herauszusuchen, die die gewünschte Genveränderung trägt, und sie in die Keimbahn einer Maus einzubringen. Am Ende erhält man Nachkommen, die mit großer Wahrscheinlichkeit die gewünschte Veränderung ihres Erbmaterials aufweisen. Mit Hilfe neuer Techniken (RNAi-Interferenz) ist es sogar möglich, diese Gene im lebenden Organismus an- und abzuschalten.

### Impfung erst nach Genbefragung

Diese Technik verwenden die Braunschweiger Wissenschaftler, um zum Beispiel Gene zu identifizieren, die Mäuse anfällig machen gegen Streptokokkenerkrankungen. „Wir arbeiten mit Inzuchtstämmen, die genetisch fast identisch sind. Die Vererbungsmuster sind gut zu verfolgen, außerdem kontrollieren wir die Umweltbedingungen“, sagt Balling. Seit Projektbeginn sind drei Genregionen identifiziert worden, die in Frage kommen. In diesen Bereichen liegen Hunderte von Genen – weshalb die Forschung noch viele Jahre dauern wird.

Sobald konkrete Ergebnisse vorliegen, können diese auf den Menschen übertragen werden. Dann werden Ärzte an den Genen erkennen können, ob jemand anfällig gegen eine Streptokokken-Infektion ist oder nicht. Die Impfung oder Behandlung könnte man dann auf die Menschen beschränken, die anfällig reagieren. „Nicht nur ein medizinischer Gewinn, denn ich behandle nur die Menschen, die krank sind oder krank werden können, sondern auch eine enorme Kostenersparnis für das Gesundheitswesen.“

Balling ist sich sicher, dass wir in Zukunft noch viele Überraschungen

über den Zusammenhang von genetischer Veranlagung, Umwelteinflüssen und Infektionen erleben werden: „Es zeigt sich bereits jetzt, dass wir Infektionen als Problem bisher unterschätzt haben. Denn Bakterien, Viren und Parasiten verursachen nicht nur Infektionskrankheiten wie Tuberkulose, AIDS und Malaria, sondern scheinen auch Volkskrankheiten auszulösen. Dazu gehören beispielsweise Krebs- oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Zudem wird die Bevölkerung immer älter: Ältere Menschen besitzen ein schwächeres Immunsystem und leiden deshalb häufiger an Infektionen.“

**Dipl.-Biol./Dipl.-Journ. Thomas Gazlig**

Leiter Presse- und Öffentlichkeitsarbeit  
Gesellschaft für Biotechnologische Forschung, Braunschweig

## Nachgefragt



In Braunschweig werden Mausmodelle entwickelt, um der Infektionsforschung wichtige Erkenntnisse zu liefern. Auch bei anderen Versuchen sind Tiere ein unverzichtbares Werkzeug der modernen Forschung. Fragen dazu an Dr. David Monner, Leiter des Tierhauses der GBF.

*Wie muss man sich ein „Maushaus“ vorstellen?*

*Die Mäuse werden nahezu keimfrei gehalten, um zu aussagekräftigen Experimenten zu kommen. Ein modernes Maushaus besteht aus verschiedenen Reinräumen, die in ihrer Sauberkeit und der eingesetzten Technik einem OP oder einem Raum zur Chipherstellung ähnlich sind. Außerdem werden die Mäuse in speziellen, getrennt belüfteten Käfigen gehalten, die sicherstellen, dass keine Infektionserreger oder andere Keime von einem Käfig zum anderen übertragen werden können.*

*Elektronenmikroskopische Aufnahme von Streptokokken-Bakterien, die gerade an Kollagenfasern binden.*





*Dr. David Monner:  
„Wir stoßen auf großes Verständnis  
für Tierversuche in der Gesundheits-  
forschung.“*



### *Welche Regeln beachten Sie bei der Tierhaltung?*

*Zunächst einmal alle Vorschriften des Tierschutzgesetzes, das ist doch selbstverständlich. Wir folgen darüber hinaus auch den Empfehlungen der Gesellschaft für Versuchstierkunde und der European Federation of Laboratory Animal Sciences zur Haltung und Gesundheitsüberwachung der Mäuse. Für das Wohlbefinden der Mäuse sind nicht nur ausreichend Wasser, Futter und Streu wichtig, sondern auch die Versorgung mit Beschäftigungsmaterial und „Häuschen“ zum Verstecken.*

### *Welche Versuche werden in Braunschweig gemacht?*

*Hauptsächlich Infektionsversuche und Tests zur Prüfung neuer Impfstoffe und -strategien.*

### *Wie begründen Sie, dass es notwendig ist, solche Versuche an Tieren zu machen?*

*Die komplizierten Wechselwirkungen während einer Infektion und die Abwehrmechanismen, wie sie sich in den verschiedenen Organen des Körpers abspielen, können nicht in der Kulturschale nachgeahmt werden. Da Menschen als Versuchsobjekte natürlich nicht in Frage kommen, sind die Tierversuche unverzichtbar.*

### *Gibt es Grenzen dafür, was man mit den Mäusen machen darf?*

*Selbstverständlich. Wie oben erwähnt, regelt das Tierschutzgesetz Vorgehen und Ausmaß eines Versuches. Alle Versuche müssen vor Beginn bei der Bezirksregierung beantragt und genehmigt werden. Dabei werden sie zusätzlich durch eine unabhängige Ethikkommission geprüft. Im Vordergrund steht immer, das Leid und die Anzahl der Tiere auf ein Mindestmaß zu reduzieren.*

### *Können Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bei Ihnen es ablehnen, bestimmte Versuche zu machen?*

*Diese Möglichkeit ist sicherlich gegeben. Allerdings wird dies schon bei der Vorbereitung eines Tierversuchsantrags unter den beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern geklärt. Ich, als Leiter des Tierhauses, entscheide nicht, welche Versuche bei wem durchgeführt werden. In jedem Tierversuchsantrag*

*jedoch wird namentlich genau aufgeführt, welche Personen für die Versuchsdurchführung verantwortlich sind. Grundsätzlich dürfen nur nachweislich qualifizierte Personen Tierversuche durchführen.*

### *Die Tierpflegerinnen und Tierpfleger in Braunschweig wissen, dass ihre „Schützlinge“ nach absehbarer Zeit getötet werden. Wie gehen sie damit um?*

*Es gibt viele Berufe, wie zum Beispiel Krankenpflege, Human- und Tiermedizin sowie verschiedene Rettungs- und Hilfsdienste, wo man lernen muss, mit dem Tod umzugehen. Auch wenn wir „nur“ mit Mäusen zu tun haben, für unsere Tierpfleger ist es nicht anders: Man lernt damit umzugehen, es wird einem aber nie gleichgültig.*

### *Haben Sie Kontakt zu den örtlichen Tierschutzvereinen?*

*Ja, wir stehen in regelmäßigem Kontakt mit dem Tierschutzverein, der unsere Anlagen kurz vor der Fertigstellung auch besucht hat. Hier besteht ein kritischer, aber auch sehr konstruktiver Dialog.*

### *Wie reagieren die Menschen in der Region darauf, dass bei Ihnen Tierversuche gemacht werden?*

*Wir gehen seit Jahren sehr offen mit dem Thema um. Gerade wenn es um den Einsatz von Tieren in der Gesundheitsforschung – zum Beispiel neue Impfstoffe oder neue Behandlungsmöglichkeiten geht –, stoßen wir allgemein auf großes Verständnis.*

### *Können Besucher sich die Maushäuser ansehen?*

*Nein, das ist leider nicht möglich, denn die Tiere werden unter keimfreien Bedingungen und möglichst frei von Störungen gehalten. Daher dürfen auch nur wenige GBF-Mitarbeiter das Tierhaus betreten.*

Die Fragen stellte Thomas Gazlig.



Chancen und Risiken der modernen biomedizinischen Forschung, zum Beispiel Genomanalyse und Stammzellen, werden öffentlich intensiv diskutiert. Der Dialog mit breiten Kreisen der Gesellschaft ist ein wichtiges Anliegen der Helmholtz-Gemeinschaft. Der nachfolgende Beitrag stellt deshalb ausnahmsweise im Jahresheft der Gemeinschaft nicht konkrete Forschungsarbeiten vor. Er umreißt vielmehr einen ethischen Rahmen, innerhalb dessen diese Diskussion fundiert geführt werden kann. Der Autor, Professor Dr. **Detlev Ganten**, war seit 1991 Gründungsdirektor und Stiftungsvorstand des Max-Delbrück-Centrums für Molekulare Medizin (MDC) Berlin-Buch. Von 1997 bis 2001 war Professor Ganten zudem Vorsitzender der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren und danach einer der Vizepräsidenten der Gemeinschaft. Seit dem 15. Februar 2004 steht er als Vorstandsvorsitzender der Berliner Charité, dem größten Universitätsklinikum Europas, vor. Er gehört dem Nationalen Ethikrat an, der sich auf Beschluss der Bundesregierung im Mai 2001 als nationales Forum des Dialogs über ethische Fragen in den Lebenswissenschaften konstituiert hat.

# Wie weit soll die Selbstbestimmung reichen?

Ethische und gesellschaftliche Herausforderungen der Genomforschung.

Die Möglichkeiten der Gentechnologie und des Zugriffs auf das Genom bereiten manchem verständliches Unbehagen. Es ist schwer, allgemein gültige moralische Grundsätze zu finden, die hier gelten sollen. Einige halten es für eine moralische Pflicht, die „menschliche Natur“ in ihrer gegenwärtigen Ausprägung zu erhalten. Andere sehen eine wichtige Aufgabe des Menschen in der kulturellen Weiterentwicklung der „natürlichen“ Lebensbedingungen. Der Philosoph Kurt Bayertz schreibt: „Man kann daher sowohl intuitiv als auch unter Berufung auf eine ehrwürdige Tradition des kulturellen, theologischen und philosophischen Denkens die Auffassung vertreten, dass die Pflicht des Menschen bezüglich seiner eigenen Natur dieselbe ist wie seine Pflicht bezüglich der Natur aller übrigen Dinge, nämlich nicht, ihr zu folgen, sondern sie zu verbessern.“



Seit Frühjahr 2003 entschlüsselt: Die Abfolge von drei Milliarden DNA-Basenpaaren im Genom des Menschen.


**D**ie „Positivisten“ unter den Gentechnologen muss man daran erinnern, dass es bisher keine wissenschaftlichen Grundlagen für gezielte „Verbesserungen“ im Genom des Menschen gibt, da Gene alleine nicht über Gesundheit und Krankheit, geschweige denn, über noch komplexere Eigenschaften wie „Menschlichkeit“ entscheiden. Es gibt keinen genetischen Determinismus.

Denen, die sorgenvoll in unsere biologische Zukunft blicken, sei gesagt, dass die natur-

gegebene Evolution, auch die des Menschen, viel mächtiger und wirksamer ist als alle Gentechnologen zusammen – selbst wenn sie ein gemeinsames Ziel verfolgten. Die wirklichen Gefahren der Menschheit scheinen eher gesellschaftlicher und politischer als gentechnischer Art zu sein. Gerade deshalb ist der öffentliche Dialog so wichtig.

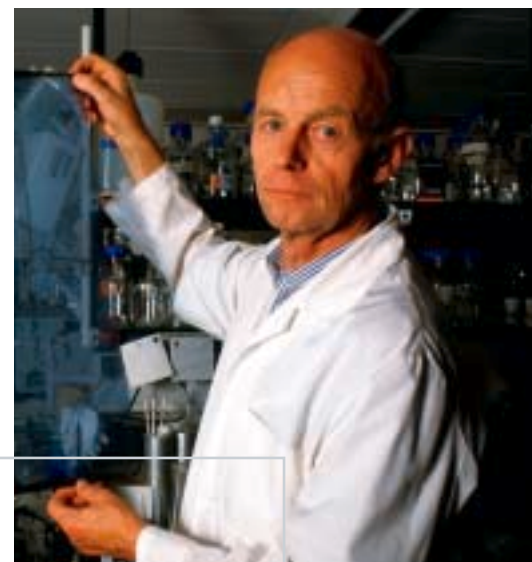
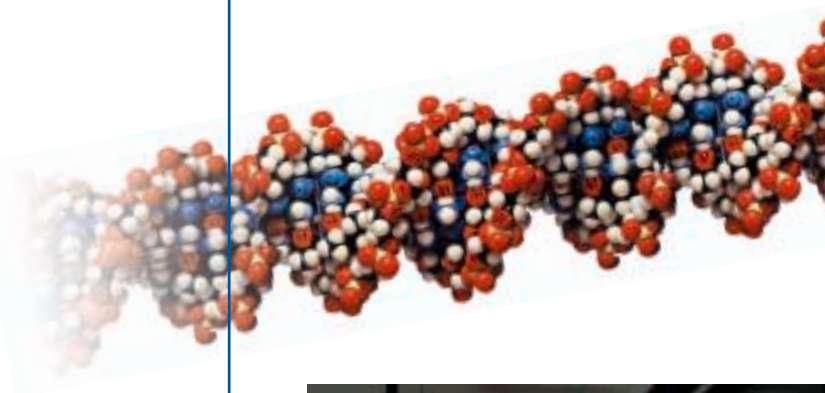
Die in jüngster Zeit in Deutschland verstärkt zu beobachtende Besinnung auf „natürliches Leben“ in Form von „natürlicher

## Genomforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft

 Ziel der Helmholtz-Gesundheitsforschung ist es, die Entstehungsprozesse von komplexen und schweren Krankheiten besser zu verstehen, daraus neue Strategien für Prävention, Diagnose und Therapie zu entwickeln und diese neuen Ansätze in Kooperationen mit Kliniken zur Anwendung zu bringen. Molekulare zelluläre Mechanismen aufzuklären, die ebenso die Basis der menschlichen Gesundheit wie der Krankheitsentstehung bilden – dies ist einer der Schwerpunkte der Gesundheitsforschung der Gemeinschaft.

Gebündelt werden die Arbeiten dazu unter anderem im Programm Vergleichende Genomforschung. Um die molekularen Ursachen von Krankheiten zu verstehen, untersuchen Forscherinnen und Forscher die Genome von Modellsystemen wie der Fruchtfliege, der Maus und der Ratte und übertragen ihre Erkenntnisse auf analoge Mechanismen im menschlichen Genom. Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen werden für vergleichende Analysen in Datenbanken gesammelt und bioinformatisch ausgewertet. Erkenntnisse über die genetischen Komponenten von Erkrankungen werden durch Proteomforschung ergänzt: Sie liefert Informationen über die Genprodukte, die Proteine, und über deren intrazelluläre krankheitsrelevante Interaktionen. Wesentlich beteiligt sind die Wissenschaftler des Programms am Deutschen Human Genom Projekt und am Nationalen Genomforschungsnetz, dessen Kernbereich zu einem großen Anteil aus Helmholtz-Projekten und -Angeboten besteht. ■

HGF



Detlev Ganten: "Es gibt keinen genetischen Determinismus."

Ernährung“, „Naturheilmitteln“, „natürlicher Geburt“, „natürlichem Wohnen“ und so weiter ist eine *kulturelle* Option, die der Einzelne in Einklang mit bestimmten Weltanschauungen oder Religionen wählen kann. Doch basiert diese „Natürlichkeit“ als Lebensstil immer auch auf einem technisch-zivilisatorischen Sicherungssystem, auf das im Ernstfall zurückgegriffen wird, wenn etwa ein Notkaiserschnitt durchgeführt, ein Kind mit schwerer Lungenentzündung mit Antibiotika behandelt oder Kurzsichtigkeit mit Kontaktlinsen ausgeglichen wird.

Bearbeitung und Überwindung der natürlichen Zwänge und Beschränkungen bilden den Kern der historischen Entwicklung des Menschen, und Teil dieser Entwicklung war es häufig, Tabus in Frage zu stellen



# Gesundheit



und Grenzüberschreitungen zu wagen. So war es etwa für die Medizin von enormer Bedeutung, im 16. Jahrhundert das Sektionsverbot zu überwinden und die Anatomie des menschlichen Körpers im Detail kennen zu lernen. Im 20. Jahrhundert brach die Einführung der Pille ein Tabu und stellte einen wirklich historischen Fortschritt für die Selbstbestimmung der Frauen dar. Auch Herztransplantationen, die heute jedes Jahr Tausende von Men-

schenleben retten, wurden zu Beginn als nicht akzeptabler Eingriff in die Natur bekämpft.

Heute gibt es ähnlich heftige Diskussionen im Hinblick auf Pränatal- und Präimplantationsdiagnostik, Stammzell- und Gentherapie und therapeutisches Klonen. Das bedeutet nicht, dass alles Machbare auch gemacht werden soll und wird. Für fast alle neuen eingreifenden Technologien gibt es in der Praxis gesellschaftliche, moralische oder gesetzliche, zum Teil strafbewehrte, Einschränkungen, um den von vielen befürchteten „Dammbbruch“ oder einen „Pietätsverlust“ zu vermeiden.

Aufgeklärte, demokratische Gesellschaften beschäftigen sich zu Recht aufwändig und differenziert mit der Frage, wie Gewolltes und Erlaubtes ermöglicht und wie Ungewolltes verhindert wird – unter Beibehaltung eines Höchstmaßes auch individueller und gesellschaftlicher Freiheit.



*Als erstes geklontes Tier erregte Dolly (hier mit Tochter) 1996 Aufsehen. Detlev Ganten: "International besteht Konsens darüber, das Klonen von Menschen zu verbieten."*

*Der Philosoph Immanuel Kant im Jahr 1768 im Alter von 44 Jahren. Er formulierte das Aufklärungsideal des mündigen Individuums.*



Bei den zurzeit intensiven Debatten um Entwicklung und Anwendung biomedizinischer, besonders genomischer, Technologien geht es im Kern darum, wie weit die Selbstbestimmung des Menschen reichen soll, die besonders seit der Aufklärung ein zentraler Wert nicht-autoritärer Gesellschaften ist. Einigkeit dürfte darüber herrschen, dass kein Eingriff in den menschlichen Körper ohne die freie Entscheidung des Betroffenen erlaubt sein darf. Was aber darf der einzelne Mensch tun, wenn er weiß, was er tut, und sich selbst dazu entschieden hat?

Viele Menschen, die für ein generelles Verbot von Gentests, Keimbahnveränderung oder den Einsatz anderer Technologien eintreten, gehen wie selbstverständlich davon aus, dass für sie selbst ein solches Verbot nicht erforderlich wäre, da sie selbst in der Lage seien, die „richtige“ Entscheidung zu treffen. Aber können sie das auch für andere?

Eine kurze, aber verhängnisvolle Epoche unserer deutschen Geschichte (1933 - 1945) zeigt besonders deutlich, wie wichtig es ist, dass die Gesellschaft und die Wissenschaft frei bleiben von dogmatisch ideologischer und politischer Einflussnahme. Ein totalitäres Regime kann auch die Wissenschaft korrumpieren. Darum messen wir der Freiheit der Wissenschaft einen so hohen, vom Grundgesetz garantierten Wert bei.

Dem Ideal der Aufklärung entspricht es, die Fähigkeit zur mündigen und freien Entscheidung zu fördern und am Selbstverständnis des Menschen als Gestalter der Natur festzuhalten, der auch grundsätzlich in der Lage ist, sein gestalterisches Tun selbst zu verantworten, und der weiß, dass er zur Verantwortung gezogen wird, wenn er anderen Schaden zufügt.

Dieses moderne Selbstverständnis des Menschen, dem Selbstbestimmung zugebilligt und Verantwortung zugemutet werden kann, ist eine wichtige Basis für Freiheit, Kreativität, Individualität und Menschenwürde. Die Würde des Menschen wird im medizinischen Kontext dann gewahrt, wenn die Gesellschaft ihm eine autonome Entscheidung erlaubt und Wissenschaft und Technik ihm verlässliche Methoden für sein selbstbestimmtes Handeln liefern. Immanuel Kant antwortete in seiner *Kritik der praktischen Vernunft* aus dem Jahre 1788 auf diese Fragen mit dem ka-

tegorischen Imperativ: „Handle so, dass die Maxime deines Willens jederzeit zugleich als Prinzip einer allgemeinen Gesetzgebung gelten könne.“ Aus dem Wert der Selbstbestimmung ergibt sich selbstverständlich auch, dass immer dann, wenn nicht der eigene Körper, sondern der anderer Menschen betroffen ist, hohe moralische und juristische Barrieren zu errichten sind. Hierzu gibt es in Deutschland wie in anderen Ländern verlässliche Strukturen. Sie haben sich in allen Bereichen der Medizin bewährt, so auch auf dem neuen Gebiet der Genomforschung. Merkmal dieser Strukturen ist die offene Debatte und die demokratische Fortschreibung akzeptierter Regeln. So können wir uns auf den Fortschritt freuen.

*Dieser Text basiert auf einem Kapitel in „Leben - Natur - Wissenschaft“ von Detlev Ganten, Thomas Deichmann, Thilo Spahl, erschienen im Eichborn Verlag, Frankfurt, 2003, ISBN 3-8218-3981-3 mit Genehmigung des Verlages.*



## Nachgefragt



### Drei Fragen an Professor Dr. Detlev Ganten.

*Herr Professor Ganten, Sie sagen: Die Kernfrage ist, wie weit die Selbstbestimmung des Menschen reichen soll. Können Sie ein Beispiel nennen, wo aus Ihrer Sicht die Entscheidungsfreiheit des aufgeklärten Individuums an ihre Grenzen stößt?*

Dem schottischen Wissenschaftler Ian Wilmut war es im Jahre 1996 gelungen, durch den Transfer des Kerns einer normalen (somatischen) Körperzelle in eine zuvor entkernte „leere“ weibliche Eizelle totipotente Zellen zu „reprogrammieren“ und so einen „Embryo“ herzustellen, der in der Gebärmutter eines Schafes heranwuchs und lebend geboren wurde: das berühmte Klon schaf „Dolly“. Dieses reproduktive Klonen erlaubt also, einen ungeschlechtlich entstandenen „Embryo“ zu einem mit dem Zellkernspender genetisch identischen Zwilling, seinem „Klon“, heranwachsen zu lassen. Experimentell ist das Verfahren des reproduktiven Klonens inzwischen auch bei anderen Tieren (zum Beispiel Maus, Ratte, Kaninchen, Kalb) etabliert. International besteht Konsens darüber, das Klonen von Menschen zu verbieten. Hierfür gibt es viele biologische, medizinische und ethisch-moralische Gründe, also ein Beispiel dafür, dass das wissenschaftlich möglicherweise „Machbare“ nicht erlaubt werden sollte.

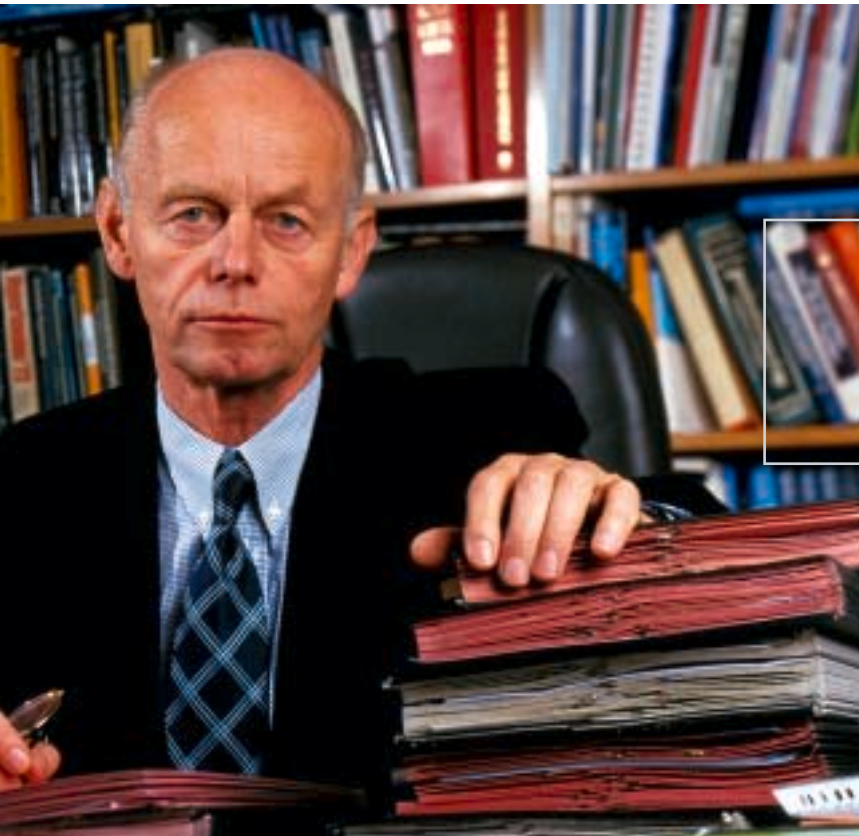
*Können Sie andererseits ein Beispiel für eine individuelle Entscheidungssituation geben, auf die sich die Menschen heute einstellen müssen?*

Ein Beispiel ist die Präimplantationsdiagnostik (PID) oder Pränataldiagnostik (PND), bei der Schäden eines Kindes vor der Einnistung in den Mutterleib (PID) oder vor der Geburt (PND) festgestellt werden können und die Eltern wie Ärzte vor die schwierige Frage der Konsequenzen einer solchen Diagnostik stellt. Eine solche Maßnahme ist in der Regel nur sinnvoll und damit ärztlich begründbar (indiziert), wenn aus der Diagnose auch eine konkrete präventive oder therapeutische Handlung folgt. Voraussetzung dafür ist, dass der betroffene Patient – oder in diesem Fall die werdenden Eltern – dieser Diagnose zustimmen. Das setzt

voraus, dass die Person bewusstseinsklar, einsehensfähig und bereit ist, auch die Konsequenzen ihrer Willensentscheidung zu tragen.

Zwischen medizinischer Indikation und individueller Entscheidungsautonomie kann es dabei zu schweren Konflikten kommen. Zum einen kann ein Patient eine diagnostische beziehungsweise therapeutische Maßnahme ablehnen, obwohl sie medizinisch (dringend) indiziert ist. Zum anderen kann selbstbestimmt eine medizinisch nicht unbedingt angezeigte ärztliche Handlung eingefordert werden. Bei der PND und PID geht es unter Umständen um eine solche selbstbestimmte Einforderung einer medizinisch nicht angezeigten ärztlichen Handlung.

Um zu verhindern, dass PND – und im Falle einer Zulassung auch PID – in den „Service“-Bereich geraten, also schrankenlos eingefordert werden können, muss zur Selbstbestimmung der Eltern die Bindung an die Zielsetzung des ärztlichen Handelns, an Heilung, Linderung und Prävention von Krankheit, hinzutreten. Dies



Detlev Ganten: "Individuelle Genprofile werden Wege zu einer maßgeschneiderten Diagnostik, Prävention und Therapie eröffnen."

stellt Ärzte und Ärztinnen vor ein schwieriges Abwägungsproblem. Sie müssen auf der einen Seite einer uneingeschränkten Selbstbestimmung entgegenzutreten, auf der anderen Seite aber zugleich vermeiden, dass die ärztliche Indikation zur Fremdbestimmung wird, die den betroffenen Eltern bei existenziellen Konflikten die Entscheidungen über ihr zukünftiges Leben aus der Hand nimmt. Bei diesen Überlegungen ist der Spielraum für eine verantwortliche Bewertung des Einzelfalls im Rahmen der jeweiligen Arzt-Patient-Beziehung unverzichtbar. Der Nationale Ethikrat hat hierzu ausführlich Stellung genommen und darauf beziehe ich mich explizit.

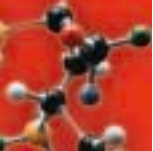
An Genomforschung knüpfen sich Befürchtungen, aber ebenso große Erwartungen. Auf welche Fortschritte, etwa in Prävention und Diagnostik schwerer Krankheiten, darf man in absehbarer Zeit hoffen?

Im Krankheitsfall werden individuelle Genprofile (die in Zukunft vielleicht aus DNA-Sequenzen auf CD-ROMs bestehen) Wege zu einer maßgeschneiderten Diagnostik, Prävention und Therapie eröffnen. Im Bereich der Krebstherapie wird eine solche personalisierte Medizin heute bereits in Einzelfällen umgesetzt. Langfristiges Ziel können und müssen individualisierte Maßnahmen zur Prävention sein, wobei dies im Rahmen einer genombasierten Gesundheitsversorgung erfolgen kann, die eine aktivere Beteiligung der Patienten als die voraussetzt, die derzeit die Praxis der Medizin kennzeichnet.

Es könnte sein, dass über diesen Umweg verwirklicht wird, was einige Ärzte schon länger befürworten, dass nämlich die Bildung der Patienten, also ihre Sachkenntnis, das wichtigste Arzneimittel der Zukunft wird und dadurch zur Gesundheit beiträgt. Ein genombasiertes Gesundheitswesen wird den Menschen

neue, individualisierte Präventionsmaßnahmen anbieten. Die diagnostischen Möglichkeiten werden dabei durch die Entwicklung der so genannten DNA-Chiptechnologie erweitert. DNA-Chips erlauben bereits heute viele tausend Gentests in einem Arbeitsgang.

Ein Hauptproblem der heutigen klassischen Behandlung von Krankheiten ist es, dass Tabletten alle gleich, Menschen aber alle verschieden sind. Mit ein und demselben Medikament werden Hunderttausende von Patienten behandelt, von denen jeder ein individuelles Genom hat, das zu einer individuellen Krankheitsausprägung und einer individuellen Reaktion auf die Therapie führt. Dieser Tatsache müssen wir in Zukunft gerecht werden, wenn es unser Ziel ist, Krankheiten zuverlässig und möglichst ohne Nebenwirkungen zu heilen. Die entsprechende Wissenschaft heißt Pharmakogenetik oder Pharmakogenomik. Sie basiert auf der Existenz von Genvarianten, deren unterschiedliche Wirkung auf Variationen der Buchstabenfolgen in einer einzelnen Stelle zurückgeführt werden kann, den Single Nucleotide Polymorphisms (Einzelnukleotid-Polymorphismen), kurz SNPs oder „Snips“. Für jeden Menschen lassen sich charakteristische „Snip“-Muster aufstellen, mit denen dann Schlüsse auf die individuelle Wirksamkeit von Medikamenten oder auf die entsprechende Anfälligkeit für bekannte Krankheiten möglich werden. Auch hier gilt jedoch, dass Genanalysen keine exakten Vorhersagen über das Einzelschicksal erlauben, es gibt keinen strikten genetischen Determinismus. Das integrierte Wissen des erfahrenen Arztes sowie sein Verhältnis zum Patienten bleiben immer wichtig auch oder besonders im Zeitalter der Molekularen Medizin. ■



# Lichtschnelle Elektronen im Gleichtakt

Am Photoinjektor-Teststand PITZ entstehen die Elektronenquellen der Zukunft.

Ein Beitrag aus dem Deutschen Elektronen-Synchrotron in Hamburg und Zeuthen

Die Quelle bestimmt, was die Mündung hergibt – das gilt jedenfalls für den Röntgenlaser XFEL, der derzeit als europäisches Projekt beim Forschungszentrum DESY in Hamburg geplant wird. Damit die Mündung Röntgenlaserlicht liefert, auf das sich vielerorts die Hoffnungen der Wissenschaftler richten, muss schon die Quelle höchste Anforderungen erfüllen. Nur dann nämlich kann das ersehnte Licht völlig neuer Qualität entstehen, das den Naturwissenschaften ebenso wie industriellen Anwendern einzigartige Forschungsperspektiven eröffnet. Entwickelt wird diese besondere Quelle von Forschern am Photoinjektor-Teststand PITZ bei DESY in Zeuthen. Sie produziert Elektronen, die anschließend einen supraleitenden Linearbeschleuniger und eine spezielle Magnetstruktur durchlaufen.

**F**ilme im Mikrokosmos drehen, mit atomarer Auflösung erforschen, wie sich Werkstoffe oder Viren verhalten – eine einzigartige Lichtquelle macht aus Visionen Wirklichkeit. Der als europäisches Projekt geplante Freielektronen-Röntgenlaser beim Forschungszentrum DESY wird hochintensive ultrakurze Röntgenblitze mit den Eigenschaften von Laserlicht erzeugen. Und dringt dabei in bislang unerreichte Dimensionen vor:

Seine Leuchtstärke ist in ihren Spitzenwerten milliardenfach höher als die modernster existierender Röntgenquellen, die mittlere Leuchtstärke ist zehntausendfach höher.

Seine Zeitauflösung ist um Größenordnungen besser als die bisher verfügbarer Quellen: Ein einzelner Röntgenblitz ist kürzer als 100 Femtosekunden (billiardstel Se-

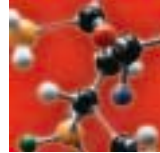
kunden). Das ist die Zeitdauer, in der sich chemische Bindungen ausbilden und Molekülgruppen ihre Lage ändern.

Die Wellenlänge seines Röntgenlichts ist so kurz, dass selbst atomare Details erkennbar werden. Sie kann im Bereich zwischen sechs und einem zehntel Nanometer (milliardstel Meter) variiert werden.

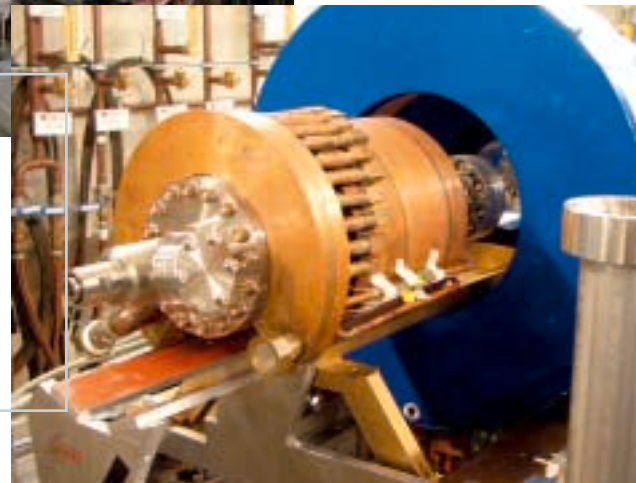
Seine Röntgenstrahlung hat die Eigenschaften von Laserlicht. Damit sind beispielsweise holographische Experimente auf atomarer Ebene möglich.

Die unvorstellbar kurzen und intensiven Röntgenpulse ermöglichen es den Forschern, chemische Reaktionen mit atomarer Auflösung regelrecht zu filmen, ebenso Bewegungen von Biomolekülen oder die Entstehung von Feststoffen. Davon profi-





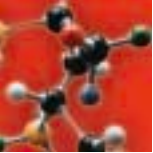
*Der Photoinjektor-Teststand PITZ in Zeuthen. Der Hohlraumresonator (kleines Bild) ist das Herzstück. Er ist von Fokussiermagneten (blau) umgeben.*



tieren die verschiedensten Naturwissenschaften – von der Physik über die Chemie, die Material- und Geoforschung bis hin zu den Biowissenschaften. Ebenso profitieren industrielle Anwender – beispielsweise wenn es darum geht, neue Werkstoffe und Materialien im Nanobereich zu entwickeln, also mit Abmessungen von milliardstel Metern.

## **Europäische Spitzenforschung**

Im Februar 2003 gab das Bundesministerium für Bildung und Forschung grünes Licht für den von DESY vorgeschlagenen Röntgenlaser, der als europäisches Projekt realisiert werden soll. Diese Entscheidung basierte auf einer Empfehlung des Deutschen Wissenschaftsrats, der verschiedene Großgeräte für die Grundlagenforschung begutachtet hatte. Jetzt soll das Projekt zusammen mit den europäischen Partnern so weiterentwickelt werden, dass die endgültige Baugenehmigung im Jahr 2005 erteilt werden kann. Die Bauzeit beträgt etwa sechs Jahre. 2012 könnte die Inbetriebnahme der neuen Anlage beginnen.



# Struktur der Materie

*Der Freie-Elektronen-Laser im Aufbau: Im so genannten Undulator, einer Anordnung mit vielen Magneten, entsteht das kurzwellige Laserlicht.*

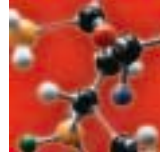


DESY

## Zukunftstechnologie

Zu der geplanten Anlage gehören eine Teilchenquelle, die dicht gebündelte „Päckchen“ von Elektronen erzeugt, und ein supraleitender Linearbeschleuniger, der diese auf Energien von 10 bis 20 Milliarden Elektronenvolt bringt. Anschließend fliegen die lichtschnellen Elektronen im Slalomkurs durch eine spezielle Magnetanordnung, den Undulator. Dabei geben sie Röntgenstrahlung ab, die sich während des Fluges immer mehr verstärkt. Das Ergebnis ist brillant: unglaublich intensive und kurze Röntgenblitze mit Lasereigenschaften. Die Voraussetzung dafür ist ein Elektronenstrahl von extrem hoher Qualität. Die wesentlichen Strahleigenschaften werden bereits in der Elektronenquelle festgelegt. Die Anforderungen sind enorm: Die Quelle muss innerhalb von wenigen Millionstel einer Sekunde (Picosekunden) mehrere Milliarden Elektronen produzieren, die sich dicht gedrängt auf weitgehend parallel verlaufenden Flugbahnen bewegen sollen – quasi zusammengeschnürt wie in einem Paket.

Um solche neuartigen Elektronenquellen bereitzustellen, nahm DESY Zeuthen im Januar 2002 den Photoinjektor-Teststand PITZ in Betrieb – einen etwa sechs Meter langen Linearbeschleuniger für die Entwicklung und Optimierung von lasergetriebenen Hochfrequenz-Photoelektronenquellen. An PITZ beteiligen sich außer DESY folgende Institute: das Berliner Max-Born-Institut MBI, die Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft BESSY sowie die Technische Universität Darmstadt. Wichtige Beiträge kommen auch aus Italien, Armenien, Bulgarien und Russland. Weitere Arbeitsgruppen aus Italien, Frankreich und den Niederlanden werden sich beteiligen.

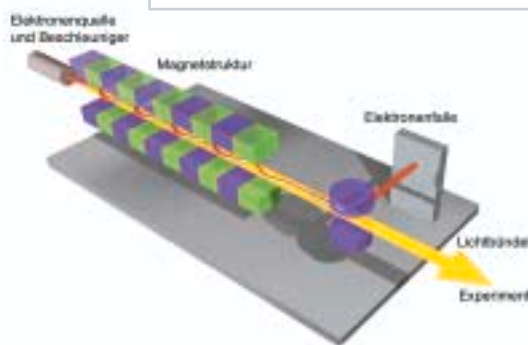


## Das Funktionsprinzip des Röntgenlasers

### Ein supraleitender Beschleuniger

Die Elektronen müssen zunächst auf Energien von einigen Milliarden Elektronenvolt beschleunigt werden, bevor sie Röntgenblitze aussenden können. Das geschieht in den Resonatoren, in denen elektromagnetische Felder die Teilchen beschleunigen. Die Resonatoren bestehen aus Niob und sind supraleitend: Kühlt man sie auf minus 271 Grad Celsius ab, verlieren sie ihren elektrischen Widerstand. Der Strom fließt dann in den Resonatoren verlustfrei – eine äußerst effiziente und energiesparende Methode der Beschleunigung. Praktisch die gesamte elektrische Leistung wird auf die Teilchen übertragen. Außerdem ermöglichen die supraleitenden Resonatoren, die hohe Qualität des Elektronenstrahls bei der Beschleunigung zu erhalten. Das ist die Voraussetzung dafür, einen Röntgenlaser überhaupt betreiben zu können.

Das intensive Laserlicht wird nach einem neuartigen Prinzip erzeugt: Elektronen werden in einem supraleitenden Teilchenbeschleuniger auf hohe Energien gebracht, fliegen anschließend im Slalomkurs durch eine besondere Magnetanordnung („Undulator“) und senden dabei laserartig gebündelte Strahlung aus.

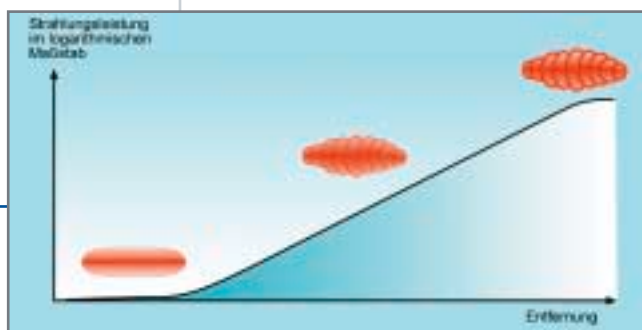
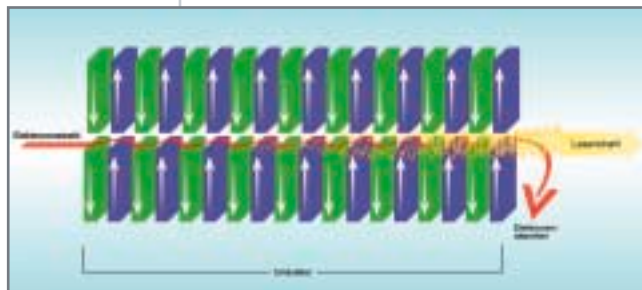


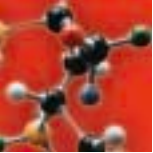
### Ein Laser nach dem SASE-Prinzip

Die hoch beschleunigten Elektronen rasen anschließend durch den Undulator, eine periodische Magnetanordnung, die sie auf einen rasanten Slalomkurs zwingt. Dabei sendet jedes einzelne Elektron ein helles, gebündeltes Röntgenlicht aus. Da dieses Licht schneller ist als die auf einer oszillierenden Bahn fliegenden Elektronen, überholt es die Teilchen vor sich und wirkt beim Vorbeifliegen auf die Elektronen ein, indem es die einen beschleunigt und andere abbremst. Als Folge davon ordnen sich die Elektronen nach und nach zu vielen dünnen Scheibchen an. Am Ende des Undulators ist diese Scheibchenstruktur voll ausgebildet. Das Entscheidende: Sämtliche Elektronen in einer Scheibe strahlen im Gleichtakt. Dadurch entstehen am Ende des Undulators extrem kurze und intensive Röntgenblitze mit den Eigenschaften von Laserlicht.

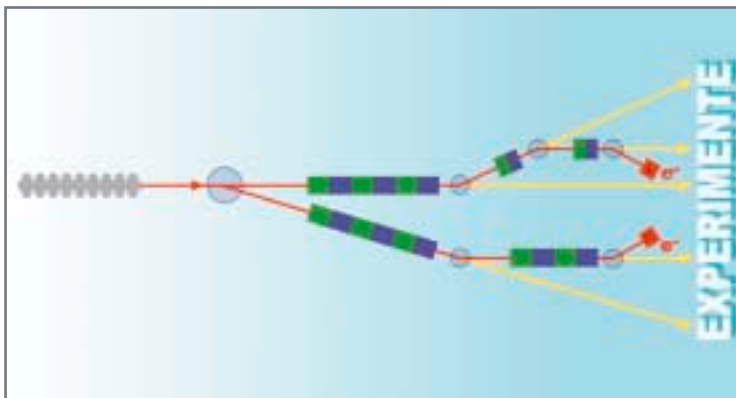
Das Röntgenlaser-Prinzip: Beim Slalomkurs durch eine periodische Magnetanordnung („Undulator“) strahlen die Elektronenpakete Licht („Photonen“) einer festen Wellenlänge aus. Der Photonenstrahl breitet sich geradlinig aus und überlappt mit dem Elektronenpaket. Er „prägt“ den Elektronen seine regelmäßige „Struktur“ auf, das heißt: Nach einiger Zeit ist aus der anfangs gleichmäßigen Ladungsdichteverteilung eine Aneinanderreihung von einzelnen „Ladungsscheibchen“ geworden, die jeweils eine Lichtwellenlänge voneinander getrennt sind. Nun strahlen alle Elektronenscheibchen im Gleichtakt – das Licht kann sich zu intensiver Laserstrahlung verstärken.

Dies ist das SASE-Prinzip – „Self-Amplified Spontaneous Emission“, die selbstverstärkte spontane Emission. Das Besondere daran: Die Wellenlänge lässt sich je nach Bedarf einstellen – im Gegensatz zu herkömmlichen Lasern. Die Beschleunigung der Elektronen muss nur entsprechend der gewünschten Wellenlänge eingestellt werden. Auf Spiegel, die für eine Laserverstärkung normalerweise erforderlich sind, kann vollständig verzichtet werden. Solche Laserspiegel sind für Wellenlängen unter 100 Nanometer auch gar nicht verfügbar.





# Struktur der Materie



Das Röntgenlaserlabor: Mit dem Elektronenbeschleuniger lassen sich gleich mehrere Undulatoren betreiben, sodass Strahlung für verschiedene Messplätze erzeugt werden kann. Für das Röntgenlaserprojekt XFEL sind zunächst zehn solcher Messplätze für unterschiedliche Experimente geplant. In der schematischen Aufsicht markieren die roten und gelben Linien die Elektronen- beziehungsweise Photonen-Strahlführungen, die Undulatoren sind grün-violett dargestellt.

DESY

## Energierreiche Elektronen

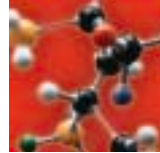
Das eigentliche Kernstück des Photoinjektors ist der so genannte Hohlraumresonator. Dort werden Elektronen erzeugt, indem ultraviolettes Laserlicht auf photoempfindliches Material – die so genannten Photokathoden – trifft und Elektronen herauslöst. Ein hochfrequentes elektromagnetisches Feld beschleunigt die Elektronen im Inneren des Hohlraumresonators. Bei einer Beschleunigungsspannung von vielen Millionen Volt pro Meter erreichen die Elektronen bereits nach wenigen Millimetern nahezu Lichtgeschwindigkeit, verlassen mit einer Energie von mehreren Millionen Elektronenvolt den Hohlraumresonator und fliegen dann durch ein Strahlrohr. Dort werden die Eigenschaften des Elektronenstrahls genau vermessen, damit sich die Wissenschaftler ein genaues Bild von den physikalischen Prozessen machen und die Elektronenquelle optimieren können. Denn an der Photokathode spielen sich interessante Effekte ab: Die vielen Elektronen sind negativ geladen und stoßen sich daher gegenseitig ab. Nur durch die schnelle Beschleunigung der Elektronen und Anwendung eines geeigneten externen Magnetfeldes wird erreicht, dass die Elektronen gebündelt bleiben und als dichtes Paket den Hohlraumresonator verlassen.

Am 13. Januar 2002 erzeugte PITZ auf diese Weise erstmalig Elektronen. Die Projektgruppe wuchs von anfänglich zwei auf mittlerweile acht Physiker und Physikerinnen an, die zudem von Fachleuten aus den Bereichen Mechanik, Elektronik, Rechnen und technische Infrastruktur unterstützt werden. Im Jahr 2002 baute das Team die Hochfrequenzversorgung des Photoinjektors weiter aus. Mit dem Ergebnis, dass jetzt eine Ausgangsleistung von fünf Megawatt mit Hochfrequenz-Pulslängen von über einer Millisekunde bei Wiederholraten von bis zu zehn Hertz zur Verfügung steht. Mit dieser Hochfrequenzleistung können die Elektronen im Hohl-

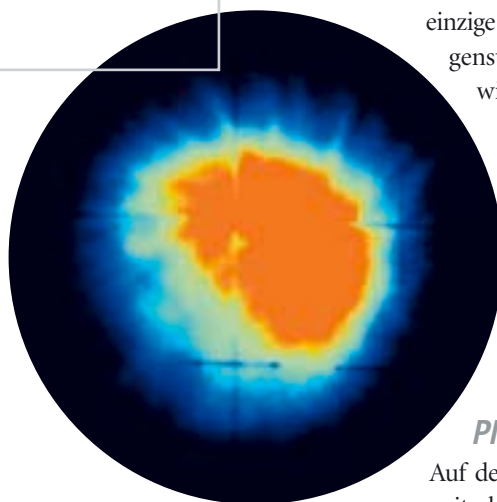
raumresonator beschleunigt werden – und diese Leistung zählt, denn: Je schneller der Teilchenstrahl auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt wird, desto stärker bleibt der Elektronenstrahl gebündelt und somit die Strahlqualität erhalten.

Die Eigenschaften des Elektronenstrahls hat das PITZ-Team in einer Reihe kontinuierlicher Betriebsphasen im Jahr 2003 vollständig vermessen. Auch die so genannte Emittanz konnte entscheidend verbessert werden. Die Emittanz ist ein Maß für die Qualität des Elektronenstrahls. Sie kennzeichnet, welche Ausdehnung das Elektronenpaket hat und wie stark sich die Flugrichtungen der einzelnen Elektronen voneinander unterscheiden. Ziel ist, eine möglichst kleine Emittanz zu erreichen, also möglichst dicht an dicht mit gleicher Energie und Richtung fliegende Elektronen zu erzeugen. Je niedriger die Emittanz ist, desto kürzer ist die erreichbare Wellenlänge der am Röntgenlaser erzeugten Lichtpulse. Und je kürzer diese Wellenlänge, desto detaillierter können die Wissenschaftler damit in die atomare Welt vordringen.

Mit der jetzt erreichten Emittanz ist der Photoinjektor bereit für seine neue Aufgabe: Mitte November 2003 reiste die Elektronenquelle von Zeuthen nach Hamburg, um in einen neuen Freie-Elektronen-Laser – eine Pilotanlage für den Röntgenlaser XFEL – eingebaut zu werden. Diese Anlage wird ab 2004 bei DESY in Betrieb genommen und



Aufnahme eines der ersten Elektronenstrahlen, die am Photoinjektor-Teststand PITZ erzeugt wurden.



weiche Röntgenstrahlung bis hinunter zu einer Wellenlänge von sechs Nanometern erzeugen. Darüber hinaus werden die Arbeiten an PITZ in Zeuthen mit einer „Kopie“ des bisherigen Aufbaus fortgesetzt und ausgeweitet.

### Kurzwelliges Laserlicht

Die insgesamt 260 Meter lange Hamburger Pilotanlage für den Röntgenlaser besteht aus der Elektronenquelle sowie mehreren hintereinander aufgereihten supraleitenden Resonatoren, die den Elektronenstrahl auf eine Energie von einer Milliarde Elektronenvolt beschleunigen. Anschließend durchläuft der Strahl einen 30 Meter langen Undulator, der weiche Röntgenstrahlung erzeugt. Die intensiven Lichtblitze werden dann auf insgesamt fünf Messplätze verteilt. Diese Anlage ist die erste Quelle für kurzwellige Laserstrahlung mit hoher Spitzenleuchtstärke und

ultrakurzen Lichtpulsen. Das wissenschaftliche Interesse ist dementsprechend groß: Rund 200 Wissenschaftler aus neun Ländern reichten insgesamt 30 Projektvorschläge für Experimente aus Bereichen wie Cluster-, Festkörper- und Oberflächenphysik, Plasmaforschung sowie Molekularbiologie ein.

Bis zum Jahr 2008 wird dieser Freielektronen-Laser bei DESY der weltweit einzige für den Bereich der weichen Röntgenstrahlung sein. Sein Betrieb liefert wichtige Erkenntnisse für den Röntgenlaser XFEL, der noch kürzere Wellenlängen bis hinunter zu einem Zehntel Nanometer erzeugen wird. Zugleich führen die Wissenschaftler an der Anlage die Entwicklungsarbeiten für den supraleitenden TESLA-Linearcollider fort.

### PITZ in Zukunft

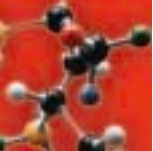
Auf den Photoinjektor PITZ warten auch weiterhin sehr wichtige Aufgaben: In den kommenden Jahren werden die Forscher in Zeuthen insbesondere daran arbeiten, die Erzeugung und Beschleunigung der dichten Elektronenpakete für Freielektronen-Laser weiterzuentwickeln und zu optimieren. Ziel ist es zum einen, die hohe Strahlqualität und kleine Emittanz zu erhalten, wenn der Elektronenstrahl die Quelle verlässt und beschleunigt wird. Das dafür an PITZ experimentell zu optimierende Prinzip wird nicht nur für den Röntgenlaser XFEL von großer Bedeutung sein, sondern auch für den Großteil der anderen weltweit geplanten Freielektronen-Laser. Zum anderen soll die Emittanz der Quelle noch weiter verringert werden, um den extrem hohen Anforderungen des Röntgenlasers XFEL an die Qualität des Elektronenstrahls zu genügen.

### Dr. Frank Stephan

Projektsprecher von PITZ  
Deutsches Elektronen-Synchrotron, Zeuthen

### Dr. Ute Wilhelmsen

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit  
Deutsches Elektronen-Synchrotron, Hamburg



## Struktur der Materie

# Grenzwertig!

Forscher in Darmstadt untersuchen einzelne Atome superschwererer Elemente. Ihre Arbeit könnte die Chemie auf Neuland jenseits des Periodensystems führen.



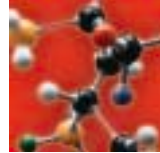
Ein Beitrag aus der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt

Die chemischen Elemente – sie sind die Bausteine aller Stoffe und die Grundlage für unser Leben. Im Periodensystem, dem klassischen Ordnungssystem der Chemie, sind alle bekannten, um die hundert verschiedenen chemischen Elemente einsortiert. Für Wissenschaftler ist diese im 19. Jahrhundert entwickelte Klassifizierung ein hilfreiches Instrument. Denn am Periodensystem lassen sich in einfacher Weise die chemischen Eigenschaften der Elemente ablesen und voraussagen. In den letzten Jahren haben allerdings zahlreiche Experimente Zweifel an der scheinbar so einfachen und überzeugenden Struktur des Periodensystems aufkommen lassen. Verantwortlich dafür sind vor allem Experimente mit so genannten superschweren Elementen. Ein internationales Team von Wissenschaftlern bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt arbeitet daran, die chemischen Eigenschaften dieser Elemente und damit ihren Platz im Periodensystem herauszufinden. Ihre Erkenntnisse versprechen Antwort auf die Frage, wie weit das Periodensystem die moderne Chemie trägt.

1																	18
H																	He
2																	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar									Kr	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	111	112	113	114	115	116	117	118
			<b>SUPERSCHWERE ELEMENTE</b>														
* Actinoide		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		
* Lanthanoide		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		

Periodensystem der Elemente. Die Elemente mit den Ordnungszahlen 104, Rutherfordium (Rf), bis 108, Hassium (Hs), sind nun auch chemisch soweit charakterisiert, dass sie in die Gruppen 4 bis 8 eingeordnet werden können. Die aktuelle Suche nach chemischen Eigenschaften des Elements 112 ist durch die gepunktete Linie angedeutet: Es könnte Eigenschaften von Quecksilber (Hg), aber auch von Radon (Rn) in sich vereinen.

Superschwere Elemente sind weit schwerer als Uran (U), das schwerste auf der Erde vorkommende Element. Die Ordnungszahl – das ist die Anzahl der Protonen im Atomkern – der heute sicher bekannten superschweren Elemente reicht lückenlos von 104, dem Rutherfordium (Rf), bis zu 112, einem noch namenlosen Element. Darüber hinaus gibt es aus dem Kernforschungszentrum in Dubna erste Hinweise auf noch schwerere Elemente. Die Elemente 107 bis 112 – darunter Element 110, das gemäß der Tradition in der Chemie angelehnt an den Entdeckungsort Darmstadtium heißt – konnten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Verlauf der letzten 20



## Struktur der Materie

*Kinder lernen es spielerisch kennen. Und Wissenschaftler testen in komplexen Experimenten, wie weit sein Erklärungshorizont reicht: Das Periodensystem sortiert die chemischen Elemente.*



### *Chemie mit superschweren Elementen*

Chemische Experimente mit superschweren Elementen unterscheiden sich erheblich von solchen Experimenten, wie sie den meisten aus der Schule vertraut sind. Die größte Herausforderung für die Chemiker: Die Elemente stehen ihnen nicht in wägbaren Mengen zur Verfügung. Ja, sie haben nicht einmal soviel, wie es die empfindlichsten chemischen Nachweisverfahren erfordern. Für die Forscher bedeutet das: Alle diese Elemente können jeweils nur als einzelne kurzlebige Atome durch Kernreaktionen an Schwerionenbeschleunigern hergestellt werden. Für das Element 108, Hassium (Hs), sind dies beispielsweise nur rund drei Atome pro Tag. Zudem zerfallen diese schon kurze Zeit nach ihrer Bildung. Die Chemiker müssen also Chemie mit einzelnen Atomen betreiben – und das innerhalb von wenigen Sekunden!

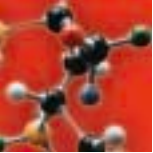
### *Hassium: das schwerste chemisch untersuchte Element*

Für das Element 108, Hassium (Hs), erwarteten die Wissenschaftler, dass sein Verhalten zu den leichteren Elementen in der Gruppe 8 passen würde. Besonders aufschlussreich dafür ist die Untersuchung von Verbindungen mit Sauerstoff (O), wodurch sich Elemente chemisch gut unterscheiden lassen. So gibt es bei den Schwermetallen aus Gruppe 8, Ruthenium (Ru) und Osmium (Os), die Besonderheit, dass sie ein sehr leicht flüchtiges, schon bei Zimmertemperatur verdampfendes Tetroxid ( $\text{RuO}_4$ ,  $\text{OsO}_4$ ) bilden. Die Frage, ob Hassium ebenfalls ein Tetroxid bildet ( $\text{HsO}_4$ ) und die Bestimmung seiner Flüchtigkeit: Darum ging es also bei den ersten chemischen Untersuchungen am Element 108.

Bei diesen kernchemischen Untersuchungen arbeiten viele Arbeitsgruppen in einem weltweiten Netzwerk eng zusammen. Für die Wissenschaftler besonders wichtig:

Jahre bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt erstmals herstellen und nachweisen. Ihr jüngster Erfolg ist ebenfalls eine Premiere: Ihnen gelang es, Hassium, das Element 108, chemisch zu untersuchen. Damit ist Hassium das derzeit schwerste Element, über das chemische Eigenschaften bekannt sind.

In Berkeley, USA, und in Dubna, Russland, sind schon früher erste Übersichtsexperimente zur Chemie superschwerer Elemente durchgeführt worden. Sie brachten zunächst durchaus erwartete Ergebnisse. So schien die generelle Einordnung der Elemente 104 und 105 in die Gruppen 4 und 5 des Periodensystems zutreffend zu sein. Neuere Experimente, viele davon in Darmstadt, in Villigen (Schweiz) und in Tokai (Japan) durchgeführt, haben dies bestätigt. Überraschungen gab es allerdings bei immer detaillierteren chemischen Untersuchungen. Hier wurden Eigenschaften sichtbar, die deutlich von den Erwartungen abwichen. Waren dies bereits die ersten Anzeichen für „das Ende“ des Periodensystems? Das blieb zunächst offen, denn eine Reihe von weitergehenden Untersuchungen am Element 106, Seaborgium (Sg), und ein erster Blick auf Element 107, Bohrium (Bh), zeigten – inzwischen fast schon überraschend – ein ganz normales Verhalten für die Gruppen 6 und 7.



# Struktur der Materie

GSI

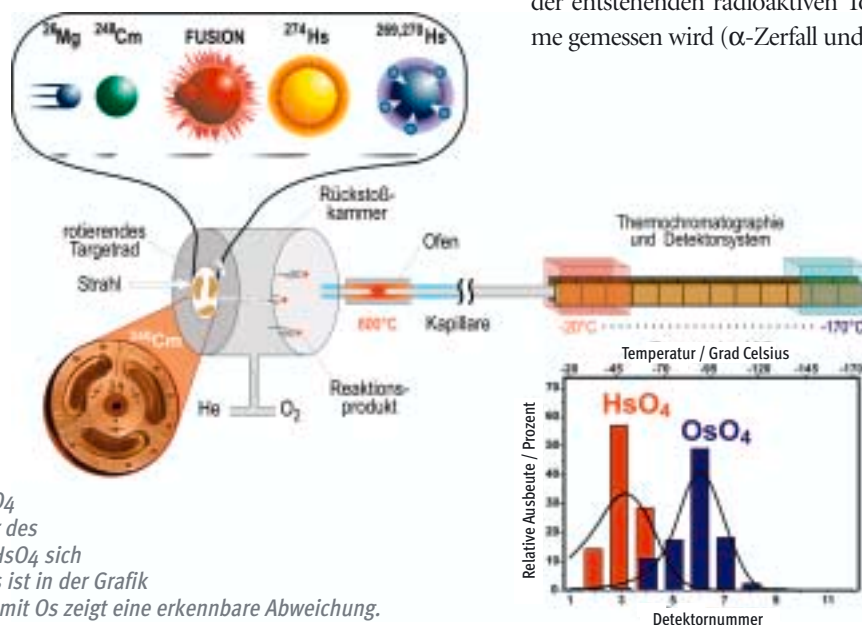
In Darmstadt können sie eine optimale Kombination aus dem 120 Meter langen Schwerionenbeschleuniger UNILAC (Universal-Linear-Accelerator) der GSI und hervorragenden Experimentiermöglichkeiten nutzen. Die für dieses Experiment notwendigen neuen chemischen Trenn- und Nachweis-Apparaturen wurden in einem ersten Typ am Lawrence Berkeley National Laboratory (USA) und in einer Weiterentwicklung am Paul Scherrer-Institut (Schweiz) gebaut und beide bei GSI in das Gesamtexperiment integriert. Auch die „erste Chemie“ an dem Element, das 1984 bei GSI entdeckt wurde und zu Ehren des Bundeslandes Hessen den Namen Hassium trägt, war konsequenterweise international. Ein Team von Wissenschaftlern aus Deutschland, der Schweiz, Russland, den Vereinigten Staaten und China war beteiligt.

Die Forscherinnen und Forscher nutzten den Schwerionenbeschleuniger UNILAC der GSI, um Magnesium-26-Ionen mit etwa 10 Prozent Lichtgeschwindigkeit auf eine Curium-248 Folie zu schießen. Durch die Fusion

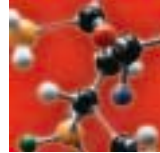
eines Magnesium-Atomkerns mit einem Curium-Atomkern entsteht in sehr seltenen Fällen ein Hassium-Atom. Dieses Hassium-Atom fliegt dann in eine mit Helium und Sauerstoffgas gefüllte Kammer und einen 600 Grad Celsius heißen Ofen. Unter diesen Bedingungen kann sich die gewünschte Sauerstoffverbindung – das Hassiumtetroxid – bilden. Anschließend strömt diese durch mehrere Meter lange Teflon-Kapillare binnen weniger Sekunden zu einer Chemieapparatur. Nur wenn sich tatsächlich ein leicht flüchtiges  $\text{HsO}_4$  gebildet hat, wird es die Chemieapparatur erreichen.

Die Apparatur dient den Forschern zum Nachweis und zur Charakterisierung der Flüchtigkeit des  $\text{HsO}_4$ . Zu diesem Zweck wird es durch einen schmalen, 1,5 Millimeter hohen und etwa 40 Zentimeter langen Kanal geleitet, in dem hintereinander an zwölf Positionen Halbleiter-Detektoren angeordnet sind. Diese sind unterschiedlich gekühlt, sodass sich ein kontinuierliches Temperaturgefälle von minus 20 Grad bis minus 170 Grad Celsius entlang des Kanals ergibt. Jede Detektorposition entspricht einer bestimmten Temperatur. Das durch den Kanal strömende  $\text{HsO}_4$ -Molekül scheidet sich auf einem Detektor ab. Der Detektor identifiziert das Hassium-Isotop, indem sein spezifischer radioaktiver Zerfall und der Zerfall der entstehenden radioaktiven Tochteratome gemessen wird ( $\alpha$ -Zerfall und Spontan-

*Schema des Experiments zur ersten chemischen Untersuchung des Elements 108, des Hassium. Oben links: Magnesium-26-Ionen werden auf eine Curium-248-Folie geschossen. Durch Kernfusion können Hassium-269- und Hassium-270-Isotope gebildet werden. In einer Rückstoßkammer, gefüllt mit Helium und Sauerstoff und einem Ofen, kann sich das flüchtige Hassiumtetroxid ( $\text{HsO}_4$ ) bilden. Innerhalb weniger Sekunden strömt es durch eine mehrere Meter lange Kapillare zu einer Chemieapparatur (Thermochromatographie- und Detektorsystem). In einem schmalen Kanal sind dort hintereinander an zwölf Positionen Detektoren mit kontinuierlich abfallenden Temperaturen von minus 20 Grad bis minus 170 Grad Celsius angeordnet. Um die Flüchtigkeit des  $\text{HsO}_4$  zu bestimmen, wird die Temperatur des Detektors gemessen, auf dem das  $\text{HsO}_4$  sich niedergeschlagen hat. Das Ergebnis ist in der Grafik unten rechts gezeigt. Der Vergleich mit Os zeigt eine erkennbare Abweichung. Die durchgezogenen Linien sind das Ergebnis einer Simulationsrechnung.*







Wissenschaftler bei Montagearbeiten an einem der Hassium-Experimente.

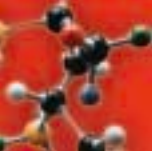
spaltung). Aus der Temperatur des Detektors, auf dem sich das  $\text{HsO}_4$  abscheidet, können die Forscher dann auf dessen Flüchtigkeit schließen.

## Sieben Atome reichten

Mit nur sieben Atomen konnte im ersten Experiment zur Chemie des Hassiums gezeigt werden, dass Hassium, wie vorhergesagt, ähnlich zu Osmium und Ruthenium ein flüchtiges Tetroxid bildet. Drei der  $\alpha$ -Zerfallsketten wurden dabei eindeutig dem Isotop Hassium-269 zugeordnet, zwei dem dabei vermutlich neu entdeckten Hassium-270 – ein schönes „nukleares Nebenprodukt“ der chemischen Untersuchung –, zwei weitere waren mit dem leichten Makel einer nicht ganz vollständig registrierten Zerfallskette behaftet. Die Halbwertszeiten der beiden Hassiumisotope betragen etwa 15 und vier Sekunden. Aber nicht nur die Tatsache, dass das Tetroxid überhaupt gebildet wird, interessierte die Forscher. Unbedingt wissen wollten sie natürlich auch, wie es um seine Flüchtigkeit bestellt ist. Deshalb beobachteten sie genau die Abscheidedeponation für die sieben  $\text{HsO}_4$ -Moleküle. Die Wissenschaftler ermittelten dabei eine Abscheidetemperatur von

$(-44 \pm 6)$  Grad Celsius für  $\text{HsO}_4$ . Sie weicht erkennbar ab von derjenigen des  $\text{OsO}_4$ , die in diesem Experiment zu  $(-82 \pm 7)$  Grad Celsius bestimmt worden war. Genau diese Unterschiede mit Hilfe der theoretischen Chemie zu verstehen, ist derzeit eine weitere Herausforderung.

Ein zweites, in allerjüngster Zeit bei der GSI durchgeführtes Experiment, das in enger Zusammenarbeit mit der Universität Mainz vorbereitet wurde, hatte das Ziel, bei Raumtemperatur eine erste chemische Reaktion des  $\text{HsO}_4$  mit der alkalischen Oberfläche von Natriumhydroxid zu untersuchen. Die Forscher nutzten dabei die gleichen Synthese- und Transportwege wie beim ersten Experiment. Während das erste allerdings mit extrem trockenen Gasen gearbeitet hatte – es sollte sich ja kein Eis auf den kalten Detektoren abscheiden – wurden nun gezielt feuchte Gase eingesetzt. Auch hier waren es wieder nur „eine Hand voll“ Hassium-Atome, die zur ersten nachweisbaren chemischen Reaktion des  $\text{HsO}_4$  führten. Die beobachteten Ergebnisse stehen im Einklang mit den Erwartungen, die die Forscher ausgehend von den leichteren Elementen in



# Struktur der Materie

Gruppe 8 hatten: Hassiumtetroxid bildet mit Natriumhydroxid das Natriumhassat (VIII),  $\text{Na}_2[\text{HsO}_4(\text{OH})_2]$ .

Als schwerstes, bisher eindeutig chemisch charakterisiertes – und damit der Chemie erschlossenes – Element hat Hassium damit seinen Platz unterhalb von Osmium in der Gruppe 8 des Periodensystems gefunden. Zwar erlebten die Forscher Überraschungen, was die chemischen Eigenschaften superschwerer Elemente im Detail betrifft – in diesem Fall bei der unterschiedlichen Flüchtigkeit von  $\text{HsO}_4$  und  $\text{OsO}_4$ . Die „Welt der Chemiker“ wurde durch die Untersuchungen des Hassium aber nicht erschüttert. Das Periodensystem behält fürs erste seine Gültigkeit.

GSI

## Neue Frage:

### Ist Element 112 ein gasförmiges Schwermetall?

Einige Entwicklungen und Erfahrungen der bisherigen Experimente, kombiniert mit völlig neuen Verfahren, bilden nun die Grundlage für die Untersuchung noch schwererer Elemente. Denn schon laufen die ersten Experimente für einen großen Sprung nach vorne im Periodensystem:

*Die moderne Alchemie zur Erkundung superschwerer Elemente nutzt neu entwickelte Apparaturen wie den am Paul Scherrer-Institut, Villigen, gebauten Cryo-Online-Thermochromatography-Detektor (COLD) und das am Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, entwickelte Vorläufermodell CTS. Ein internationales Team von Kernchemikern aus China, Deutschland, Russland, der Schweiz und den USA konnte damit am Beschleuniger der GSI erstmals wichtige chemische Eigenschaften des Elements 108, Hassium (Hs), studieren und – mit nur sieben Atomen – Hassium in die Gruppe 8 des Periodensystems einordnen.*



Element 112 ist weltweit das nächste Ziel der Kernchemiker. Hier wird es allen Erwartungen nach ganz besonders spannend. Element 112 ist nämlich das erste Element, bei dem bisher unbekannte, ja geradezu widersprüchliche Kombinationen von chemischen Eigenschaften auftreten könnten. Einerseits gehört es wohl zusammen mit Quecksilber (Hg) in die Gruppe 12 des Periodensystems – und sollte damit ein Schwermetall sein. Andererseits könnte es chemisch sehr viel weniger reaktiv als Quecksilber sein und zugleich eine deutlich höhere Flüchtigkeit besitzen. Damit wäre es in einem bestimmten Sinne fast dem Edelgas Radon (Rn) aus Gruppe 18 ähnlich.

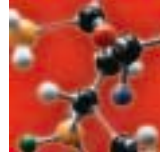
Um einen Zugang zur Chemie des Elements 112 zu finden, haben zwei internationale Kollaborationen bereits erste Experimente in Dubna und in Darmstadt durchgeführt. Schon dabei konnten die Forscher Hinweise finden, dass sich Element 112 nicht genau wie Quecksilber verhält und vermutlich eine geringere Reaktivität und höhere Flüchtigkeit besitzt. Für das neueste, bei GSI durchgeführte Experiment wurde nun unter Führung einer Schweizer Gruppe ein Detektor entwickelt und eingesetzt, der es ermöglicht, für Element 112 ein breites Spektrum von Flüchtigkeit zu bestimmen – von Quecksilber bis hin zum Edelgas Radon. Die ersten Daten, noch in Auswertung, sehen sehr vielversprechend aus. Gasförmige Schwermetalle? Vielleicht betreten die Kernchemiker bei der Erforschung superschwerer Elemente nun bald wirklich Neuland: Damit wären nämlich in der Tat zwei widersprüchliche Eigenschaften in einem Element vereinigt, die nicht mehr in einfacher Weise aus dem Periodensystem abgelesen werden könnten. Die Frage, wie weit das Periodensystem die moderne Chemie trägt, bleibt weiter spannend.

**Dr. Matthias Schädel**

Leiter der Arbeitsgruppe „Kernchemie“

**Dr. Ingo Peter**

Wissenschaftliche Geschäftsführung, Öffentlichkeitsarbeit  
Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt



# Das geht der Kunst unter die Haut

Mit hochenergetischen Protonenstrahlen enträtseln Wissenschaftler Geheimnisse alter Werke.

Ein Beitrag aus dem Hahn-Meitner-Institut Berlin

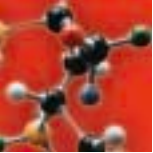
Welches Material verwendete der Künstler für diese Plastik? Woraus bestehen die Farben dieses Gemäldes? Antworten auf solche Fragen sind für Kunstwissenschaftler außerordentlich wichtig. Denn sie ermöglichen, alte Werke zu datieren oder einzuordnen. Kein Wunder also, dass naturwissenschaftliche Verfahren zur Materialbestimmung in der Kunstwissenschaft immer größere Bedeutung gewinnen. Forscher am Hahn-Meitner-Institut in Berlin setzen ganz besondere Strahlen ein, um tief in Kunstwerke hineinzuschauen, ohne ihre wertvolle Substanz anzutasten.



**E**ine ägyptische Königin des 16. Jahrhunderts vor Christus fand ihre letzte Ruhe in einem vergoldeten Sarg. Aber woher nahmen die Handwerker das Gold, das sich zu einer hauchdünnen Auflage verarbeiten ließ? In der Mongolenmetropole Karakorum stießen Archäologen auf zahlreiche Münzen. Doch wie sind die Metall-Legierungen der Münzen beschaffen, die vor über 700 Jahren im Umlauf waren? Bildhauer der Renaissance schufen in Oberitalien kostbare Bronze-Statuetten. Doch aus

welchen Bestandteilen haben sie ihren Werkstoff zusammengeschmolzen?

Zu gerne möchten die Forscher in die Kunstwerke hineinschauen, um den Meistern der Vergangenheit ihre Werkstattgeheimnisse zu entlocken. Denn die Materialien der Künstler verraten nicht nur etwas über die Handelsbeziehungen eines alten Volkes oder die damals angewandten Techniken. An der Metall-Legierung einer Skulptur, an den Pigmenten eines Gemäldes lässt sich manchmal auch die Handschrift eines bestimmten Künstlers oder seiner Werkstatt erkennen, wenn kunstwissenschaftliche Argumente alleine nicht mehr weiterhelfen.

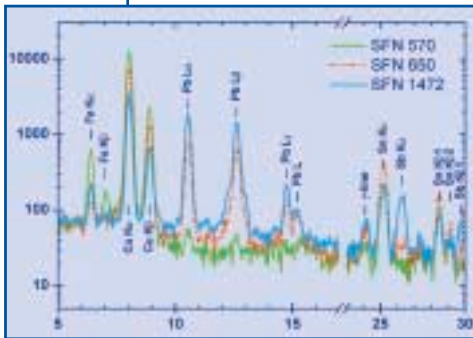


## Chinesische Münzen aus Karakorum

Das Institut für Vor- und Frühgeschichtliche Archäologie der Universität Bonn gräbt seit mehreren Jahren im mongolischen Zentrum Karakorum, das im 13. und 14. Jahrhundert die Hauptstadt eines weltumspannenden Reiches war. Bei diesen Ausgrabungen kamen bis heute über 300 Münzen zutage. Im Karakorum des 13. und 14. Jahrhunderts waren offenbar chinesische Buntmetall-Münzen im Umlauf, eigene mongolische Prägungen sind vergleichsweise selten. Die Münzen haben nach vielen Händewechseln und nach über 700 Jahren im Erdreich eine dicke Patina ausgebildet. Kein Problem für Metallanalysen mit Hochenergie-PIXE am Hahn-Meitner-Institut. Sie enthüllten, dass die Buntmetall-Münzen ein breites Spektrum verschiedener Bronzelegierungen aufweisen, und erbrachten auch einen besonders spannenden Befund: In steigendem Maße wurde den Münzmetallen Blei zugesetzt; die Münzen verloren im Laufe der Zeit also deutlich an Wert. Welche Rolle dabei die steigende Bedeutung des Papiergeldes im Mongolenreich und bei den finanzkräftigen Bevölkerungskreisen von Karakorum spielte, bedarf noch einer eingehenden Untersuchung.



HMI



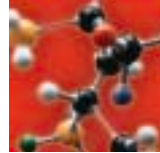
Das Diagramm stellt die Mess-Ergebnisse von drei verschiedenen Münzen dar, gekennzeichnet durch je eine andere Farbe. Die drei Messlinien werden übereinander gelegt und erlauben somit einen Vergleich über die Zusammensetzung des Materials aus den verschiedenen chemischen Elementen. ■

### Das Ziel: Atome zum Sprechen bringen

Festzustellen, woraus ein Kunstwerk gemacht wurde, das bedeutete lange Zeit jedoch, dass man Proben entnehmen musste. Mittlerweile gibt es zwar verschiedene zerstörungsfreie Methoden, mit denen untersucht werden kann, aus welchen chemischen Elementen ein Kunstwerk besteht. Allerdings geben die bisherigen

Verfahren nur Auskunft über die Zusammensetzung nahe der Oberfläche. Tief in den Gegenstand hineinzuschauen, erlauben sie nicht.

Dafür haben die Wissenschaftler am Berliner Hahn-Meitner-Institut (HMI) nun ein seit längerem benutztes Verfahren zur Materialbestimmung weiterentwickelt: PIXE nutzt die Protoneninduzierte Röntgenemission (Proton-Induced X-ray Emission), bei der die Untersuchungsobjekte mit Protonen bestrahlt werden. Deren Wechselwirkung mit den Atomen im Gegenstand lässt sich für die Untersuchung ausnutzen: Trifft ein



Proton auf ein Atom, so wird eines der Elektronen dieses Atoms aus seiner Umlaufbahn um den Atomkern herausgeschlagen. Daraufhin sendet dieses Atom eine charakteristische Röntgenstrahlung aus. Und genau das ist es, was die Wissenschaftler interessiert: Denn diese Strahlung können sie messen.

Während bislang Protonen mit einer Energie von drei Mega-Elektronenvolt (MeV) zur Materialbestimmung üblich sind, können die Wissenschaftler am HMI einen Strahl mit hochenergetischen Protonen von 68 MeV einsetzen, bei dem die Protonen sich mit einem Tempo von etwa zehn Prozent der Lichtgeschwindigkeit bewegen. Diese hochenergetischen Protonen verwenden die Wissenschaftler am HMI hauptsächlich, um Augentumore zu behandeln. Sie sind aber auch hervorragend geeignet, Probleme bei der Materialanalyse von Kunstwerken zu lösen. Und das nutzen die Forscher aus.

## Die Wahrheit liegt unter der Oberfläche

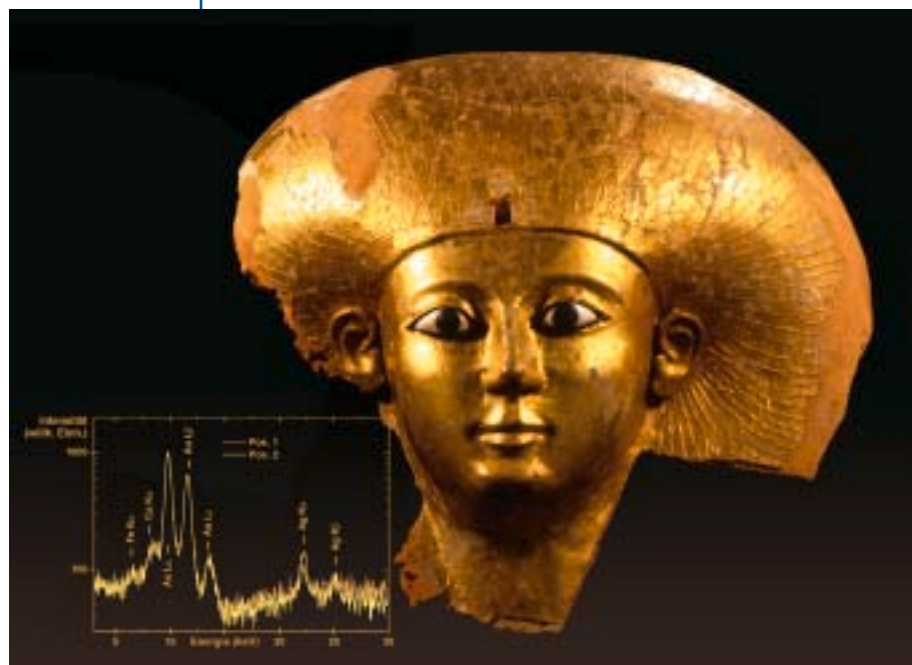
Die höhere Energie des Strahls bringt zahlreiche Vorteile mit sich. Zum Beispiel die Reichweite: Während der niederenergetische Protonenstrahl von drei Mega-Elektronenvolt (MeV) in normaler Luft nicht einmal ein Ziel in 15 Zentimetern Entfernung erreicht, kommt der hochenergetische Protonenstrahl auf über dreißig Meter. Das vereinfacht die Untersuchung, insbesondere bei großen und sperrigen Objekten, und schont die Werke. Denn sie müssen weder ins Vakuum noch übermäßig nahe an das Austrittsfenster des Protonenstrahls gebracht werden.

Der entscheidende Vorteil aber ist, dass hochenergetische Protonenstrahlen viel tiefer in die Materie eindringen als die derzeit gebräuchlichen niederenergetischen. Wäh-

## Sargmaske der Königin Sat-Djehuti

Die ägyptische Königin Sat-Djehuti wurde im 16. Jahrhundert vor Christus in einem menschengestaltigen Holzsarg beige-  
setzt, der mit einer dünnen Goldschicht bedeckt war. Das Fragment dieses Sarges mit dem Gesicht der Königin wurde im Ionenstrahlabor des Hahn-Meitner-Instituts mit Hochenergie-PIXE untersucht. Ermittelt wurde dabei ein hoher Goldanteil von 94 Prozent. Er war auf jeden Fall für die Handwerker wichtig, denn nur weiches Material konnte zu den hauchdünnen Lagen auf dem Holz gehämmert werden. Zugleich gibt der hohe Goldanteil den Kunstwissenschaftlern Rätsel auf: Denn das Material, das die Ägypter aus goldführenden Quarzgängen zwischen Nil und Rotem Meer gewannen, weist in der Regel nur einen Goldgehalt von 80 bis 85 Prozent auf. Vermutlich waren die Ägypter in dieser Zeit auch noch nicht imstande, durch Trennverfahren den Goldanteil zu erhöhen. Offenbar wurde das Gold also nicht aus diesen Lagerstätten gewonnen, sondern es könnte sich um Waschgold handeln, wie es in Nubien zu finden war.

Das eingespiegelte Diagramm zeigt zwei Messungen an der Maske an unterschiedlichen Stellen. Untersucht wird, ob die Vergoldung nachträglich ausgebessert wurde.



## Oberitalienische Renaissance-Bronzen

Den Werkstoff von Renaissance-Statuetten aus Oberitalien verhüllt meist ein dunkler Lackanstrich, der sich aber mit hochenergetischen Protonen durchdringen lässt. Die Spektren der Röntgenemissionen offenbaren, wie unterschiedlich die Materialzusammensetzung bei den einzelnen Werken ist. Die Werte im Spektrum des schreitenden Pferdes aus der Werkstatt des Severo Calzetta von Ravenna beispielsweise zeigen außer Kupfer auch Zugaben von Zinn, Zink, Blei und – in sehr kleinen Mengen – Antimon. Rezepturen für solche Legierungen aus den italienischen Werkstätten der Renaissance sind kaum überliefert. Als Idealrezept in der Tradition der Antike galt der Renaissance offenbar eine Zugabe von etwa acht Prozent Zinn zum Kupfer, um dessen hohen Schmelzpunkt niedriger und das Material härter zu machen. Die Untersuchung der Kleinbronzen aus der Berliner Skulpturensammlung am HMI ergab, dass die besten Werke tatsächlich einen entsprechenden Zinn-Anteil aufweisen. Außerdem ließ sich bei fast allen Werken eine Zugabe von Blei nachweisen, in einigen Skulpturen bis zu 21 Prozent. Es erfüllte die gleiche Funktion wie Zinn, war aber wesentlich billiger. Indiz dafür, dass die Künstler Rezepturen für die Legierungen sehr weitherzig auslegten.

Die drei Messkurven stammen von drei verschiedenen Renaissance-Bronzen. Sie zeigen, welche unterschiedliche Materialzusammensetzung sich unter dem dunklen Lackanstrich verbirgt.

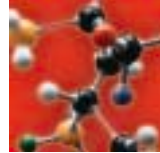
HMI



rend die herkömmlichen Strahlen nur circa 100 Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) weit kommen, also 100 Tausendstel Millimeter, reichen die hochenergetischen Strahlen bis zu zwei Zentimeter in Glas und bis zu sechs Millimeter in Bronze. Damit lässt sich also auch unter dicke Korrosionsschichten auf Metall oder unter starke Farb- und Firnissschichten von Gemälden schauen. Und genau das ist es, was die Kunsthistoriker für ihre Forschung brauchen.

### *Gesucht: der Fingerabdruck der Elemente*

Gesucht wird von den Wissenschaftlern nämlich der Fingerabdruck der Elemente, und dies auch in solchen Stoffen, die sich unter anderen Materialien verbergen. Die vom Protonenstrahl angeregte Röntgenstrahlung



## Kleine Teilchen, große Wirkung: Bestrahlung mit Protonen



Protonen sind wie Neutronen Bestandteile des Atomkerns. Sie tragen eine positive elektrische Ladung. Ihre Anzahl im Atomkern eines Elements entspricht dessen Ordnungszahl, sprich dem Platz, den das Element in der Reihenfolge des Periodensystems einnimmt. Umgeben wird der Atomkern von negativ geladenen Elektronen in gleicher Anzahl wie die Protonen. Der Kern des Wasserstoffatoms besteht nur aus einem Proton, das von seinem Elektron getrennt und mit Hilfe entsprechender Beschleuniger auf hohe Geschwindigkeiten gebracht werden kann.

Um den Kern größerer Atome sind die Elektronen in mehreren so genannten Schalen oder Umlaufbahnen angeordnet. Die dem Atomkern nächste Schale, die mit dem Buchstaben K gekennzeichnet wird, hat die niedrigste Energie. Die Schalen mit den nächst höheren Energien bezeichnet man der Reihe nach mit L, M und so weiter. Wird durch die Bestrahlung mit hochenergetischen Protonen ein Elektron aus einer der inneren Bahnen, K oder L, hinausgeworfen, nimmt nach kurzer Zeit ein Elektron aus einer der nächsten Schalen seinen Platz ein. Die Energie der dabei entstehenden charakteristischen Röntgenstrahlung identifiziert das Atom eindeutig. Je nachdem, aus welcher Schale das herüberwechselnde Elektron kommt, werden unterschiedliche Energien frei. ■

liefert diesen unverwechselbaren Identitätsnachweis, denn aus der charakteristischen Röntgenstrahlung lässt sich eindeutig ermitteln, zu welchem Element das angeregte Atom gehört. Voraussetzung ist allerdings, dass die Elemente schwer genug sind, um eine messbare Röntgenstrahlung auszusenden.

„Röntgenstrahlen werden prinzipiell von ihrer Umgebung absorbiert, besonders aber die niederenergetischen Strahlungen“, sagt Dr. Andrea Denker, Leiterin des Hochenergie-PIXE-Projektes. „Je leichter das aussen-

dende Element, desto niedriger ist die Energie der Röntgenstrahlung. Deswegen ist die Methode erst bei Elementen mit einer Ordnungszahl größer als 16 realistisch einsetzbar, weil die Strahlung ja in der Probe und in der Luft absorbiert wird. Das leichteste Element, bei dem wir gute Ergebnisse erzielen, ist Schwefel, das zum Beispiel in der Farbe Zinnober enthalten ist.“

Wenn es in den Werkstoffen eines Kunstwerks solche ausreichend schweren Elemente gibt, lassen sie sich schon während der Messung identifizieren. Danach wird mit komplexen Auswertungsprogrammen aus den Messergebnissen das Verhältnis der einzelnen Elemente ermittelt: Zutage kommen dabei oft Rezepturen, die einst von den Werkstätten eifersüchtig gehütet wurden. Ohne die Substanz der Kunstwerke zu verringern, erlaubt der Einsatz hochenergetischer Protonen also den Blick in alte Werkstattgeheimnisse – nicht selten der Schlüssel, um das Profil eines Meisters und seiner Schule schärfer herauszuarbeiten.

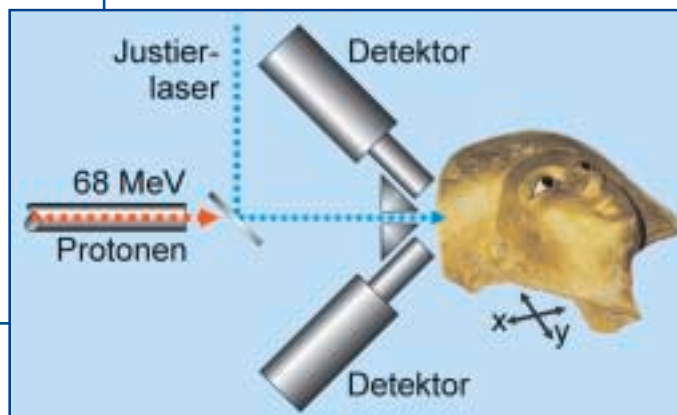
**Dr. Malte Römer**

Wissenschaftsjournalist, Berlin

## Messprinzip der Methode „PIXE“



Vor der Untersuchung wird mit einem eingespiegelten Laserstrahl der Zielpunkt für den Protonenstrahl auf dem Objekt markiert. Etwa ein Quadratmillimeter groß sollte die Fläche eines Messpunktes auf einem Kunstgegenstand sein. Sonst können Einsprengsel im Material die Messungen verfälschen. Das Objekt liegt auf einem in horizontaler und vertikaler Richtung verstellbaren Tisch. Detektoren messen die charakteristische Röntgenstrahlung. Etwa 200 Sekunden dauert eine Messung. ■





## Zentimeterarbeit auf die Sekunde

Wenn ein Flugzeug mit der Nase steil in den Himmel zeigend landet, ... stecken Hightech und Kreativität dahinter. Auch Software aus Braunschweig spielte bei der Premiere eine wichtige Rolle.

Ein Beitrag aus dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt

29. April 2003, Patuxent River, das Flugversuchsgelände der US-Navy in Maryland, USA: Das deutsch-amerikanische Experimentalflugzeug X-31A setzt zur Landung an. Aber nicht zu irgendeiner Landung – das Flugzeug wird Luftfahrtgeschichte schreiben. Die X-31A nähert sich dem Boden. Alles, was Testpilot Major Cody Allee vom US Marine Corps durch die Cockpitscheibe sehen kann, ist ein Stück Himmel mit eingeblendeten Navigationsdaten, denn die Nase der X-31A ragt steil nach oben. Mit einem Anstellwinkel von 24 Grad fliegt sie der Landebahn entgegen. Erst als das Flugzeug nur noch 60 Zentimeter vom Boden trennen, dreht es in die normale Landeposition und setzt sicher auf der Landebahn auf. Genau im richtigen Moment. Nur eine Sekunde später wäre das Heck auf dem Asphalt aufgeschlagen.

**D**as Entwicklungsteam der X-31A wird diesen Moment nicht vergessen. Die Forscherinnen und Forscher hatten gerade eine Premiere erlebt, die sie zwar minutiös vorbereiten, aber nicht proben konnten: Gerade einmal eine Woche vorher hatte der deutsche Testpilot Rüdiger Knöpfel von der Wehrtechnischen Dienststelle 61 die erste vollautomatische, schubvektorgesteuerte







ESTOL-Landung (Extremely Short Take-Off and Landing) überhaupt absolviert. Soeben gelungen war die erste Landung mit einem Anstellwinkel von 24 Grad. Das Forschungsprogramm VECTOR ist damit erfolgreich beendet – unter anderem dank neuer Steuerungssoftware von den bekannten Luftfahrtfirmen Boeing und EADS, deren Entwicklung das Braunschweiger DLR-Institut für Flugsystemtechnik mit so genannter Systemidentifizierung unterstützt hat. Die erfolgreiche Landungs-Premiere mit dem extremen Anstellwinkel war auch gleichzeitig die letzte der X-31A. Inzwischen steht sie bereits zusammen mit anderen technischen „Highlights“ der Luftfahrtgeschichte in Oberschleißheim, der Außenstelle des Deutschen Museums.

### **Erfolgreiches Teamwork überbrückt den großen Teich**

Die X-31A ist das Produkt einer langjährigen deutsch-amerikanischen Kooperation. Ende der 80er-Jahre wurde sie zunächst konstruiert und gebaut, um die Manövrierfähigkeit bei so genannten Post-Stall-Flügen zu testen. Das sind Flüge mit sehr großen Anstellwinkeln, bei denen das Flugzeug ohne zusätzliche Stabilisierung durch das Schubvektorsystem außer Kontrolle geraten würde. Die X-31A erstaunte damals die Fachwelt mit Post-Stall-Flügen bis zu 70-Grad Anstellwinkel. Nun, bei diesem zweiten Forschungsprogramm namens VECTOR, lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung so genannter ESTOL-Landungen. Diese sind für die Luftfahrt sehr attraktiv: Da die Flugzeuge langsamer zur Landung anfliegen können, verkürzt sich der Bremsweg erheblich. Deshalb kommen sie mit deutlich kürzeren Landebahnen aus. Alternativ können die Flugzeuge bei gleicher Anfluggeschwindigkeit mit viel schwereren Lasten landen als bei herkömmlichen Verfahren. Allerdings muss dieses komplexe Manöver automatisch geflogen werden, denn der Pilot selbst könnte nicht exakt genug steuern. Die automatische Flugregelung arbeitet da genauer und schneller. Um sie so zu perfektionieren, dass sie eine ESTOL-Landung wie die am 29. April 2003 einwandfrei bewältigt, mussten die beteiligten Ingenieurinnen und Ingenieure allerdings einige harte Nüsse knacken.

### **Ein komplexes Modell für eine komplexe Situation**

Denn die Flugregelung braucht, um das Flugzeug sicher zu landen, verlässliche Daten über die Aerodynamik und die Größen aller Parameter, die diese Aerodynamik kurzfristig beeinflussen können. Das Institut für Flugsystemtechnik setzte zur Bestimmung dieser Daten die im Hause entwickelten Methoden der Systemidentifizierung ein. Diplomingenieur Detlef Rohlf, der die X-31A-Programme seit mehr als zehn Jahren begleitet, begann 1996 mit der Entwicklung des „Globalen Modells“. Dieses Werkzeug liefert Daten über das individuelle Flugverhalten der Maschine in allen denkbaren Flugsituationen. In der Sprache der Wissenschaftler: Das Globale Modell ermöglicht es, bei der Identifizierung den gesamten Flugbereich der X-31A in einem einzigen Modellansatz auszuwerten; vom extremen Langsamflug bei 70 Grad Anstellwinkel bis zum Flug mit Überschallgeschwindigkeit. Im Rahmen des VECTOR-Programms erweiterte Rohlf sein Modell, sodass es jetzt auch Start und Landung mit einschließt. Während der „normale“ Flug noch mit relativ einfachen Modellen zu beschreiben ist, erfordert die Auswertung der extremen Flugmanöver der X-31A komplexe dynamische Modelle. Hier müssen zusätzlich zur Aerodynamik das Triebwerk, die Schubvektorsteuerung und – für Start und Landung – auch das Fahrwerk sowie der so genannte Bodeneffekt berücksichtigt werden. Das Modell von Rohlf berücksichtigt natürlich auch den Treibstoffverbrauch bei der Berechnung des Flugzeuggewichtes und sogar das Schwappen des Treibstoffs im Tank bei der Schwerpunktberechnung.

### **Kniffliges Problem: Luftpolster verändern den Auftrieb**

Bei der ESTOL-Landung der X-31A beeinflusst der Bodeneffekt die Aerodynamik gerade im kritischsten Moment sehr stark, nämlich dann, wenn das Flugzeug aus dem 24-Grad-Anstellwinkel in die normale



*Aus sieben Einzelbildern zusammengesetzt, veranschaulicht die Collage den Ablauf der ESTOL-Landung. Nur Sekunden liegen zwischen dem Anflug und dem Aufsetzen des Hauptfahrwerks, Sekunden höchster Präzision.*



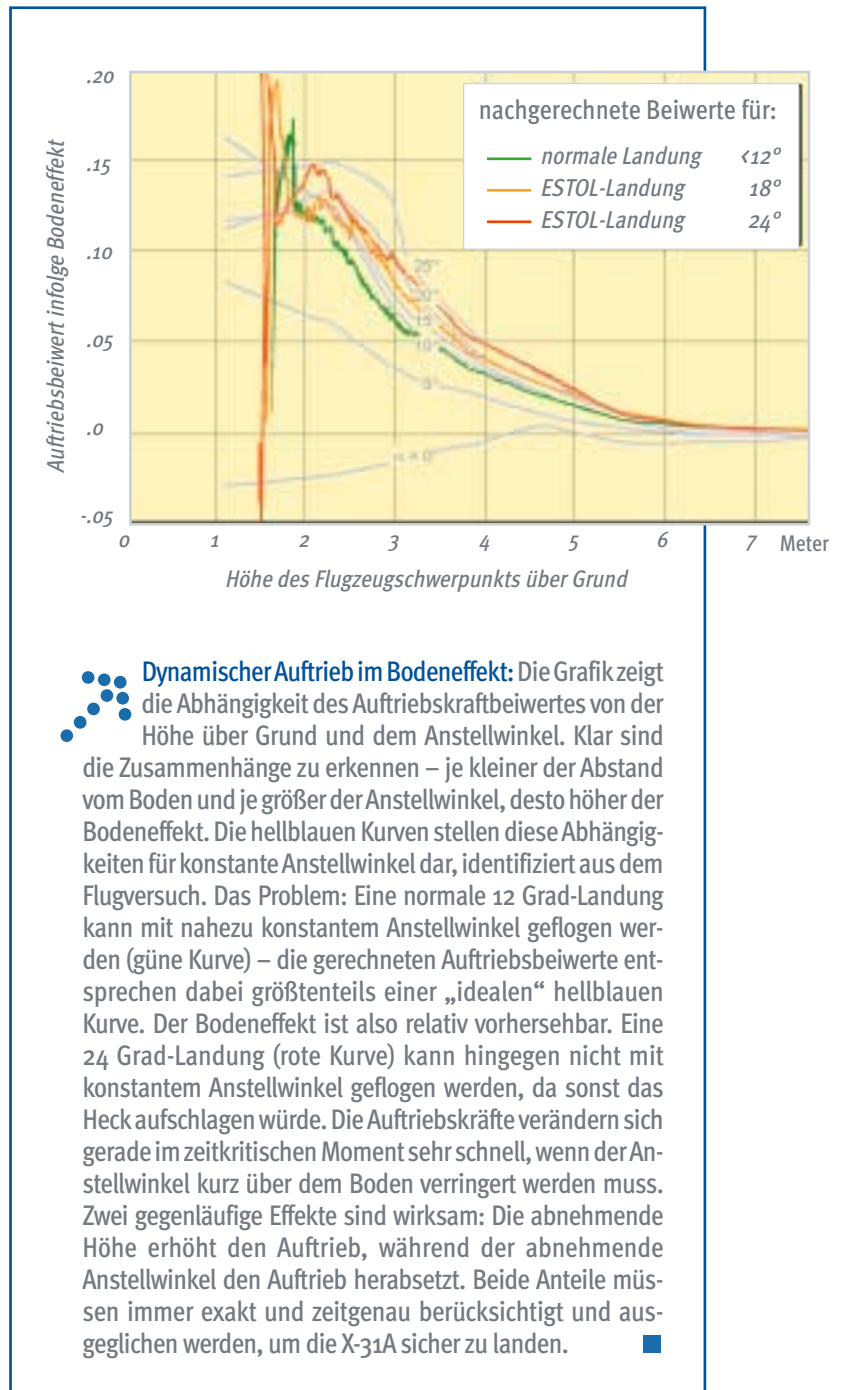
# Verkehr und Weltraum

DLR

Landeposition dreht. Der Bodeneffekt entsteht durch das Luftpolster, das sich unter einem sehr tief über Wasser oder Land fliegenden Fluggerät bildet. Die erzeugten Luftströme können nicht so schnell abfließen, wie sie sich aufbauen. Es entsteht ein zusätzlicher Auftrieb, der bei der Landung berücksichtigt werden muss. Die Stärke des Luftpolsters hängt vor allem von der Flughöhe über dem Boden und dem Anstellwinkel ab. Jedes Flugzeug zeigt hierbei ganz individuelle Charakteristiken. Deswegen ist der Bodeneffekt keine konstante Größe, die einfach in den Flugregler eingegeben werden kann, sondern ändert sich ständig. Die Stärke des Luftpolsters muss blitzschnell während der Landung im Flugregler berücksichtigt werden, damit das Flugzeug sicher und erfolgreich landen kann. Das erfordert maximale Leistung der Sensoren und sekundenschnelle Datenverarbeitung. Ein hochgenaues Navigationssystem bestimmt auf den Zentimeter genau, wie weit das Flugzeug in diesem Moment vom Boden entfernt ist. So kann die Flugregelung den benötigten Schub und die Klappenstellungen bestimmen, äußerst präzise abgestimmt auf den aktuellen Flugzustand.

## Schwierige Aufgabe: Visitenkarte für ein Flugzeug

Um ein solch komplexes Reglerwerk zu entwickeln, muss das Flugzeug identifiziert werden. Das bedeutet, dass zunächst ein mathematisches Modell aus computerunterstützten Berechnungen und Daten aus dem Windkanal erstellt wird, welches das Verhalten des Flugzeuges im unbeeinflussten Flug simuliert. Dieses Modell ist sozusagen die Visitenkarte des Flugzeuges, die sein individuelles Flugverhalten beschreibt. Auch für die X-31A wurde ein solches Modell entwickelt und verifiziert. Dazu wurden spezielle Flugversuche exakt im Computer „nachgeflogen“. Wichen die Ergebnisse vom realen Flugversuch nicht stärker ab, als durch vorgegebene Grenzen festgelegt, so galt das Modell als verifiziert. Bei größeren Abweichungen wurden die Modelle aktualisiert.



Mit dieser Methode wurde auch der aus Versuchen im Windkanal vorausgesagte Einfluss des Bodeneffektes verifiziert. Die Software simulierte die Reaktionen des Flugzeuges. Noch bevor die X-31A geflogen war, wussten die Forscher also recht genau, wie sie sich bei der Landung verhalten würde. Um die Sicherheit weiter zu erhöhen, wurde jede einzelne Landung zunächst auf einer virtuellen Landebahn in circa 1.500 Metern Höhe durchgeführt, bevor die Testpiloten im April 2003 die ESTOL-Manöver erfolgreich zum Boden flogen.

Anne Papenfuß

Institut für Flugsystemtechnik  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt



# Gigantisches Gitter über den Globus

Grid-Computing ist das Modell für den Datenaustausch der Zukunft.

Ein Beitrag aus dem Forschungszentrum Karlsruhe

Riesige Datenmengen abrufen quasi „aus der Steckdose“? So wie man Strom und Wasser bekommt? Das klingt nach Utopie. Doch Wissenschaftler in Karlsruhe wollen diesen Traum Wirklichkeit werden lassen. Das neue Zauberwort heißt Grid-Computing. Dahinter verbirgt sich die Vision, gigantisch große Datenbestände durch ein weltweites, leistungsfähiges Netz zu verknüpfen und so kurzfristig verfügbar zu machen. Wirklichkeit werden soll dies am „German Grid Computing Centre Karlsruhe“, das seit 2001 am Institut für Wissenschaftliches Rechnen des Forschungszentrums Karlsruhe entsteht und von Elementarteilchenphysikern bereits genutzt wird.

„Grid“ hat noch vor wenigen Jahren niemand mit Computern in Verbindung gebracht. Heute findet eine gängige Suchmaschine im Internet mehr als sieben Millionen Referenzen dieses Begriffs. Selbst die Kombination „Grid Computing“ ist dort schon millionenfach vorhanden. Und nicht nur Computer-Fachzeitschriften, sondern auch angesehene Tageszeitungen und Magazine in aller Welt berichten neuerdings regelmäßig über die rasant zunehmende Bedeutung des Grid-Computing.

Im englischen Sprachgebrauch wird „Grid“ häufig im Zusammenhang mit Stromnetzen und mit der Wasserversorgung verwendet. Darauf nahmen Ian Foster und Carl Kesselmann Bezug, als sie 1999 in ihrem Buch „The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure“ das Modell des Grid-Computing erstmals definierten. Sie formu-



# Schlüsseltechnologien

lierten die Vision, dass künftig jedermann Computer-Ressourcen weltweit in beliebiger Menge problemlos und ohne technisches Detailwissen beziehen könne, ohne sich über die Herkunft und die technischen Einzelheiten dieser Ressourcen Gedanken machen zu müssen. Ganz so, wie man heute elektrischen Strom bequem aus einer genormten Steckdose beziehen kann, ohne über die Herkunft oder über Spannung und Frequenz dieses Stroms irgendetwas zu wissen.

## Daten-Netze für den Alltag

Gebraucht wird das neuartige Datennetzwerk allemal. Denn an vielen Stellen wächst der Bedarf, kurzfristig und unregelmäßig auf sehr große Datenbestände zuzugreifen und diese mit großem Computeraufwand auszuwerten. Beispiel Arztpraxis: Ein Arzt bespricht mit einem Patienten ein soeben entstandenes Röntgenbild. Für eine sichere Diagnose wäre es sinnvoll, wenn der Arzt unmittelbar auf Tausende gleichartiger Röntgenbilder und die entsprechenden Diagnosen zugreifen könnte, um die Beschwerden seines Patienten möglichst treffend noch während des Gesprächs beurteilen zu können. Beispiel Reisebüro: Hier möchte sich ein Kunde über ein Urlaubsziel informieren. Sehr nützlich wäre es, wenn der Verkäufer kurzfristig auf große Datenbestände und Rechenkapazitäten zugreifen könnte, um dem Kunden das gewünschte Reiseziel dreidimensional als „Virtuelle Realität“ darzustellen.

Beiden Beispielen ist gemeinsam, dass der Bedarf an Computer-Kapazitäten nicht gleichmäßig anfällt, sondern dass nur gelegentlich sehr große Datenmengen zu bearbeiten sind, die sich nicht am Ort des Bearbeiters befinden. Es wäre allerdings vollkommen unwirtschaftlich, wenn Arzt oder Reisebüro diese Ressourcen ständig in großem Umfang selbst bereithielten. Vielmehr müssen Netze vorhanden sein, die kurzfristig sehr große Datenmengen transportieren können.

## Hochenergiephysik ist Triebfeder für Grid-Computing

Vorangetrieben wird die Entwicklung des Grid-Computing vor allem von der Wissenschaft, um grundlegende Fragen der Physik auf einem neuen Niveau angehen zu können. Noch immer ist es eine ungelöste Frage, was sich beim Urknall und während der ersten Milliardstel Sekunde danach abgespielt hat. Weltweit suchen etwa 8.000 Hochenergie- und Elementarteilchenphysiker nach der Antwort auf diese Frage. Sie versuchen, mit gigantisch großen Teilchenbeschleunigern den Zustand der Materie während und kurz nach dem Urknall experimentell nachzubilden. Dazu werden in mehreren Ländern gewaltig große Elementarteilchenbeschleuniger gebaut und betrieben. Die weltweit größte dieser Anlagen, der „Large Hadron Collider – LHC“ wird zurzeit im Europäischen Kernforschungszentrum CERN bei Genf aufgebaut. Sie ist in einem kreisförmigen Tunnel von 28 Kilometern Länge untergebracht. Andere bedeutende Beschleuniger werden zum Beispiel im Fermi-Laboratorium in der Nähe von Chicago, in Stanford in Kalifornien und am Helmholtz-Zentrum DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) in Hamburg betrieben.



*Im Europäischen Kernforschungszentrum CERN bei Genf entsteht mit dem Large Hadron Collider (LHC) der zurzeit weltgrößte Teilchenbeschleuniger. Hier ein Blick in die Kühlanlage.*



In diesen Beschleunigern werden Elektronen und Positronen, Protonen und Antiprotonen mit extrem hohen Energien auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und durch Kollisionen zum Zerplatzen gebracht. Dabei entstehen Hunderte bis Tausende von Bruchstücken, was in etwa dem Zustand der Materie kurz nach dem Urknall entspricht. Die entstehenden Teilchen werden mit bürohausgroßen und bis zu 12.000 Tonnen schweren Detektoren gemessen, und ihre Flugbahnen werden aufgezeichnet. Dabei können pro Sekunde mehrere Gigabyte an Daten entstehen, innerhalb eines Monats mehrere Millionen von Gigabyte, die aufgezeichnet und später ausgewertet werden müssen. Für die Auswertung der aus den Beschleunigerexperimenten gewonnenen Daten werden anschließend gewaltige Computerkapazitäten benötigt, allein für die Untersuchung der am CERN-Experiment LHC entstehenden Daten wurde ein Bedarf von etwa 100.000 heutigen Pentium-PCs ermittelt.

FZK



## Schlüsseltechnologien



**LHC Tier-1-Zentren weltweit:**  
Zehn dieser besonders leistungsfähigen  
Computerzentren soll es geben.

### Petabyte – eine 1 mit 15 Nullen

Ein Byte ist die Informationsmenge, die einem Buchstaben entspricht, 1.000 Byte sind ein Kilobyte, 1.000 Kilobyte ein Megabyte, 1.000 Megabyte ein Gigabyte – das ist heute jedem Schulkind geläufig, weil heutzutage jeder PC über mehrere Gigabyte an Plattenspeicher verfügt. Aber wie heißen die nächstgrößeren Einheiten? 1.000 Gigabyte nennt man ein Terabyte, 1.000 Terabyte ein Petabyte, das sind dann 1.000.000.000.000.000 Byte. In den großen Elementarteilchenbeschleunigern entstehen bis zu zehn Petabyte Daten pro Jahr. Zehn Petabyte sind eine schier unvorstellbar große Informationsmenge, sie entspricht sämtlichen von der gesamten Menschheit innerhalb eines ganzen Jahres gesprochenen Wörtern. Wollte man diese Informationen auf CD-ROMs speichern, entstünde ein Stapel von mehr als zehn Kilometern Höhe. ■



# Schlüsseltechnologien

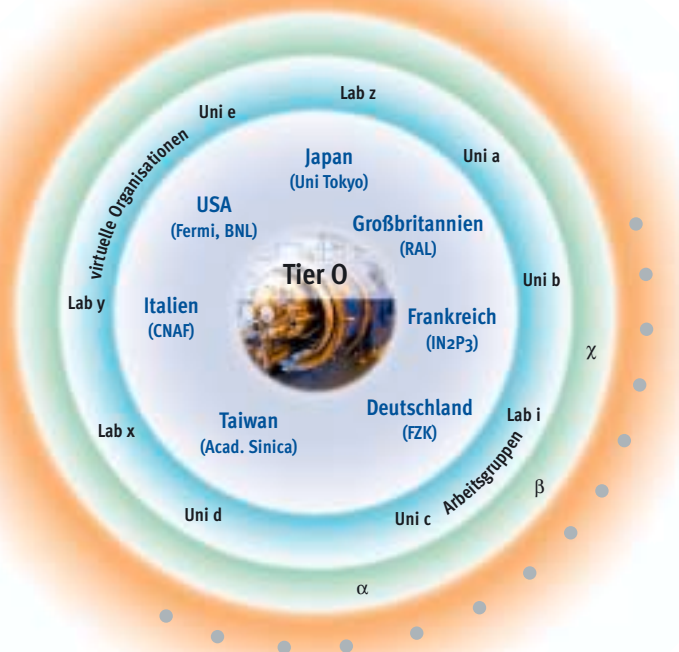
## Mehrschichtige Computerarchitektur

Die gigantisch großen Datenbestände, die benötigten riesigen Computerkapazitäten und die 8.000 über nahezu alle Länder dieser Welt verteilten Wissenschaftler – diese Bedingungen haben zur Folge, dass das bisher übliche Modell großer zentraler Rechenzentren nicht mehr sinnvoll einsetzbar ist. Sowohl wirtschaftliche als auch technische Gründe sprechen dagegen. So entstand für die Bearbeitung der Beschleunigerdaten auf der Basis der Grid-Idee von Foster und Kesselmann ein globales Grid-Modell: Computer und Wissenschaftler, die über den gesamten Erdball verteilt sind, werden mit weltumspannenden leistungsfähigen Datennetzen verknüpft.

Die bei diesem Grid-Modell vorhandenen Ressourcen, also Datenbestände und Computer, werden in einer mehrschichtigen Computerarchitektur angesiedelt: An den Teilchenbeschleunigern selbst, also an der Quelle der Daten, befindet sich je ein Computerzentrum der Schicht 0, hier werden vor allem alle gemessenen Daten in ihrem Urzustand aufbewahrt. Um dieses Schicht-0-Zentrum werden als nächste Ebene weltweit etwa zehn sehr leistungsfähige Computerzentren der Schicht 1 angesiedelt, welche jeweils über sehr große Datenkapazitäten sowie über sehr starke Computer für die Auswertung der Daten verfügen. Diesen Schicht-1-Zentren werden dann insgesamt etwa 100 mittelgroße Computerzentren der Schicht 2 zugeordnet, diesen wiederum etwa 1.000 kleinere Zentren der Schicht 3. Die Arbeitsplatzrechner der 8.000 beteiligten Wissenschaftler bilden schließlich die Schicht 4.

Den Computerzentren der Schicht 1 – man nennt sie nach dem englischen Begriff für „Schicht“ auch die „Tier-1-Zentren“ – kommt in diesem Modell eine besondere Bedeutung zu. Hier laufen für alle beteiligten Wissenschaftler die aufwändigen Auswertungen der gemessenen experimentellen Daten ab, die mitunter Dutzende von Computern über Wochen hinweg beschäftigen. Die weltweit zehn geplanten Tier-1-Zentren werden derzeit in Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien, Japan, Russland, Taiwan, USA (2) und den Niederlanden eingerichtet.

Das deutsche Tier-1-Zentrum, das „German Grid Computing Centre Karlsruhe – GridKa“, entsteht nach einer entsprechenden Entscheidung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung seit Herbst 2001 im Institut für Wissenschaftliches Rechnen des Forschungszentrums Karlsruhe und wird seit dem Frühjahr 2002 in ständig zunehmendem Maße von den beteiligten Wissenschaftlern genutzt. Schon heute sind hier etwa 500 Pentium-Rechner, 150 Terabyte Plattenspeicher sowie 200 Terabyte Magnetbandarchive vorhanden. Bis zum Jahre 2007 werden alle diese Ressourcen noch um den Faktor 15 anwachsen, sodass den Wissenschaftlern mit GridKa dann ein extrem leistungsfähiges Computerzentrum zur Verfügung stehen wird.



FZK


	Tier 0 - Computerzentren an den Teilchenbeschleunigern
	Tier 1 - LHC-Zentren weltweit
	Tier 2 - 100 mittelgroße Computerzentren
	Tier 3 - 1.000 kleinere Rechenzentren
	Tier 4 - Arbeitsplatzrechner der 8.000 Wissenschaftler

## Intelligente Steuerung koordiniert Kapazitäten

Grid-Computing bedeutet, dass ein Wissenschaftler an seinem Arbeitsplatz zunächst seine Aufträge in das Grid eingibt. Dabei muss er angeben, mit welchen im Grid vorhandenen Daten welche Berechnungen durchzuführen sind. Im weltweiten Grid muss dann eine intelligente Steuerungssoftware, für die sich der Begriff „Middleware“ eingebürgert hat, die gewünschten Kapazitäten suchen und so koordinieren, dass die Anforderungen des Wissenschaftlers erfüllt werden können. Dazu muss zunächst festgestellt werden, wo im Grid in näherer Zukunft genügend Computerkapazität frei sein wird, wo auf der Welt sich die gewünschten Daten befinden und welche Leitungskapazitäten für die Übermittlung großer Datenbestände zur Verfügung stehen. Sobald das alles geregelt ist, kann der Auftrag des Nutzers ausgeführt und können die Ergebnisse an ihn zurückgesandt werden.



## Die Übermittlung von Daten braucht ihre Zeit


 Mit einem häuslichen ISDN-Anschluss lassen sich in einer Sekunde etwa 50.000 Bit, also 50 Kilobit übertragen, das entspricht 6.250 Byte. Mit dieser Übertragungsgeschwindigkeit dauert die Übermittlung eines Megabyte 160 Sekunden, ein Gigabyte beansprucht schon knapp zwei Tage, ein Terabyte annähernd sechs Jahre, und für ein Petabyte würde man etwa 6.000 Jahre brauchen. Selbst ein T-DSL-Anschluss mit etwa zehnfacher Übertragungsgeschwindigkeit verbessert die Situation nicht wesentlich: Für die Übermittlung eines Petabyte an Daten von einem Computerzentrum in ein anderes brauchte man immer noch 600 Jahre, was im Umfeld des beschriebenen globalen Grid-Projektes eindeutig zu lang ist. Abhilfe schaffen hier erst so genannte Gigabit-Verbindungen, welche pro Sekunde die Übermittlung von mindestens 125 Megabyte erlauben. Bei ihnen flutscht ein Megabyte innerhalb einer Hundertstelsekunde über die Leitung, ein Gigabyte, also etwa der Inhalt einer CD-ROM, binnen acht Sekunden, ein Terabyte ist nach knapp drei Stunden am Ziel, und für ein Petabyte benötigte man „nur noch“ 100 Tage. ■



Rechnerraum im Forschungszentrum Karlsruhe

## Vom World Wide Web zum World Wide Grid

Das WWW, das World Wide Web, hat in den vergangenen zehn Jahren die Welt nachhaltiger verändert als jemals zuvor eine andere technische Erfindung binnen so kurzer Zeit. Und das, obwohl es sich beim WWW um eine recht schlichte Struktur handelt, bei der ein Benutzer sich lediglich auf ziemlich einfache Art Informationen beschaffen kann. Die neuartige Idee des Grid-Computing verspricht, weit interessanter zu werden: Jedermann wird bei Bedarf unabhängig von seinem geografischen Standort auf einfachste Weise Daten und Computerkapazitäten in nahezu unbeschränkter Menge „aus der Steckdose“ beziehen können, so wie man das heute bei Strom und Wasser gewohnt ist. Bisher nutzen erst die Elementarteilchenphysiker die neuartige Idee des Grid-Computing. Bald werden andere wissenschaftliche Disziplinen wie Biomedizin, Klimaforschung und Astrophysik hinzukommen, und auch die Wirtschaft wird binnen kurzer Zeit innovative Grid-Anwendungen entwickeln. So ist fest damit zu rechnen, dass das WWW in den kommenden Jahren die wissenschaftliche, die kommerzielle und die private Welt noch schneller und noch nachhaltiger verändern wird, als wir das mit dem WWW erlebt haben.

*Test von supraleitenden Quadrupol-Magneten für den Large Hadron Collider (LHC). Er soll 2005 in Betrieb gehen und mit seinen bisher unerreichten Energien unter anderem den Nachweis der bisher nur theoretisch vorhergesagten Higgs-Teilchen ermöglichen.*



**Klaus-Peter Mickel**

Institut für  
Wissenschaftliches Rechnen  
Forschungszentrum Karlsruhe



## Physik praktisch


In der Internationalen Sommerschule gewinnen Studierende Einblick in die Arbeit der Forscher.

Studierende aus aller Welt besuchen die Sommerschule, die das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY alljährlich anbietet. Allein in diesem Jahr waren es 86 junge Leute aus 22 Ländern. Das Forschungszentrum mit den Standorten in Hamburg und Zeuthen gibt den Studierenden Gelegenheit, acht Wochen lang in den „Berufsalltag“ der DESY-Physiker hineinzuschnuppern.

**E**lisabeth Ptacek will der Teilchenphysik treu bleiben: Während der achtwöchigen Sommerschule bei DESY habe sie sich für eine Doktorarbeit in dieser Fachrichtung entschieden, berichtet die junge Amerikanerin, die am Massachusetts Institute of Technology (MIT) Physik studiert. Die praktischen Erfahrungen während ihres Aufenthalts bei DESY haben ihr Gewissheit gegeben. Die Nachwuchswissenschaftlerin arbeitete in der Forschergruppe des H1-Experiments, die an der großen Beschleunigeranlage HERA Teilchenkollisionen misst. Integriert in die Aufgaben des Teams, beteiligte sich Elisabeth Ptacek an der Entwicklung eines Analyseprogramms für eine neue Komponente des H1-Teilchendetektors. Dabei sammelte sie erste Erfahrungen, wie man mit Hilfe spezieller Software die Funktionstüchtigkeit einer Detektorkomponente prüft.

Ihre neuen Kenntnisse konnte die Amerikanerin in Seminaren und in Fachdiskussionen mit Wissenschaftlern und Betreuern vertiefen. Besonders effektiv fand die 22-Jährige Vorlesungen, die auf Niveau und Bedürfnisse der Sommerschüler zugeschnitten sind. In den ersten fünf Wochen begleitet dieses Lehrangebot die praktische Arbeit im Projekt und vermittelt den Studierenden die theoretischen Hintergründe. Nach einer Einführung in die Forschungsschwerpunkte von DESY erhalten sie – je nach wissenschaftlicher Ausrichtung auf Hochenergiephysik oder Forschung mit Synchrotronstrahlung – getrennte Vorlesungen und können sich so auf unterschiedliche Themen spezialisieren

### Heute für morgen: Helmholtz-Nachwuchsförderung

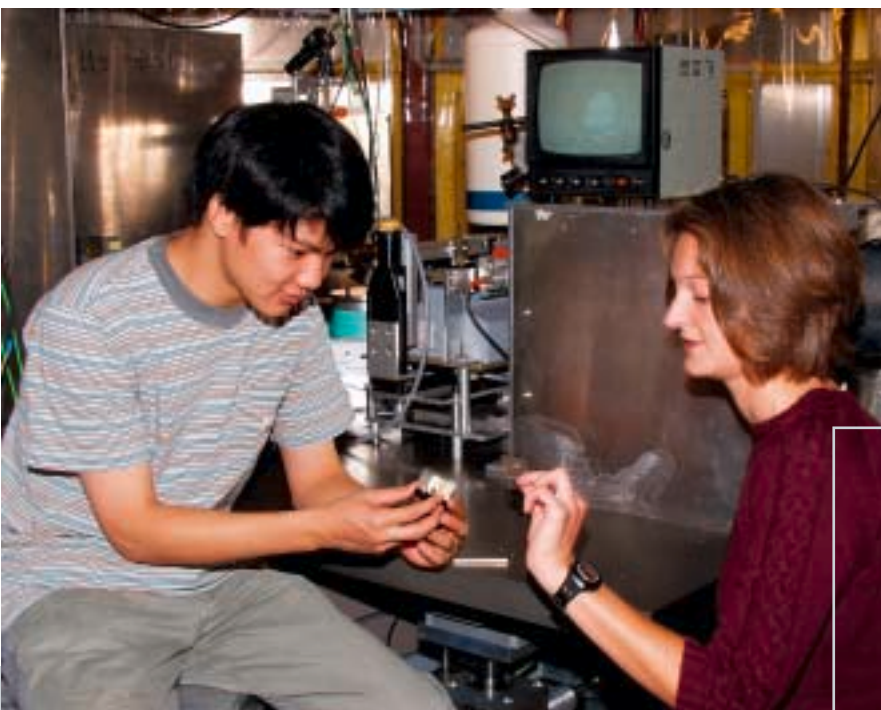
 Die Helmholtz-Gemeinschaft unterstützt den wissenschaftlichen Nachwuchs, trägt durch Ausbildung in den Forschungsbereichen zu seiner beruflichen Qualifizierung bei und bietet die Chance zur frühen wissenschaftlichen Selbstständigkeit. So sagt es die Mission der Gemeinschaft.

Konkret bedeutet dies, dass sich in den fünfzehn Forschungszentren der Gemeinschaft derzeit rund 1.800 Doktoranden, 750 Diplomanden und 100 Habilitanden qualifizieren. Attraktiv ist die Arbeit in den Helmholtz-Forschungszentren für Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler vor allem deshalb, weil sie hier schon früh in ihrer Berufskarriere eigenständig forschen können, zugleich aber eingebunden sind in die Arbeit international besetzter Teams an großen Projekten. Besonders anziehend für den Nachwuchs sind die hervorragende Forschungsinfrastruktur der Helmholtz-Zentren und die zum Teil weltweit einzigartigen Großgeräte, die die Forscher nutzen können.

Um junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler besonders zu fördern, setzen die Forschungszentren unterschiedliche Modelle ein – drei davon stellen wir hier beispielhaft vor: das internationale Sommerstudentenprogramm von DESY in Hamburg, die Nachwuchsgruppen mit Tenure Track nach amerikanischem Vorbild am Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg und die Helmholtz-Stipendien des Max-Delbrück-Centrums für Molekulare Medizin in Berlin-Buch.

Weil erfahrungsgemäß die Förderung junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler durch Helmholtz-Zentren zusammen mit den Hochschulen besonders erfolgreich ist, setzt die Gemeinschaft dafür eigens Mittel ein, allein im Jahr 2003 in zweistelliger Millionenhöhe. 19 Helmholtz-Hochschul-Nachwuchsgruppen werden damit gerade neu aufgebaut, rund 100 sollen es in den nächsten Jahren werden. ■





*Im Labor: Der Thailänder Chaivat Tengsirivattana diskutiert mit seiner Betreuerin Karen Rickers die spezielle Messtechnik der Spurenanalytik mit Synchrotronstrahlung: Indem man unter hohem Druck in einer Diamantstempel-Zelle die Löslichkeiten von Mineralien misst, können beispielsweise Bedingungen in der Erdkruste simuliert werden.*

DESY

## Motiviert und begeistert

Die Sommerschule für den Forscher-Nachwuchs hat bei DESY Tradition. Bereits seit 1968 lädt das Forschungszentrum Studierende der Physik oder verwandter Forschungsrichtungen dazu ein, in den verschiedenen Arbeitsgruppen zu hospitieren. Ziel der Nachwuchsförderung ist es, den Studierenden fachliche und fachübergreifende Kenntnisse zu vermitteln, ihnen wissenschaftliche Kontakte – national wie international – zu ermöglichen und die zukünftigen Hochschulabsolventen für die Forschung bei DESY zu begeistern.

Von den insgesamt 86 Studierenden im Jahr 2003 forschten 72 in Hamburg, 14 an DESYs zweitem Standort in Zeuthen, Brandenburg. „Die Begeisterung und Motivation der Studenten ist beeindruckend. Für viele ist es der erste Auslandsaufenthalt, bei dem sie Praxiserfahrung sammeln können“, berichtet Professor Joachim Meyer, der seit vielen Jahren das Programm betreut. Die Studierenden können ihren „Arbeitsbereich“ selbst wählen: Experimente zur Elementarteilchenphysik, Forschung mit Synchrotronstrahlung, Entwicklung von Beschleunigeranlagen, Theorie der Elementarteilchen oder Informationstechnologie.

Chaivat Tengsirivattana hat sich für die Mitarbeit an einem Experiment im Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB entschieden. Dort wird die an Beschleunigern erzeugte elektromagnetische Strahlung für vielfältige Untersuchungen in Oberflächenphysik, Materialwissenschaften, Chemie, Molekularbiologie, Geophysik und Medizin genutzt.

Der junge Thailänder ist fasziniert von der Präzision, die seine Forschungsgruppe in der Spurenelementanalytik durch Nutzung der hoch brillanten Synchrotronstrahlung erreicht: So untersuchte sein Team zum Beispiel winzige Probeschnitte eines mit Schwermetall belasteten Hüftknochens und konnte selbst bei sehr niedrigen Konzentrationen noch die Bleiverteilung in verschiedenen Regionen des Knochenschnitts lokalisieren. Solche Daten helfen, die Knochenkrankheit Osteoporose zu erforschen.



Am DESY-Sommerstudentenprogramm können Studierende der Physik oder einer verwandten Forschungsrichtung teilnehmen. Voraussetzung für deutsche Teilnehmerinnen und Teilnehmer ist das Vordiplom. Bewerber anderer Länder müssen eine ähnliche Qualifikation vorweisen.

Internetadresse „Sommerstudenten“  
<http://www.desy.de/summerstudents>

Allgemeine Hinweise für die Bewerbung:  
<http://www.desy.de/f/students/conditions.html> ■

## Internationales Netzwerk

Zuvor hatte der Thailänder erste Erfahrungen in einem zweiwöchigen Seminar beim heimischen National Synchrotron Research Center (NSRC) sammeln können, wo gerade die erste thailändische Synchrotronstrahlungsquelle gebaut wird. Jetzt habe er ein viel



## Nachwuchs

besseres Verständnis für die Praxis, meint Chaivat Tengsirivattana nach seiner Zeit bei DESY. Besonderes Interesse hat das europäische Röntgenlaserprojekt XFEL (siehe DESY-Beitrag Seite 72) bei dem 22-Jährigen geweckt: „In diesem europäischen Projekt meine Doktorarbeit zu machen, wäre großartig.“

Die Sommerstudenten erhalten bei DESY nicht nur Einblick in die alltägliche Forscheroutine, sondern knüpfen gleichzeitig ihr eigenes Netzwerk. In einer internationalen Gemeinschaft auf Zeit zu leben, ist für die meisten besonders reizvoll: Die Studierenden wohnen alle auf dem DESY-Campus und organisieren „Special Events“, bei denen beispielsweise jede Nationalität ein spezielles Landesgericht für die übrigen kocht. Das stärkt den Zusammenhalt – auch über die Zeit der Sommerschule hinaus.

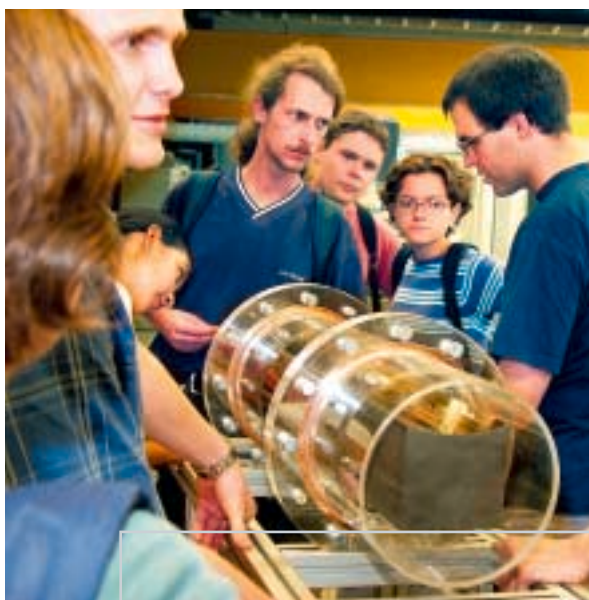
## Früher flügge

Mit Helmholtz-Stipendien für Nachwuchsforscher werden in Berlin Postdoktoranden gefördert.

Was tun, wenn man promoviert ist, seinen „Postdoc“ erfolgreich abgeleistet, aber noch keine Fünfjahres-Stelle in Aussicht hat? Das Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin (MDC) Berlin-Buch hat sich für solche Postdoktoranden etwas einfallen lassen: Die Forschungseinrichtung im Norden Berlins fördert seit 2000 Nachwuchswissenschaftler mit einem „Helmholtz-Stipendium“. Bisher hat das Zentrum dafür mehr als eine Million Euro aus eigenen Mitteln zur Verfügung gestellt.

„Mit dem Helmholtz-Stipendium soll die frühe Unabhängigkeit junger, Erfolg versprechender Wissenschaftler gefördert werden“, betont der langjährige MDC-Stiftungsvorstand, Professor Detlev Ganten. Das Stipendium wird zunächst für drei Jahre bewilligt. Wenn die Forschung der jungen Wissenschaftler positiv begutachtet wird, kann es um zwei Jahre verlängert werden. Zwölf Helmholtz-Stipendien wurden bereits vergeben. Fünf Stipendiaten sind Biologen, sieben Mediziner. Letztere kommen aus den Kliniken der Charité/Helios-Klinikum Berlin, mit denen das MDC eng auf dem Campus Berlin-Buch zusammenarbeitet.

„Das MDC ist das einzige Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft, das diese Fördermaßnahme für Postdocs eingerichtet hat“, sagt Dr. Katrin Stade, selbst



*Orientierungshilfe: Am Anfang ihres Aufenthalts führt Nachwuchswissenschaftler Bernd Steffen (rechts) die Sommerstudenten über den DESY-Campus; dabei gewinnen sie einen ersten Einblick in DESYs Aufgaben und Forschungsziele.*

**Sandra Hesping**

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit  
Deutsches Elektronen-Synchrotron, Hamburg

**Ilka Flegel**

Wissenschaftsjournalistin, Jena



# Dickere Bretter bohren

Ein Tenure Track-Modell in Heidelberg bietet jungen Forscherinnen und Forschern die Chance, schon früh in der Karriere mit Perspektive zu arbeiten.

## MDC

Helmholtz-Stipendiatin und MDC-Frauenbeauftragte. Sie und drei ihrer Kollegen aus dem Stipendienprogramm haben die erste Hürde geschafft. Ihre Forschungen sind positiv bewertet worden, sodass sie jetzt jeweils zwei weitere Jahre Förderung erhalten. „Damit finanzieren wir unsere eigene Stelle und bekommen zusätzlich Sachmittel“, erläutert Katrin Stade die Vorteile des Programms.

Die Stipendiaten sind an eine „gastgebende“ Forschungsgruppe des MDC angeschlossen, können deren Infrastruktur mitnutzen, gehen ihren Forschungsinteressen jedoch selbstständig nach. Das bedeutet, dass sie Drittmittel, also Gelder für ihre Forschung und für Mitarbeiter, selbst einwerben müssen und eigenständig publizieren. Katrin Stade: „Wer in der Wissenschaft Karriere machen möchte, muss auch wissen, wie er an Gelder für Forschung und Personal herankommt.“

Die Biologin fände es allerdings noch besser, wenn die Stipendiaten genauer überblicken könnten, wie sie ihre Sachmittel verbrauchen, etwa mit Hilfe einer eigenen Kostenstelle. „Es ist wichtig“, betont Katrin Stade, „dass wir auch etwas über Sachmittelverwaltung in der Forschung lernen. Das stärkt unsere Unabhängigkeit.“

### Barbara Bachtler

Leiterin der Pressestelle  
Max-Delbrück-Centrum für  
Molekulare Medizin (MDC) Berlin-Buch

Die Klagen über unattraktive Arbeitsbedingungen in der deutschen Wissenschaft reißen nicht ab. Erstklassige Nachwuchsforscher packen immer häufiger die Koffer, so heißt es, und suchen ihre Karrierechancen im Ausland. Eine Alternative für junge Wissenschaftler bietet jetzt das Deutsche Krebsforschungszentrum mit dem Tenure Track nach amerikanischem Vorbild: Vier „Theodor Boveri-Nachwuchsgruppen“ haben nach diesem Modell im Jahr 2003 ihre Arbeit aufgenommen. Über ihre Möglichkeiten und Perspektiven geben die Boveri-Gruppenleiter PD Dr. Ursula Klingmüller und Dr. Michael Boutros Auskunft.

### Was bedeutet „Tenure Track“?

**Klingmüller:** Der Begriff stammt aus den USA. Dort sind Tenure Track-Stellen zeitlich befristet, aber mit der Option, nach einer positiven Begutachtung in eine permanente Stelle überführt zu werden. Die Professoren werden zunächst auf Zeit eingestellt, können jedoch nach erfolgreichem Abschluss des Tenure-Verfahrens zu einer unbefristeten Professur befördert werden. Die amerikanische Tenure Track-Konstruktion spiegelt vor allem ein Interesse an einer langfristigen Zusammenarbeit. Das ist in Deutschland häufig anders. Hier wird in starr befristeten Zeiträumen geforscht, und das schränkt die Zukunftsperspektiven junger Forscher erheblich ein.

### Wie sieht das Tenure Track-Verfahren im DKFZ aus? Und wie beurteilen Sie die Perspektiven?

**Boutros:** Die Boveri-Gruppen sind zunächst auf fünf Jahre begrenzt. Nach vier Jahren wird ihre wissenschaftliche Arbeit begutachtet. Bei einem positiven Ergebnis kann die Arbeit langfristig weitergeführt werden. Diese Konstruktion ist in Deutschland ungewöhnlich. Auf einer Fünf-Jah-



## Nachwuchs

„Mit Tenure Track erhöht das DKFZ seine internationale Konkurrenzfähigkeit.“

Dr. Michael Boutros

res-Stelle mit Option auf Verlängerung kann ich in der Forschung dickere Bretter bohren. Da habe ich das Gefühl, dass meine Arbeitsgruppe auch als längerfristige Investition angesehen wird.

Mit dem Tenure Track erhöht sich auch die internationale Konkurrenzfähigkeit des DKFZ. Die Boveri-Gruppen sind eine Ergänzung zu normalen Berufungsverfahren und erhöhen die Chance, gute Wissenschaftler nach Heidelberg zu holen. Wie sich das entwickelt und ob sich das Modell noch verändern sollte, muss man beobachten. Das ideale Tenure Track-Modell gibt es vielleicht noch nicht.

DKFZ

**Klingmüller:** Ich habe mich für das DKFZ entschieden, weil mir der Tenure Track faire Bedingungen setzt, meine und die Zukunft meiner Mitarbeiter selbst zu gestalten. Wenn ich – wie sonst üblich – alle zwei Jahre eine Gruppe neu aufbauen müsste, würde die personelle und wissenschaftliche Kontinuität meiner Forschung darunter leiden. Generell glaube ich, dass durch die zeitlich zu eng befristeten Verträge große Verluste für die Forschung entstehen.

### Wie kann man die deutschen Forschungsstrukturen verbessern?

**Boutros:** Neben mehr Kontinuität würde uns mehr Flexibilität gut tun. Hierzulande gibt es meist nur zwei Extreme: kurzfristiger Zeitvertrag mit unverrückbarem Ende oder Vertrag bis zur Verrichtung. Das ist mir zu statisch. Man muss das dynamischer sehen und auch bei längeren Verträgen leistungsorientierte Anreize schaffen. In den USA ist es zum Beispiel durchaus üblich, dass das Gehalt sinkt und die Arbeitsgruppe sehr stark schrumpft, wenn jemand keine Geldmittel einwirbt und nichts mehr publiziert.

**Klingmüller:** Die Karrierelücke zwischen Nachwuchs- und Führungspositionen ist in Deutschland einfach viel zu groß. Das DKFZ-Modell der Boveri-Gruppen ist ein neuer Ansatz, diese Lücke zu schließen. Auch andere Forschungsinstitutionen haben mittlerweile nachgezogen. Ich bin fest überzeugt, dass man damit nicht nur Kontinuität in der Forschung herstellen, sondern auch deren Qualität verbessern kann.

### Irgendwelche Ideen, wie man der Forschung mehr Leben einhauchen könnte?

**Boutros:** Es sind häufig die kleinen Dinge, die Forschung voranbringen. Kommunikationsstrukturen sind sehr wichtig. Gut wäre es, eine günstige Atmosphäre für den wissenschaftlichen Austausch zu schaffen. Es genügt manchmal, die Cafeteria im Haus nicht schon mittags zu schließen, son-

dern bis zum Abend zu öffnen. Hier fehlt mir häufig das Bewusstsein dafür, welches Kreativpotenzial in diesen eher zufälligen Gesprächen am Kaffeeautomaten liegt.

**Klingmüller:** Es fehlt hierzulande doch etwas Fantasie, Arbeit effizienter zu organisieren. Da schaut mancher nur auf die Zeiten der Anwesenheit. Dass man aber mitunter stundenlang in Sitzungen die immer gleichen Themen wiederkaut, wird nicht gesehen. Die Arbeitszeiten müssten flexibler sein. Ich bin manchmal nachts im Labor, gehe aber gelegentlich auch früher, um Zeit mit meiner Familie zu verbringen. Wichtig ist, dass meine Projekte laufen und sich andere darauf verlassen können, dass alles termingerecht erledigt wird.





„Das Modell hilft, die Kariere-  
lücke zwischen Nachwuchs-  
und Führungspositionen zu  
schließen.“

PD Dr. Ursula Klingmüller

### Welche Anreize könnte man für wissenschaft- lichen Nachwuchs schaffen?

**Boutros:** Problematisch ist in Deutschland das System der öffentlichen Vergütung nach BAT. Wenn ich hoch qualifizierte Bewerber aus dem Ausland werben möchte – was können die mit „Vergütung erfolgt nach BAT“ in der Ausschreibung anfangen? In der Wissenschaft konkurrieren wir auf internationalem Parkett, da sind solche komplizierten und starren Verträge wenig hilfreich, und wir schaden uns selbst, wenn es keinen Spielraum in den Gehaltsverhandlungen gibt. In anderen Ländern ist das Gehalt innerhalb bestimmter Spannen frei verhandelbar.

**Klingmüller:** Ich wünsche mir einen flexibleren Umgang mit den Altersgrenzen. In manchen Einrichtungen kann man als über 35-Jähriger keinen Einzelantrag mehr schreiben, und häufig sind Stipendien für Bewerber, die älter als 27 oder 28 Jahre sind, nicht mehr zugänglich. Alterskriterien sind prinzipiell sicher nicht falsch, aber diese werden der Realität nicht mehr gerecht. Es gibt immer häufiger nicht-lineare Forscherkarrieren von älteren, hochbegabten Quer- oder Wiedereinsteigern, die kreatives Potenzial aus anderen Disziplinen mitbringen. Man sollte mehr auf das Potenzial als auf das Alter achten.

Die Fragen stellte **Jürgen Lösch**.  
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit  
Deutsches Krebsforschungszentrum, Heidelberg

## Nachwuchs

### Auszeichnungen für den Nachwuchs

**Für herausragende Leistungen ist der wissenschaftliche Nachwuchs in den Helmholtz-Zentren vielfach ausgezeichnet worden. Einige Beispiele:**

Dr. **Thomas Mock** vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) wurde von der Sektion Phytologie der Deutschen Botanischen Gesellschaft für den besten Doktorandenvortrag mit dem E.G. Pringsheim-Preis ausgezeichnet.

Mit dem Promotionspreis der Freunde und Förderer des DESY wurden Dr. **Lara de Nardo** von der University of Alberta und Dr. **Oscar Gonzales Lopez** von der Universidad Autonoma de Madrid ausgezeichnet. Beide Teilchenforscher haben ihre Dissertation zu Experimenten am Beschleuniger HERA angefertigt – Lara de Nardo am Hermes-Experiment, Oscar Gonzales Lopez am Zeus-Experiment.

Die Biostatistikerin Dr. **Iris Burkholder** vom Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ) darf sich über den Dissertationspreis des Fachbereichs Statistik der Universität Dortmund freuen.

Mit dem Walther und Christine Richtzenhain-Preis werden wegweisende Arbeiten in der experimentellen Krebsforschung gewürdigt. Im vergangenen Jahr erhielten Dr. **Daniel Gerlich** und Dr. **Axel Szabowski** vom Deutschen Krebsforschungszentrum diese Auszeichnung für ihre Doktorarbeiten. Gerlich entdeckte, dass die räumliche Anordnung der Chromosomen bei der Zellteilung an die Tochterzellen weitergegeben wird. Szabowski wies nach, dass Funktionsveränderungen bei Proteinen in Zellen der Lederhaut zu einer massiven Veränderung der geordneten Struktur der Oberhaut beitragen.

**Peter Hassenpflug**, **Max Schöbinger** und **Ivo Wolf**, alle beim Deutschen Krebsforschungszentrum in der Abteilung Medizinische und Biologische Informatik tätig, sind für ihre Arbeiten und Posterpräsentationen anlässlich des Workshops Bildverarbeitung in der Medizin in Erlangen beziehungsweise auf der internationalen Bildverarbeitungskonferenz SPIE Medical Imaging 2003 in San Diego ausgezeichnet worden.

Dr. **Frank Lyko**, Leiter der Arbeitsgruppe Epigenetik des Deutschen Krebsforschungszentrums, ist mit dem Karl-Freudenberg-Preis 2003 für seine Arbeit zur Entdeckung des DNA-Methylierungssystems bei der Taufliege *Drosophila* ausgezeichnet worden. Seine Ergebnisse leisten einen wichtigen Beitrag zur Etablierung neuartiger, experimenteller Krebstherapien.

Der DLR-Wissenschaftspreis 2003 ging im vergangenen Jahr an ein Autorenteam und drei einzelne Wissenschaftler: Dr. **Rolf Engel**, Dr. **Christian Klein** und Dr. **Ole Trink**s bekamen den Preis für ihre Veröffentlichung zur berührungslosen Druckbestimmung der Oberflächen eines Windkanalmodells. Dr. **Konstantinos Papathanassiou** wurde für eine Arbeit ausgezeichnet, die „einen Meilenstein in der Radarforschung“ darstellt. Dr. **Axel Jahn** hat sich den Kapazitätsressourcen für den Mobilfunk und Satelliten-Multimedia-Systemen gewidmet und wurde dafür ausgezeichnet. Dr. **Ralf Koepp**e vom Institut für Robotik und Mechatronik wurde geehrt, weil er erfolgreich Methoden erforscht, wie sensorische Fertigkeiten des Menschen auf Computer übertragen werden können.

Den Hochschullehrer-Nachwuchspreis 2003 für Biotechnologie bekam Dr. **Andreas Liese**, Forschungszentrum Jülich, vom Dechema-Unterrichtsausschuss für Technische Chemie an wissenschaftlichen Hochschulen.





## Nachwuchs

Die Günther-Leibfried-Preise 2003, mit denen das Forschungszentrum Jülich Doktoranden auszeichnet, die ihre hervorragenden Arbeiten auch allgemein verständlich mitteilen können, gehen an Dr. **Tino Polen**, Dr. **Volker Linnemann** und Dr. **Kerstin Threydte**.

**Véronique Baylac-Domengetroy** vom Institut für Reaktorsicherheit des Forschungszentrums Karlsruhe ist an der Uni Karlsruhe und deren Partnerhochschule in Grenoble für ihr exzellent benotetes Doppel-Diplom (Dipl.-Phys. und Dipl.-Ing.), das sie während eines Austauschprogramms erworben hat, mit dem Deutsch-Französischen Hochschulpreis ausgezeichnet worden.

Der Georg-Weinblum-Preis, eine mit 2.500 Euro dotierte Auszeichnung für die jeweils beste an einer deutschen Hochschule entstandene Dissertation eines jungen Wissenschaftlers auf dem Gebiet der Schiffstechnik, wurde im vergangenen Jahr an Dr. **Xue-Nong Chen**, Institut für Kern- und Energietechnik des Forschungszentrums Karlsruhe, verliehen.

Dr. **Oliver Drumm** vom Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik des Forschungszentrums Karlsruhe erhielt den Förderpreis 2003 der Informationstechnischen Gesellschaft (ITG) des Verbands der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE). Er wurde für seine Dissertation geehrt, die im Rahmen des Graduiertkollegs Numerische Feldberechnung entstanden ist.

Den Förderpreis 2003 des Arbeitskreises für Zellbiologie und Biomedizinische Forschung bekamen **Sandra Götze** und **Lars Macke** von der Gesellschaft für Biotechnologische Forschung (GBF), die als Nachwuchswissenschaftler Erstklassiges in der Grundlagenforschung leisteten. Sandra Götze untersuchte in ihrer Doktorarbeit Abschnitte der DNA, die sich genetisch nicht zuverlässig bestimmen lassen und bisher als funktionslos galten. Lars Macke untersuchte spezielle Abwehrzellen des Immunsystems. Er veränderte entnommene Zellen genetisch so, dass sie eine Immunantwort gegen Krebszellen auslösen.

Mit dem Heureka-Journalistenpreis für Nachwuchsjournalisten und dem ersten Platz im Medienwettbewerb Hauptsache Biologie ist im vergangenen Jahr die Artikelserie **Biologisch** ausgezeichnet worden, die gemeinsam von der Gesellschaft für Biotechnologische Forschung und zwölf Zeitungsvolontären der Braunschweiger Zeitung erarbeitet wurde.

Dr. **Wolf-Dieter Schubert**, Wissenschaftler der Gesellschaft für Biotechnologische Forschung in Braunschweig, untersuchte den räumlichen Aufbau und den Zusammenhang zwischen Struktur und Funktion von biologischen Eiweiß-Molekülen. Dafür wurde er mit dem Max-von-Laue-Preis ausgezeichnet, der hervorragende Arbeiten von Nachwuchswissenschaftlern im Bereich der Kristallographie würdigt.

Die Geophysikerin Dr. **Monika Korte** vom GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) wurde für ihre herausragenden Arbeiten auf dem Gebiet der Erforschung des Erdmagnetfeldes und für die Koordinierung der ersten europaweiten geomagnetischen Landesvermessung mit dem GFZ-Forschungspreis 2003 ausgezeichnet.

Auf der European Conference on Neutron Scattering in Montpellier erhielt Dr. **Anke Hansen** von der Außenstelle des Instituts für Werkstoffkunde und Werkstofftechnik im GKSS-Forschungszentrum Geesthacht einen Young Scientist Award für ihren Vortrag zum Thema Texturmessungen von Gesteinsproben.

Drei Mitarbeiter des Zentrums für Magnesiumtechnologie des GKSS-Forschungszentrums konnten sich über einen Best Poster Award freuen. **Petra Fischer** und **Volker Kree** errangen diesen Preis auf

der 37. Metallographietagung in Berlin für ihre Darstellung unterschiedlicher Präparationsmethoden für Magnesiumlegierungen. Dipl.-Ing. **Joanna Dzwonczyk** bekam im November auf der internationalen Konferenz Magnesium Alloys and their Applications in Wolfsburg eine Auszeichnung für das beste Poster, das sich mit dem Einfluss des Herstellungsprozesses auf die Mikrostruktur von Magnesium-Strangpressprodukten befasste.

Die in der Hauptwerkstatt der GKSS ausgebildeten Maschinenbauingenieure **Stefan Münzer** und **Sergej Ungefug** wurden beim Praktischen Leistungswettbewerb der Handwerksjugend Schleswig-Holstein 2003 erster und zweiter Landessieger.

Dr. **Christoph Böhme** wird mit dem zum zweiten Mal vergebenen und mit 3.000 Euro dotierten Adlershofer Dissertationspreis ausgezeichnet, der von der Humboldt-Universität zu Berlin, der Initiativegemeinschaft Außeruniversitärer Forschungseinrichtungen in Adlershof e.V. und der Wista-Management GmbH vergeben wird. Seine prämierte Dissertation entstand in der Abteilung Silizium-Photovoltaik des Hahn-Meitner-Instituts (HMI) und entwickelt die Grundlagen für eine neuartige Messmethode zur Analyse von Defekten in Halbleiterschichten und -bauelementen.

Dr. **Christian Franck** und Dr. **Matthias Meier** vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching (IPP) erhielten für ihre Arbeiten über elektromagnetische Wellen in magnetisierten Plasmen beziehungsweise über dynamische Effekte beim Wachstum von amorphen wasserstoffhaltigen Kohlenstoffschichten die Otto-Hahn-Medaille, mit der die Max-Planck-Gesellschaft herausragende Leistungen junger Wissenschaftler auszeichnet.

Für die Erforschung der Wirkungsweise von Zellgiften auf Tumorzellen hat Dr. **Clemens A. Schmitt** vom Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin (MDC) Berlin-Buch und der Charité den mit 10.000 Euro dotierten Forschungspreis der Kind-Philipp-Stiftung für Leukämieforschung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft erhalten.

Dr. **Maik Gollasch** und Dr. **Ralph Kettritz** (MDC und Franz-Volhard-Klinik der Charité) haben am 9. Juni 2003 auf dem Weltkongress für Nierenheilkunde in Berlin den mit jeweils 5.000 Euro dotierten Franz-Volhard-Preis der Gesellschaft für Nephrologie beziehungsweise Hans-U.-Zollinger-Forschungspreis für Nephrologie erhalten.

Dr. **Jana Helm** erhielt den mit 5.000 Euro dotierten Förderpreis der Friedrich-und-Elisabeth-Boysen-Stiftung und der Technischen Universität Dresden für ihre herausragende Dissertation auf dem Gebiet der Umwelttechnik. Jana Helm arbeitete im UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle an der Herstellung neuer, umweltfreundlicher Materialien mit Hilfe methanotropher Bakterien.

Für ihre herausragende Dissertation zur Störungsökologie auf dem Gebiet der Naturschutzforschung wurde Dr. **Anke Jentsch** vom Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle mit dem Horst-Wiehe-Preis ausgezeichnet. Er wird alle zwei Jahre von der Gesellschaft für Ökologie an junge Wissenschaftler verliehen und ist mit 2.000 Euro dotiert.

Die Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig hat den Kurt-Schwabe-Preis 2003 an Dr. **Michael Schubert** vom Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle verliehen. Der Kurt-Schwabe-Preis wird für hervorragende naturwissenschaftliche oder technikkundliche Leistungen und hohe persönliche Verdienste um die Erhaltung der Natur und ihrer Ressourcen vergeben und ist mit 2.500 Euro dotiert.

# Die Muster im Lebendigen lesen

Der Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft würdigt exzellente Ergebnisse interdisziplinärer Forschung in der Helmholtz-Gemeinschaft.

## Erwin Schrödinger-Preis

Grenzüberschreitend in mehrfachem Sinn sind die Forschungsarbeiten, die mit dem Erwin Schrödinger-Preis 2003 ausgezeichnet wurden. Eine deutsch-amerikanische Wissenschaftlergruppe klärte die Muster auf, die von Kalzium als Botenstoff in lebenden Zellen hervorgerufen werden. Die zwei amerikanischen Biologen, Professor Patricia Camacho und Professor James D. Lechleiter von der University of Texas in San Antonio, und der theoretische Physiker Dr. Martin Falcke vom Hahn-Meitner-Institut Berlin kamen gemeinsam dem Phänomen der Kalzium-Muster auf die Spur. Nachdem die Kalziumwellen mathematisch modelliert wurden, konnte die Funktionsweise beteiligter Zellorganellen neu beschrieben werden. Auf der Helmholtz-Jahrestagung im Oktober

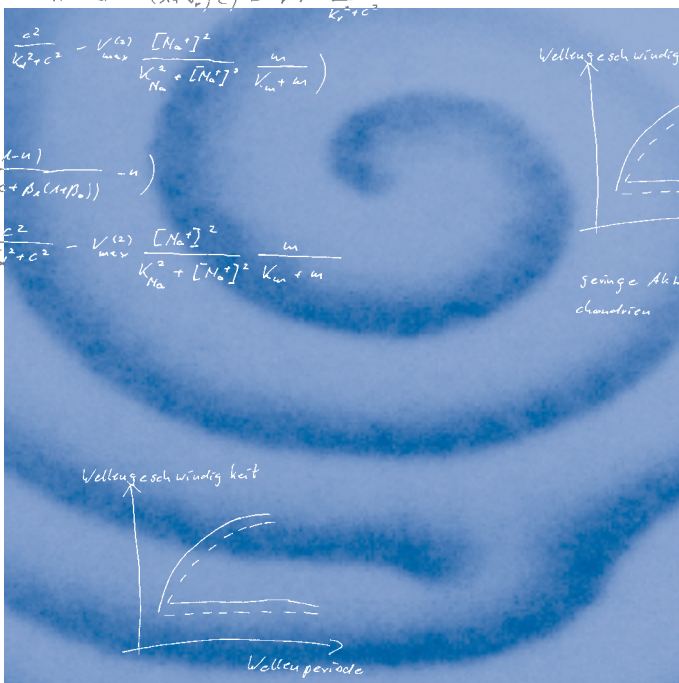
2003 in Hamburg erhielten die drei Forscher den für herausragende interdisziplinäre Forschung vergebenen Preis des Stifterverbandes für die Deutsche Wissenschaft.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C + (P_{\text{leak}} + P_{\text{chan}} \frac{C(1-u)}{C + \beta_1(1+\beta_0)}) - \gamma_r \frac{C}{K_r + C} - \gamma_m \frac{C}{K_m + C}$$

$$- \gamma_m \left( V_{\text{max}} \frac{C^2}{K_r^2 + C^2} - V_{\text{max}} \frac{[Na^+]^2}{K_{Na}^2 + [Na^+]^2} \frac{u}{K_m + u} \right)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \epsilon \left( \frac{C^2(1-u)}{\beta_2(C + \beta_0(1+\beta_0))} - u \right)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = V_{\text{max}} \frac{C^2}{K_r^2 + C^2} - V_{\text{max}} \frac{[Na^+]^2}{K_{Na}^2 + [Na^+]^2} \frac{u}{K_m + u}$$



Das Leben beginnt mit einer Kalziumwelle. Die Natur hat es so eingerichtet, dass in der Regel nur eine Spermienzelle in die Eizelle gelangt. Dann „macht die Zelle dicht“. Dazu muss die Zelloberfläche von der erfolgten Befruchtung erfahren. Diese Nachricht wird von einer Kalziumwelle durch die Zelle getragen. Doch nicht nur für diese Informationsvermittlung ist Kalzium verantwortlich: Muskelkontraktionen, Denkprozesse, Drüsensekretion – nichts geht ohne das Signal, das in Veränderungen der Kalziumkonzentration kodiert ist. Diese Änderungen zeigen sich in Mustern. Dafür interessierte sich Martin Falcke, der theoretische Physiker mit dem Spezialgebiet „Muster bildende Systeme“.

# Exzellent



Der theoretische Physiker **Martin Falcke** promovierte an der Technischen Universität Berlin über Strukturbildung auf Katalysatoroberflächen und arbeitete in den USA und am Max-Planck-Institut für Physik Komplexer Systeme in Dresden unter anderem über Muster bildende Systeme. Seit 2001 ist er am Hahn-Meitner-Institut Berlin in der Helmholtz-Gemeinschaft tätig.



Aufgeschrieben von Dr. Martin Falcke: Die Kalziumwelle als Formel. Erreicht die Welle eine „verbotene“ Periode, erlischt sie.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c + (P_{\text{peak}} + P_{\text{chan}} \frac{c(1-n)}{c + \beta_0(1+\beta_0)}) v$$

$$- ( (1 + \gamma_m + \gamma_r) c_H - \gamma_m n - (1 + \gamma_r) c ) - \sqrt{r} P_{\text{max}} \frac{c^2}{K_r^2 + c^2}$$

$$- \sqrt{m} ( V_{\text{max}}^{(1)} \frac{a^2}{K_d^2 + c^2} - V_{\text{max}}^{(2)} \frac{[N_m^*]^2}{K_m^2 + [N_m^*]^2} \frac{m}{K_m + m} )$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \epsilon \left( \frac{c^2(1-n)}{\beta_0(c + \beta_0(1+\beta_0))} - n \right)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = V_{\text{max}}^{(1)} \frac{c^2}{K_d^2 + c^2} - V_{\text{max}}^{(2)} \frac{[N_m^*]^2}{K_m^2 + [N_m^*]^2} \frac{m}{K_m + m}$$

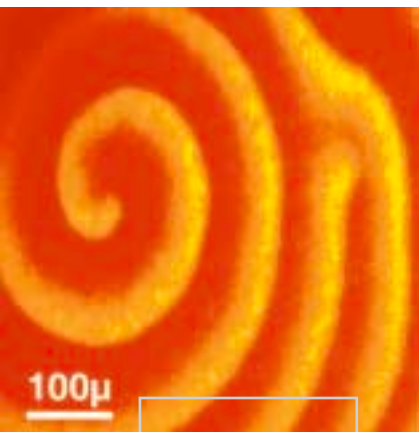
Die Kalzium-Muster, die ihm von den Biologen James Lechleiter und Patricia Camacho von der University of Texas in San Antonio gezeigt wurden, sind besondere: In einmaligen oder auch periodischen Streifen wandern sie durch die Zelle, bilden zuweilen prachtvolle Spiralen. Die Spirale, das uralte Symbol des Lebens, sah der Physiker nun real in der Zelle. Dieser Faszination konnte er sich nicht entziehen. Ebenso wenig wie der im Wortsinn lebendigen Atmosphäre im Team von James Lechleiter. Hier stimmte die Chemie.

Lechleiter und Camacho schienen besessen von der Frage, nach welchen Gesetzen die Kalzium-Wellen, vor allem die Kalzium-Spirale, funktionieren. Der Physiker, beeindruckt von der Universalität dieses Musters und der weiten Verbreitung von Kalzium als Botenstoff, kniete sich in die biologische Literatur, schaute sich wieder und wieder die Messwerte an, simulierte Rechenmodelle, entwarf und verwarf Differenzialgleichungen.

Schließlich gab es eine Formel, die auf die Messwerte aus den Froscheier-Experimenten von Camacho und Lechleiter zutraf. Und es ergab sich eine Frage an die Biologen: Können Sie sehen, ob sich die Amplituden der Wellen durch den Einfluss der Mitochondrien verändern? Diese Zellorganellen hatten Lechleiter und Camacho als Akteur in dem hoch komplizierten molekularen Wechselspiel schon lange in Verdacht. Doch die gängige Lehrmeinung sprach den Mi-



Die amerikanischen Biologen Professor **James D. Lechleiter** und Professor **Patricia Camacho** arbeiten seit mehr als zehn Jahren an der Aufklärung intrazellulärer Regulationsvorgänge. Sie waren die ersten, die spiralförmige Kalziumwellen in lebendigen Zellen nachwiesen und zählen zu den weltweit führenden Wissenschaftlern auf diesem Gebiet. Auf dem Bild von links nach rechts: Prof. Dr. Walter Kröll, Dr. Arend Oetker, Prof. Patricia Camacho, Prof. James D. Lechleiter, Dr. Martin Falcke, Prof. Dr. Karin Mölling. ■



*Kalziumspirale. Mittels Fluoreszenz werden Kalziummuster in lebenden Zellen sichtbar. Mit 30 bis 50 Mikrometer breiten Streifen dehnt sich diese Spirale in der Zellflüssigkeit einer Frosch-Eizelle aus.*

tochondrien jedwede Bedeutung für die Kalzium-Muster ab.

Falckes Differenzialgleichung schien eine andere Sprache zu sprechen. Gab es noch andere Messreihen? Die Biologen konzipierten neue Experimente, schauten sich in Fachkreisen um. Schließlich fanden sie interessante Daten bei dem Italiener Rosario Rizzuto. Aber noch schien das Rechenmodell nicht genau zu passen. Endlich fand Falcke den Fehler: Ein Prozessschritt war in der Formel unberücksichtigt geblieben. Und nun wurde klar: Die Rolle der Mitochondrien musste neu beschrieben werden. Es rauschte im Fachblätterwald.

Und auch die theoretischen Physiker horchten auf. Denn etwas Überraschendes zeigte sich. Erreichten die spiralförmigen Wellen bestimmte Perioden, verschwanden sie. Die Mitochondrien ließen durch ihre Kalziumaufnahme und -abgabe gewisse Wellen nicht zu. Sie wirkten in der Zelle also wie Frequenzfilter. „Verbotene“ Perioden aber waren in der Erforschung nichtlinearer Systeme bis dato nicht bekannt. Die Theoretische Physik, die sich als äußerst hilfreich erwiesen hatte, Abläufe in biologischen Systemen aufzuklären, bekam nun eine neue Denkaufgabe für die Zukunft zurück: Was sind die allgemeinen Bedingungen für die Existenz „verbotener“ Perioden? Um das zu klären, wird auch wieder die Biologie zu befragen sein: Können verbotene Perioden nur durch Mitochondrien oder auch durch andere Zellbestandteile erzeugt werden?

**Cordula Tegen**

Kommunikation und Medien  
Helmholtz-Gemeinschaft, Bonn

**1995** Das Phänomen von Kalziummustern in Zellen bewegt Zell-Biologen unter anderem in den USA: In San Antonio suchen James Lechleiter und Patricia Camacho einen Weg, sie mathematisch zu beschreiben. Der in Amerika weilende deutsche Physiker Martin Falcke wird für die Idee begeistert.

**1997** Es gelingt ihm, ein mathematisches Modell für Kalziumwellen zu entwickeln, doch noch hat die Formel einen Fehler.

**1998** E-Mail aus Deutschland: Der Fehler ist gefunden. Ein Prozessschritt des komplizierten intrazellulären Wechselspiels hatte im mathematischen Modell gefehlt. Frage zurück an die Biologen: Gibt es Untersuchungsergebnisse, die zu den neuen mathematischen Vorhersagen passen?

**1999** Antwort aus den USA: Es gibt sie. Die Veröffentlichung der neuen Zusammenhänge im *Biophysical Journal* sorgt für Aufsehen. Die Experimente laufen weiter: Gezielt nehmen die Biologen Einfluss auf die Komponenten, die mit den Musterbildenden Kalziumkonzentrationen in Zusammenhang stehen, die Mitochondrien und das endoplasmatische Retikulum.

**2000** Neue Fragen zur Speicherung und zur Abgabe von Kalzium in der Zelle sind aufgetaucht. Deren mathematische Beschreibung durch den Physiker zeigt und belegt, wie die Mitochondrien als Frequenzfilter und Pumpen auf dem endoplasmatischen Retikulum die Musterbildung beeinflussen.

**2003** Weitere Veröffentlichung in den USA: Das Wissen über die Kommunikation in Zellen durch sich verändernde Kalziumkonzentrationen ist entscheidend erweitert worden. Auszeichnung der interdisziplinären Arbeiten auf der Helmholtz-Jahrestagung in Deutschland.

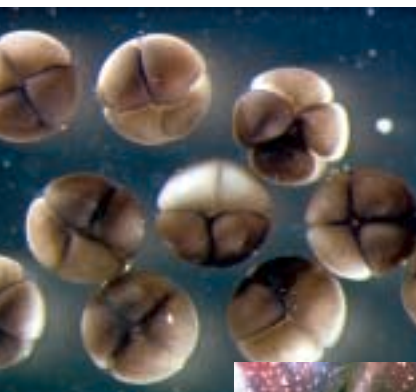
# Wissenschaftliche Auszeichnungen

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Helmholtz-Gemeinschaft sind auch 2003 mit zahlreichen Preisen und Auszeichnungen bedacht worden. Hier eine kleine Auswahl:

Professor Dr. **Christof Niehrs**, Leiter der Abteilung Molekulare Embryologie des Deutschen Krebsforschungszentrums (DKFZ), wurde mit dem **Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis** der Deutschen Forschungsgemeinschaft ausgezeichnet. Er erhielt den höchstdotierten deutschen Förderpreis für seine Arbeiten zur Entwicklungsbiologie. Sein Name steht für international viel beachtete Antworten auf zentrale Fragen dieses Gebiets, unter anderem zur embryonalen Kopfentwicklung. Seine Ergebnisse sind entscheidend für das Verständnis von Zellwachstum und -differenzierung in normalen und entarteten Zellen.



Ausgezeichneter Embryologe vom DKFZ: Professor Dr. Christof Niehrs.



Aus einem vierzelligen Embryo über das Kaulquappenstadium hin zum Frosch: Am Beispiel des afrikanischen Krallenfroschs *Xenopus* untersucht das Team um Christof Niehrs, wie aus einem Embryo das ausgewachsene Tier entsteht.



Für sein wissenschaftliches Gesamtwerk bekam Professor Dr. **Claus Mattheck**, Leiter der Abteilung Biomechanik im Institut für Materialforschung des Forschungszentrums Karlsruhe (FZK), den **Deutschen Umweltpreis 2003**. Mit dem höchstdotierten europäischen Umweltpreis würdigt die Deutsche Bundesstiftung Umwelt Matthecks Vorreiterrolle bei der Überführung biologischer Prozesse in technische Produkte. So hat er Prinzipien des Baum- und Knochenwachstums auf Computerprogramme zur Konstruktion technischer Bauteile übertragen und damit bei geringstem Materialeinsatz langlebige und ultraleichte Bauteile geschaffen. Preiswürdig sind auch seine Cartoons, Kinderbücher und informativ-unterhaltsamen Vorträge für ein breites Publikum.

Dr. **Wilma K. Weyrather**, Dr. **Michael Krämer** und Privatdozent Dr. **Michael Scholz** von der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) sind mit dem **Karl Heinz Beckurts-Preis** für ihre exzellenten Arbeiten auf dem Gebiet der Tumorthherapie mit Ionenstrahlen ausgezeichnet worden. Mit dem Beckurts-Preis werden herausragende wissenschaftlich-technische Leistungen gewürdigt, von denen Impulse für die industrielle Innovation ausgehen. Die Forscher integrierten ihre Ergebnisse mit großem Erfolg in die Bestrahlungsplanung für Tumorpatienten. Nach erfolgreichen klinischen Tests sollen ab 2006 Patienten in einem Schwerionentherapiezentrum in Heidelberg mit der neuen Methode behandelt werden, die sich durch besondere Präzision und Effizienz auszeichnet. Auf der Basis der Erkenntnisse der Forscher wird Siemens Medical Solutions die Bestrahlungsanlagen für die neue Therapieform bauen.

Mit dem europäischen Umweltpreis **EUREKA Lillehammer Award** ist 2003 das MERMAID-Projekt ausgezeichnet worden, ein intelligentes Küstenüberwachungssystem, das Firmen und Institute aus Deutschland, Norwegen, Frankreich und Kanada unter Federführung des GKSS-Forschungszentrums in Geesthacht entwickelten. Inzwischen ist es bereits weltweit erfolgreich im Einsatz. Das Team um Projektleiter Dr. **Friedhelm Schroeder** entwickelte mit „Mermaid“ (Marine Environmental Remote-Controlled Measuring and Integrated Detection System) so etwas wie ein ferngesteuertes Labor auf hoher See, dessen Messdaten über Funktelemetrie, Handy oder Satellit zur Überwachungszentrale an Land übertragen werden können.

# Mitglieder der Helmholtz-Gemeinschaft



<p><b>Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung</b> Columbusstraße, 27568 Bremerhaven Telefon: 0471-4831-0; Telefax: 0471-4831-1149 E-Mail: awi-pr@awi-bremerhaven.de; Internet: www.awi-bremerhaven.de</p>	
<p><b>Deutsches Elektronen-Synchrotron</b> Notkestraße 85, 22607 Hamburg Telefon: 040-8998-0; Telefax: 040-8998-3282 E-Mail: desyinfo@desy.de; Internet: www.desy.de</p>	
<p><b>Deutsches Krebsforschungszentrum</b> Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg Telefon: 06221-42-0; Telefax: 06221-42-2995 E-Mail: pressestelle@dkfz.de; Internet: www.dkfz.de</p>	
<p><b>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</b> Linder Höhe (Porz-Wahnheide), 51147 Köln Telefon: 02203-601-0; Telefax: 02203-67310 E-Mail: pressestelle@dlr.de; Internet: www.dlr.de</p>	
<p><b>Forschungszentrum Jülich</b> Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich Telefon: 02461-61-0; Telefax: 02461-61-8100 E-Mail: info@fz-juelich.de; Internet: www.fz-juelich.de</p>	
<p><b>Forschungszentrum Karlsruhe</b> Hermann von Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen Telefon: 07247-82-0; Telefax: 07247-82-5070 E-Mail: info@fzk.de; Internet: www.fzk.de</p>	
<p><b>Gesellschaft für Biotechnologische Forschung</b> Mascheroder Weg 1, 38124 Braunschweig Telefon: 0531-6181-0; Telefax: 0531-6181-515 E-Mail: info@gbf.de; Intenet: www.gbf.de</p>	
<p><b>GeoForschungsZentrum Potsdam</b> Telegrafenberg, 14473 Potsdam Telefon: 0331-288-0; Telefax: 0331-288-1600 E-Mail: presse@gfz-potsdam.de; Internet: www.gfz-potsdam.de</p>	
<p><b>GKSS-Forschungszentrum Geesthacht</b> Max-Planck-Straße 1, 21502 Geesthacht Telefon: 04152-87-0; Telefax: 04152-87-1403 E-Mail: presse@gkss.de; Internet: www.gkss.de</p>	
<p><b>GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit</b> Ingolstädter Landstraße 1, 85764 Neuherberg Telefon: 089-3187-0; Telefax: 089-3187-3322 E-Mail: oea@gsf.de; Internet: www.gsf.de</p>	
<p><b>Gesellschaft für Schwerionenforschung</b> Planckstraße 1, 64291 Darmstadt Telefon: 06159-71-0; Telefax 06159-71-2785 E-Mail: info@gsi.de; Internet: www.gsi.de</p>	
<p><b>Hahn-Meitner-Institut Berlin</b> Glienicke Straße 100, 14109 Berlin Telefon: 030-8062-0; Telefax: 030-8062-2181 E-Mail: info@hmi.de; Internet: www.hmi.de</p>	
<p><b>Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (assoziiertes Mitglied)</b> Boltzmannstraße 2, 85748 Garching Telefon: 089-3299-01; Telefax 089-3299-2200 E-Mail: info@ipp.mpg.de; Internet: www.ipp.mpg.de</p>	
<p><b>Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin Berlin-Buch</b> Robert-Rössle-Straße 10, 13125 Berlin-Buch Telefon: 030-9406-0; Telefax: 030-949-4161 E-Mail: presse@mdc-berlin.de; Internet: www.mdc-berlin.de</p>	
<p><b>UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle</b> Permoserstraße 15, 04318 Leipzig Telefon: 0341-235-0; Telefax: 0341-235-2791 E-Mail: info@gf.ufz.de; Internet: www.ufz.de</p>	

Jahresheft 2004

Wir leisten Beiträge zu großen und drängenden Fragen von Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft durch strategisch-programmatisch ausgerichtete Spitzenforschung in den Bereichen Energie, Erde und Umwelt, Gesundheit, Schlüsseltechnologien, Struktur der Materie, Verkehr und Weltraum.

Wir erforschen Systeme hoher Komplexität unter Einsatz von Großgeräten und wissenschaftlichen Infrastrukturen gemeinsam mit nationalen und internationalen Partnern.

Wir tragen bei zur Gestaltung unserer Zukunft durch Verbindung von Forschung und Technologieentwicklung mit innovativen Anwendungs- und Vorsorgeperspektiven.

**Das ist unsere Mission.**