

GRUNDLAGENFORSCHUNG MIT GROSSGERÄTEN

# ZUKUNFTS MASCHINEN

GRUNDLAGENFORSCHUNG MIT GROSSGERÄTEN

ZUKUNFTSMASCHINEN



# INHALT

12

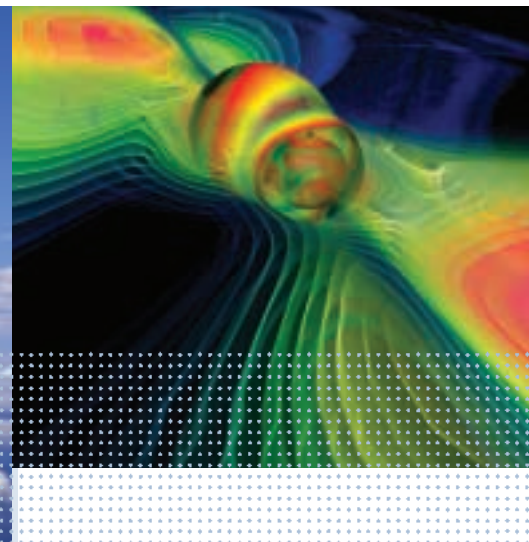
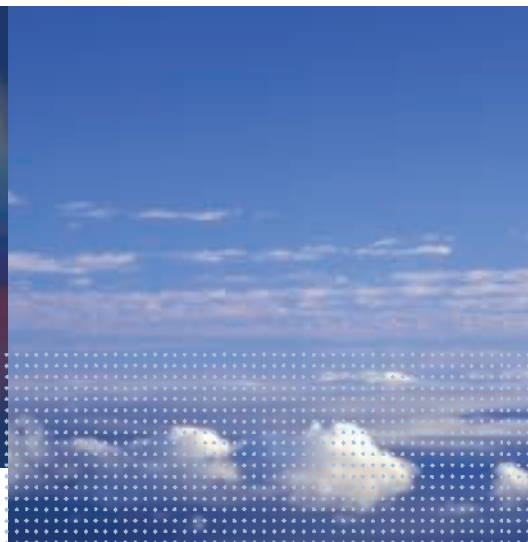
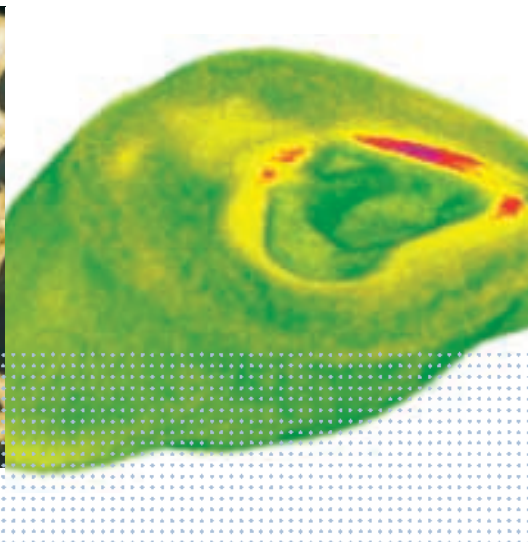
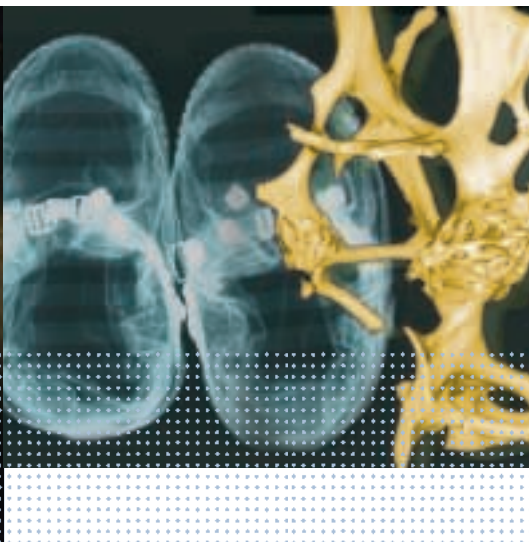
28

44

52

60

68



**Weißt Du, wie ein Stern entsteht?**  
DAS GEHEIMNIS DER MASSE

**Nanokino**  
RÖNTGENLICHT AN: MOLEKÜLE WERDEN ZU FILMSTARS

**Sonden für die atomare Welt**  
MATERIALWISSENSCHAFT MIT NEUTRONEN

**Traumhafte Anziehungskräfte**  
GRUNDLAGENFORSCHUNG MIT HOHEN MAGNETFELDERN

**Expeditionen**  
GROSSGERÄTE ZUM EINSATZ IN LUFTIGER HÖHE UND IM EIS

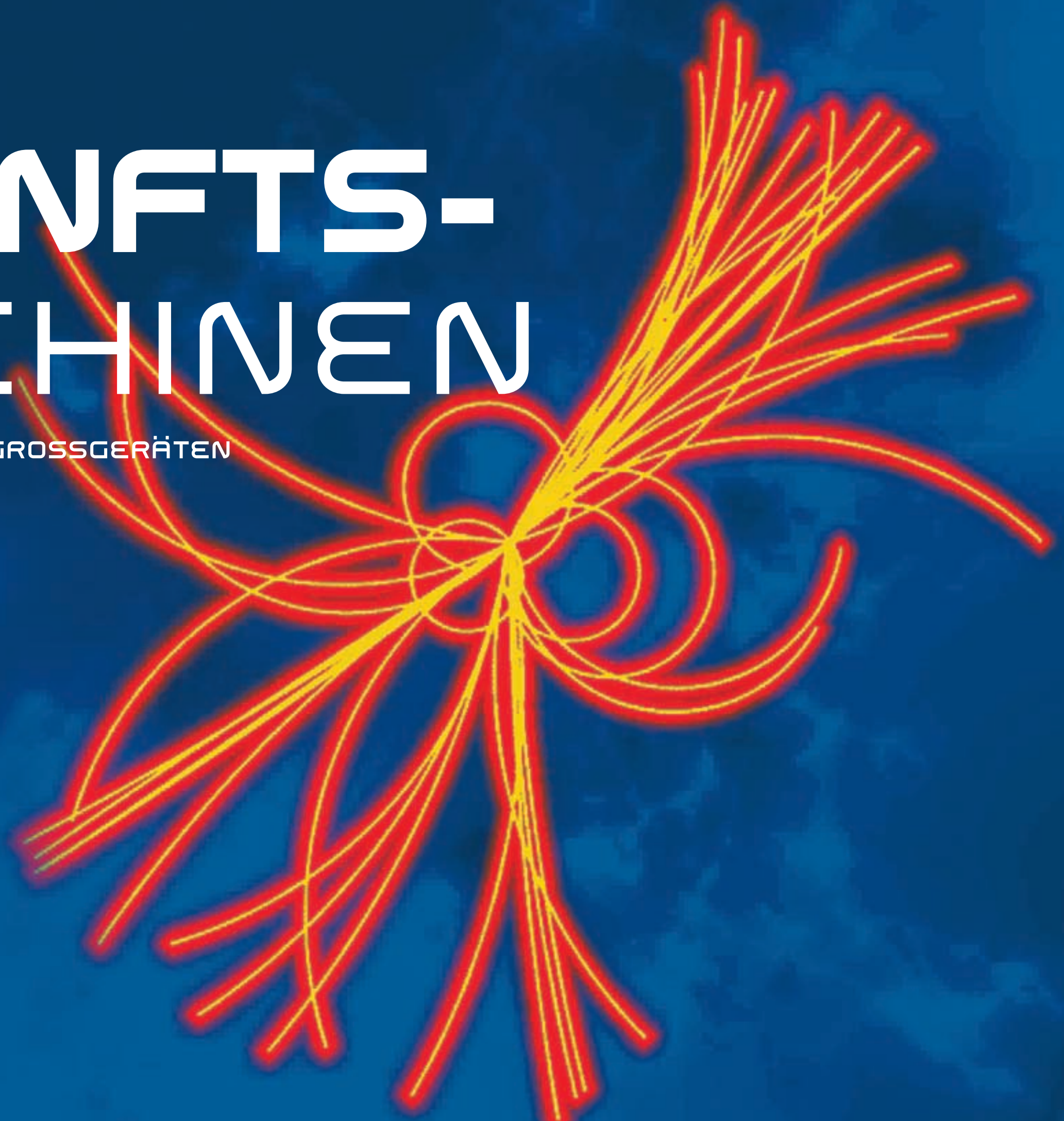
**Goldene Phase der Astrophysik**  
DER BLICK INS UNIVERSUM

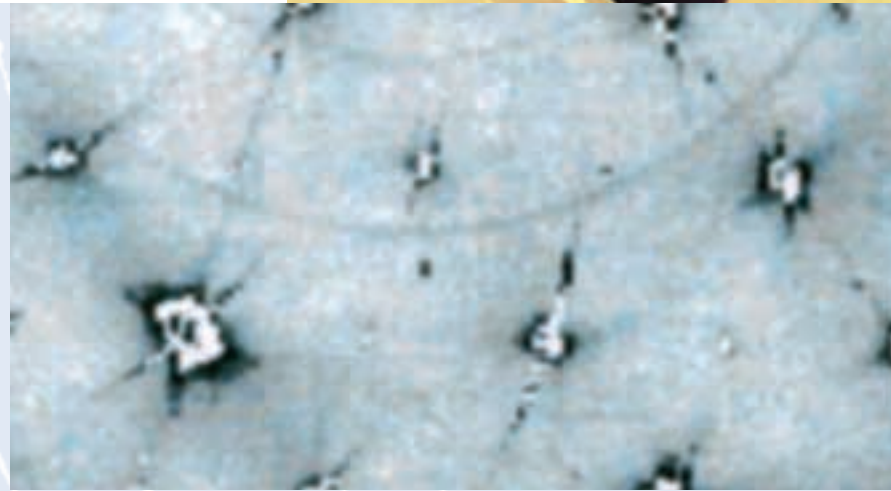
04  
Vorwort

73  
Impressum

# ZUKUNFTS- MASCHINEN

GRUNDLAGENFORSCHUNG MIT GROSSGERÄTEN





**// D**er Anfang aller Erkenntnis ist Staunen: Staunen über die Welt, die uns umgibt. Einer Welt, die von physikalischen Vorgängen durchdrungen ist.

Welt und Leben sind Physik – genau das sagt der griechische Begriff „physis“, von dem sich die „Physik“ ableitet: Er bedeutet „Welt“, „Ursprung“, „Natur“. Eine Welt ohne Mathematik und Naturwissenschaften lässt sich nicht vorstellen. Das physikalische Weltbild ist daher nicht nur eine Grundlage der technischen und wirtschaftlichen Entwicklung, sondern auch eine hohe kulturelle Leistung.

**INFO** ?

**PHYSIK MACHT ARBEIT**

Wissenschaft schafft Arbeit, nicht nur in der Forschung, sondern auch in Wirtschaft und Industrie. Je besser die Ausbildung eines Studenten oder einer Studentin, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass er oder sie Arbeitsplätze schafft – sei es durch eine Unternehmensgründung oder in einer Forschungsgruppe.



**EINIGE GRUNDFRAGEN DER NATURWISSENSCHAFT**

- ▶ Was ist der Ursprung der Masse? Wie ist die Materie entstanden? Und welche Rolle spielt die dunkle Energie?
- ▶ Wie konstant sind die Naturkonstanten? Haben sie sich während der Entwicklung des Universums geändert?
- ▶ Wie sehen die Moleküle aus, die das Leben bestimmen? Wie funktioniert das Zusammenspiel von Proteinen und Enzymen?
- ▶ Wie lassen sich Phänomene wie Hochtemperatur-Supraleitung und Magnetismus verstehen und wie kann man sie optimal für die Technik nutzen?
- ▶ Wie kann man neue „maßgeschneiderte“ Materialien herstellen und welche Eigenschaften haben sie?
- ▶ Welche Modelle für Klima und Wetter ermöglichen eine zuverlässige Vorhersage der Lebensbedingungen auf unserem Planeten in der Zukunft?

**INFO** ?

Die Physik geht alle Menschen etwas an. Sie bestimmt ihr Leben, im Alltag und in allen modernen Technologien. Daher handeln die folgenden Seiten von grundlegenden physikalischen Fakten – und von grundlegenden physikalischen Rätseln. Rätseln, deren Grundlagen außerhalb unserer Erfahrungswelt liegen, deren Wirkungen aber in den Alltag aller Menschen hineinreichen. Auf den folgenden Seiten begeben wir uns auf eine Reise, auf der wir dem Rätsel vom Ursprung der Masse begegnen, der derzeit härtesten Nuss, die Physiker knacken wollen, aber auch „handfesten“ technologischen Problemen, wie etwa der Frage, wie schnell man ein magnetisches Nanoteilchen umpolen kann, also wie schnell die Magnetspeicher der Zukunft arbeiten können.

Vom Kosmos bis zu den Elementarteilchen erkunden die Physikerinnen und Physiker heute Dimensionen, die weit über unser sinnliches Fassungsvermögen hinausgehen. Ihre Forschung entführt uns in ferne Welten und ermöglicht da-

bei neue Einblicke in das Verhältnis des Menschen zu seiner Umwelt. Sie macht neue technische Entwicklungen möglich. Und sie erfüllt eine wichtige kulturgeschichtliche Aufgabe: Tastend erkundet die Forschung neue Welten und vergangene Zeiten. Blicke ins ferne Universum offenbaren das Aussehen der Welt kurz nach dem Urknall.

Was Wissenschaftler in den vergangenen Jahren von diesen Reisen in das Universum und in den Nanokosmos zurück gebracht haben, davon han-

» WER DIE ZUKUNFT ALS GEGENWIND EMPFINDET, GEHT IN DIE FALSCHER...



deln die folgenden Seiten. Und davon, was Physiker, Biologen und Chemiker möglicherweise in Zukunft entdecken könnten. Vor allem aber beschreiben sie die Instrumente, derer sich die Forscher dabei bedienen wollen: Die Zukunftsmaschinen.

INFO

#### ZUSAMMENARBEIT: INTERNATIONAL. INTERDISZIPLINÄR.

Moderne Forschung ist nichts für Einzelgänger. Forschungsteams bestehen häufig aus Dutzenden von Wissenschaftlern aus vielen Ländern. Der Wissenschaftsalltag ist geprägt von internationaler Zusammenarbeit – besonders bei den großen Forschungsgeräten, den Beschleunigern, Synchrotronstrahlungs- oder Neutronenquellen. Aufwändige Spitzenforschung erfordert internationale Teams. Die Zusammenarbeit geht dabei auch über alle Fachgrenzen hinweg: Die Physik eröffnet den Blick auf Biomoleküle, supramolekulare Systeme oder in geologische Strukturen. Selbst die Sozialwissenschaften profitieren von der Zusammenarbeit mit Physikern, etwa bei der Untersuchung sozio-ökonomischer Systeme.

Viele Entdeckungen in der atomaren Welt und dem Nanokosmos, sind nur mit Hilfe immer größerer und leistungsfähigerer Mikroskope, sogenannter Teilchen-Beschleuniger, möglich – eine Konsequenz der Relativitäts- und Quantentheorie. So lassen sich beispielsweise die Feldquanten der Higgs-Felder, mit denen man das Rätsel der Masse lösen will, nur mit Hilfe von Teilchenstrahlen extrem hoher Energie erzeugen. Auch Materie höchster Dichte wie das Quark-Gluon-Plasma kann man nur durch die Kollision von Ionen herstellen, die auf hohe Energien beschleunigt wurden. Und um in die Nanowelt der festen Stoffe und der neuen Materialien vorzudringen, benötigt man Röntgenstrahlung, die eine möglichst kurze Wellenlänge besitzt.

Heute werden Röntgenstrahlen nicht mehr, wie zu Wilhelm Conrad Röntgens Zeiten, im Labor erzeugt, sondern als Synchrotronstrahlung an modernsten Ringbeschleunigern und in Zukunft durch Röntgenlaser. Neutronenstrahlen, die seit knapp einem halben Jahrhundert in vielen Bereichen der Forschung angewendet werden, ermöglichen die mikroskopische Untersuchung der Struktur und Dynamik von leichten (d.h. wasserstoffhaltigen) und magnetischen Materialien. Herstellen lassen sie sich in großer Menge durch „Spallation“ – und dafür sind

ebenfalls große Teilchenbeschleuniger nötig. Ein weiteres wichtiges Forschungsgebiet der Festkörperphysik: Die Untersuchung der magnetischen Eigenschaften von Festkörpern und ihres Verhaltens in starken Magnetfeldern. Sie hat eine große wirtschaftliche Bedeutung.

Für diese Forschungsaufgaben sind Zukunftsmaschinen nötig – Geräte, in die jeweils mehr als 15 Millionen Euro investiert werden müssten. Neun solcher Zukunftsmaschinen unterschiedlichen Planungsstandes wurden zwischen Ende 2000 und Juli 2002 in Deutschland durch den Wissenschaftsrat beurteilt. Zwei dieser Einrichtungen stufte der Wissenschaftsrat anschließend als „ohne Vorbehalt förderungswürdig“ ein. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ging über diese Empfehlung weit hinaus: Es will in den kommenden Jahren insgesamt vier Großgeräte realisieren. In den

#### DEUTSCHE FORSCHUNG WELTWEIT AUF SPITZENPLATZ

In vielen Bereichen der Forschung gehören deutsche Forscher weltweit zur Spitzenklasse. Deutsche Studenten oder Nachwuchswissenschaftler aus der Physik werden weltweit mit lukrativen Angeboten umworben. Besonderes Ansehen genießen dabei die Forscher, die an Großforschungseinrichtungen auf Spitzenniveau gearbeitet haben. Auch an der ständig steigenden Zahl der Patente, die in Deutschland angemeldet werden, kann man den Erfolg der Forschung ablesen – sie liegt inzwischen bei jährlich über 127.000. Beim Europäischen Patentamt liegt Deutschland damit an erster Stelle. Die Ergebnisse deutscher Forschung genießen weltweit höchsten Ruf.

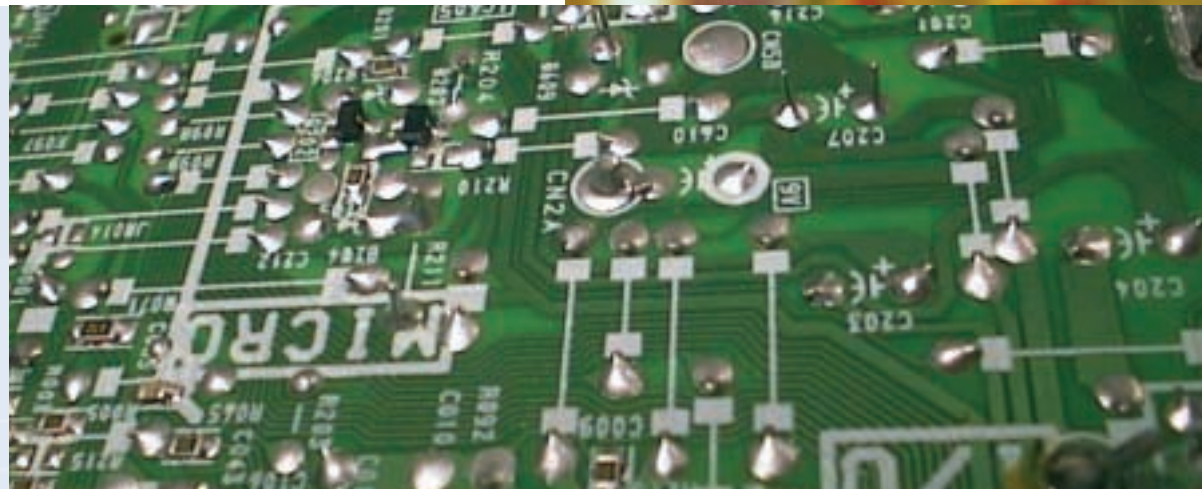
INFO

ACHSE

23,94

Kranbahn UK +10,15m

RICHTUNG. « » DIE ZUKUNFT HAT VIELE NAMEN. FÜR DIE SCHWACHEN IST SIE DAS UNERREICHBARE.



- Für die Atmosphärenforschung und die Erdbeobachtung wird mittelfristig ein neues Forschungsflugzeug HALO angeschafft und betrieben, dessen Kosten von 97 Millionen Euro vom Bund übernommen werden.
- Das Forschungszentrum DESY in Hamburg soll einen „Freie-Elektronen-Laser“ für harte Rönt-

INFO

### GRUNDLAGENFORSCHUNG IM VERBUND

Physik ist Grundlagenforschung. Sie legt die Basis für die wirtschaftliche und technische Weiterentwicklung unseres Landes – und ist darüber hinaus eine kulturelle Höchstleistung. Investitionen in die physikalische Grundlagenforschung und in Großgeräte sind daher Investitionen in die Zukunft. Großgeräte werden von Großforschungszentren betrieben, besonders wichtig ist deshalb die Einbindung der Hochschulen. Sie sichern den steten Zufluss an wissenschaftlichem Nachwuchs und guten Ideen und garantiert die hohe Ausbildungsqualität in Deutschland. Dies wird durch ein spezielles Förderprogramm des BMBWF sicher gestellt: die Verbundforschungsförderung, eines der erfolgreichsten Förderinstrumente des Bundes.

genstrahlung (x-FEL) erhalten. Die Hälfte der Investitionskosten in Höhe von 673 Millionen Euro trägt der Bund. Bereits in etwa zwei Jahren soll eine Bauentscheidung getroffen werden, so dass der TESLA X-FEL in acht Jahren in Betrieb gehen kann.

- Die Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt soll ihre Anlagen gemeinsam mit europäischen Partnern stufenweise ausbauen und zu einem führenden europäischen Physikzentrum werden. Mindestens ein Viertel der Kosten in Höhe von 675 Millionen Euro soll von ausländischen Partnern aufgebracht werden.

Der Wissenschaftsrat evaluierte außerdem den supraleitenden Elektron-Positron Linearcollider (TESLA) am Hamburger DESY. Dieser wurde als „mit Auflagen förderungswürdig“ eingestuft.

Vier weitere Großgeräte konnten „zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht zur Förderung empfohlen werden“. In der Regel waren die Pläne noch nicht weit genug entwickelt, um eine Empfehlung zu erlauben. Diese vier Projekte waren:

- Ein „Freie-Elektronen-Laser“ für weiche Röntgenstrahlung (BESSY X-FEL) am BESSY in Berlin.
- Die Hochfeldmagnetanlage für Strukturuntersuchungen mit Neutronen am Berliner Hahn-Meitner-Institut.
- Die Europäische Spallations-Neutronenquelle (ESS).



### ERSTKLASSIGE WISSENSCHAFT LOCKT DIE BESTEN AN

Der Forschungsstandort Deutschland ist sehr attraktiv: Jedes Jahr kommen mehr ausländische Wissenschaftler und Studenten nach Deutschland, um hier zu forschen oder zu studieren. Besonders anziehend: Großforschungseinrichtungen wie DESY, GSI und BESSY oder die Forschungszentren Jülich, Karlsruhe und HMI. Hunderte von Nachwuchswissenschaftlern schließen hier unter weltweit einmaligen Forschungsbedingungen jedes Jahr ihre Ausbildung ab. Auch der Anteil ausländischer Studenten steigt ständig, auf inzwischen 19 Prozent. Diese Stellung kann das Land jedoch nur behaupten, wenn es in die Zukunft investiert. Die neuen Großgeräte werden dabei eine herausragende Rolle spielen. Denn nur die weltweit besten Forschungsbedingungen werden weiterhin die weltweit besten Nachwuchskräfte anziehen.

INFO

- Das europäische eisbrechende Forschungsbohrschiff Aurora Borealis, geplant unter Mitwirkung des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung.

Im Falle der ESS sprach sich die Bundesregierung gegen eine kurzfristige Förderung eines deutschen Standortes aus. Als europäisches Projekt wird das Großgerät möglicherweise in Großbritannien oder Skandinavien entstehen. Auch für den TESLA-Linearbeschleuniger wird zurzeit kein deutscher Standort vorgeschlagen: Dieses Projekt wird in einer Weltkollaboration betrieben, deshalb sollen internationale Entwicklungen abgewartet werden. DESY soll aber die international eingebetteten Forschungsarbeiten weiterführen können, um eine führende deutsche Rolle in einem späteren globalen Projekt zu ermöglichen.

Welche Ergebnisse die Physik in Zukunft bringen wird, das kann noch niemand sagen. Wie ihre Zukunftsmaschinen und die Forschung damit aussehen werden, das kann man auf den folgenden Seiten nachlesen.

FÜR DIE FURCHTSAMEN IST SIE DAS UNBEKANNTE. FÜR DIE TAPFEREN IST SIE DIE CHANCE. «

# // WEISST DU, WIE EIN STERN ENTSTEHT?

DAS GEHEIMNIS DER MASSE

// **M**ajestätisch umrunden  
einander zwei Gala-  
xien. Seit Milliarden von Jahren zerrt  
ihre gewaltige Masse aus Milliarden  
Sternen, Gas und Dunkler Materie an  
den Spiralformen: Die Masse beein-  
flusst alle Bewegungen. Im Universum  
genau wie in unserer Alltagswelt.

Seit Jahrhunderten fasziniert diese Macht der Masse die Menschheit. Isaac Newton lieferte vor über 300 Jahren in seinen „*Principia Mathematica*“ eine erste mathematische Theorie für die Bewegungen der Masse von Galaxien, Sternen und Planeten. Was er nicht wusste: Im Verborgenen leistet die Masse noch viel mehr. Denn sie ist auch für die Reichweite von Kräften zuständig. Und sie beeinflusst den Zerfall von Kernbausteinen oder die Wechselwirkungen von Quarks – den Elementarteilchen, die zusammen mit **Gluonen** und Elektronen die Materie in der Alltagswelt bilden. Dadurch hatte die Masse nach dem Urknall ein entscheidendes Wörtchen bei der Bildung der Welt mitzureden. Sie ist verantwortlich für das Aussehen der heutigen Welt. Und das macht sie zu einem der wichtigsten und spannendsten Rätsel der Gegenwart – denn noch weiß niemand, wie Masse eigentlich zu Stande kommt.

**GLUONEN** – die „Klebstoffteilchen“, Austauschteilchen der starken Kraft – wurden erstmals 1979 bei DESY am PETRA Elektron-Positron-Speicherring nachgewiesen. Sie halten unter anderem die Quarks zusammen.

Anziehende Massen: Die Spiral-Galaxien NGC 2207 und IC 2163 auf einer Aufnahme des Hubble Space Telescope.  
(Bild: NASA)

Im Reinraum werden die Kavitäten für den TESLA-Beschleuniger zusammengebaut. (Bild: DESY, Hamburg)

## // URKNALL IM LABOR

Vielleicht wird man dieses Rätsel mit TESLA lösen. In einem Tunnel, etwa 20 Meter unter der Erde, könnten Wissenschaftler aus aller Welt der Sache mit der Masse auf den Grund gehen. 41 Institute aus neun Ländern sind an der technischen Planung beteiligt; die Federführung liegt beim Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY). Zurzeit schlägt die Bundesregierung noch keinen deutschen Standort für den TESLA-Linearbeschleuniger vor: Sie will die internationale Entwicklung in der wissenschaftlichen Kollaboration abwarten. Möglicherweise wird der Beschleuniger auch in den USA stehen und aus weltweit mehreren Forschungszentren per Satellit gesteuert – ähnlich wie beim Weltraumteleskop VLT, das in Chile steht und von Garching bei München aus gesteuert wird (siehe Kapitel „Goldene Phase der Astronomie“).

### INFO

#### TEILCHEN AUF SCHLITTSCHUHEN

Zwei Elementarteilchen, die aufeinander eine abstoßende Kraft ausüben, kann man sich ähnlich vorstellen wie zwei Schlittschuhläufer, die sich einen Ball zuwerfen. Der geworfene Ball – er entspricht dem Austauscheteilchen – treibt in diesem Fall die Teilchen auseinander, die Kraftwirkung ist also abstoßend. Auf den ersten Blick ist klar: Schwere Bälle können nur über kurze Strecken geworfen werden. Die Masse entscheidet also über die Reichweite der Kraft. Tatsächlich können Kräfte auch über gewaltige Distanzen (viele Milliarden Lichtjahre) hinweg wirken.

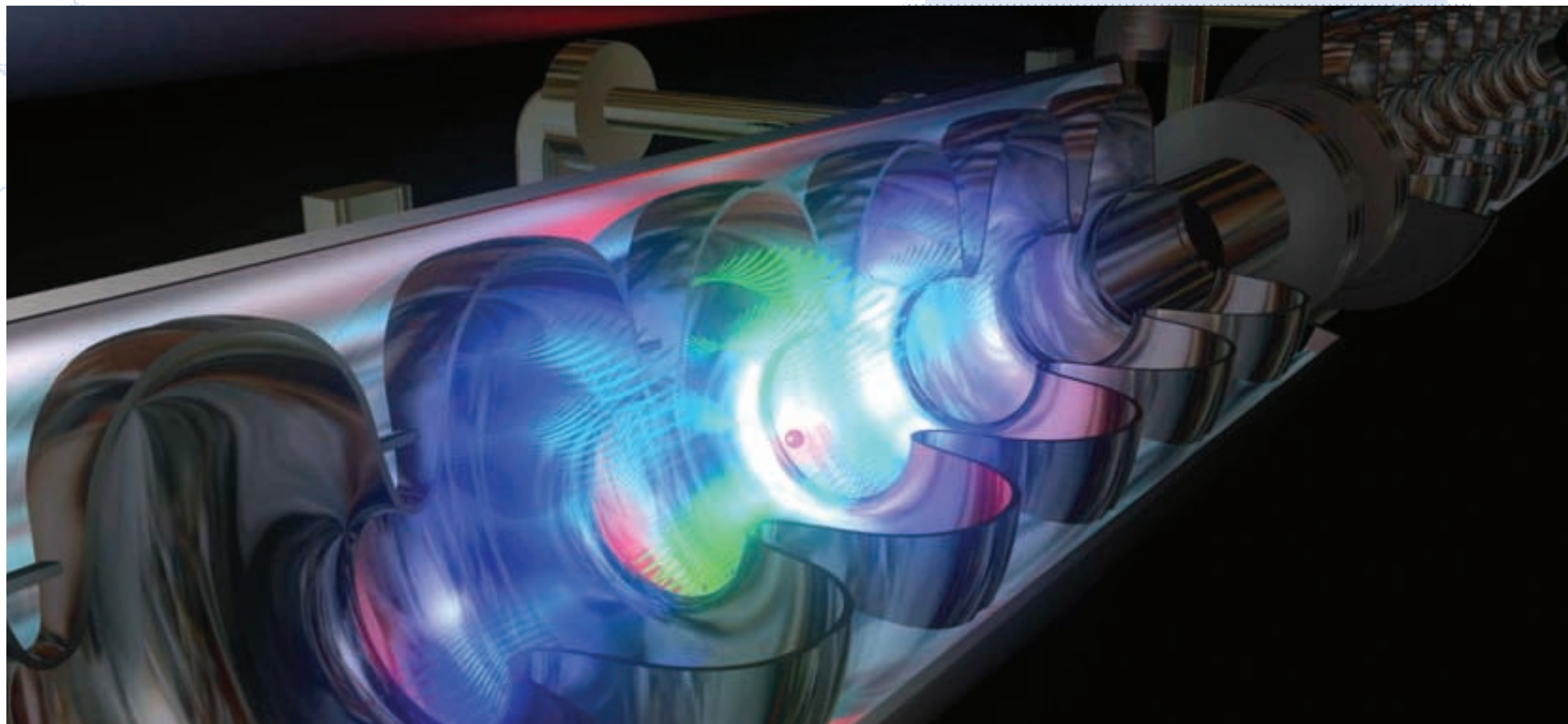


### INFO

#### DAS PRINZIP SURFBRETT

In fast jedem Haushalt findet man einen einfachen Teilchenbeschleuniger: den Fernseher. Dort kommen Elektronen aus einer Glühwendel und werden von einem elektrisch geladenen Gitter angezogen und so in Richtung Bildschirm beschleunigt.

Bei TESLA wird dieses Prinzip abgewandelt. Die Elektronen fliegen durch hohle Kammern – so genannte Resonatoren –, in denen sie ein elektromagnetisches Wechselfeld anschiebt. Im Prinzip funktioniert das wie bei einem Wellenreiter auf einem Surfbrett: Immer im richtigen Moment „schubst“ die elektromagnetische Welle die Elektronen ein Stück weiter. Die TESLA-Resonatoren sind so geformt, dass die Elektronen beim Durchflug nirgends anstoßen oder die Felder zu sehr verwirbeln. Die Kammern aus Niob werden außerdem auf Minus 271 Grad gekühlt. So wird das Metall zu einem Supraleiter (siehe Kapitel „Traumhafte Anziehungskräfte“) – das spart Strom. Und liefert obendrein Know-How für Spitzentechnologie.





DER STANDARD DER PHYSIK

Seit vielen Jahrzehnten nähern sich Elementarteilchen-Physiker stufenweise einer Theorie, die die Welt mathematisch geschlossen beschreiben soll. Jede der Stufen erweitert die vorhergehende.

Das Standardmodell ist die aktuelle Theorie zur Beschreibung kleinster Teilchen. Es erklärt die Vorgänge rund um Quarks, Gluonen, Z- und W-Bosonen und sagt zum Beispiel voraus, dass die Ladung von Elektronen und Protonen betragsmäßig sehr genau übereinstimmt.

Das Standardmodell vereinigt drei der vier bekannten Kräfte (schwache und starke Wechselwirkung sowie elektrische Kraft). Sie gleichen sich bei hohen Energien an. Doch die Gravitation entzieht sich auf dieser Theoriestufe noch einer geschlossenen Beschreibung.

**250 GeV:** Der Elektronenstrahl in einem Farbfernseher hat den Bruchteil eines Millionstels dieser Energie.

Auf halber Strecke des 33 Kilometer langen TESLA-Tunnels sollen Elektronen auf ihre Antimaterie-Geschwister, die Positronen, prallen. 14.000 Pakete aus jeweils etwa zehn Milliarden Elementarteilchen sollen pro Sekunde ineinander rasen. Jedes Teilchen hat dabei nahezu Lichtgeschwindigkeit und eine Energie von zunächst **250 Milliarden Elektronenvolt** (erweiterbar auf das Doppelte) – Energien, wie sie kurz nach dem Urknall vor 15 Milliarden Jahren herrschten. Pro Sekunde soll es ungefähr einen physikalisch interessanten Zusammenstoß zwischen einem Elektron und einem Positron geben – einen Mini-Urknall sozusagen.

Bei einem solchen Crash vernichten sich die beiden Teilchen nicht spurlos. Aus der Energie der Pärchen entstehen neue Teilchen, darunter **Quarks oder W- und Z-Bosonen**, die sich durch die Spuren ihrer Zerfallsprodukte verraten. Doch die Forscher wollen nicht nur diese Teilchen vermessen – sie wollen damit vor allem die geheimnisvollen Higgs-Teilchen unter die Lupe nehmen.



// EINE THEORIE FÜR DIE MASSE

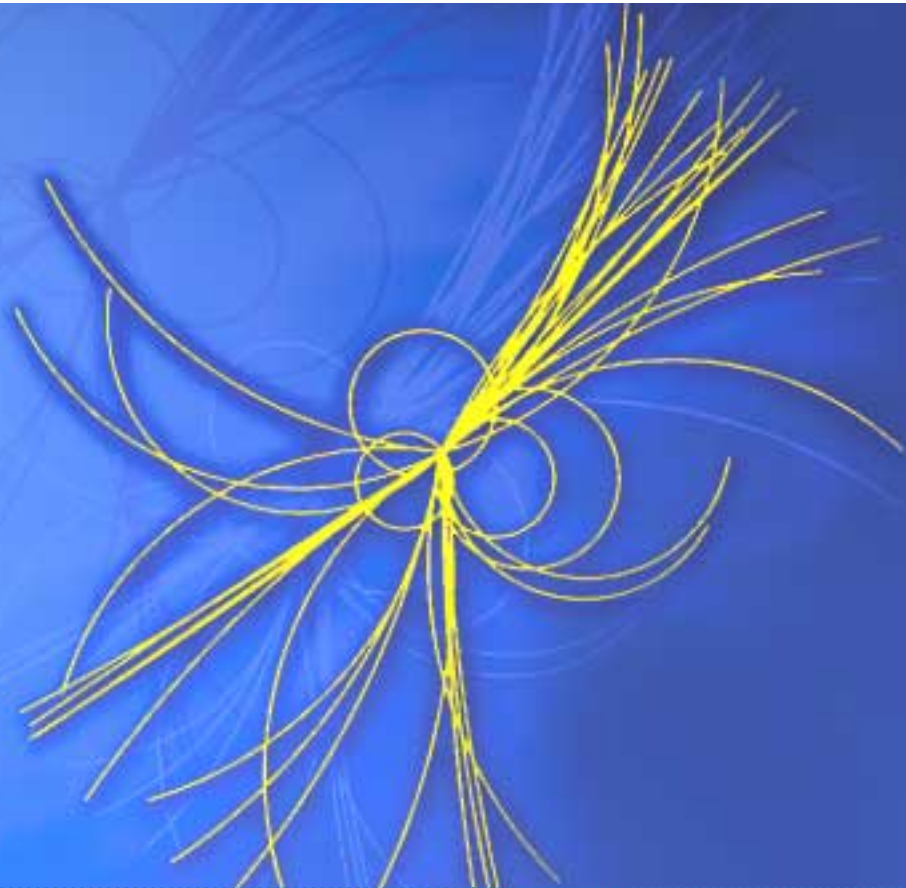
Mitte der 60er Jahre versuchte der britische Theoretiker **Peter Higgs**, den Ursprung der Masse zu erklären: Er hatte die Idee, das Vakuum als kompliziertes Gewimmel vieler Teilchen darzustellen, in dem überall ein „Higgs-Feld“ herrscht.

Dieses Feld ist heute ein wichtiger Bestandteil des Standardmodells. Doch in der Realität konnte es noch niemand nachweisen: Zu klein sind die Energien der derzeitigen Beschleuniger.

DAS HIGGS-FELD

Dieses Feld soll Quarks, Leptonen und W- oder Z-Bosonen träge Masse verleihen. Man kann es sich vorstellen wie eine große Party; ein Quark, das das Higgs-Feld durchquert, entspricht dann einem Gast auf dem Weg zum kalten Buffet. Wenn der mit den anderen Gästen ein paar Worte wechselt, dann bewegt er sich mit größerer Trägheit – das Quark erhält Masse.

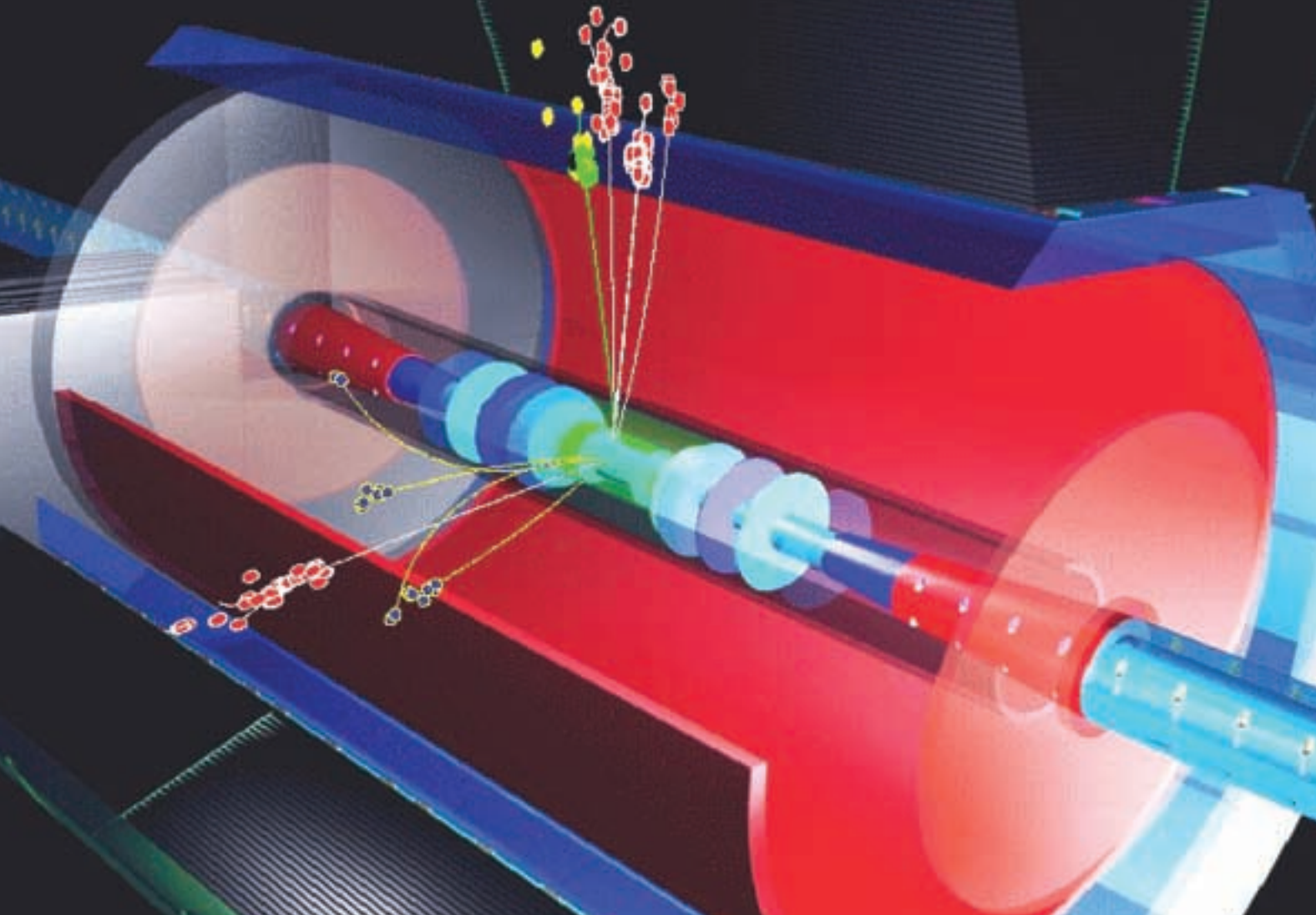
Doch das Vakuum, in dem sich das Ganze abspielt, ist ein kompliziertes Medium. Es kann auch Energie aufnehmen, was auf der Party angeregten Gesprächen entspricht. Ein Gerücht zum Beispiel, das zwischen den Partygästen weiter getragen wird, führt dazu, dass Grüppchen von Menschen die Köpfe zusammen stecken – Physiker sprechen von einer Anregung des Feldes.



Ein Teilchencrash hinterlässt Spuren: Positronen und Elektronen zerplatzen in dutzende Partikel, die ihrerseits wieder zerfallen. Irgendwo dazwischen: Das Higgs-Boson. (Bild: DESY, Hamburg)



Der Tunnel für den TESLA-Linearcollider ist eine Betonröhre, in der die Anlage aufgestellt werden soll. Er soll 10-30 Meter unter der Erde verlaufen und einen Innendurchmesser von ca. fünf Metern haben. In den gelben Röhren sollen die auf minus 271 Grad Celsius gekühlten, supraleitenden Beschleunigungselemente aus dem Metall Niob stecken. (Bild: DESY, Hamburg)



❖ Verschiedene Nachweisgeräte im zentralen Teil des Detektors, wo Elektronen und Positronen aufeinander prallen. Vertex-Detektor (grün), Spurkammer (rot), elektromagnetisches Kalorimeter (blau) und hadronisches Kalorimeter (schwarz). (Bild: DESY, Hamburg)

Schließlich bewies man in den letzten Jahren durch Versuche am Large Electron-Positron Collider (LEP) in Genf oder am Tevatron in Chicago, dass Feldquanten der Higgs-Felder – wenn es sie gibt – nicht bei Energien unter 114 GeV entstehen. Daher wird nun am Zentrum für Teilchenforschung CERN in Genf an einem neuen Beschleuniger gebaut. Im „Large Hadron Collider“ (LHC) will man ab März 2007 Higgs-Teilchen erzeugen und untersuchen.

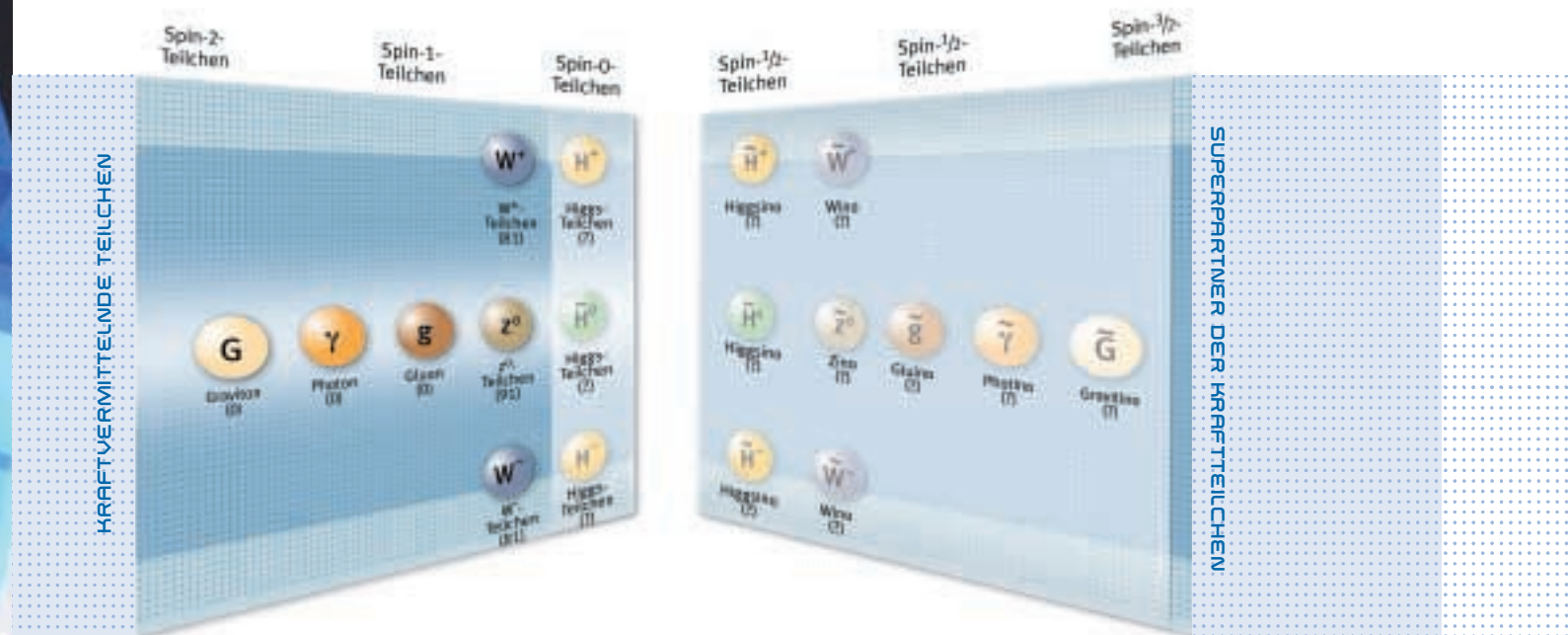
Die Protonen, die im Tevatron und dem LHC auf die Reise geschickt werden, sind jedoch im Vergleich zu den einfachen, punktförmigen **Leptonen** im Tesla-Tunnel komplizierte, zusammengesetzte Gebilde. Für Crash-Tests bei höchsten Energien sind sie gut geeignet – doch sie produzieren beim Aufprall neben den gesuchten Higgs-Teilchen viele weitere Teilchen. Im Gegensatz dazu werden bei Lepton-Crashes die

Higgs-Teilchen nahezu allein erzeugt und können daher genau unter die Lupe genommen werden. Die Physiker können dann auch untersuchen, wie zwei Higgs-Teilchen miteinander wechselwirken – ein weiteres wichtiges Charakteristikum dieses Masse-erzeugenden Teilchens.

### // EINE STUFE WEITER: SUPERSYMMETRIE

Doch die Experten erhoffen sich von TESLA noch viel mehr: Der Beschleuniger könnte sie auf der Theorietreppe bis zu experimentellen Belegen für eine supersymmetrische Theorie (susy) führen. Diese Theorie vereint Teilchen und Kräfte unter einem Dach und bezieht sehr elegant die Gravitation mit ein. Eine Nebenwirkung hat die susy aber: Sie sagt voraus, dass jedes Elementarteilchen in unserer bekannten Welt

## TEILCHEN IM STANDARDMODELL UND SEINER SUPERSYMMETRISCHEN ERWEITERUNG



jeweils einen supersymmetrischen Partner besitzt. Und genau damit wollen die Physiker sie testen – denn noch hat niemand supersymmetrische Teilchen nachgewiesen. Man vermutet deshalb, dass supersymmetrische Partner-Teilchen recht schwer sind und in Sekundenbruchteilen zerfallen. Das heißt: Man benötigt viel Energie, um sie zu erzeugen – eigentlich sogar mehr, als TESLA zur Verfügung stellen kann. Doch hier kommt den Physikern die Natur zu Hilfe, mit einem geheimnisvollen Phänomen: Sie lässt im Vakuum ständig für kurze Zeit neue Teilchen entstehen und vergehen. Für kurze Zeit könnte man daher in TESLA auch exotische

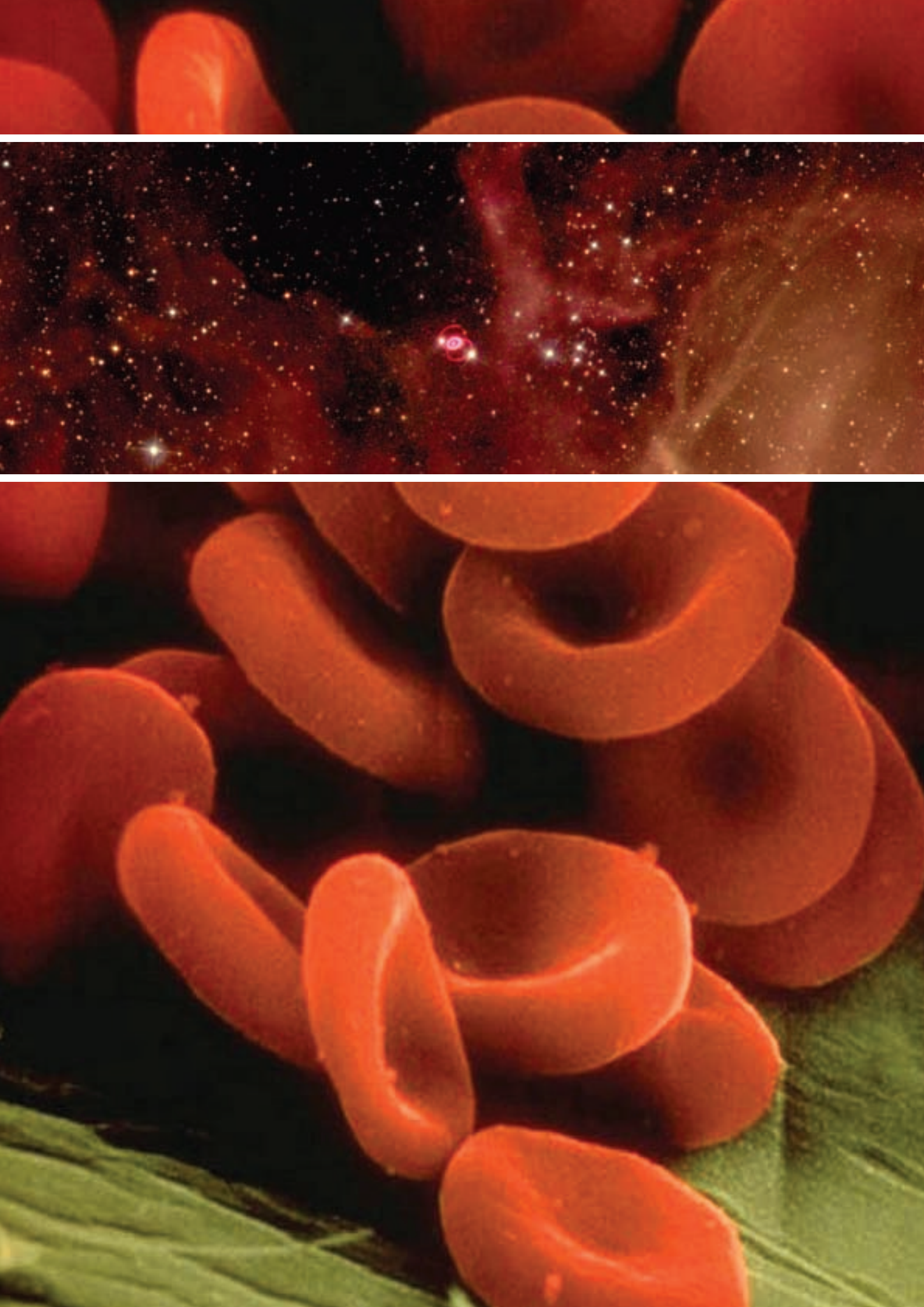
supersymmetrische Materie nachweisen. Der Teilchenstrahl von TESLA wäre für eine präzise Analyse der Exoten besonders gut geeignet.

Könnte man supersymmetrische Elementarteilchen an TESLA entdecken, dann wäre das vergleichbar mit den ersten experimentellen Belegen für die Relativitätstheorie: Es wäre eine Revolution für das physikalische Weltbild. Die Physik hätte mit TESLA nicht nur einen großen Schritt in Richtung Zukunft geschafft – sie hätte auch einen ersten Blick in noch völlig unbekannte Welten geworfen.

❖ ❖ Die Bausteine der Materie lassen sich auf wenige Elementarteilchen zurückführen, von denen die meisten bereits beobachtet wurden (linker Bereich in den Grafiken). In supersymmetrischen Theorien jedoch bekommt jedes dieser Teilchen einen supersymmetrischen Partner, von denen TESLA möglicherweise einige nachweisen wird. (Grafik: ius)

Zu den **LEPTONEN** gehören Elektronen und Positronen, aber auch zum Beispiel die Neutrinos.





## // HADRONEN UND KERNE UNTER KIEFERN

Einen ganz anderen Blick auf exotische Materie versprechen Experimente auf einer abgelegenen Waldlichtung nahe dem hessischen Darmstadt: Dort plant die Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) ein europäisches Zentrum der Hadronen- und Kernphysik, das nach dem aktuellen Beschluss der Bundesregierung in den kommenden Jahren gebaut wird.

Zu den zahlreichen Fragen der **Hadronen-** und Kernphysik, die die Darmstädter Forscher bewegen, gehört die Herkunft schwerer Elemente, ohne die menschliches Leben auf der Erde nicht möglich wäre. Die roten Blutkörperchen beispielsweise können Sauerstoff nur transportieren, weil sie Eisenatome enthalten – Eisen, das vor Milliarden von Jahren in Sternen erzeugt und dann in einer gewaltigen Explosionen frei gesetzt wurde, bevor es nach einer Odyssee durch den Weltraum in der Ur-Erde und schließlich im menschlichen Körper landete!

## // QUARK-GLUONEN-PLASMA

An der GSI wird man ähnliche Verhältnisse erzeugen können, wie sie im sehr frühen Universum herrschten. Im Labor geschieht das für sehr kurze Zeit, bei der Kollision schwerer Kerne. Dadurch wollen die Forscherinnen und Forscher herausfinden, wie das Universum aussah, als es vollständig von einer „Ursuppe“ aus Quarks und Gluonen erfüllt war – dem Quark-Gluon-Plasma.

Viele Forschungsthemen also. Und viele Forscher: Jährlich experimentieren an der GSI über

❖ Rote Blutkörperchen binden Sauerstoff mit Hilfe des Eisens im Hämoglobin. Dieses Eisen hat einen langen Weg hinter sich: Es wurde in fernen Sternensystemen gebildet. Für die Struktur des Hämoglobins interessieren sich auch Forscher in Synchrotronlabors (Seite 33) und Magnetfeld-Experten (siehe Seite 57/59). (Bild: flashlight)

Neutronen und Protonen gehören zu den **HADRONEN**. Der Name kommt vom griechischen hadros (stark, kräftig), denn die Teilchen werden durch die starke Kraft zusammengehalten. Protonen und Neutronen machen immerhin über 99 Prozent der sichtbaren Materie im Weltall aus.

1000 Forscher aus dem In- und Ausland, 220 Doktoranden sind an wissenschaftlichen Projekten beteiligt. Denn die Einrichtung ist schon jetzt in vielerlei Hinsicht weltweit einmalig: An der GSI können alle Elemente des Periodensystems ionisiert werden, vom leichten Wasserstoff bis zum schweren Uran. Das heißt, mit Hilfe von Hochspannung verringern die Forscher die Anzahl der Elektronen der Atome. Dadurch wird die positive Ladung der Protonen im Atomkern nicht mehr durch die negativen Elektronen ausgeglichen – und die Atome sind elektrisch positiv geladen.

So lassen sie sich wie die Elektronen in einem Fernseher auf sehr hohe Energien beschleunigen. In Darmstadt geschieht das derzeit zunächst in einem Linearbeschleuniger und anschließend in einem unterirdischen **Ringbeschleuniger** (Durchmesser 216 Meter), wo die Ionen etwa 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit erreichen. Treffen sie dann auf andere Materie, erzeugen sie beim Aufprall viele neue, exotische Partikel. Diese werden entweder in Detektoren registriert. Oder man speichert sie in einem weiteren Beschleunigerring, um sie anschließend zu weiteren Experimenten zu verwenden.

## INFO?

### IMMER AN DER WAND LANG...

So genannte Ringbeschleuniger (darunter das SIS an der GSI oder das Kühlersynchrotron COSY am FZ Jülich, mit dem ebenfalls Kerne und Hadronen untersucht werden) schicken geladene Teilchen immer im Kreis herum. Sie können dabei Beschleunigungsstrecken durchfliegen, die ein Mehrfaches des Erdumfanges betragen. Linearbeschleuniger hingegen schieben die Teilchen auf einer geraden Strecke an, was zwar die effektive Beschleunigungsstrecke deutlich verkürzt, aber auch die Verluste durch Strahlung verringert.

❖ Neutronensterne (oben der mit 200-500 Lichtjahren erdnächste) sind Überreste einer Supernova-Explosion (unten). Sie haben nur einen Durchmesser von etwa zehn km und bestehen im Wesentlichen aus einer kompakten Ansammlung von Neutronen. Ein Stück Neutronensternmaterie, klein wie ein Zuckerwürfel, wiegt daher genauso viel wie ein etwa tausend Meter hoher Berg. (Bilder: NASA oben; NASA/ CXC/ SAO unten)

Der Plan für die Zukunft sieht einen viel größeren Ringbeschleuniger von 350 Meter Durchmesser vor. Damit will man intensive Strahlen aus Anti-Protonen erzeugen. Oder Strahlen fast beliebiger Ionen mit weit höherer Intensität und bis zu 15fach höherer Energie als im bestehenden Gerät. Das Besondere dabei: Der neue Beschleunigerring lässt parallele Forschungsarbeiten zu – so, als ob man nicht einen, sondern drei Beschleuniger hätte.

Das wird durch ausgefeilte Tricks möglich: Der geplante Hauptbeschleuniger wird exakt mit einer Reihe von kleinen Nebenringen abgestimmt. All diese Beschleuniger greifen ineinander wie die Zähne in einem komplizierten Zahnradwerk. So stören sich die unterschiedlichen Ionenstrahlen nicht in den einzelnen Beschleunigerphasen.

## // REISE INS INNERE EINES NEUTRONENSTERNES

Damit können die Forscher unter anderem die Reise ins Innere eines Neutronensterns antreten, in eine unwirtliche Gegend: Ähnlich wie kurz nach der Entstehung des Universums liegen dort vermutlich drei Quarksorten in einem besonderen Materiezustand vor, dem „Quark-Gluon-Plasma“. Quarks und Gluonen schwimmen darin ungebunden durcheinander, und zwar bei tiefsten Temperaturen: Neutronensterne stellen sozusagen riesige kalte Atomkerne dar. Die Wissenschaftler wollen sich diesem exotischen Materiezustand mit dem neuen Beschleunigerring so weit wie möglich nähern. Darüber hinaus wollen sie untersuchen, welche Zustände Materie unter extrem hohen Drücken und Temperaturen einnimmt.

Dabei interessiert die Wissenschaftler besonders der Übergang zwischen dem exotischen Quark-Gluon-Plasma und der „normalen“ Materie in unserer Welt. Denn die beiden Materieformen unterscheiden sich unter anderem in einer wichtigen Eigenschaft: Der „chiralen Symmetrie“. Die Flugrichtung definiert zusammen mit dem Drehsinn (Spin) des Teilchens seine „Händigkeit“. Und die könnten einer der Schlüssel sein für die Massen der Hadronen.

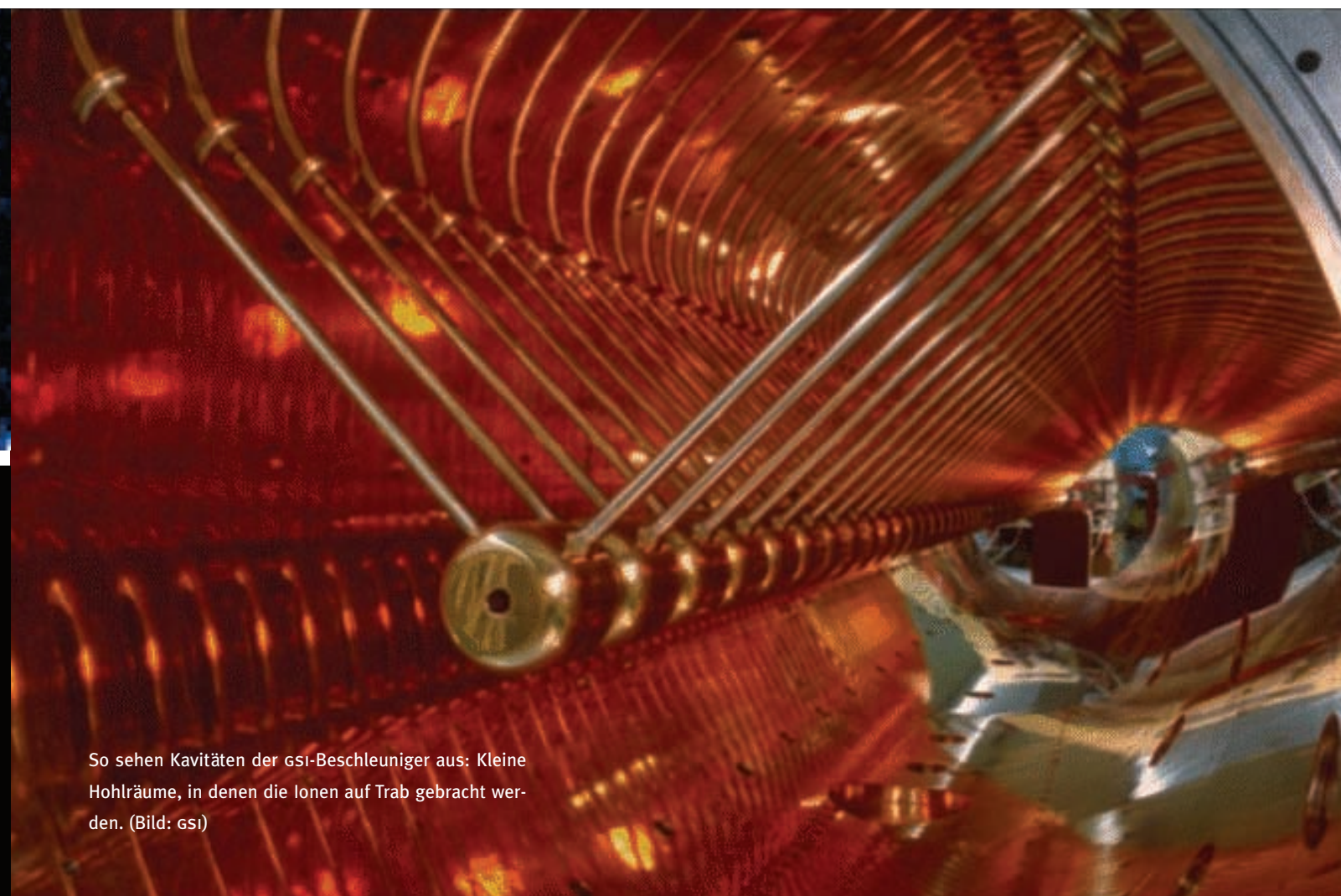
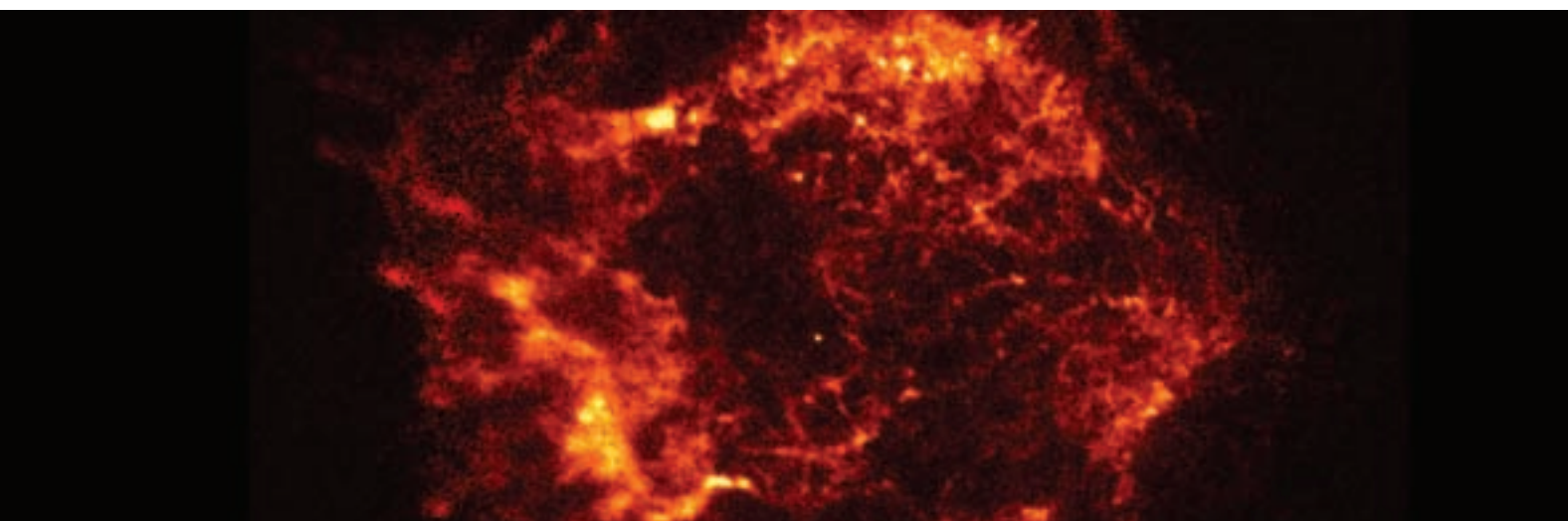
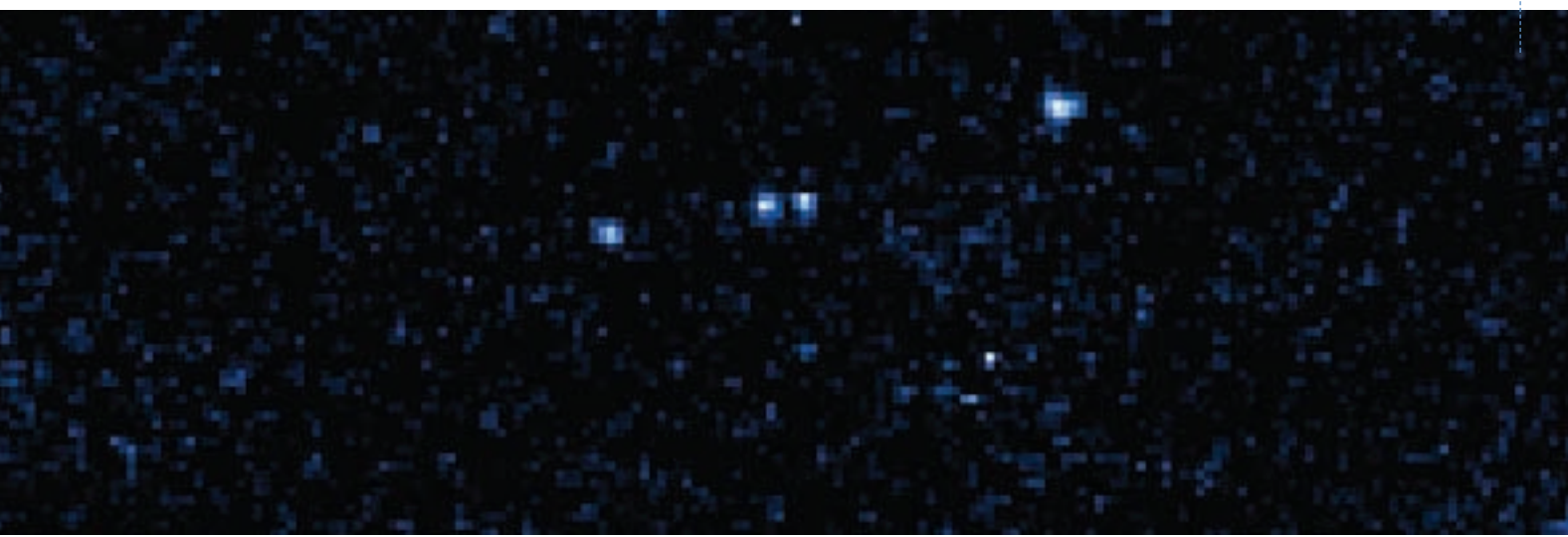
## // MASSIVES HÄNDESCHÜTTELN

Es zeigt sich nämlich, dass zunächst ein linkshändiges Quark, das ein Gluon aussendet oder absorbiert, linkshändig bleibt. Einem rechtshändigen Quark geht es entsprechend. Diese Symmetrie besteht allerdings nur, solange nicht die

Das Wort **CHIRAL** kommt aus dem Griechischen von cheir (Hand).

Quarkmasse ins Spiel kommt. Quarks mit Masse können ihre Händigkeit ändern, wenn sie ein Gluon aussenden oder absorbieren. Für sie gibt es deshalb keine symmetrische Trennung mehr zwischen links- und rechtshändig. Massenerzeugung und chirale Symmetrie hängen also eng zusammen.

Die Massen der Hadronen entstehen beim Übergang zwischen Quark-Gluon-Plasma und normaler Materie. Dabei spielen die Quarks und Antiquarks, die ständig im Vakuum entstehen und vergehen, eine zentrale Rolle – auch sie brechen die chirale Symmetrie. An der GSI will man das Zusammenspiel dieser Fluktuationen mit den zugehörigen charakteristischen Gluonenfeldern erforschen. Denn darüber, wie das alles zusammenpasst, gibt es gegenwärtig nur Hypothesen. Die geplanten Experimente, die



So sehen Kavitäten der GSI-Beschleuniger aus: Kleine Hohlräume, in denen die Ionen auf Trab gebracht werden. (Bild: GSI)

DEN PRAKTISCHEN NUTZEN SUCHT, KANN SICHER SEIN, DASS ER VERGEBLICH SUCHEN WIRD. «



**BEDEUTUNG DER CHIRALEN SYMMETRIE:**

Im Quark-Gluonen-Plasma koppeln nur links- mit linkshändigen und rechts- mit rechtshändigen Quarks (oben). In unserer Welt mischen sich auch links- mit rechtshändigen Quarks (unten). (Bild: ius)



zum Beispiel zeigen werden, wie sich die Massen von Hadronen in heißer und kalter Kernmaterie unterschiedlicher Dichte verändern, können helfen, dieses Rätsel zu lösen und damit die fundamentale Frage zu beantworten: Woher kommt die Masse in unserer Welt?

Die neue Anlage an der GSI würde es auch erlauben, Hadronen zu erforschen, die strange- und charm-Quarks enthalten. Übergewichtige Materie mit vielen strange-Quarks kommt nicht in der normalen Welt vor, wird aber als ein möglicher Baustoff für die **dunkle Materie** im All diskutiert. Und möglicherweise werden mit Antiprotonenstrahlen an der neuen GSI auch exotische Verbindungen aus Quarks beobachtbar – jenseits der bekannten Hadronen aus zwei bzw. drei Quarks. Schließlich sollen sogar die Klebteil-

Physiker vermuten die Existenz „**DUNKLER MATERIE**“, die sich unsichtbar im Weltall befinden soll. Diese Materie könnte durch die Schwerkraft die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Universums bestimmen. Und sie könnte dazu geführt haben, dass die Galaxien sich im heutigen Weltall in gigantischen schaumartigen Strukturen anordnen (siehe auch Kapitel „Goldene Phase der Astronomie“).

chen, die die Quarks zusammenhalten, der Theorie zufolge eigene Gebilde formen können: So genannte Gluonenbälle.

**// BLICK IN DIE KOCHTÖPFE DER ELEMENTE**

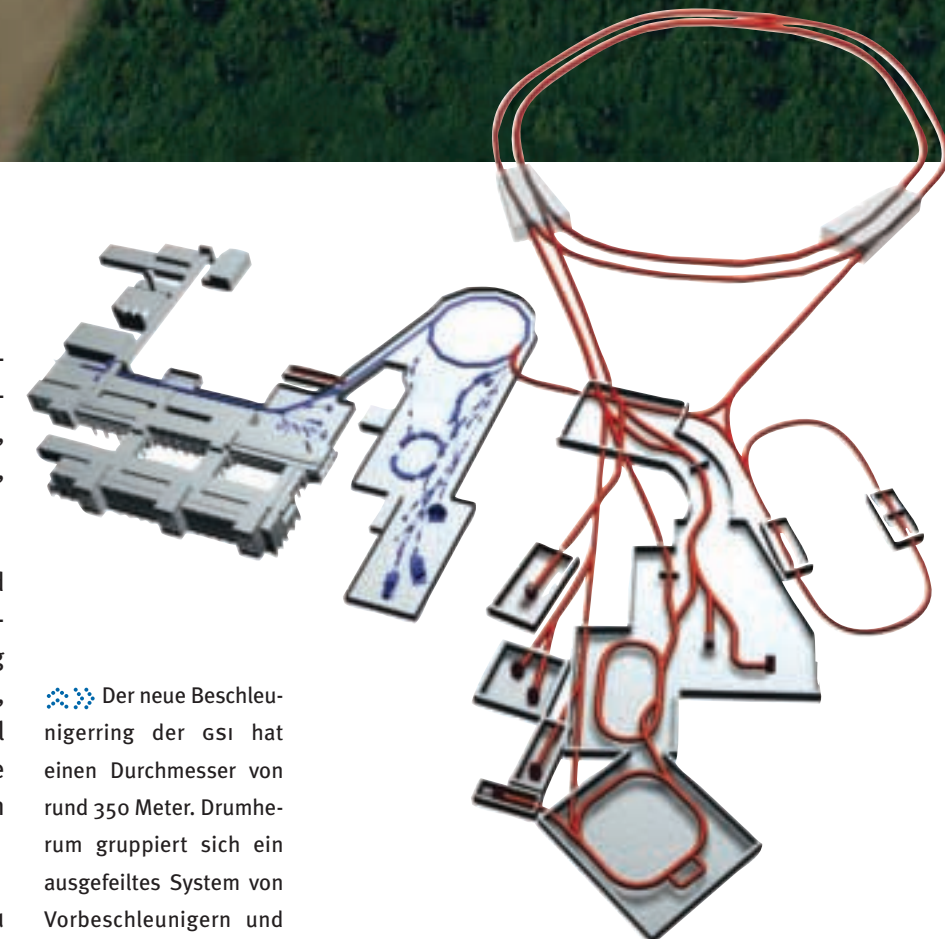
Nicht nur die Entstehung der Materie im Universum, auch ihr Weiterleben interessiert die GSI-Forscher: Sie beschäftigen sich auch mit dem Zerfall von besonders schweren Atomen.

Solche elementaren Schwergewichte haben oft eine schwere Geburt hinter sich, etwa das Ende eines Roten Riesen in einer gewaltigen Stern-Explosion (Supernovae). Bei diesen stellaren Katastrophen befreien sich Neutronen und Proto-

nen, die sich dann wiederum an große Kerne anlagern können. Die entstehenden Riesen-Atomkerne leben oft nur Bruchteile von Sekunden, um sofort in leichtere Bruchstücke zu zerfallen, die meist ebenfalls nicht stabil sind.

Die Natur recycled diese Zerfallsprodukte und verwendet sie als Baumaterial für neue Sonnensysteme. Auch die Erde hat bei ihrer Entstehung große Mengen schwerer Atome abbekommen, deren radioaktiver Zerfall heute zum Beispiel das Erdinnere erwärmt. Und: Schwere Elemente sind lebenserhaltend für viele Organismen (siehe Seite 20).

Die Physiker wollen deshalb bei den bis zu 15fach höheren Energien des neuen Beschleunigers schwere Exoten erzeugen und anschlie-



Der neue Beschleunigerring der GSI hat einen Durchmesser von rund 350 Meter. Drumherum gruppiert sich ein ausgefeiltes System von Vorbeschleunigern und Speicherringen. (Bild: GSI)

End ihren Zerfall unter die Lupe nehmen. Dazu schießen sie zum Beispiel Uranpartikel auf eine dicke Metallscheibe. Dabei entstehen die gleichen neutronenhaltigen Trümmer wie in den Sternen. Die werden dann in einem komplizierten Filtersystem nach Kernladung und Masse getrennt und anschließend untersucht. Die neue Beschleunigeranlage wird hier durch höhere Energien und neue Teilchenfilter weitere Möglichkeiten eröffnen, dem Ursprung der Elemente auf die Spur zu kommen.

## INFO

## GOLDFINGER

Bei der Aufstellung des Periodensystems vor rund 130 Jahren endete die Ordnung der Elemente bei Wismut – mit Atomgewicht 83 nur etwas schwerer als das Element Blei, das die Alchemisten des Mittelalters mit Hilfe des Steines der Weisen erfolglos in Gold zu verwandeln versucht hatten. Heutige Periodensysteme enden bei Atomgewicht 112 und gehen damit sogar noch weiter als die Natur selbst. Denn viele der extrem schweren Elemente zerfallen umgehend wieder. Wissenschaftler der GSI haben unter anderem für Sekundenbruchteile das instabile Element 110 erzeugt. Nach dem Entdeckungsort soll es künftig „Darmstadtium“ heißen. Das Element mit Atomgewicht 108, ebenfalls an der GSI erzeugt, wird bereits jetzt „Hassium“ genannt, nach dem Bundesland Hessen.

Selbst der Traum von der Golderzeugung ist heute Alltag in physikalischen Labors: Forschern der GSI ist es gelungen, aus Kupfer und Zinn Gold zu machen. Mit viel Fingerspitzengefühl schossen sie Zinn-Atomkerne gerade mit solch einer Geschwindigkeit auf eine Kupfer-Folie, dass beide Kerne sich berühren und zu einem Goldkern verschmelzen konnten, ohne zu zerplatzen.

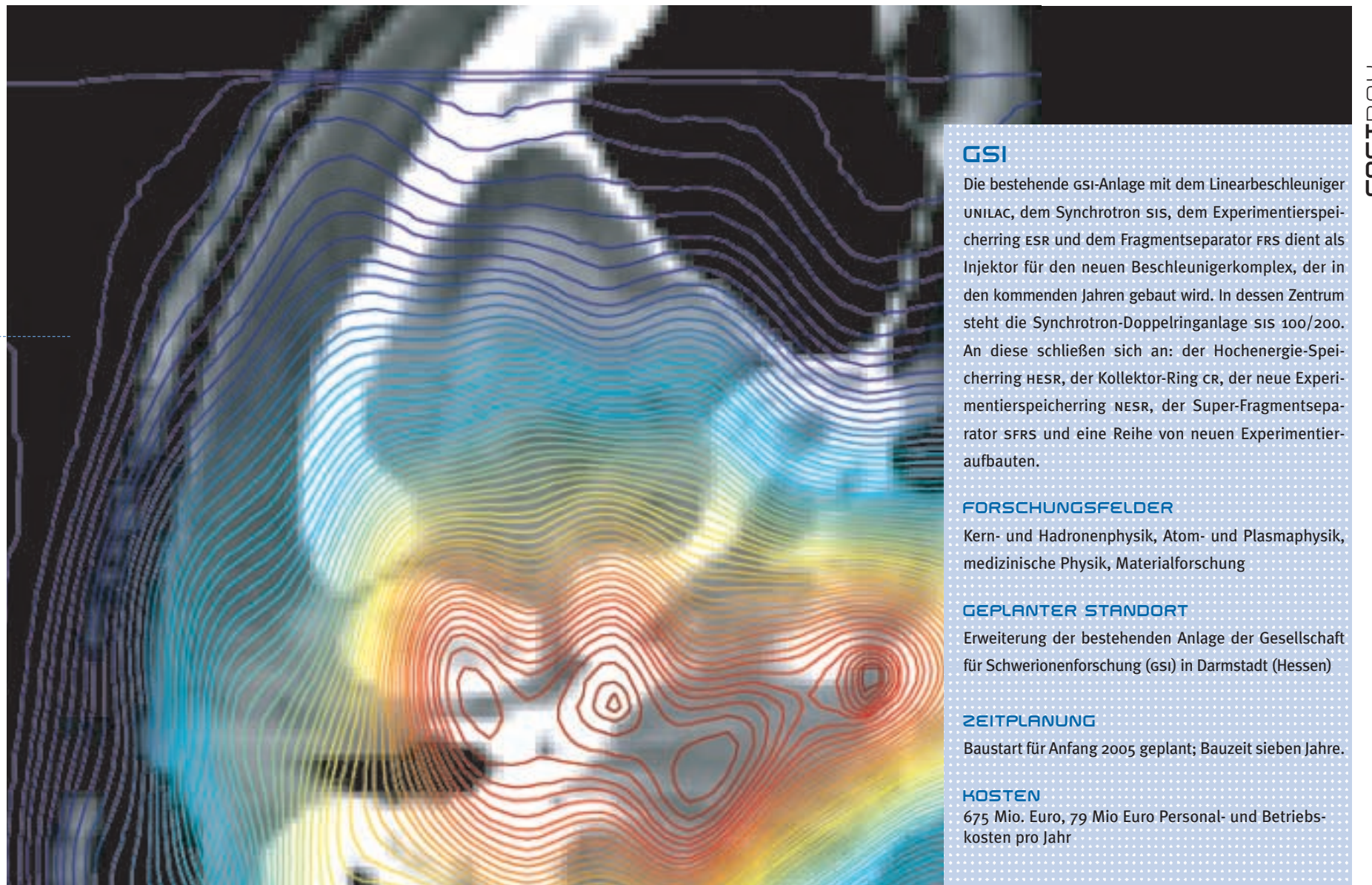
## // IONEN FÜR'S GEMEINWOHL

Die Grundlagenforschung mit schweren Ionen hat auch schon zu vielen praktischen Anwendungen geführt – zum Beispiel zu Techniken zur Werkstoffhärtung oder zur Herstellung von Mikrostrukturen sowie Tests von Satellitenbauteilen. Ein Highlight: Die **Bestrahlung von Hirntumoren** mit Ionen, die an der GSI seit 1997 betrieben wird. Darauf aufbauend wird in den kommenden Jahren zusammen mit der Industrie, dem Deutschen Krebsforschungszentrum und der Universitätsklinik Heidelberg das erste Zentrum für Ionenstrahltherapie in Europa gebaut.

Mit dem biophysikalischen Wissen aus der Tumorthherapie wollen die Forscher auch die Strahlenbelastung von Astronauten bei Langzeitflügen untersuchen – wichtig etwa für zukünftige Marsmissionen. An der neuen Anlage können statt einzelner Bauteile zudem auch ganze Satelliten auf ihre Strahlentauglichkeit hin untersucht werden. Selbst durch dicke Edelstahlwände – zum Beispiel von Hochdruckzellen – können die Forscher radioaktive Teilchenstrahlen schicken und so Materie auch unter extremen Bedingungen untersuchen.



❖ Ionen gegen Hirntumoren: Die Ionenstrahlen lassen sich sehr gezielt auf die betroffenen Regionen richten. Auch die Eindringtiefe läßt sich genau einstellen. So kann man damit besonders Tumoren in Weichteilen (Gehirn, Augen oder Prostata) behandeln – mit großem Erfolg, wie der Vorher-Nachher-Vergleich zeigt. (Bild: GSI)



## GSI

Die bestehende GSI-Anlage mit dem Linearbeschleuniger UNILAC, dem Synchrotron SIS, dem Experimentierspeicherring ESR und dem Fragmentseparator FRS dient als Injektor für den neuen Beschleunigerkomplex, der in den kommenden Jahren gebaut wird. In dessen Zentrum steht die Synchrotron-Doppelringanlage SIS 100/200. An diese schließen sich an: der Hochenergie-Speicherring HESR, der Kollektor-Ring CR, der neue Experimentierspeicherring NESR, der Super-Fragmentseparator SFRS und eine Reihe von neuen Experimentieraufbauten.

## FORSCHUNGSFELDER

Kern- und Hadronenphysik, Atom- und Plasmaphysik, medizinische Physik, Materialforschung

## GEPLANTER STANDORT

Erweiterung der bestehenden Anlage der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt (Hessen)

## ZEITPLANUNG

Baustart für Anfang 2005 geplant; Bauzeit sieben Jahre.

## KOSTEN

675 Mio. Euro, 79 Mio Euro Personal- und Betriebskosten pro Jahr

## TESLA

Zwei supraleitende Linearbeschleuniger mit einer Gesamtlänge von 33 km, in denen Elektronen und Positronen in hohen elektromagnetischen Feldern entgegengesetzt beschleunigt werden und innerhalb eines Detektors kollidieren.

## FORSCHUNGSFELDER

Elementarteilchenphysik

## GEPLANTER STANDORT

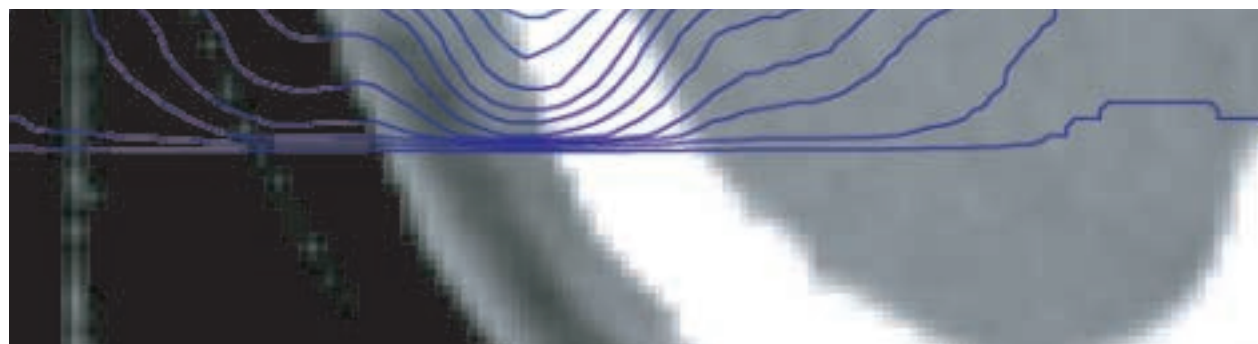
Ein möglicher Standort ist das DESY in Hamburg. Es wird jedoch die internationale Entwicklung abgewartet.

## ZEITPLANUNG

Baustart steht noch nicht fest; Bauzeit acht Jahre.

## KOSTEN

3,45 Mrd. Euro, 135 Mio. Euro Personal- und Betriebskosten pro Jahr



OHNE SIE WIRKLICH ZU VERSTEHEN. AUF EINEM HOHEN NIVEAU WIRD DIE PHYSIK ZUR REINEN POESIE. «

050

NEIL ARMSTRONG

7 7 69

# // NANOKINO

RÖNTGENLICHT AN: MOLEKÜLE WERDEN ZU FILMS TARS

Um Neil Armstrongs Raumanzug auf darin verborgene spitze Gegenstände zu untersuchen, röntgte man selbst die Schuhe. Röntgenologische Feinarbeit ist dagegen die Mikrotomografie, hier zur Untersuchung des Calciumabbaus in Knochen (Osteoporose) – von dem Astronauten häufig bedroht sind.

// **A** lles begann am 22. Dezember 1895. An diesem Tag hielt Anna Bertha ihre Hand zwischen eine glimmende Röhre und eine Photoplatte: Wilhelm Conrad Röntgen machte eine der ersten „medizinischen“ Röntgenaufnahmen der Geschichte, nachdem er zuvor bereits eine Türe, einen Satz Laborgewichte und ein Jagdgewehr durchleuchte hatte. Er schrieb so mit Röntgenstrahlung Geschichte auf Photoplatten.

Über hundert Jahre später ein weiterer Meilenstein in der Röntgengeschichte: In den Morgenstunden des 22. Februars 2000 pulste zum ersten Mal der Laser der TESLA-Testanlage. Das Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg sammelte damit Erfahrungen für einen großen „Freie-Elektronen-Laser“ (X-FEL), der demnächst harte Röntgenstrahlung liefern soll: Das Projekt wurde jüngst genehmigt. Auch BESSY, die Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung, plant einen X-FEL – allerdings für weiche Röntgenstrahlung.

» Die Hand von Anna Bertha Röntgen: Eine der ersten medizinischen Röntgenaufnahmen. (Bild: Deutsches Röntgen-Museum, Remscheid)



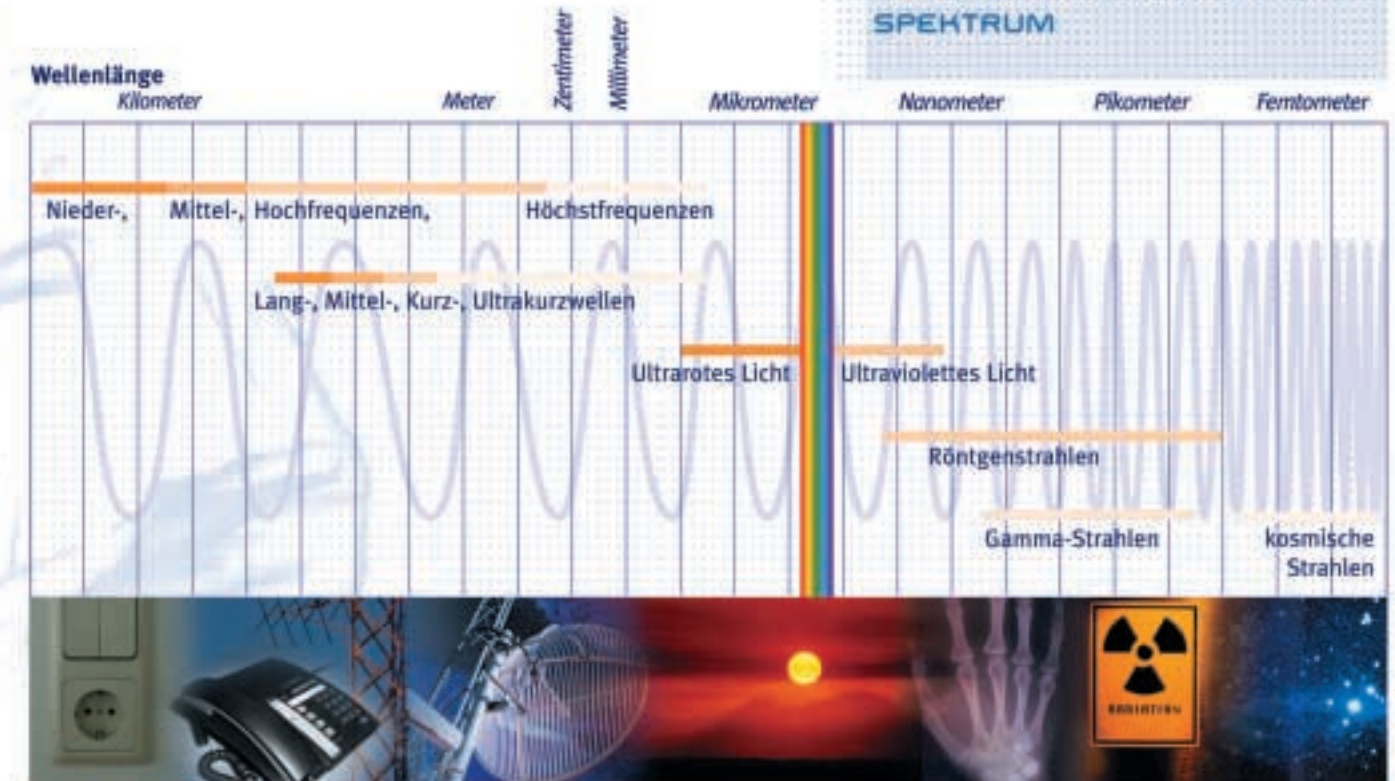
Beide Einrichtungen sollen einander ergänzen. Und beide sollen zwei der wichtigsten Entwicklungen der Physik vereinen, den Laser und die Röntgenstrahlung: Sie sollen Röntgenlicht liefern, das die Eigenschaften von Laserlicht hat.

// LICHT IST NICHT GLEICH LICHT

Eine Glühlampe erzeugt sichtbares Licht, genau wie die Leuchtdioden im Display eines Radioweckers. Das Licht der Lampe ist fast weiß und hell genug zum Lesen. Die Zeitanzeige am Radiowecker ist dagegen meist einfarbig – und viel dunkler. Ähnlich verhält es sich mit dem Röntgenlicht: Unterschiedliche Röntgenquellen produzieren unterschiedliche Röntgenstrahlung.

Heute stehen im Prinzip drei Möglichkeiten zur Verfügung, um Röntgenlicht zu erzeugen: Röntgenröhren, Synchrotrons. Und Röntgenlaser.

Seine berühmten Aufnahmen machte Röntgen mit einer Kathodenstrahlröhre. Ähnliche Röhren stecken auch heute noch in medizinischen Röntgengeräten. Im Gegensatz zu diesen Röhren strahlen die beschleunigten Elektronen in modernen Synchrotrons Licht ab, das einige Milliarden Mal heller ist. Röntgenlaser versprechen eine weitere Steigerung der Intensität um das Millionenfache. Wenn die Helligkeit von Röntgens Röhre dem Glimmen einer trüben Glühlampe entspricht, dann ist der X-FEL heller als eine ganze Flutlichtanlage!



Beleuchtung, Kraftstrom; Nachrichtenverkehr, Rundfunk, Fernsehen; Funkmess-technik; Sonnenstrahlen an der Erdoberfläche; Röntgen-photografie; Strahlung radio-aktiver Stoffe (Grafik: ius)

So ähnlich, wie sich im fast weißen Licht der Glühlampe in Wirklichkeit viele Farben verbergen, kommt aus Röntgenröhren oder Synchrotrons Röntgenstrahlung, die sich aus einem breiten Farbenspektrum zusammensetzt. Laserlicht hingegen ist fast vollkommen einfarbig. Zudem haben die Wellenzüge (oder Photonen) im Laserlicht einen festen Abstand voneinander – Physiker nennen diese Eigenschaft „Kohärenz“ (lat.: „Zusammenhang“). Das heißt, alle Photonen marschieren im Gleichschritt, und zwar geradewegs in genau eine Richtung. Daher kann man mit Röntgenlasern sogar Moleküle in drei Dimensionen fotografieren: Man kann mit dem unsichtbaren Licht Hologramme von der atomaren Struktur herstellen, so wie man mit sichtbarem Licht Hologramme von makroskopischen Objekten erzeugen kann.

INFO? UNSICHTBARES LICHT

UV-Licht, Röntgenstrahlung, infrarotes Licht – alles „elektromagnetische Strahlung“, doch sehr unterschiedlich, was den Energie-Inhalt angeht. Und der hängt von der Entfernung der Wellenberge und -täler ab. Sehr große Wellenlängen und damit eine nur geringe Energie haben zum Beispiel Radio- und Funkwellen. Mehr Energie überträgt schon das sichtbare Licht. Noch kürzer: Die Wellenlänge der UV-Strahlung – und wie viel Energie die enthält, weiß jeder, der sich schon mal einen Sonnenbrand eingefangen hat. Gleich dahinter kommt auf der Energie-Skala die Röntgenstrahlung, die für das bloße Auge unsichtbar ist. Erst auf Filmen oder Kamera-Chips tauchen Röntgenbilder auf.



## // MOVIES AUS DER MOLEKÜLWELT

Die dritte besondere Eigenschaft des Röntgen-Laserlichtes aus x-FELs: Es besteht – anders als beispielsweise das Röntgenlicht aus medizinischen Röntgenapparaten – aus einer Folge von extrem kurzen Röntgenblitzen. Wie mit einem Stroboskop lassen sich so chemische Reaktionen beleuchten. Zusammen mit geeigneten Detektoren wird ein Röntgenlaser damit zu einer High-Speed-Filmkamera für Movies aus der Molekülwelt. Röntgenlaser ermöglichen Filme von chemischen Reaktionen und Molekül-Bewegungen in Zeitleupe.

Röntgenstrahlung hat, egal wie man sie herstellt, kurze Wellenlängen, verglichen mit dem sichtbaren Licht. Das heißt, es transportiert viel Energie. Daher werden viele Materialien für Röntgenlicht so durchsichtig wie Fenster- oder zumindest Milchglas für Sonnenlicht. Die Elektronendichte eines Stoffes ist entscheidend-

dafür, wie stark Röntgenlicht beim Durchstrahlen verschluckt wird. So durchdrang es die Hand von Frau Röntgen mit Leichtigkeit und wurde in den schweren, elektronenreichen Metallatomen im Ehering und in den Knochen fast vollständig verschluckt. Mediziner wissen diese Tatsache seit über 100 Jahren zu schätzen. Röntgen erhielt dafür 1901 den ersten Physik-Nobelpreis. Inzwischen wurde der Preis mehr als 20 mal an Wissenschaftler verliehen, die mit Röntgenstrahlen gearbeitet hatten.

## // GEBEUGTES LICHT

Denn das medizinische Durchleuchten von Knochen und Gewebe macht nur einen kleinen Teil der Anwendungsmöglichkeiten von Röntgenstrahlung aus. Das unsichtbare Licht kann auch am regelmäßigen Atomgitter in Kristallen gebeugt werden: Beleuchtet man einen Kristall mit Röntgenlicht, dann werden einige Wellenzüge verschluckt und andere verstärkt, je nach Ein-

fallswinkel. So werfen die Atome des Kristalls regelmäßige Muster auf Röntgenfilme oder -detektoren. Wissenschaftler können aus solchen Mustern die Anordnung der Atome herauslesen. Diese „Röntgenbeugung“ wurde extrem wichtig für die gesamte Naturwissenschaft, denn damit wurden Einblicke in den atomaren Aufbau der Stoffe möglich. Sogar viele Bausteine biologischer Zellen, ja selbst Viren, lassen sich auskristallisieren und anschließend mit Röntgenlicht atomar entschlüsseln. Aus den Beugungsmustern erhält man die genaue Anordnung der Atome und Moleküle.

Mit Hilfe dieser Methode enthüllten Rosalind Franklin, Maurice Wilkins, James Watson und Francis Crick die Wendeltreppenform des Erbmaterials, der DNA – seinerzeit eine Revolution in der Molekularbiologie. Damals erzeugte man die Strahlung noch mit Röntgenröhren und hatte so mehrere Jahre gebraucht (von Mitte der 40er Jahre bis 1953). Noch länger dauerte die Enthüllung der Struktur von Hämoglobin, des

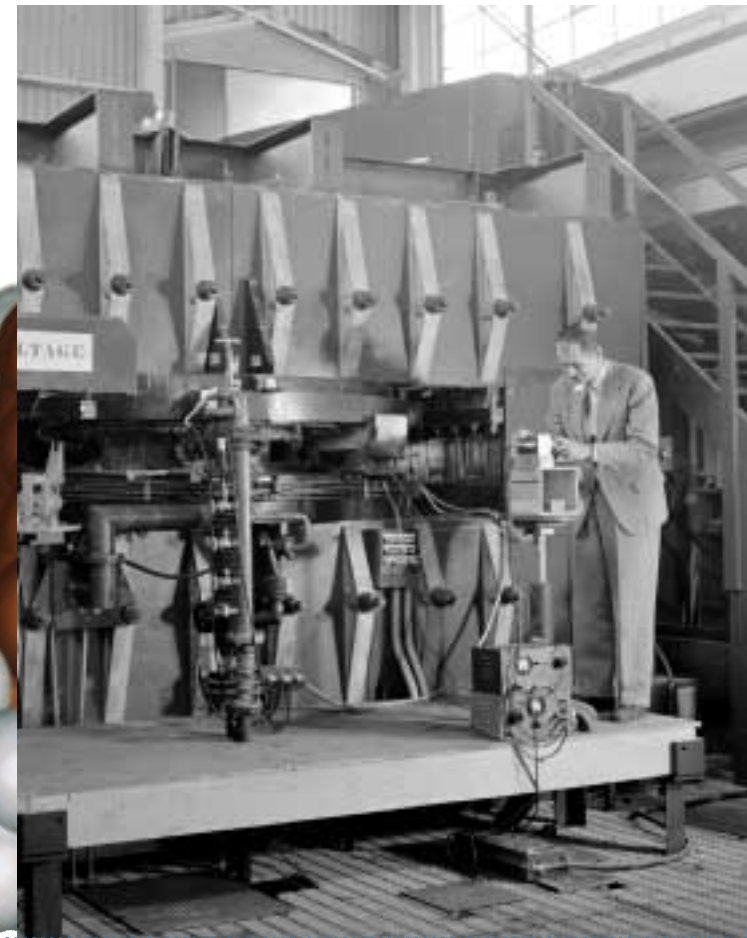
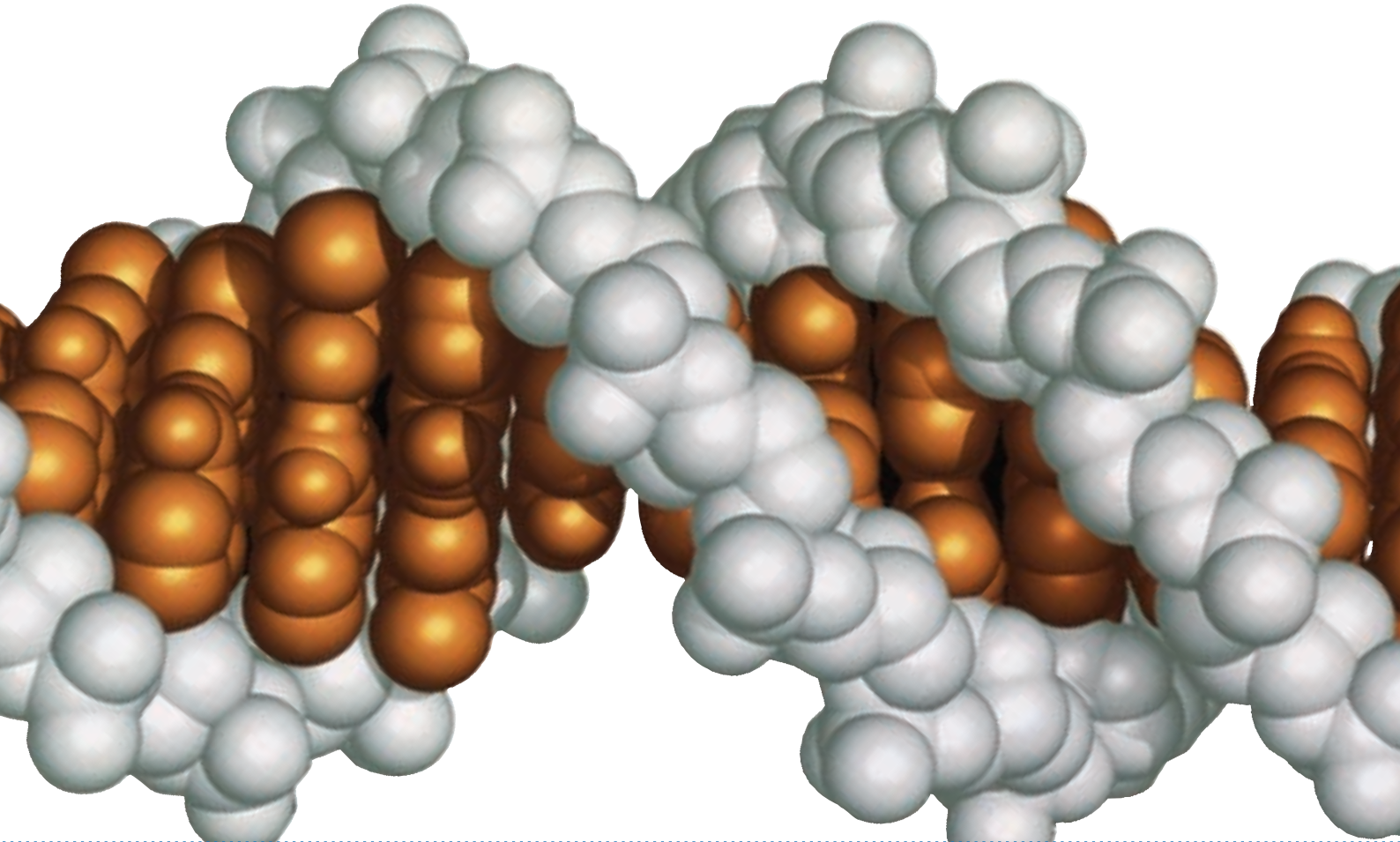
Farbstoffes in den roten Blutkörperchen: Von 1937 bis 1957. Im intensiven Röntgenlicht moderner **Synchrotrons** sind ähnliche Strukturuntersuchungen nur noch eine Sache von einigen Stunden. Röntgenlaser sind noch heller und versprechen daher eine weitere Verkürzung der Untersuchungszeit. Protein- und Moleküluntersuchungen werden dann im Sekundentakt möglich. Vermutlich genügen einige Röntgenblitze, um die Struktur großer Moleküle zu entschlüsseln.

## // VON DER RÖNTGENLAMPE ZUM LASER...

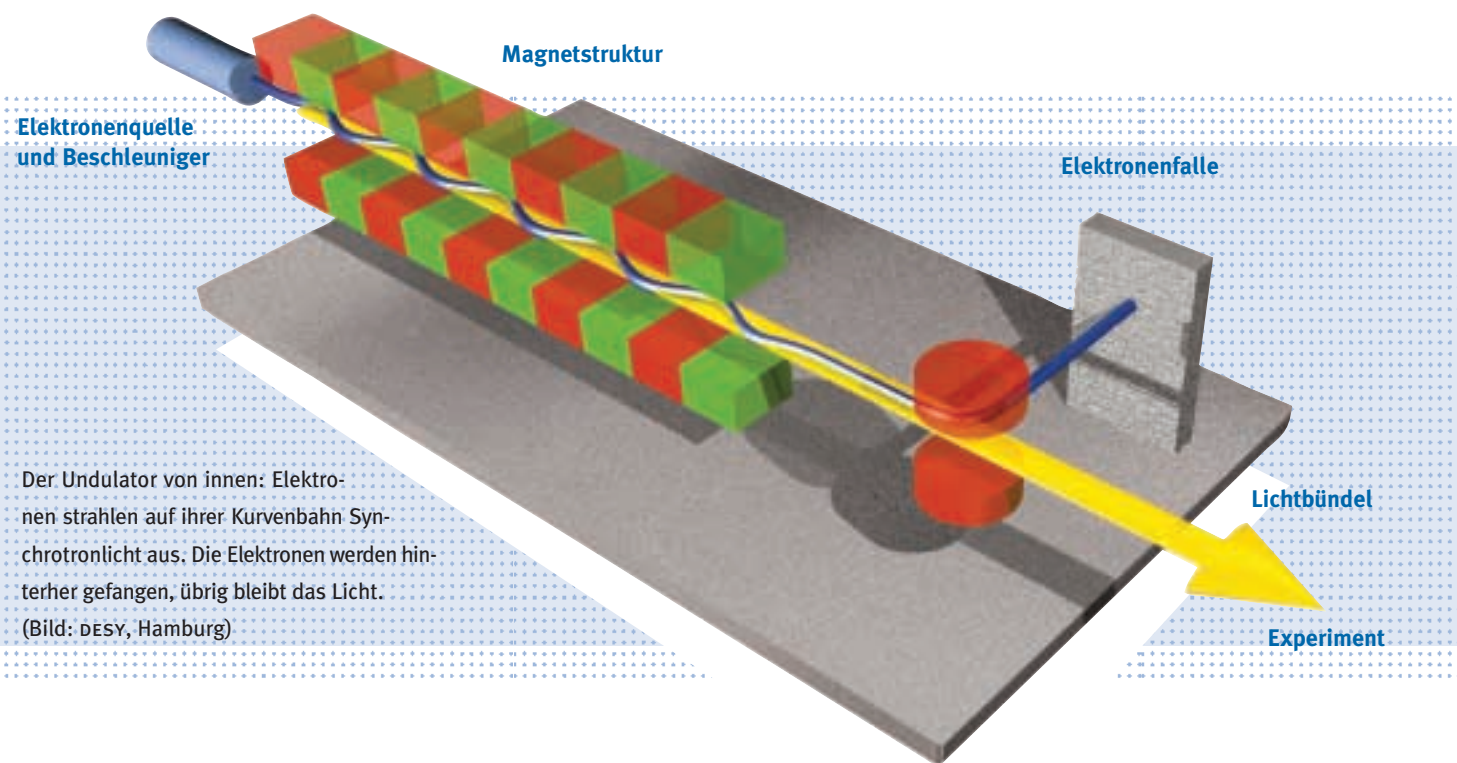
Jahrzehnte lang erzeugte man in Labors die Strahlung genau so, wie es Wilhelm Conrad Röntgen vorgemacht hatte: Indem man einen Elektronenstrahl auf eine Metallfläche – meist Kupfer oder Molybdän – lenkte und so rasch abbremsste. Die Elektronen strahlen dann Licht ab. Auch in modernen Röntgenröhren geht man diesen Weg.

❖ Röntgen-Beugungsbilder enthüllen Wissenschaftlern den Aufbau von Molekülen. So konnten Franklin, Wilkins, Watson und Crick auf die Struktur der Erbsubstanz (DNA) schließen.  
(Bild: Agentur Focus)

❖ Links: **SYNCHROTRON-STRahlung** einst und jetzt: Links eines der ersten Synchrotrons, das 340 MeV-Synchrotron von General Electric aus dem Jahre 1948. Rechts: Ein moderner Undulator aus der TESLA-Versuchsanlage, in dem die Elektronen durch Magnetfelder auf eine meterlange Serpentinbahn gezwungen werden. (Bild: LBL/DESY, Hamburg)



LICHTQUANTEN? NICHT NÄHERGEBRACHT. NATÜRLICH BILD ET SICH HEUTE JEDER WICHT EIN, ER WISSE DIE



Der Undulator von innen: Elektronen strahlen auf ihrer Kurvenbahn Synchrotronlicht aus. Die Elektronen werden hinterher gefangen, übrig bleibt das Licht.  
(Bild: DESY, Hamburg)

Doch dabei gibt es ein Problem: Das Metall wird unter Elektronenbeschuss sehr heiß. Das beschränkt die Intensität des gewonnenen Röntgenlichtes. Die Lösung fand sich in den 1940er Jahren: 1947 beobachteten Forscher erstmals „Synchrotronstrahlung“ – und zwar mit bloßem Auge: Zwischen den Magneten eines Elektronenbeschleunigers im Forschungslabor von General Electric in Schenectady, New York blitzte sie als heller Lichtschein hervor. Die Ursache: Sehr schnelle Elektronen wurden durch gewaltige Magnete von ihrer Bahn abgelenkt und sendeten dadurch Licht oder Röntgenstrahlung in Flugrichtung aus, ähnlich, wie Wassertropfen von einem rotierenden Autoreifen geschleudert werden. Heute erzeugt man Synchrotronstrahlung in riesigen Ringbeschleunigern, die ganze Turnhallen oder Fußballstadien füllen könnten (siehe Kapitel „Weißt du, wie ein Stern entsteht?“). Synchrotronstrahlung deckt einen breiten Spektralbereich ab: von Mikrowellen bis zur Gammastrahlung, abhängig von Energie und Krümmung der Flugbahn der Elektronen.

Seit den ersten Anfängen durchliefen Synchrotrons eine rasante Entwicklung. Form und Wicklungen der Ablenkmagnete wurden immer raf-

finierter ausgeklügelt. In den Weg der Elektronen integriert man heute auch spezielle Magnetstrecken, so genannte Wiggler oder Undulatoren. Diese zwingen die Elektronen auf einen Zickzack-Schlingerkurs. Dort geben sie bei jeder Kursänderung Strahlungspakete ab, die sich obendrein recht genau auf bestimmte Energiebereiche (Wellenlängen) einstellen lassen. Synchrotronstrahlung wurde so über die Jahre

**INFO** **DAS LASER-PRINZIP**

Atome oder Moleküle können Energie, die sie zum Beispiel aus einem Lichtblitz erhalten haben, kurzzeitig speichern. Werden sie dann von einem geeigneten Lichtteilchen angestoßen, dann geben sie diese Energie wieder ab: Sie strahlen Licht aus, und zwar in genau derselben Wellenlänge und Richtung wie das fremde Photon. Wenige Photonen können so – zwischen zwei parallelen Spiegeln – eine wahre Photonen-Lawine losstreuen: Ein Laserstrahl entsteht.

Laser sind aus der modernen Forschung nicht wegzudenken. Sie werden als Lineale aus Licht eingesetzt: Mit ihnen lassen sich Längen höchst exakt bestimmen. Sie helfen dabei, Gase auf Inhaltsstoffe zu prüfen, sie übertragen Informationen und ermöglichen höchst genaue Geschwindigkeitsmessungen. Und sie dienen als Fotoblitz bei Fotografien in drei Dimensionen (Holografie).

immer einfarbiger und intensiver – und immer intensiver genutzt. Doch der Traum der Wissenschaftler ging weiter: in Richtung Röntgenlaser. Die besonderen Eigenschaften von Laserlicht würden eine Fülle neuer Experimente ermöglichen, zum Beispiel die Untersuchung der Bewegungen von Atomen und Molekülen.

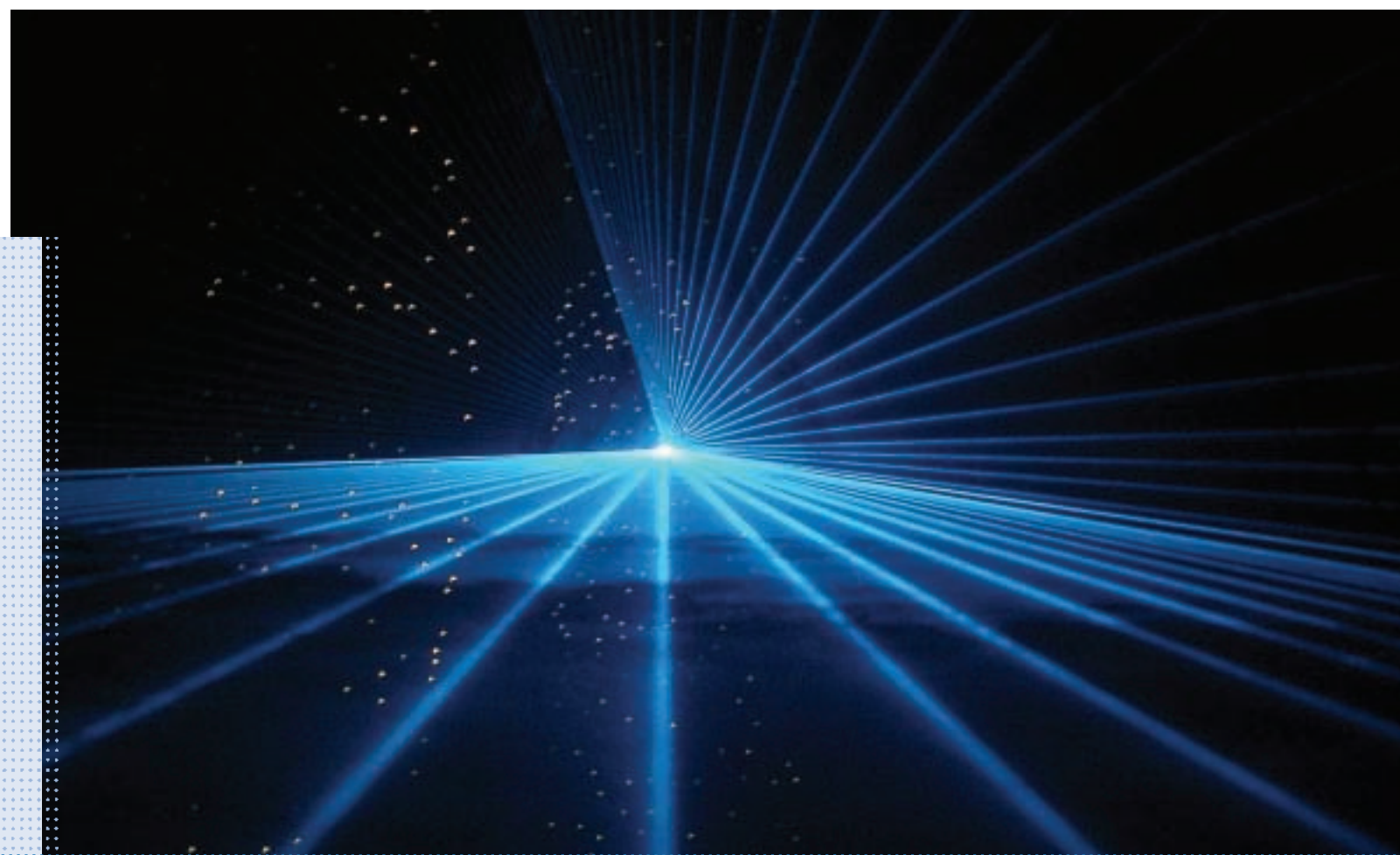
**// IM GLEICHSCHRITT... LICHT!**

Röntgenlaserlicht lässt sich aber mit einem klassischen Laser nicht erzeugen – das scheiterte an geeigneten Laserspiegeln. 1971 fand der amerikanische Physiker John Madey eine Lösung: Er schlug einen Laser vor, der kein Medium mehr benötigt. Nicht mehr gebundene Elektronen in Atomen, sondern frei bewegliche Elektronen in einem Magnetfeld produzieren die Laser-Strahlung, in variabler Wellenlänge. Der „Freie-Elektronen-Laser“ (FEL) war geboren – zumindest in der Theorie.

Es dauerte vier Jahre, bis man auch die komplizierte Praxis halbwegs im Griff hatte. Man beschleunigte Elektronen und führte sie anschließend in einen Undulator. Dort strahlten sie Licht ab, genau wie es schon seit Jahren in Synchrotrons geschah. Das Neue war ein Laserlichtstrahl, der zusätzlich in den Undulator eingespeist wurde.

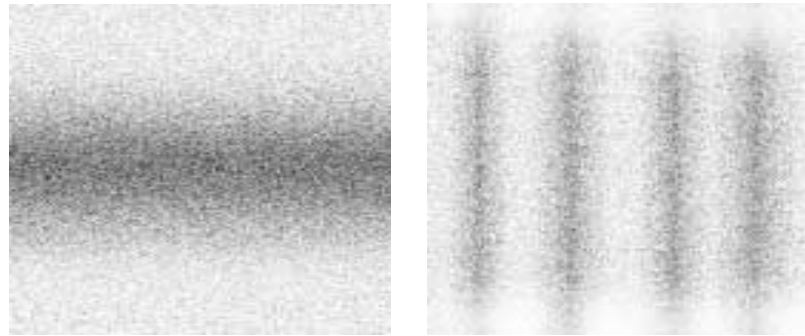
Der „Trick“ dabei: Die Elektronen im Undulator bewegen sich auf einer schlangenförmigen Bahn und strahlen dabei Photonen ab. Bei geeigneter Wahl der Elektronenenergie und Magnetfeldstärke stimmt deren Wellenlänge mit der des eingestrahnten Laserlichtes überein. Dann können die eingespeisten Laserphotonen die Elektronen zur synchronen Abstrahlung weiterer Photonen exakt der gleichen Wellenlänge „stimulieren“ – das Laserlicht wird verstärkt.

Der Laser, eines der wichtigsten Forschungsinstrumente.  
(Bild: photocase.de)



## // EIN SCHRITT WEITER: SASE

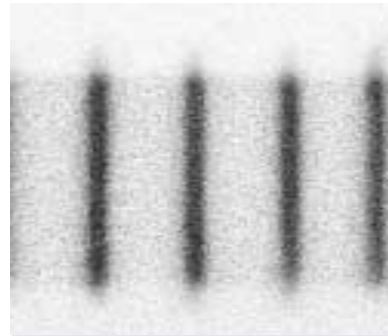
In Hamburg und Berlin soll das FEL-Prinzip abgewandelt werden: Man will auf die Anregung durch einen externen Laserstrahl verzichten. Bei der „selbst-verstärkenden spontanen Emission“ von Röntgenlicht, kurz: **SASE** (Self-Amplified Spontaneous Emission) ordnen sich die Elektronen durch die Synchrotronstrahlung, die sie selbst abstrahlen – ein Prinzip, das 1984



Microbunching im SASE-FEL: Je länger der Elektronenstrahl durch den Undulator fliegt, desto mehr formt ihn das Laserlicht – bis schließlich aus dem gleichförmigen Strahl eine Serie von pfannkuchenförmigen Elektronen-Paketen wird. (Grafik: ius)

erstmalig mathematisch detailliert beschrieben wurde. SASE-Laser für UV- bzw. Röntgenlicht entstehen derzeit auch am SLAC in Stanford (USA) und am SPRING 8 bei Osaka (Japan).

Die beiden deutschen SASE-FELs sollen zwei unterschiedliche Wellenbereiche abdecken: Der TESLA X-FEL wird harte Röntgenstrahlung bis zu einer Wellenlänge zwischen einem und 0,05 Nanometer produzieren. Der BESSY X-FEL könnte eines Tages den weichen Röntgenbereich von 1,2 bis 60 Nanometer übernehmen. Mit dem TESLA X-FEL kann man dann strukturelle Eigenschaften, also die Positionen der Atome und Moleküle, sehr genau und sogar während ihrer Bewegung bestimmen. Mit dem BESSY X-FEL ließen sich dagegen die elektronischen und magnetischen Eigenschaften besser verstehen und chemische Reaktionen im Detail verfolgen. Zusammen werden die beiden Anlagen große Auswirkungen auf die Grundlagenforschung in Europa haben: Man wird in Zukunft mit exakt einstellbaren Röntgenblitzen Experimente durchführen können, von denen die Physiker bislang nur träumten.



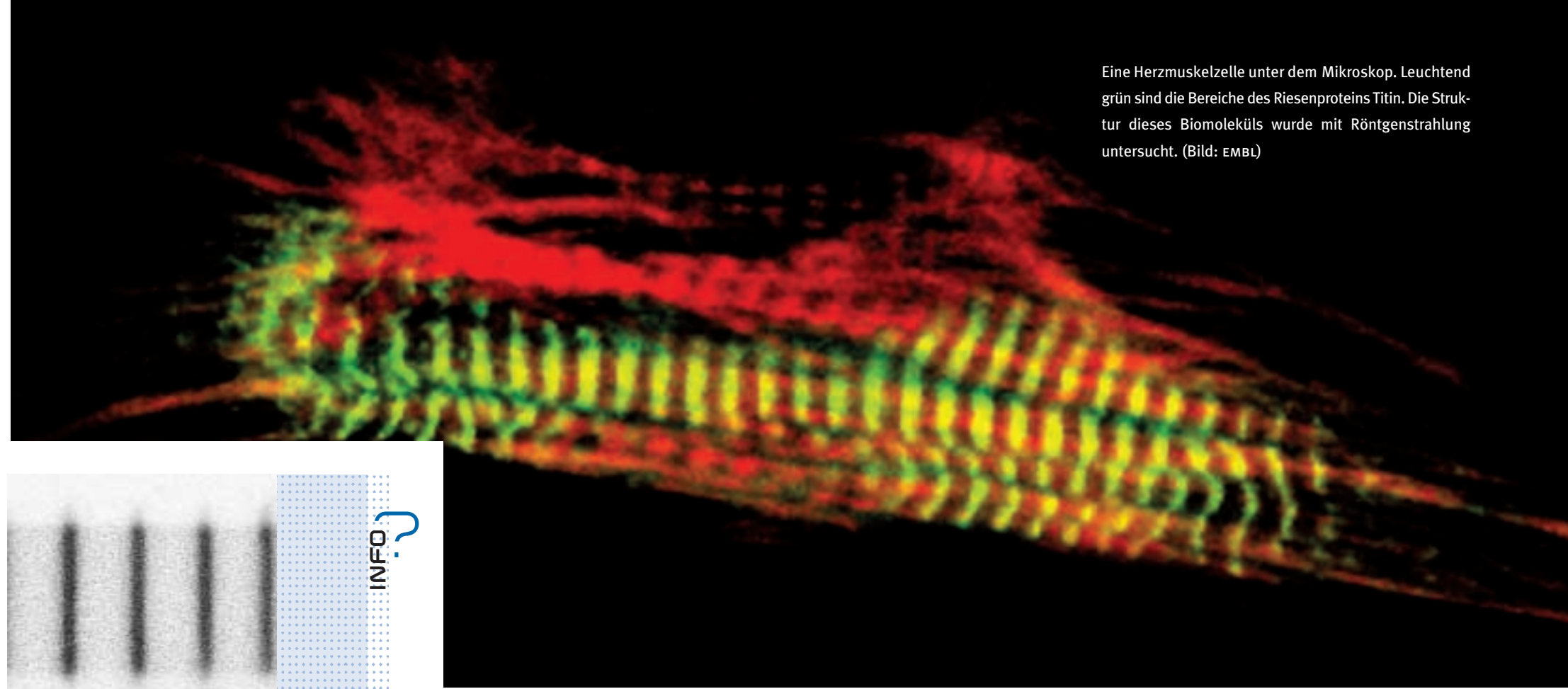
INFO

## DAS SASE-PRINZIP

Hier wird zunächst ein hochbrillanter Elektronenstrahl mit supraleitenden Resonatoren auf Trab gebracht (siehe auch Seite 15). Der Strahl wird zu schnellen Elektronenstößen verdichtet, die danach in einen sehr langen Undulator geleitet werden.

Während bei einem normalen FEL ein kleiner Lichtblitz von außen die Elektronen in eine Ordnung zwingt, liefern beim SASE-Prinzip die Elektronen selbst das Synchrotronlicht, auf ihrem Zickzack-Kurs durch den Undulator. Und zwar – praktischerweise – in genau passender Wellenlänge.

Die SASE-Technik wurde bereits in dem Testprojekt zur Tesla-Anlage (ТТФ 1, Tesla Test Facility) überprüft, mit viel versprechenden Ergebnissen. Im Frühjahr 2000 konnte damit erstmals kohärentes Laserlicht am Übergang zum Röntgenbereich bei 109 Nanometern erzeugt werden.



Eine Herzmuskelzelle unter dem Mikroskop. Leuchtend grün sind die Bereiche des Riesenproteins Titin. Die Struktur dieses Biomoleküls wurde mit Röntgenstrahlung untersucht. (Bild: EMBL)

## // SPOT AN FÜR DIE FORSCHUNG

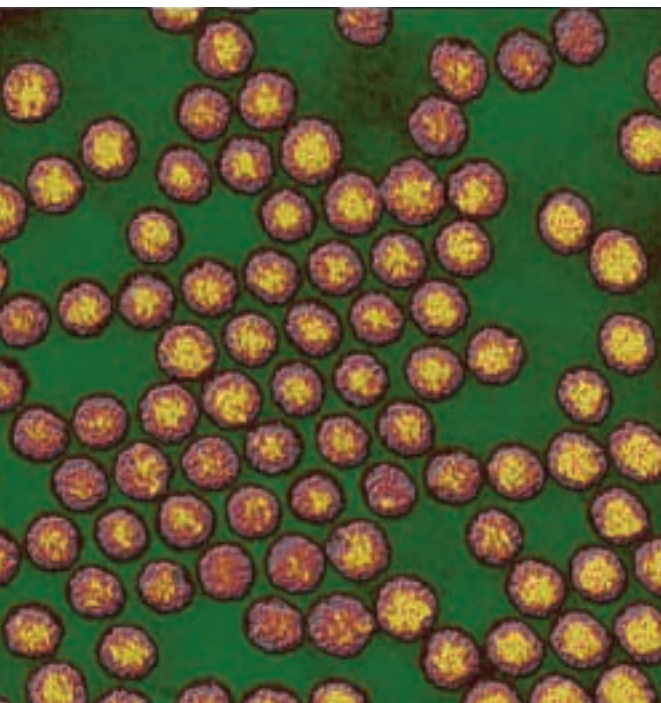
Zum Beispiel in der Materialforschung: Röntgenphotonen haben genügend Energie, um Elektronen aus Materie heraus zu schlagen. Anhand der Geschwindigkeit, die sie hinterher haben, kann man feststellen, wie stark sie an die Atome gebunden waren. Mit Hilfe dieser „Photoelektronenspektroskopie“ erfährt man viel über die elektronischen Eigenschaften eines Stoffes und über den Aufbau von chemischen Bindungen – und kann dadurch auch vorhersagen, wie bereitwillig der Stoff mit anderen Elementen reagieren wird. Röntgenstrahlung ermöglicht so nicht nur einmalige Einblicke in die Nanowelt, sondern auch in deren Chemie.

So kann man mit Röntgenlicht einzelne Objekte in ihren elektronischen Eigenschaften vermessen und durch Röntgenbeugungsversuche ihre Struktur und Oberfläche bis ins feinste Detail enthüllen. Ein Beispiel: Mikrofeine Risse in Werkstücken lassen sich durch Bestrahlung mit Röntgenlicht finden.

Doch die Möglichkeiten reichen noch viel weiter: Bis in die Welt der Moleküle. Die Form der DNA ist nur ein Beispiel für eine Molekül-Struktur, die man mit Röntgenstrahlung entdeckt hat. Seitdem sind die Methoden immer feiner geworden. Röntgenlicht und Synchrotronstrahlung enthüllten zum Beispiel auch den inneren Aufbau und die Struktur der Oberflächen vieler Viren – dazu gehört das Tabak-Mosaik-Virus, das Tabakpflanzen befällt. Auch Grippe- und Erkältungsviren konnte man auf diesem Wege charakterisieren.

## // PROTEINEN BEI DER ARBEIT ZUSEHEN

Zahlreiche andere Bauelemente des Lebens konnte man ebenfalls mit Röntgenstrahlung sehr genau unter die Lupe nehmen. Dazu gehören vor allem Proteine – große Moleküle, die praktisch bei sämtlichen Zellfunktionen gebraucht werden und deren Form in den Genen gespeichert wird. Die Biochemiker Robert Hu-



❖ Erkältungsviren: Ihre Struktur wurde im Synchrotronlicht enthüllt. (Bild: eye of science)

## // MIKROSKOPISCHE BURGEN

Bei der Beantwortung all dieser Fragen werden Röntgenlaser entscheidende Antworten liefern. Beispiel: Membranen, die die Zellbestandteile voneinander abgrenzen. Wie Burgmauern halten sie unerwünschte Eindringlinge fern (etwa Viren oder Fremdstoffe). Bestimmte Proteine wirken jedoch wie Tore in dieser Mauer und schleusen zum Beispiel Energieträger ein und Abfälle aus. Wie öffnen sich diese Wege durch die Mauer? Wie funktioniert der Transport?

Membranen sind noch aus einem anderen Grund hochinteressant: Der Einlass funktioniert nach einem chemischen Schlüssel-Schloss-Prinzip.

Besonders für Pharma-Forscher kann es äußerst nützlich sein, einen chemischen Nachschlüssel zu besitzen: Zum Einschleusen von Medikamenten. Doch die Protein-Schlüssel sind viel komplizierter als normale Sicherheitsschlüssel. Sie haben Gelenke, an denen sie sich zusammenfalten und verbiegen können – sie bilden so genannte Konformationen. Genau das lässt sich aber hervorragend mit Röntgenlasern untersuchen, denn die können sowohl die Grundform der Schlüssel abbilden als auch ihre Verformbarkeit vermessen. Eine andere Idee der Pharmakologen: Man könnte bestehende Schlüssel-Proteine als Trojanische Pferde im Miniaturformat nutzen. An sie hängen die Forscher „Gast-Proteine“ an, die im Inneren der Membran Repara-

tur-Arbeiten durchführen. Doch wo sind mögliche „Andockstellen“ am trojanischen Protein?

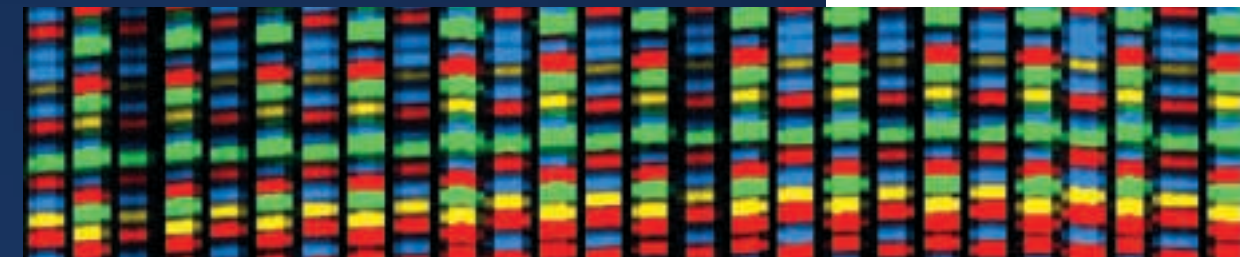
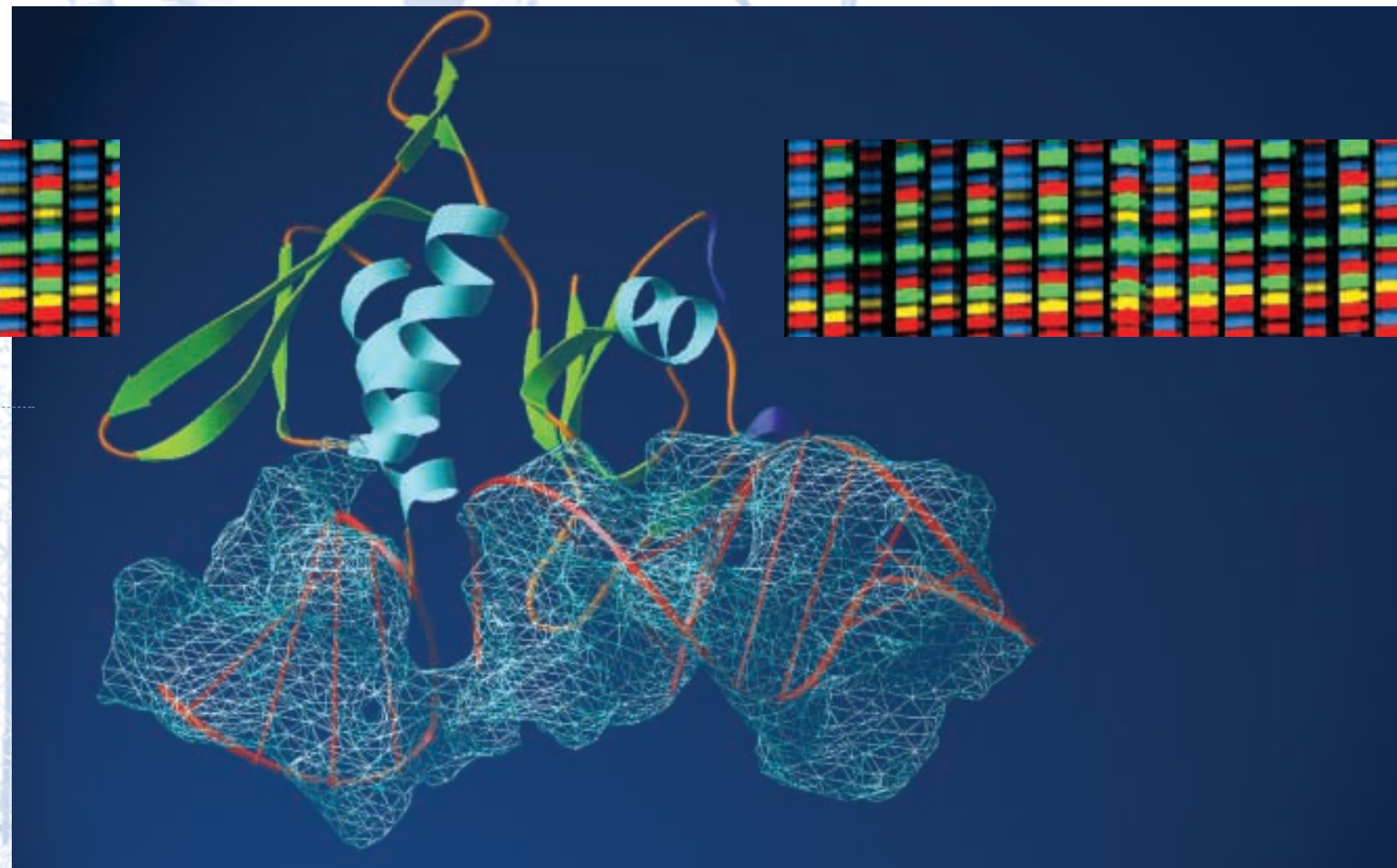
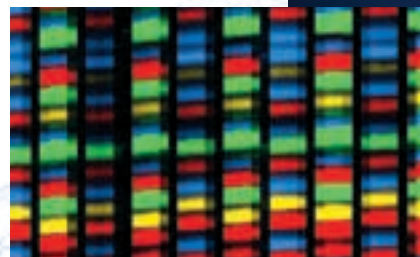
Verformen sich die Proteine falsch, dann kann das übrigens sogar zu Krankheiten führen: Die Creutzfeldt-Jakob-Krankheit oder BSE entstehen, wenn sich bestimmte Proteine, so genannte Prionen, falsch „verknäueln“. Auch das kann man mit einem Röntgenlaser sichtbar machen.

## // PLATZREGEN AUS TEILCHEN

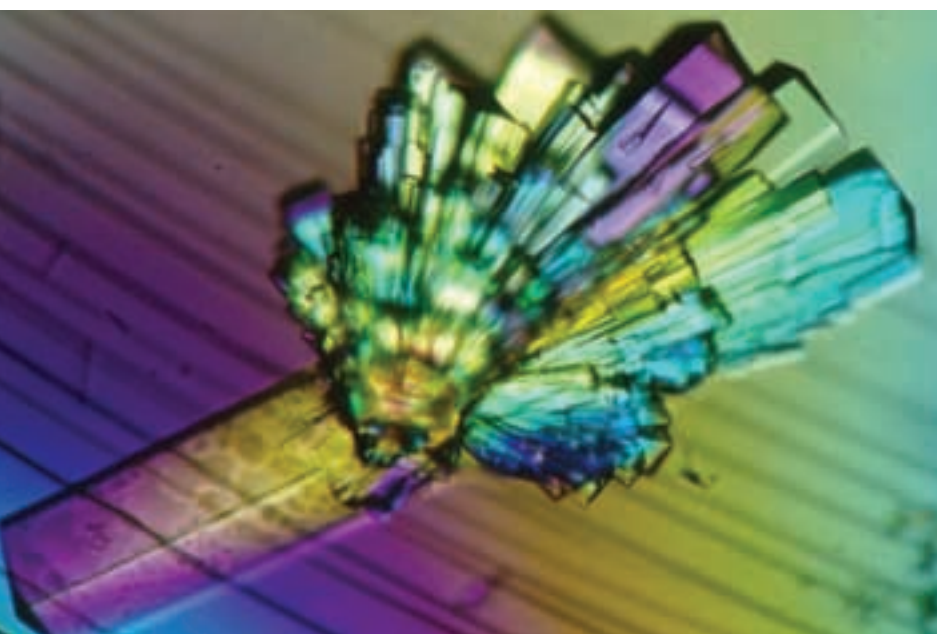
Bei all diesen Versuchen nutzt man die Tatsache, dass sich das Laserlicht auf einen extrem kleinen Raum konzentriert, auf einem winzigen

ber, Johann Deisenhofer und Hartmut Michel entschlüsselten beispielsweise Anfang der 80er Jahre das Aussehen eines Proteins, das an der Membran von Purpurbakterien an der Photosynthese mitwirkt. Erst vor wenigen Jahren wurde auch die Struktur der Protein-Fabriken in den Zellen, der **Ribosomen**, entschlüsselt – und zwar mit Hilfe von Synchrotronstrahlung am HASYLAB in Hamburg.

Das Potenzial der Forschung auf diesem Gebiet ist noch lange nicht ausgeschöpft. Besonders, seitdem das Human Genome Project alle Gene des Menschen aufgelistet hat, kennt man zwar das Buch des Lebens, weiß aber noch wenig über die Bedeutung der einzelnen Worte. Ganz neue Fragen kommen daher auf die Forschung zu: Was bewirken die Gene? Wie kann man ihre Arbeit hemmen oder fördern? Wie sehen die Proteine aus, deren Form sie speichern? Welche Funktion hat dieses oder jenes Protein – und wie arbeiten sie zusammen?



❖ Die Struktur von Ribosomen, im Computer simuliert. Die Sequenzierung der DNA, der Bauvorlage für Proteine (oben), wirft ganz neue Fragen auf: Wie funktionieren Proteine? Wie werden sie in den Ribosomen hergestellt? (Bilder: Scheuerpflug/ Dechant, DKFZ Heidelberg, oben; Max-Planck-Arbeitsgruppen Hamburg, links)



Lichtfleck von gerade mal ein paar Zehntausendstel Quadratmillimetern (so lassen sich wenige Moleküle sehr gezielt „beleuchten“). Das Licht aus einem SASE-FEL fällt auf dieser Fläche nicht in einem kontinuierlichen Photonen-Strom ein, sondern in winzigen Licht-Paketen. Unvorstellbar viele Lichtteilchen prasseln für eine unvorstellbar kurze Zeit auf die Probe – und dann herrscht wieder für kurze Zeit Ruhe.

Und das ist geradezu ideal. Denn Moleküle und Cluster würden einem hochenergetischen Platzregen aus Photonen nicht sehr lange standhalten. Sie blähen sich blitzschnell auf und zerplatzen anschließend regelrecht. Doch weil der Laserlichtregen so extrem kurz dauert, las-

sen sich die Moleküle „fotografieren“ und vermessen, bevor sie zerfallen. So kann man chemische Abläufe sogar in lebenden Zellen untersuchen.

#### // DIE ERD-ATMOSPHERE IM LABOR

Mit den extremen Belichtungszeiten kann man am TESLA X-FEL in Hamburg und dem geplanten Röntgenlaser in Berlin sogar „Kurzfilme“ aus der Molekül-Welt drehen. (Mit seiner weichen Röntgenstrahlung wäre der BESSY X-FEL für diese Versuche besonders gut geeignet.) Die Laser sollen wie ein Stroboskop chemische Reaktionen beleuchten und so Schritt für Schritt

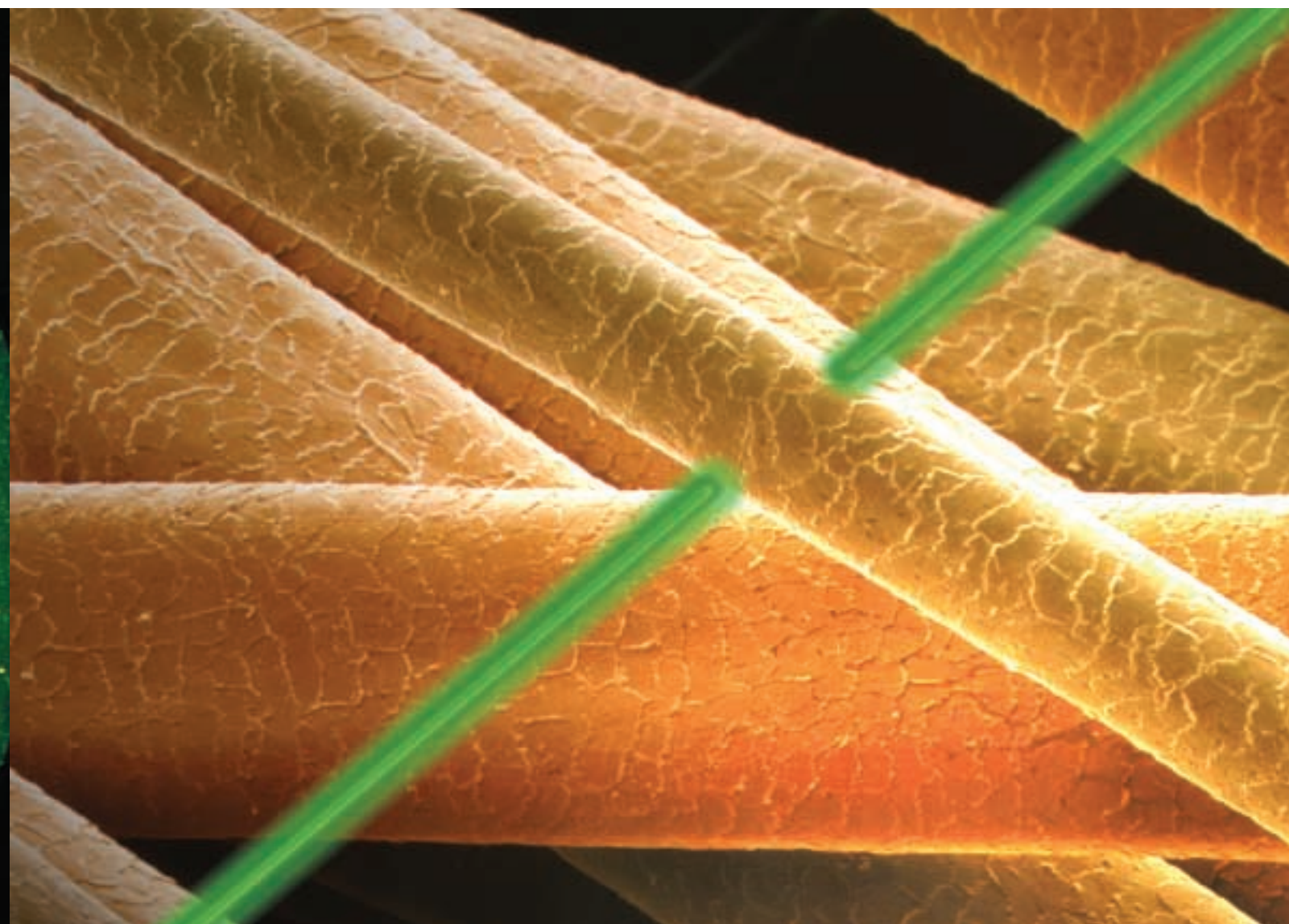
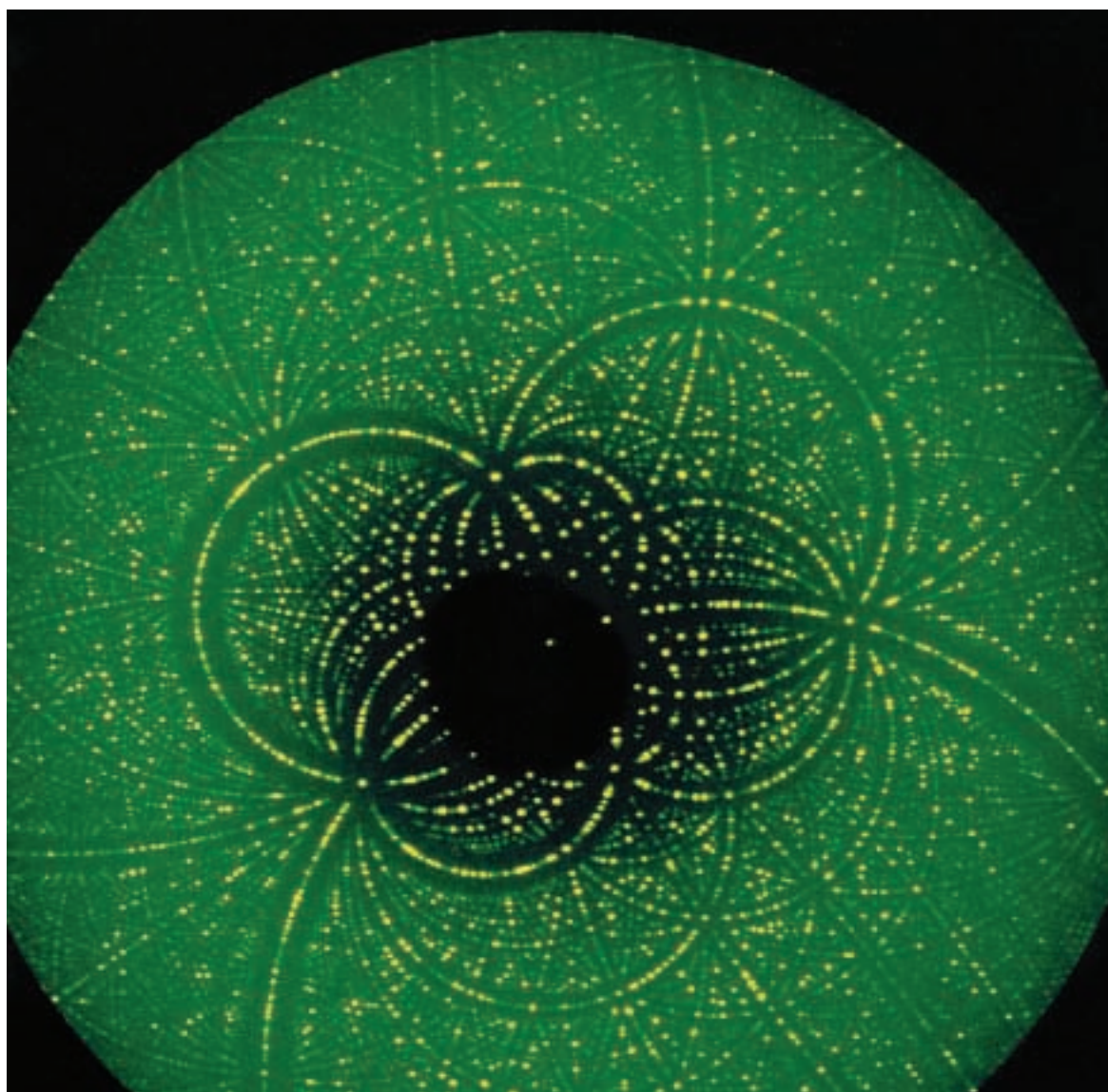
festhalten, zum Beispiel die Korrosion im Auto-Chassis – oder auch das Zusammenfallen eines Proteins.

Auch die Vorgänge in der obersten Atmosphäre wollen die Forscher im Labor nachstellen: Sie wollen die chemischen Reaktionen von Molekülen in extremer Verdünnung untersuchen. Wenige Nanoteilchen, die man zum Teil nur in sehr kleinen Konzentrationen herstellen kann, lassen sich mit der neuen Lasertechnologie in ihren Eigenschaften hervorragend vermessen.

Die Wissenschaftler interessieren sich außerdem für Katalysatoren, die in den meisten chemischen Reaktionen benötigt werden. Katalyse-Prozesse, wie man sie mit den Lasern „fil-

Viele chemische Reaktionen laufen innerhalb von Femtosekunden ab. 50-100 Femtosekunden – so lange dauert ein Laserpuls an den geplanten XFELs – sind extrem wenig Zeit. Licht durchquert in dieser Zeit gerade mal die Dicke zweier Haare. Und das, obwohl Photonen in einer 60stel Sekunde – der Verschlusszeit einer Fotokamera – die Strecke von Berlin bis New York schaffen! (Bild: Agentur Focus/ ius)

Winzige Proteinkristalle (typische Größe: einige Zehntel Mikrometer, oben) werden mit Röntgenstrahlung durchleuchtet. Es ergeben sich Beugungsbilder von großer Deutlichkeit (unten). Röntgenlaser verbessern die Qualität weiter. (Bild: Max-Planck-Arbeitsgruppen Hamburg)



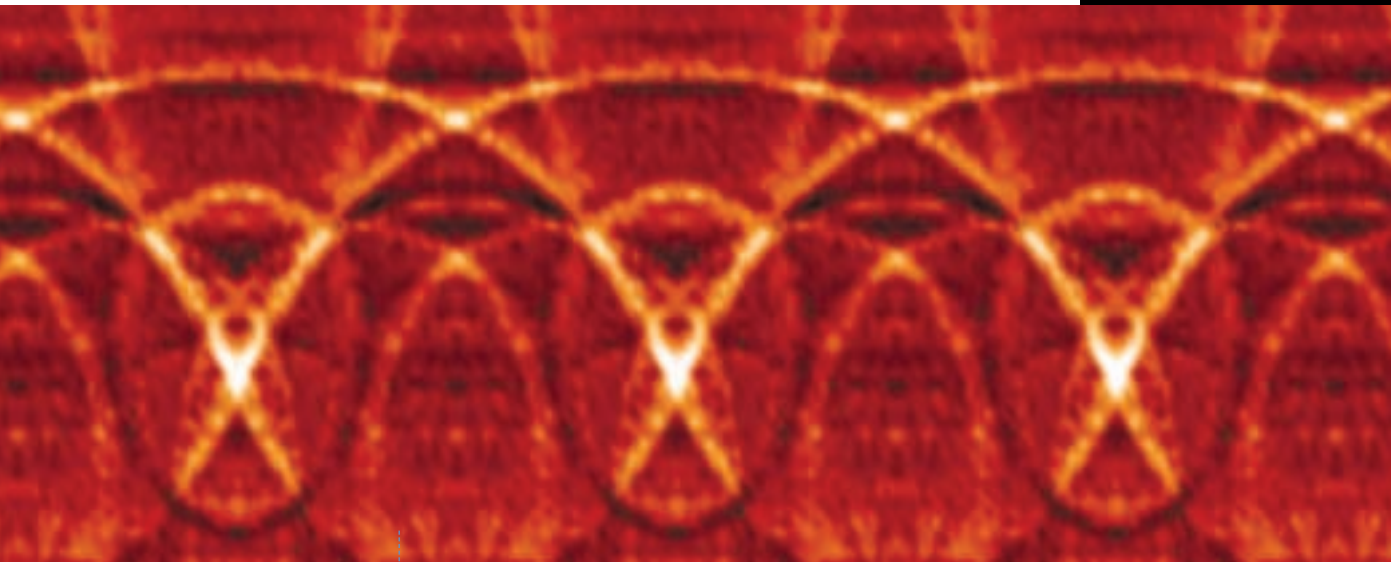
MENSCHEN VERWIRKLICHEN. «

» ÜBER DIE ZUKUNFT KÖNNEN WIR NICHTS WISSEN,

men“ kann, laufen nicht nur im Auspuff eines jeden Autos mit Benzinmotor ab, sondern auch bei zahllosen anderen Prozessen – bei der Speicherung und dem Transport von Energie in menschlichen Körperzellen ebenso wie in elektrischen Batterien. Katalyseprozesse laufen aber auch in Brennstoffzellen ab, den Energiequellen der Zukunft. Oder bei der Herstellung neuer chemischer Substanzen.

### // ATOME IN 3D

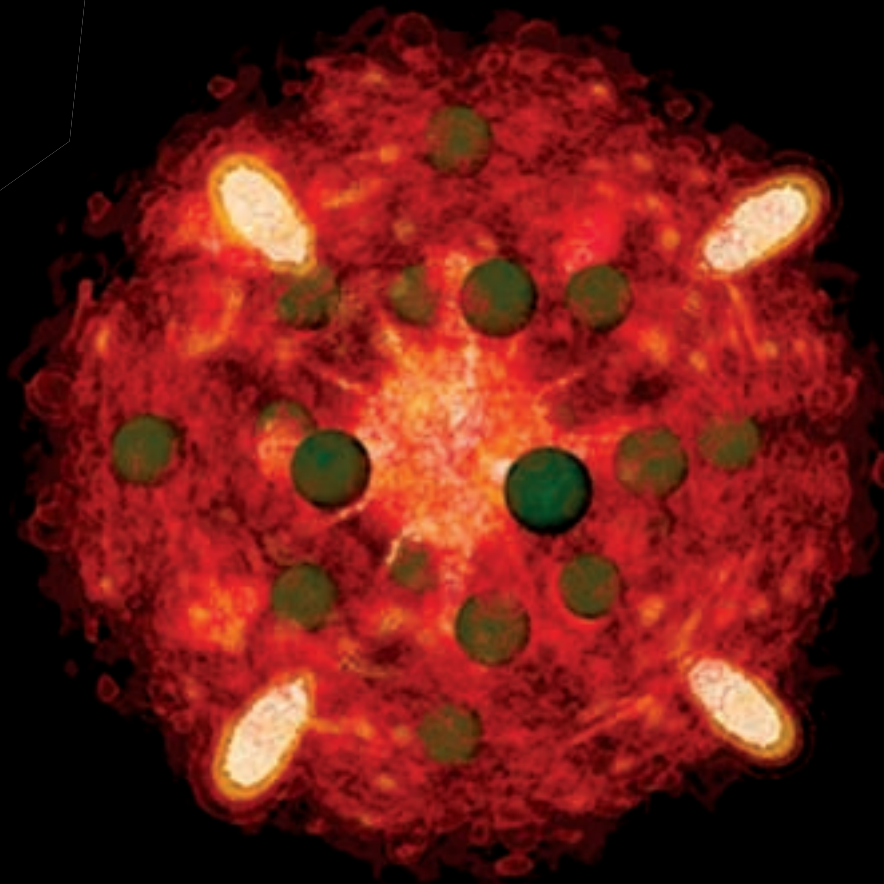
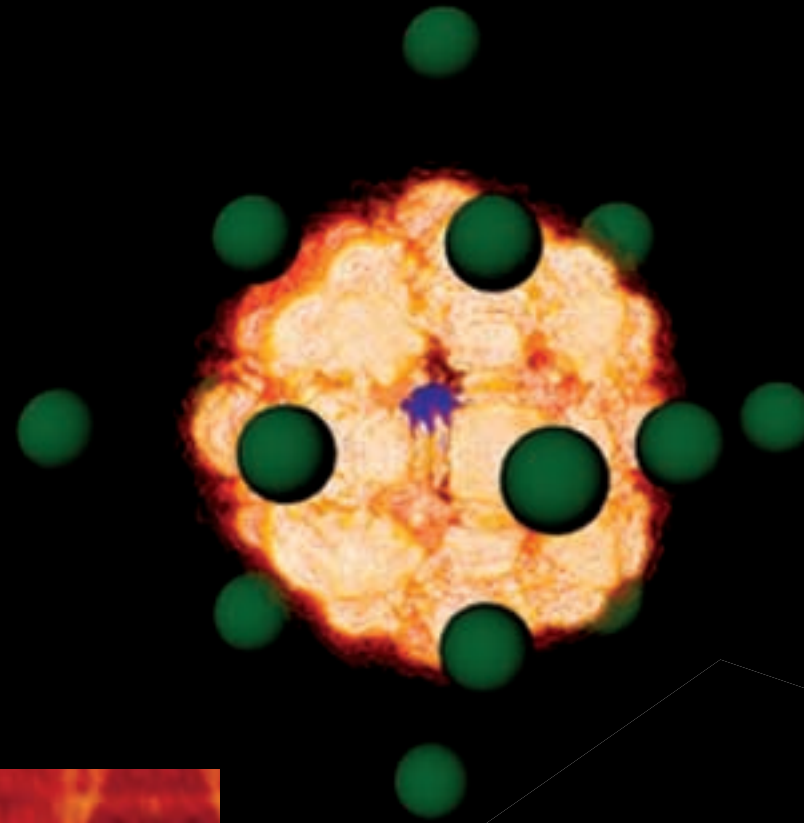
Anders als Urlaubsfotos werden Röntgenlaser die Kleinst-Welt nicht nur in zwei Dimensionen abbilden, sondern sogar dreidimensional, als



Ein Hologramm von Eisenatomen, aufgenommen am Hamburger HASY-LAB. (Bild: DESY, Hamburg)

so genannte „Hologramme“. Ähnlich wie das holografische Eurozeichen auf Geldscheinen wird man dann biologische und künstliche Moleküle räumlich betrachten können. Der klassische Blitz reicht für solche Fotografien nicht aus: Man muss die Probe mit kohärentem Laserlicht beleuchten. Selbst einzelne Atome werden die Physiker mit dem Laser dreidimensional ablichten können.

Ultrakurze Laserimpulse können Moleküle – hier eine Verbindung von Wasserstoff mit einer Edelgas-Metall-Verbindung – explosionsartig aufbrechen lassen. Dieser Prozess, der hier im Computer simuliert wurde, wird man mit X-FELs in Echtzeit verfolgen können. (Bild: F. Cordes, ZIB)



### TESLA H-FEL

Erste Strahlungsquelle mit Lasereigenschaften für Röntgenlicht im harten Spektralbereich zwischen 0,05 und einem Nanometer. Der „Freie-Elektronen-Laser“ funktioniert nach dem SASE-Prinzip. TESLA und TESLA X-FEL werden unabhängig voneinander gebaut und betrieben.

### FORSCHUNGSFELDER

Sehr hohe Leuchtdichte, einstellbare Wellenlänge und sehr kurze Pulse ermöglichen die Untersuchung von Struktur und Dynamik der Materie mit atomarer Auflösung. Durch die räumliche Kohärenz des Röntgenlichtes werden sogar Hologramme im atomaren Maßstab möglich.

### GEPLANTER STANDORT

Der TESLA X-FEL wird am DESY in Hamburg stehen.

### ZEITPLANUNG

Der TESLA X-FEL ist genehmigt; geplanter Baubeginn 2005, Bauzeit sechs Jahre.

### KOSTEN

675 Mio. Euro (50% durch europäische Partner), 36,1 Mio. Euro Betriebs- und Personalkosten jährlich.

### BESSY H-FEL

Strahlungsquelle mit Lasereigenschaften für den weichen Röntgenbereich zwischen 1,2 und 60 Nanometern. Der Laser funktioniert nach dem SASE-Prinzip.

### FORSCHUNGSFELDER

Experimente mit höchster spektraler, zeitlicher und räumlicher Auflösung im Bereich der Biowissenschaften, Femto- und Atmosphärenchemie, Atom- und Molekülphysik, Festkörper- und Oberflächenforschung. Zeit aufgelöste Prozesse, von Katalyse bis zur Dynamik von Nanostrukturen der Magnetoelektronik.

### GEPLANTER STANDORT

Berlin-Adlershof am BESSY II Speicherring

### ZEITPLANUNG

BESSY X-FEL ist in der Planungsphase. Bauzeit vier Jahre.

### KOSTEN

148 Mio. Euro, 12,4 Mio. Euro Betriebs- und Personalkosten jährlich.



# //SONDEN

FÜR DIE ATOMARE WELT

MATERIALWISSENSCHAFT MIT NEUTRONEN

Neutronen dringen zerstörungsfrei in Wasser und Materie ein. Dieses Bild zeigt eine Zuchtperle, durch die Muschelschale hindurch mit Neutronenstrahlung aufgenommen. (Bild: psi)

**// H**öchste Betriebsamkeit an der Startrampe: 50 Starts stehen pro Sekunde auf dem Plan. Doch es brummen keine Motoren, denn auf den Abflug warten – Protonen.

In den supraleitenden Resonatoren eines Linearbeschleunigers werden sie gehörig angeschoben: Mit 970 Millionen Stundenkilometern – 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit – rasen die Protonen in 1.200 Liter flüssiges Quecksilber. Für die schweren Atomkerne des Metalls hat das dramatische Folgen: Die Protonen stoßen Neutronen aus den Kernen, ein Prozess, den Physiker Spallation nennen.

Um die Energie wieder loszuwerden, dampfen die Kerne zusätzlich weitere Neutronen ab. Bis

zu neun der ungeladenen Kernbausteine kann ein einzelnes Quecksilber-Atom so loswerden, die anschließend in der Umgebung Neutronen aus anderen Atomkernen auslösen können. Ein einzelnes einfallendes Proton kann so eine ganze Neutronen-Lawine losretten: Die Ausbeute kann insgesamt bis zu 30 Neutronen betragen. Die Wissenschaftler bremsen die befreiten Neutronen ab und führen sie in einem Strahl an Experimentierplätze – um damit zu forschen.

Zahlreiche Experten verfolgen weltweit diese Idee einer Spallations-Anlage. In Oak Ridge, USA, wird derzeit die Spallationsquelle SNS gebaut, die 2008 in Betrieb genommen werden soll; sie wird eine Leistung von 1,4 Megawatt haben. In Japan wird mit J-SNS (J-Parc) an einer 1-Megawatt-Spallationsquelle gebaut und am Rutherford Appleton Laboratory bei Oxford erzeugt man schon jetzt mit ISIS (0,16 MW) Neutronenblitze, die in ihrer Helligkeit herkömmliche Neutronenreaktoren übertreffen.

Jessica: Ein 1:1-Modell des ESS-Targets. Es enthält das Quecksilber, das bei Beschuss Neutronen freigibt. (Bild: Forschungszentrum Jülich)



### LICHT REICHT NICHT

Um Atome im Okular eines Mikroskops zu sehen, braucht man mehr als ein Lichtmikroskop. Denn die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes liegt zwischen 400 und 750 Nanometer. Diese Lichtwellen sind nicht fein genug, atomare Details sichtbar werden zu lassen.

Die kleinsten Körper, die man in einem Lichtmikroskop ausmachen kann, sind etwa 1000 Mal so groß wie der Durchmesser von Atomen. Neutronen machen dagegen Atome sichtbar – und ermöglichen die Beobachtung ihrer Schwingungen und magnetischer Struktur.

### INFO

#### EIN SCHEUES TEILCHEN

Anders als Protonen und Elektronen ist das Neutron nicht elektrisch geladen. Das machte die Entdeckung nicht einfach: Geladene Teilchen kann man elektrisch ablenken und mit den verschiedensten Methoden sichtbar machen. Ungeladene Teilchen dagegen sind für viele Detektoren unsichtbar.

Daher konnte sie der Physiker Sir James Chadwick 1932 nur über einen Umweg aufspüren. Chadwick beschoss die Kerne von Berylliumatomen mit Alphastrahlung, um die geheimnisvollen Teilchen freizusetzen. Die Neutronen würden – so die Theorie – bei einer abermaligen Kollision aus Materie darin gebundene Protonen herausschlagen können. Als die Messgeräte von Chadwicks Ionisationskammer anschlugen, war 1932 der indirekte Nachweis gelungen. Dafür erhielt Chadwick 1935 den Nobelpreis für Physik.

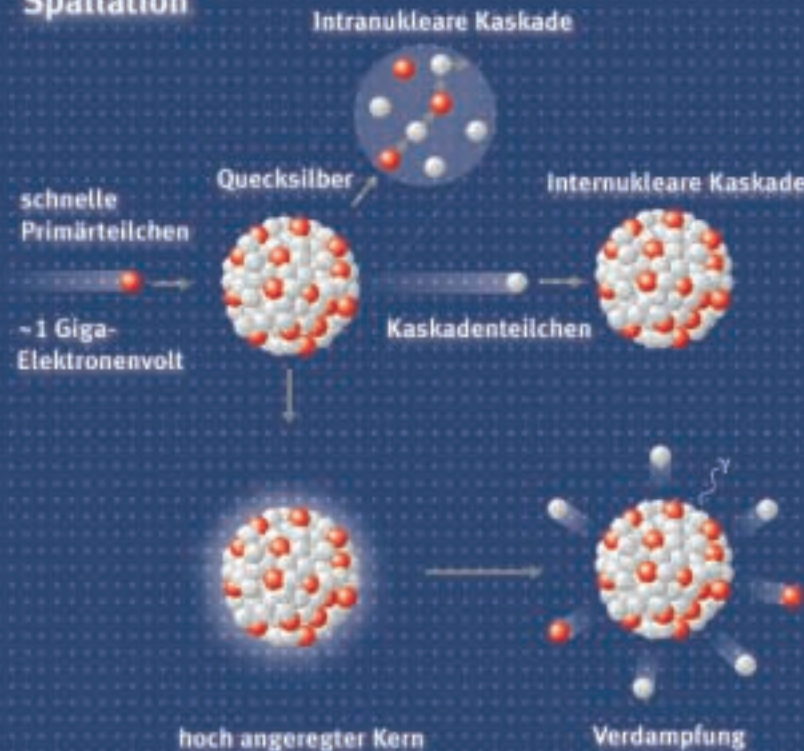
### // WOHER DIE NEUTRONEN KOMMEN

Noch mehr versprechen sich die Forscher jedoch von der „European Spallation Source“, der ESS: Sie soll mit zwei Neutronenströmen von je fünf Megawatt Strahlkraft insgesamt siebenmal so viel Leistung wie SNS liefern und damit die leistungsfähigste Neutronenquelle der Welt werden. Derzeit unterstützt und finanziert die Bundesregierung keinen Standort in Deutschland, doch natürlich werden sich deutsche Forscher an dem europäischen Projekt beteiligen. Im Gespräch sind derzeit zwei britische und ein skandinavischer Standort.

Wo auch immer die ESS entstehen wird: Rund 4.500 Forscher sollen an den beiden Strahlungsquellen der ESS forschen können, einer Kurz- und einer Langimpuls-Strahlungsquelle mit jeweils 24 Instrumenten. Dort kommen dann 50 bzw. 17 Neutronenimpulse pro Sekunde an.

### INFO

#### Spallation



Grafik: Forschungszentrum Jülich / ius

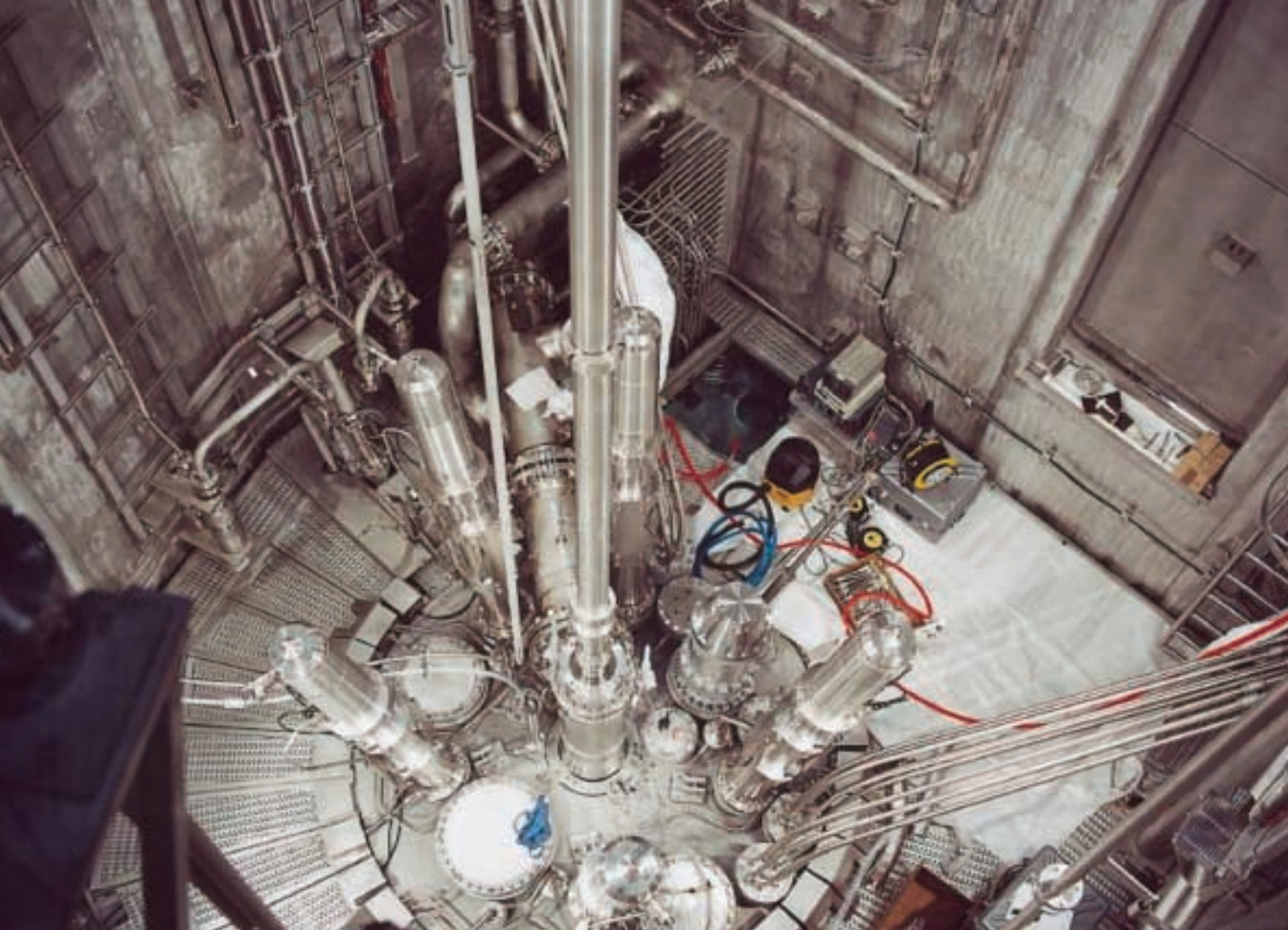
#### SPALTUNG VS. SPALLATION

Forschungsreaktoren nach herkömmlicher Bauart produzieren Neutronen durch Kernspaltung. Zu diesen Reaktoren gehören das Garchingener „Atom-EI“, der erste deutsche Atomreaktor (Betrieb von 1957 bis 2000), der Forschungsreaktor FRG-1 am GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, der FRJ-1 am FZ Jülich oder der BER II in Berlin. Das Prinzip: Zerbricht ein schwerer Atomkern (zum Beispiel aus Uran 235), dann wird dabei nicht nur Energie frei, sondern es spritzen auch einige Neutronen weg, die man auffängt und zur Forschung verwendet. Seit den 70er Jahren lassen sich so aber keine höheren Neutronenintensitäten mehr verwirklichen, obwohl die Technik rund um die Reaktoren zur höchsten Reife entwickelt wurde. Die Spallation liefert dagegen eine viel höhere Ausbeute an Neutronen. Und anders als ein Kernreaktor, in dem ständig eine Kettenreaktion abläuft, lässt sich eine Spallationsquelle jederzeit ein- und ausschalten, wie eine Lampe für Neutronenblitze.

### INFO

» DIE SCHWINGUNGEN EINES TRANSFORMATORS ODER EINES TELEFONS SIND VIEL ZU LANGSAM. KÖNNTEN SIE





Der neue Forschungsreaktor FRM II in Garching bei München soll Neutronen durch Kernspaltung herstellen. Seit Jahrzehnten ist Garching ein wichtiger Standort für Neutronenforschung. So wurden am FRM Neutronenleiter entwickelt, in denen sich Neutronen vom Reaktor zu den Arbeitsplätzen der Wissenschaftler transportieren lassen.

(Bild: FRM II, Garching)

## // VIELSEITIG OHNE LADUNG

Diese Neutronenblitze eröffnen Einblicke in Materie, wie es keine andere Strahlung kann. Denn Neutronen haben ganz besondere Eigenschaften. Weil sie keine Ladung tragen, können sie tief in die Materie eindringen. So lassen sich mit Neutronen zum Beispiel Metalle durchleuchten. Neutronen sind daher ideal dazu geeignet, mikrofeine Risse aufzuspüren, wie sie zum Beispiel bereits nach einem einzigen Transatlantikflug zu Tausenden in einem Flugzeug auftreten können. Auch Baufehler im regelmäßigen Kristallgitter lassen sich damit leicht finden – wichtig nicht nur für die Halbleiterphysik, sondern auch bei geologischen Untersuchungen. Langsame (thermische) Neutronen dringen sanft in Materie ein. Sie eignen sich selbst für die Untersuchung der Elastizität von Gummi oder Kunststoffen.

Auch in der Umweltanalytik sind Neutronen nützlich, etwa bei der Untersuchung von Klärschlämmen, Wasser- und Bodenüberwachungen oder bei Lebensmittelkontrollen. Unter Neutronenbeschuss können Atome nämlich Neutronen einfangen. Anschließend zerfallen sie und senden dabei einen „typischen Fingerabdruck“ aus Gammastrahlung aus. Winzige Proben genügen so für eine Untersuchung der Inhaltsstoffe. Diese „Neutronen-Aktivierungsanalyse“ ist auch bei Historikern und Archäologen beliebt: Man untersuchte damit zum Beispiel die Zusammensetzung von Rembrandts Farben oder die Metalllegierung im Beil des Gletschermannes „Ötzi“. Mit neuen Neutronenquellen werden diese Messungen schneller und genauer.

Ein besonderer Vorteil der Neutronen liegt jedoch in ihrer inneren Quarkstruktur. Die Quarks

## STREUVERSUCHE

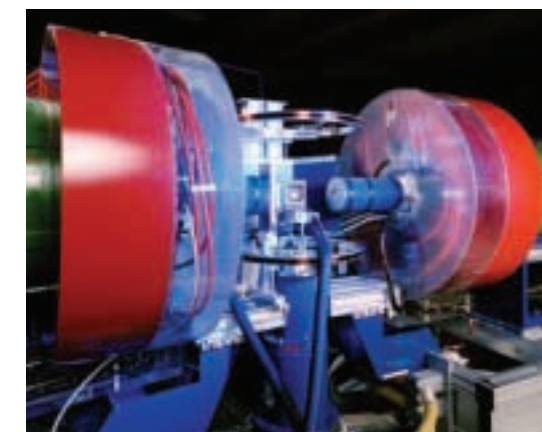
Ähnlich wie mit anderen Strahlungsarten kann man auch mit Neutronen „Streuexperimente“ durchführen und so Details der Nanowelt enthüllen. Das kann man sich so vorstellen: In einem dunklen Raum hängt eine rotierende Diskokugel – die Probe. Sie wird immer wieder von einem einzigen Strahler angeblitzt, dem Neutronenstrahl. Die vielen kleinen Spiegel auf der Oberfläche der Kugel werfen das Licht auf die Wände. Im Falle der Neutronenstrahlung registrieren Detektoren die von Atomkernen abgelenkten Neutronen. Genau, wie man zum Beispiel mit Synchrotronstrahlung (Kapitel „Nanokino“) aus einzelnen Lichtflecken auf die Struktur vieler Kristalle schließen kann, kann man aus dem charakteristischen Streumuster der Neutronen, die zurückgeworfen oder magnetisch abgelenkt wurden, ein Bild vom Aussehen der Probe und ihrem Magnetismus gewinnen. Sogar die Bewegungen der Probe – etwa das thermische Zittern im Kristallgitter – spiegeln sich in der Bewegung der gestreuten Neutronen wider.

INFO

machen aus den Neutronen winzige Magnete. Wie winzige magnetische Kompassnadeln werden die Neutronenmagnete daher beim Durchflug über Proben abgelenkt und offenbaren damit die magnetischen Eigenschaften der untersuchten Stoffe. Ein Großteil des heutigen Wissens über magnetische Strukturen basiert auf Neutronenstreuung. Damit lässt sich – ergänzend zu den Messungen am geplanten Hochfeldmagnetlabor am Hahn-Meitner-Institut



Bild: photocase.de



Wie elastisch ist ein Gummiball? Mit diesem „Neutronenspektrometer“ lassen sich minimale Geschwindigkeitsänderungen von Neutronen, die auf eine Probe treffen, messen. Auf diese Weise werden auch sehr langsame Molekülbewegungen im untersuchten Objekt sichtbar. Mit Hilfe dieser und weiterer Analysemethoden erhält man z.B. Antworten auf die Fragen, wodurch ein Gummiball elastisch ist, wieso eine Kunststofffolie reißt oder was einem Autoreifen Straßenhaftung gibt. (Bild: Forschungszentrum Jülich)

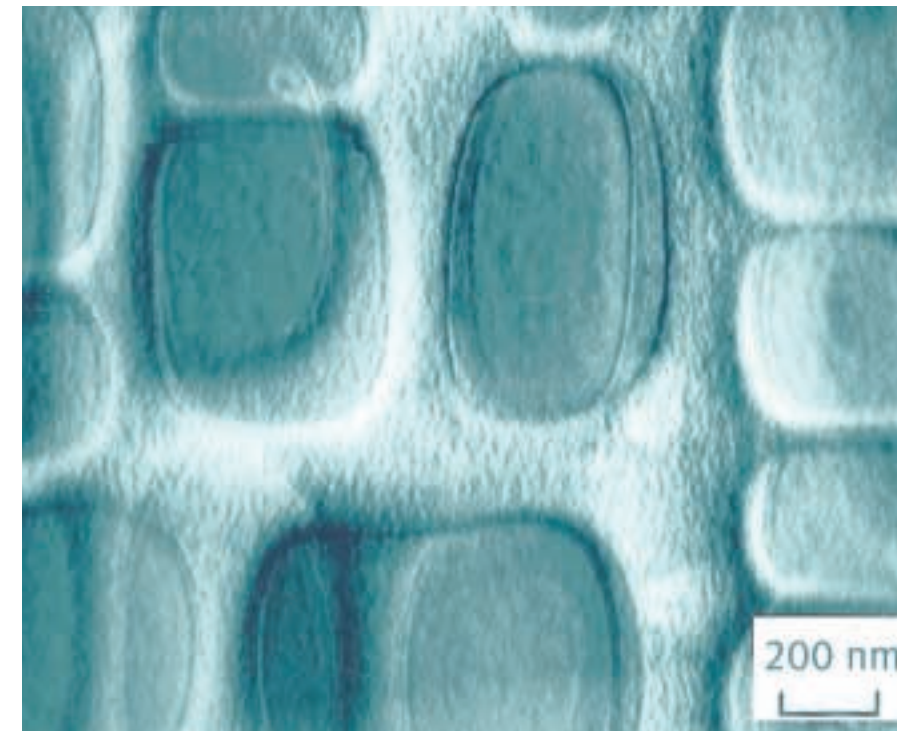
HOHLSPIEGEL VON DER GRÖSSE EINES KONTINENTS BAUEN, SO KÖNNTEN SIE DAMIT DIE BEABSICHTIGTEN

(siehe Kapitel „Traumhafte Anziehungskräfte“) – an der ess der Magnetismus neuer Legierungen untersuchen. Das ist hilfreich bei der Entwicklung neuer Materialien, vom Supraleiter bis zu neuen Speichermedien. Auch Lese Köpfe für Festplatten, die sich den Giant Magnetoresistance (siehe Seite 54) zu Nutze machen, sind aus verschiedenen Metallen geschichtet und wurden mit Hilfe von Neutronen erforscht.

Dazu kommt, dass Neutronen äußerst sensibel auf die Unterschiede der fast gleich schweren Wasserstoff-Isotope reagieren – und Wasserstoff ist ein Element, das praktisch in allen organischen Verbindungen vorkommt. Deshalb ist Neutronenstrahlung hervorragend geeignet, biochemische Prozesse zu entschlüsseln. Moleküle lassen sich mit Wasserstoff-Isotopen „markieren“ und anschließend auf ihrem Weg durch den Zell-Stoffwechsel verfolgen. Neutronenstrahlen sind daher nicht nur für Biologen höchst interessant, sondern auch für Pharmakologen. Selbst in Anwendungsbereichen, in denen man

Neutronen nicht vermutet, kann die Untersuchung „markierter“ Wasserstoffverbindungen hilfreich sein: Etwa bei der Steigerung der Wirksamkeit von Waschmitteln. Jülicher Wissenschaftler haben mit Hilfe von Neutronenstrahlen und schwerem Wasserstoff die Trennfläche zwischen Fetten und Wasser in Emulsionen untersucht. Die ist in der Regel vielfach gefaltet. Entsprechend sind viele Tensid-Moleküle nötig, um das Fett in Wasser zu lösen. Die Wissenschaftler entwickelten daraufhin ein Polymer, das diese Flächen glättet und versteift. Die Folge: Weniger Tensid ist nötig, um Öl in Wasser zu lösen.

❖ Neutronen durchdringen selbst Metalle und können dadurch helfen, Strukturfehler in Gußteilen aufzuspüren – hier zum Beispiel in Eisenbahnschienen. So helfen sie, Unfallquellen frühzeitig zu erkennen. (Bild: HMI Berlin)



❖ Die Oberfläche moderner Turbinenschaufeln wird durch Kristalleinschlüsse gehärtet. Für die anschließende Untersuchung dieser Oberflächen eignen sich Neutronen-Streuungsbilder hervorragend. (Bild: HMI)

## ESS

In einem Linearbeschleuniger beschleunigte Protonen sollen durch Spallation Neutronenstrahlung in bislang unerreichter Intensität erzeugen. An zwei eigenständigen Targetstationen mit jeweils 24 Detektor-Instrumenten soll sie Experimente zur Strukturaufklärung von Feststoffen und Flüssigkeiten ermöglichen.

## FORSCHUNGSFELDER

Struktur- und Materialforschung in sämtlichen naturwissenschaftlichen Disziplinen, von Physik über Biologie bis zur Archäologie.

## GEPLANTER STANDORT

Steht noch nicht fest. Für das europäische Gemeinschaftsprojekt sind zwei britische und ein skandinavischer Standort im Gespräch; das BMBF hat sich gegen eine kurzfristige Bewerbung Deutschlands ausgesprochen. Sitz der zentralen Projektgruppe ist das Forschungszentrum Jülich.

## ZEITPLANUNG

Geplant sind die ersten Neutronen für 2010, ein regulärer Forschungsbetrieb wäre dann ab 2012 oder 2013 möglich.

## KOSTEN

1,55 Milliarden Euro

## INFO

### WASSERSTOFF BEI DER ARBEIT

Wasserstoff bildet zusammen mit Sauerstoff Knallgas, das bei Verbrennung viel Energie und wenig Abgas liefert: Reines Wasser ist das einzige Reaktionsprodukt. In Brennstoffzellen wird dieser Verbrennungsvorgang gezähmt; sie liefern dabei Strom wie eine Batterie.

Die beiden Reaktionspartner sind im Inneren der Zelle in zwei Kammern untergebracht, getrennt durch eine Membran – und die entscheidet über die Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle. Mit dem Neutronenstrahl der ess wird man eine laufende Brennstoffzelle bei der Arbeit beobachten können. So will man Verbesserungen am chemischen Kreislauf vornehmen, bessere Elektrolyten und schließlich effizientere Brennstoffzellen konstruieren.



VERSUCHE GUT ANSTELLEN, ABER PRAKTISCH NICHTS MACHEN. SO VERMUTE ICH WENIGSTENS. «

// TRAUMHAFTE

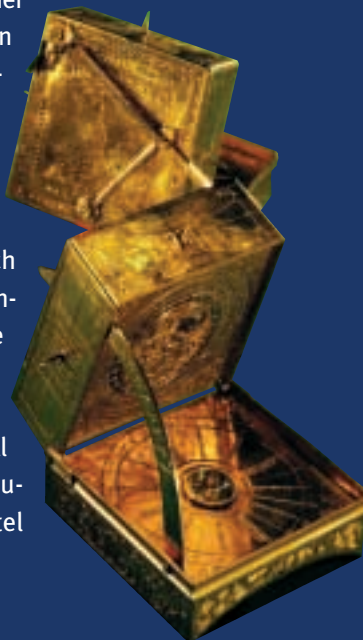
# ANZIEHUNGS- KRÄFTE

GRUNDLAGENFORSCHUNG MIT HOHEN MAGNETFELDERN

Die Magnetisierung in einem Zylinder aus einer Eisen-Nickel-Legierung, Durchmesser ein Mikrometer. In den blauen Bereichen weist die Magnetisierung nach rechts, in den roten nach links. Rechts ein Kompass aus dem Jahre 1568. (Bild: MPI Halle, links; akg-images)

// **S** eit Jahrtausenden orientieren sich Reisende nach Kräften aus dem Erdinneren: Das Erdmagnetfeld richtet Kompassnadeln recht zuverlässig nach Norden aus.

Magnetfelder sind aber auch für Wissenschaftler anziehend. Seit der britische Naturwissenschaftler Michael Faraday Anfang der 1830er Jahre mit Hilfe von Spule und Dauermagnet die Induktion nachwies, ist klar: Mit Magneten lässt sich die Bewegung von Elektronen beeinflussen. Umgekehrt ruft die Bewegung von Elektronen Magnetfelder hervor. Elektrische Ströme und Magnete hängen also eng zusammen. Im Erdinneren sind es kleine Ströme geladener Atome, die durch Wärmeströmungen in einer glutflüssigen Eisen-Nickel-Mischung entstehen. Sie schaukeln sich zu großen Strömen auf und erzeugen so das Magnetfeld der Erde. Doch auch die Elektronen, die sich um Atomkerne bewegen oder um sich selbst drehen (Spin), stellen, quantenmechanisch gesehen, so etwas wie Ströme dar und erzeugen dadurch atomare Magnetfelder. Und selbst die geladenen Quarks stehen nicht still und machen so zum Beispiel aus Neutronen kleine Magnete (siehe Kapitel „Sonden für die atomare Welt“).

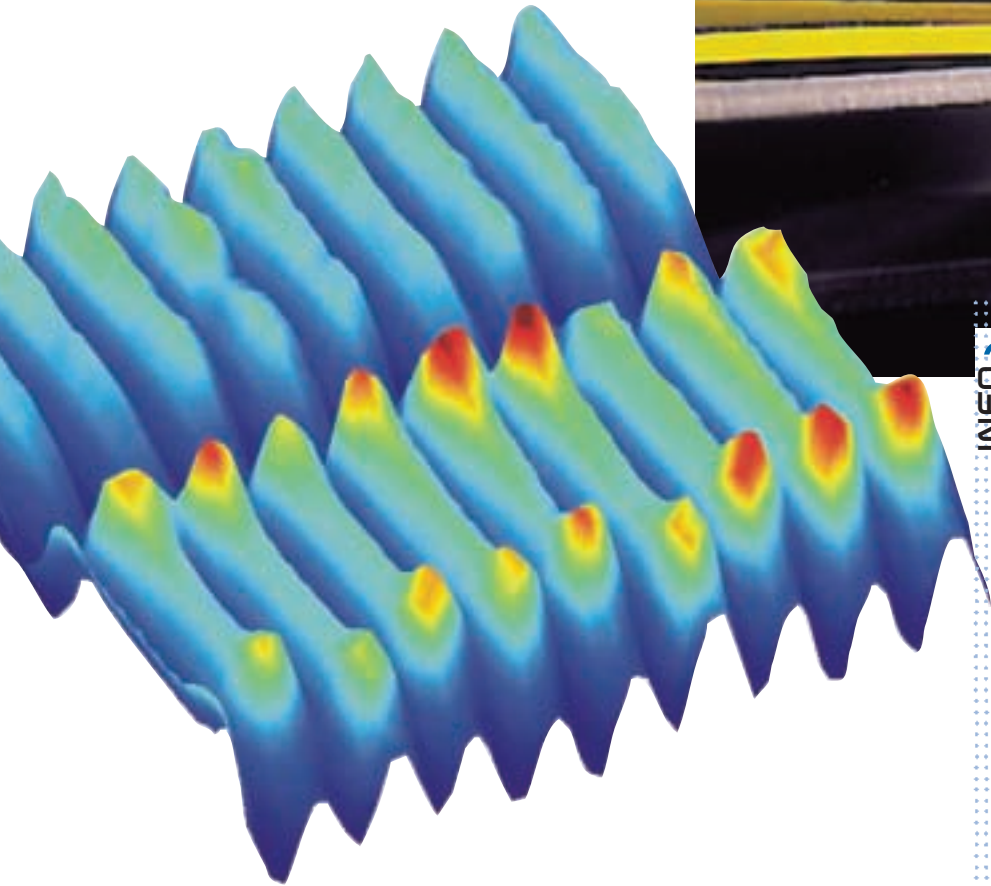


## // KLEINE WELT DER ELEMENTARMAGNETE

Bei geeigneter Elektronen-Anzahl in der Atomhülle kann so aus einem Atom ein winziger Magnet werden. Viele solcher Elementarmagnete zusammen können zum Beispiel mit vereinten Anziehungskräften Notizen am Kühlschrank festhalten.

Damit ist die Welt der kleinsten Dimensionen auch eine magnetische Welt, die unser modernes Leben aus dem Verborgenen heraus bestimmt. Auf allen Festplatten und Disketten findet man zum Beispiel hauchdünne magnetisierbare

Das magnetische Muster auf einer Diskette. Rechts: Solche neuen Leseköpfe, die sich den Giant Magnetoresistance zu Nutze machen, werden in Forschungslabors entwickelt. (Bilder: Hahn-Meitner-Institut Berlin, rechts; Dr. Michael Mueck, Justus-Liebig-Universität Giessen, unten)



Schichten aus Kobalt-Legierungen oder Eisenverbindungen. Durch Magnetisierung ordnen sich die atomaren magnetischen Momente der Legierungen darauf regelmäßig an und speichern so Daten oder Musik. Auf Minidiscs werden Magnetfelder sogar in einer besonders trickreichen Weise ausgenutzt. Auch Entdeckungen wie der **Riesen-Magnetwiderstand (GMR)** brachten die Speichertechnologie einen großen Schritt weiter – Entdeckungen, die aus der Grundlagenforschung kamen.

#### // HOHE FELDER GESUCHT

Die Felder von Magneten, die Notizen am Kühl-schrank festhalten, reichen für diese Grundla-



#### INFO? GIGANTISCHER WIDERSTAND

1988 entdeckten Pariser und Jülicher Physiker einen überraschenden Effekt: Sie schichteten bestimmte Metalle übereinander, wobei die einzelnen Schichten in unterschiedlicher Richtung magnetisiert waren. Für Elektronen wird es schwierig, durch diese Schichten hindurch zu kommen; sie erfahren also einen stark erhöhten elektrischen Widerstand, den „Giant Magnetoresistance“ (GMR). Wenn dagegen die Magnetisierung in den Schichten durch ein äußeres Magnetfeld parallel ausgerichtet wird, dann fällt der elektrische Widerstand deutlich. Das macht die Stoffe zu „Fühlern“ für Magnetfelder. So ermöglichte der GMR zum Beispiel die Entwicklung von Leseköpfen, wie man sie heute in jeder Festplatte findet.

genforschung jedoch nicht mehr aus. Ein Dauermagnet erreicht höchstens eine magnetische Flussdichte von drei Tesla. Doch man muss Magnetfelder im Bereich einiger zehn Tesla erzeugen, wenn man die inneren magnetischen Wechselwirkungen der Elektronen und Atome in Höhe von einigen tausend Tesla beeinflussen will. Für die Forschung mit hohen Feldern benötigt man daher Elektromagnete, die selbst etwa

so groß wie Kühlschränke sind – und zuweilen ein ganzes Kühlhaus brauchen, um nicht heiß zu laufen.

Zwei große Magnetfeldprojekte stehen für die kommenden Jahre an: In Rossendorf bei Dresden wird derzeit die Baugrube für eine Magnetfeldanlage ausgehoben, mit der Physiker gepulste Felder bis zu 100 Tesla herstellen werden. Im Berliner Hahn-Meitner-Institut wird dagegen eine Magnetfeldanlage für kleinere Feldstärken geplant: Rund 40 Tesla sollen hier für längere Zeitspannen erzeugt werden.

Unterschiedliche Konzepte für unterschiedliche Forschungsumfelder. Denn in Rossendorf wird der Magnet zusammen mit einem Infrarot-Laser (ELBE) betrieben. Mit diesem Laser kann man zum Beispiel chemische Übergänge stimulieren oder die Übergänge von Elektronen zwischen verschiedenen Quantenzuständen. Die Energie des infraroten Laserlichtes macht es auch möglich, die Teilchen von einem Spinzustand in einen ändern zu „schalten“.

In Berlin befindet sich dagegen mit dem Forschungsreaktor BER II eine der leistungsfähigsten Neutronenquellen Deutschlands. Neutro-



#### INFO? KLEINE SCHEIBEN UND DER EFFEKT DES HERRN KERR

Minidiscs (MDs) sind runde Wunder. Im Gegensatz zu CDs oder DVDs sind sie mit Magneto-optischem Material beschichtet, Legierungen aus Rhenium und Thulium oder Cobalt und Platin. Diese Materialien verändern die Polarisation einfallenden Lichtes je nach Magnetisierung. Entdeckt wurde der Effekt vom schottischen Physiker John Kerr Ende des 19. Jahrhunderts – Grundlagenforschung, die 100 Jahre später in jedem Minidisc-Player steckt.

Beim Aufnehmen von Daten auf eine MD wird die Magnetschicht erst mit einem Laser auf ca. 200 Grad aufgeheizt und anschließend, ähnlich wie bei einem Tonband, mit einem Aufnahmekopf magnetisiert. Das Abkühlen fixiert die Magnetisierung. Beim anschließenden Auslesen tastet ein schwächerer Laser die Spuren ab. Eine Photodiode erkennt dabei die Polarisation des zurückfallenden Lichtes und verwandelt diese Information in digitale Daten.



Die „Basis“ der Musik: Folien, die hier gerade zerschnitten werden landen schließlich in handelsüblichen Minidiscs. (Bild: EMTEC)

nen eignen sich unter anderem als Sonden für atomare Magnetfelder (siehe Kapitel „Sonden für die atomare Welt“). Daher untersuchen damit internationale Physiker-Teams am HMI seit Jah-

ren bei weltweit einzigartigen Bedingungen – tiefsten Temperaturen und Magnetfeldern von bis zu 17 Tesla – die Struktur und das Verhalten von Festkörpern.

Diese unterschiedlichen Forschungsumfelder erfordern unterschiedliche Magnetfelder: In Rossendorf werden die Felder „gepulst“ sein, der Magnet wird also immer nur für einige Tau-

➤ Magnetische Domänen: Gebiete von wechselnder Magnetisierung, aufgenommen am IFW in Dresden, das sich auch an der Planung der Magnetfeldanlage beteiligt. (Bild: R. Schäfer/O. deHaas IFW Dresden)



sendstel Sekunden in Betrieb sein. Den Wissenschaftlern genügt das, weil der Laser ELBE während eines einzigen Magnetfeldpulses bis zu 100.000 infrarote Lichtblitze durch die Proben schießt.

In Berlin planen die Wissenschaftler dagegen „stationäre“ Felder. Denn bei der Forschung mit Neutronen ist man auf lange „Belichtungszeiten“ angewiesen – bis zu mehreren Wochen kann ein Versuch dauern. Der Berliner Magnet muss daher bis zu drei Wochen eingeschaltet bleiben können. Das erfordert allerdings einen gewaltigen Kühl-Aufwand: 400 Liter Wasser sollen den Magneten pro Sekunde durchströmen und die Wärme durch vier Kühltürme in die Atmosphäre entlassen.

## // PHASENÜBERGÄNGE

Mit den hohen Magnetfeldern wollen die Wissenschaftler unter anderem Übergänge zwischen unterschiedlichen magnetischen Phasen untersuchen. Ein einfacher Übergang findet zum Beispiel statt, wenn Daten auf Festplatten gespeichert werden: In kleinen Gebieten auf der Platte werden dann die magnetischen Momente in eine bestimmte Richtung ausgerichtet. Man schafft so eine Ordnung, die sich anschließend durch das Anlegen äußerer Magnetfelder wieder auflösen lässt.

Zahlreiche magnetische Phasenübergänge wurden in den vergangenen Jahrzehnten bei verschiedenen Materialien und Randbedingungen

in Hochfeldlabors entdeckt; viele der zugrundeliegenden Mechanismen sind jedoch noch unverständlich. So plant man in Rossendorf und Berlin unter anderem, einen magnetischen Übergang in Germanium-Kupfer-Oxid genauer zu untersuchen. Wird dieser Stoff gekühlt, dann rücken bei einer bestimmten Temperatur die Kupferatome paarweise zusammen. Die Spins dieser Pärchen bilden dann einen unmagnetischen Zustand – was eine sprunghafte Änderung der gesamten Magnetisierung zur Folge hat. Mit hohen Magnetfeldern werden Physiker diesen Phasenübergang besser verstehen.

Ein anderes Forschungsgebiet: Bestimmte Metall-Oxide, die sich oberhalb einer Grenztemperatur wie Ferromagnete, darunter wie Isolatoren

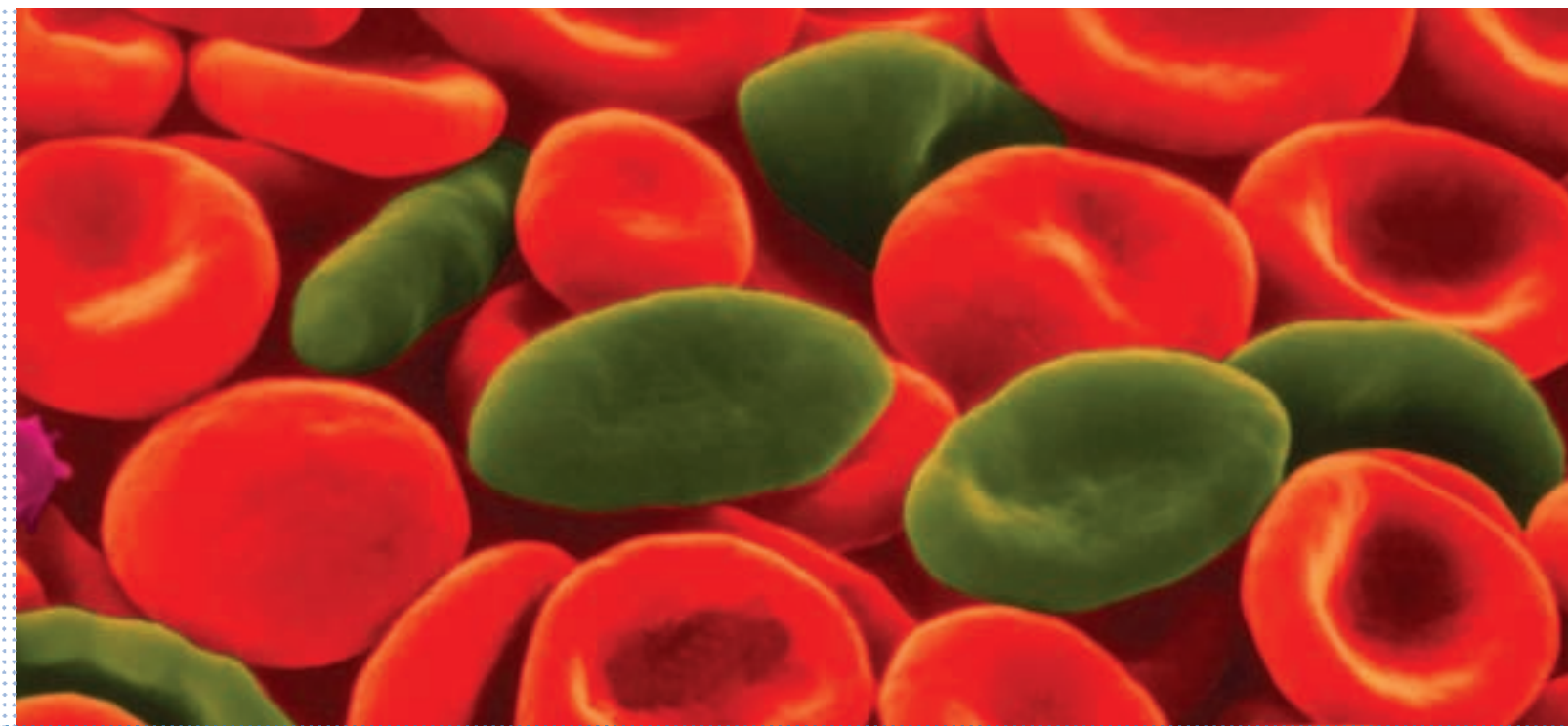
➤ Das Bakterium Escherichia Coli wächst besser in großen Magnetfeldern. (Bild: eye of science)

➤ Sichelzellenanämie: Gesunde Blutzellen lassen sich von sichelförmig mißbildeten Exemplaren (grün) durch Magnetfelder trennen. (Bild: Mauritus)



einheit. Für die Entdeckung dieses „ganzahligen Quantenhalleffektes“ erhielt Klaus von Klitzing 1985 den Nobelpreis für Physik. Weil man diese Messungen so exakt wiederholen kann, eicht die Physikalisch-Technische Bundesanstalt heute den elektrischen Widerstand mit Hilfe dieses Effektes.

Robert Laughlin, Horst Störmer und Daniel Tsui erhielten 13 Jahre später den Nobelpreis für den „fraktionierten Quantenhalleffekt“: Bei noch größerer Kälte und noch höheren Magnetfeldern paaren sich die Elektronen in sehr dünnen Halbleiterschichten mit je (beispielsweise) drei Magnetfeld-Quanten zu neuen Teilchen mit gebrochenen Ladungen. Diese „Quasiteilchen“ bilden eine Art Flüssigkeit – und waren eine große Überraschung in der Physik.



## INFO

### NOBELWÜRDIGER MAGNETISMUS

Elektronen werden bei tiefen Temperaturen in starken Magnetfeldern zurückhaltend: Sie rasen zwischen den eingefrorenen Atomrümpfen nicht mehr ungehindert hindurch, stattdessen werden sie auf bestimmte Kreisbahnen gezwungen.

Dadurch ändert sich z.B. der Widerstand in einem Halbleiter unter bestimmten Bedingungen senkrecht zu diesem Strom in festen Abständen, abhängig von der Stärke des angelegten Magnetfeldes, und zwar in ganzzahligen Vielfachen einer physikalischen Grund-

HOHE FELDER WELTWEIT

Magnete in bestehenden Hochfeldlabors – dazu gehören zum Beispiel Labors an der TU Braunschweig, der TU Dresden, in Grenoble, Nijmegen, Tokio oder Tallahassee – können heute (statische) Felder von 35 Tesla und mehr erzeugen. Doch schon, um ein statisches Feld von 20 Tesla in einer Kupferspule herzustellen, in die eine streichholzschachtelgroße Probe passt, muss die elektrische Leistung für einen ganzen ICE hindurch fließen. Das heißt: Die Kupferspulen müssen in der Regel mit ausgefeilten Methoden stark gekühlt werden.

verhalten. An solchen Stoffen wurde auch ein besonders starker Magnet-Widerstand (der „Colossal Magnetoresistance“) beobachtet; Elektronen durchtunneln sie abhängig von ihrem Spin. Beides führt möglicherweise eines Tages zu einem Einsatz in der Technik. Hohe Magnetfelder könnten bei diesem Material unter anderem helfen, eine Erklärung dafür zu finden, warum sich die Grenztemperatur durch äußere Magnetfelder verschiebt.

Das Magnetfeldlabor in Dresden wird sechs Magnete beherbergen und unten an den „Freie-Elektronen-Laser“ ELBE angeschlossen. Er erzeugt Laserlicht im mittleren und fernen Infrarotbereich. (Bild: fz Rossendorf)

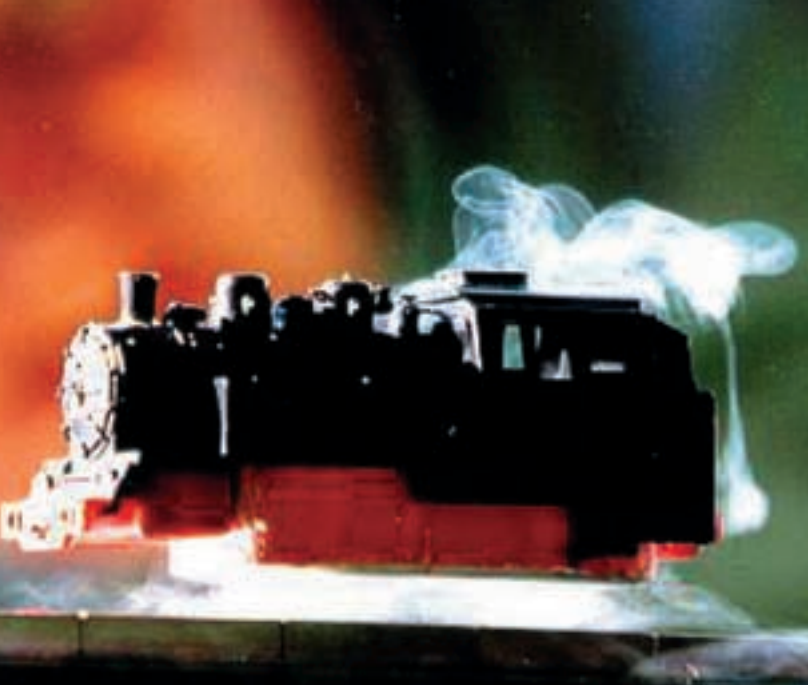


Heute stehen in den Experimentierhallen des HMI bereits zwei blau-silbrige „Tonnen“: die 14-Tesla-„Kryomagnete“. Weltweit einmalig erzeugen sie Felder um Proben, die auf tiefste Temperaturen von 0,03 Kelvin gekühlt werden. Mit diesem Magneten lässt sich auch der Weltrekord von 17 Tesla bei 0,15 Kelvin erreichen. (Bild: Hahn-Meitner-Institut Berlin)

// STÖRE MEINE KREISE

Doch Magnetfelder vermögen noch mehr: Sie können beispielsweise Elektronen auf Kreisbahnen zwingen. Je höher das Magnetfeld ist, desto kleiner sind diese Kreise. In besonders starken Magnetfeldern schrumpft der Durchmesser der Kreisbahnen auf atomare Maßstäbe. Man erreicht so die physikalischen Bereiche, die von der Quantenmechanik beherrscht werden. Die Folge: Die Durchmesser der Elektronenbahnen – und damit die Energie der Elektronen – ändern sich nur noch in Stufen, den „Landau-Niveaus“. Diese Stufen sind die Basis der Quanten-Halleffekte, von denen Theoretiker nichts ahnten, bis sie Experimentalphysiker vor einigen Jahren in Hochfeld-Magnetlabors entdeckten.

Die beiden Hochfeld-Labors in Berlin und Dresden planen außerdem die Untersuchung so genannter „Hochtemperatur-Supraleiter“. Das sind Legierungen, deren Widerstand bei Temperaturen von etwa Minus 120 Grad Celsius auf Null absinkt. Der Traum der Forscher: Eines Tages könnte es zum Beispiel Überlandleitungen ge-



ben, die den Strom praktisch verlustfrei weiterleiten. Schon heute wird bei vielen Forschungseinrichtungen mit supraleitenden Magneten gearbeitet (siehe Kapitel „Weißt Du, wie ein Stern entsteht?“ / „Nanokino“). Hohe Magnetfelder ermöglichen es unter anderem, den Supraleitungs-Effekt teilweise „auszuschalten“. Dadurch hoffen die Wissenschaftler eines Tages einen Supraleiter zu entdecken, der auch bei Raumtemperatur und großen Strömen funktioniert.

Arbeit für den Supraleiter: Diese Lokomotive schwebt, gekühlt durch flüssigen Stickstoff, supraleitend auf magnetischen Schienen. (Bild: IfW Dresden)

// ORDNUNG DURCH MAGNETISMUS

Und schließlich eröffnen hohe Magnetfelder sogar ganz neue wissenschaftliche Möglichkeiten: Kreuzungen zwischen Physik und Biologie oder Chemie zum Beispiel. Denn Magnetfelder können zum Beispiel chemische Reaktionen beeinflussen. Wenn einer der Reaktionspartner ein magnetisches Moment besitzt, dann kann man durch ein äußeres Feld die chemische Reaktion steuern („magnetische Chemie“). Auch die Biologie könnte von starken Magneten profitieren: Japanische Forscherteams stellten zum Beispiel ein vermehrtes Wachstum bei Escherichia Coli in hohen Magnetfeldern fest. Und Blutzellen, die mit Malaria infiziert sind, lassen sich durch große Magnetfelder von gesunden Zellen separieren, weil der Krankheitserreger das Hämoglobin in den Zellen so verändert, dass es andere magnetische Eigenschaften zeigt.

HOCHFELDMAGNETANLAGE FZ ROSSENDORF

Hochfeldmagnetlabor. Gepulstes Magnetfeld bis zu 100 Tesla, pro Magnet 1-3 Pulse pro Stunde, Pulsdauer rund 10-20 Millisekunden. Drei Gruppen von Magneten, für unterschiedliche Kombinationen von Pulsdauern und Probenvolumen zwischen 20 und 50 mm Durchmesser des Probenraumes. Kombination mit IR-FEL ELBE.

FORSCHUNGSFELDER

Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Halbleiterphysik, niedrigdimensionale Systeme, Magnetismus und Metallphysik, Supraleitung, Atom- und Molekülphysik sowie komplexen Flüssigkeiten und spezielle Fragen der Chemie. Technische Anwendungen (z.B. supraleitende Dauermagneten oder Entwicklung von hochfesten, hochleitfähigen Spulendrähten).

GEPLANTER STANDORT

Dresden Rossendorf (Forschungszentrum Rossendorf, FZR)

ZEITPLANUNG

Projekt genehmigt. Inbetriebnahme 2007 (vier Jahre Bau).

KOSTEN

Bau 24,5 Mio. Euro, jährliche Personal- und Betriebskosten 3,7 Mio. Euro.

HOCHFELDMAGNETANLAGE HAHN-MEITNER-INSTITUT

Hochfeldmagnetanlage: Zwei kontinuierlich betriebene Magnete, ein (horizontaler) Solenoid für 40 Tesla und eine vertikale split-pair Spule für 30 Tesla, für Neutronenstreuung in hohen Magnetfeldern.

FORSCHUNGSFELDER

Grundlagenforschung auf dem Gebiet der kondensierten Materie, der Halbleiterphysik, der weichen Materie sowie spezielle Fragen der Chemie.

GEPLANTER STANDORT

Berlin Zehlendorf (Hahn-Meitner-Institut)

ZEITPLANUNG

Baubeginn steht nicht fest, Bauzeit vier Jahre.

KOSTEN

Bau 65 Mio. Euro, jährliche Personal- und Betriebskosten 4,3 Mio. Euro.



WERDEN, WO SIE AUFHÖRT. «

» WISSEN SCHAFT IST SACHE DES VERSTANDES. «

# // EXPEDITIONEN

GROSSGERÄTE ZUM EINSATZ IN LUFTIGER HÖHE UND IM EIS

// **D**er Himmel schimmert königsblau und es ist bitterkalt. Trotz Sonnenschein verharrt das Thermometer unterhalb von minus 50 Grad Celsius. Der Luftdruck beträgt nur etwa ein Achtel des Drucks in Bodennähe.

Selbst Reinhold Messner hätte hier Atemprobleme – ein Ausflug auf den Everest wirkt im Vergleich geradezu wie eine Sauerstoffdusche. Doch bis zum Erdboden ist es weit. Mit Ausnahme einer gelegentlichen Concorde sind Linienmaschinen auf dem Dach der **Troposphäre**, die bis zu 17 Kilometer über dem Meeresspiegel reicht, nicht anzutreffen.

Ab 2007 wird das „High Altitude and Long Range Aircraft“ HALO in dieser Höhe kreuzen. Das fliegende Labor, ein umgerüsteter Business-Jet, wird dann die Atmosphäre erforschen. Forschungsbasis ist das bayerische Oberpfaffenhofen. Von den geplanten Experimenten, die auch in internationaler Kooperation geplant sind, erwartet man neue Erkenntnisse für Wissenschaft, Umwelt- und Klimaschutz. Dementsprechend ist das Aufgabenprofil weit gefächert, neben Wetter- und Klimaforschung steht auch die Erdbeobachtung auf dem Einsatzplan. Mit modernster Technik wird HALO unter anderem Daten über Treibhauseffekt, Wolkenbildung, Ozonabbau und Schadstoffbelastung sammeln.

**TROPOSPHÄRE:** Die Troposphäre ist die unterste Etage der Atmosphäre, hier spielt sich das Wettergeschehen ab. In den feuchten Tropen reicht sie vom Erdboden rund 17 Kilometer hoch, über den trockenen Polarregionen endet sie in etwa 8 Kilometern Höhe. Auf die Troposphäre folgt die Stratosphäre. Diese enthält kaum noch Wasserdampf und damit fast keine Wolken.

« » Halo: So heißt nicht nur ein solcher Strahlenkranz um die Sonne (links), sondern auch der umgebaute Businessjet (rechts) zur Vermessung der Atmosphäre. (Bilder: F. Ossing, GFZ Potsdam, links; Gulfstream Aerospace Cooperate, rechts)



Beobachtungen aus Flugzeugen sind ein Bindeglied zwischen bodengestützter und satellitengestützter Fernerkundung. Zum einen schließen sie Lücken im Netz der Bodenstationen und Messbojen und können anders als die Späher aus dem All vor Ort Proben entnehmen. Zum anderen liefern sie ein feineres Bild des Atmosphäre. HALO ist mit keinem der Forschungsflugzeuge, die heute weltweit in Be-

trieb sind, vergleichbar. Die Kombination von großer Reichweite, Gipfflughöhe und Nutzlast macht viele Experimente erst möglich. Ein ähnliches Projekt der USA bleibt auf absehbare Zeit amerikanischen Nutzern vorbehalten. Federführend für die Entwicklung von HALO sind das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und die Max-Planck-Gesellschaft.

#### // GLOBALER EINSATZ

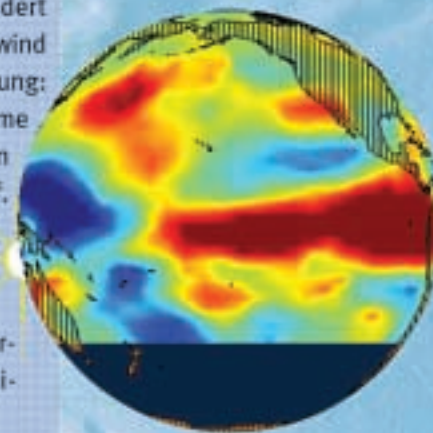
Mit einer Reichweite von über 8.000 Kilometern ist die Maschine für Langstreckenflüge ausgelegt. Von Deutschland aus lassen sich Nordpol und Äquator anfliegen, mit einem Zwischenstopp in Südamerika auch die Antarktis. HALO wird zum einen großräumige Wettersysteme – etwa Hoch- und Tiefdruckgebiete – untersuchen und andererseits für transkontinentale Beobachtungen eingesetzt werden. Die sind zum Beispiel für die Beobachtung des weltweiten Schadstofftransportes nötig. Beispiel Nordhalbkugel: Während die vorherrschenden Westwinde Abgase von Nordamerika über den Atlantik blasen, exportiert Europa seine Emissionen nach Asien. Von Messkampagnen in diesen

Regionen verspricht man sich ein besseres Verständnis des „Systems Erde“. Mögliche Einsatzgebiete von HALO sind vor allem:

- Die nördliche Polarregion: Durch den Anstieg der dortigen Temperaturen (seit 1966 um bis zu 3 Grad) und das Auftauen des Permafrosts rechnen Wissenschaftler damit, dass der torfige Untergrund Treibhausgase freisetzt. HALO wird die Veränderungen der Umwelt – darunter den Rückgang des Eises im Nordpolarmeer – verfolgen und dem Ozonabbau über der Arktis und Nordeuropa auf den Grund gehen.
- Asien gehört weltweit zu den Regionen, in denen Bevölkerung und Industrialisierung und damit die Luftverschmutzung am stärksten wachsen. Im Südostpazifik tritt außerdem die so genannte Südliche Oszillation auf, ein atmosphärisches Phänomen, das eng mit dem bekannten „El Niño“ gekoppelt ist.
- Das Amazonas-Gebiet: Die grüne Lunge unseres Planeten ist durch Entwaldung akut bedroht. Dabei spielt sie für den Umsatz des Treibhausgases Kohlendioxid eine zentrale Rolle. Präzise Daten gibt es jedoch nicht – Messstationen sind im Regenwald dünn gesät.

#### EL NIÑO

Im Abstand einiger Jahre steigt die Temperatur des tropischen Pazifiks. Zugleich ändert der üblicherweise vorherrschende Passatwind über dem westlichen Pazifik seine Richtung: Ein El Niño-Jahr beginnt. Die Fischschwärme vor der Westküste Südamerikas bleiben aus, weltweit treten Klimaerweichungen auf. Das Phänomen ist eng an Vorgänge in der Atmosphäre gekoppelt, diese werden als „Südliche Oszillation“ bezeichnet. Das Bild zeigt den erhöhten Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre (rot) in einem El Niño-Jahr. (Bild: NASA)



#### // IN LUFTIGE HÖHEN

HALO macht es außerdem möglich, die Wolkenstruktur auch in großer Höhe unter die Lupe zu nehmen. Gute Perspektiven für Wetterpropheten: Von der himmlische Spionage erwarten sie bessere Wolkenmodelle und letztlich genauere Voraussagen. Denn trotz ausgefeilter Computermodelle sind die Meteorologen hier noch auf zu viele Annahmen angewiesen – schließlich kann ein Wolkenturm mehrere Kilometer in den Himmel ragen, wobei sich Auf- und Abwinde, Feuchtigkeit, Druck und Temperatur im Inneren der Wolke mit der Höhe verändern.

#### INFO

#### TREIBHAUSEFFEKT

Die Atmosphäre besteht zu 21 Prozent aus Sauerstoff, zu 78 Prozent aus Stickstoff. Spurengase wie Methan, Kohlendioxid oder Wasserdampf – sie sind nur in geringer Konzentration vorhanden – sorgen dafür, dass sich die Atmosphäre wie ein Glashaus verhält. Sie ist zum einen durchlässig für sichtbares Sonnenlicht, andererseits wird die Wärmestrahlung des Erdbodens zurückgeworfen. Ohne den natürlichen Treibhauseffekt herrschten statt plus 15 im Mittel minus 15 Grad Celsius auf der Erde. Infolge der Industrialisierung ist die Konzentration an Treibhausgasen derart angestiegen, dass Modellrechnungen von einer Zunahme der Globaltemperatur ausgehen



## INFO OZONABBAU

Die Stratosphäre enthält den Hauptteil des atmosphärischen Ozons, eine besondere Form des Sauerstoffs. Besonders hoch ist die Konzentration in 20 Kilometern Höhe. Diese Ozon-Schicht wirkt wie ein uv-Blocker. Anfang der achtziger Jahre bemerkten Wissenschaftler erstmals, dass Abbauprodukte von Fluorkohlenwasserstoffe (FCKWs) das Ozon zersetzen, begünstigt durch die klimatischen Bedingungen über der Arktis. Seit 1990 ist das Phänomen in abgeschwächter Form auch über dem Nordpol zu beobachten.

Mit einer maximalen Flughöhe von über 15 Kilometern kann HALO auch bis in die Übergangszone zwischen Troposphäre und Stratosphäre vorstoßen. Dort leben die Eiskolken, über die man ebenfalls wenig weiß. Wie reflektieren sie das Sonnenlicht, wie die Wärmestrahlung des Erdbodens? Wie beeinflussen sie den Temperaturhaushalt unseres Planeten? Viele Unbekannte birgt auch die Chemie der oberen Troposphäre. Besonders im Äquatorbereich wirken die Luftschichten wie eine atmosphärische Wasch-

straße, die Schadstoffe umwandelt und entsorgt. HALO soll untersuchen, wie diese Entgiftungsanlage unseres blauen Planeten in Gang gehalten wird.

## // EISKALTE FORSCHUNG

Nicht nur in luftiger Höhe ist noch viel zu entdecken, auch die Arktis ist noch immer ein weißer Fleck auf der Landkarte – und das nicht nur wegen der Eis- und Schneekappe, die im Winter auf das dreißigfache der Fläche der Bundesrepublik anwachsen kann: Das arktische Polarmeer zählt zu den Regionen der Erde, die am wenigsten erforscht sind. Kein Wunder bei den Bedingungen: Temperaturen 30 Grad unter Null, schwankendes Packeis und – zumindest jenseits von Grönland – weit und breit kein Land in Sicht.

Die Polarforschung fühlt am Puls unseres Planeten. Denn in Sachen Weltklima gelten Nord- und Südpol als Sensibelchen: Modellrechnungen zeigen, dass die Polarzonen von einer globalen Erwärmung besonders betroffen wären – steigt die Temperatur, schmilzt das Polareis. Die dunklen Wasserflächen, die dann zum Vorschein

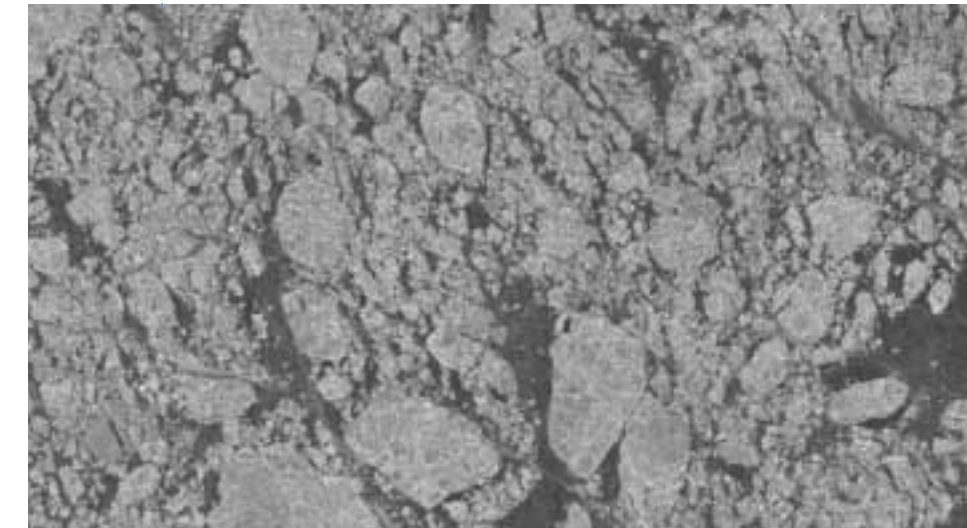
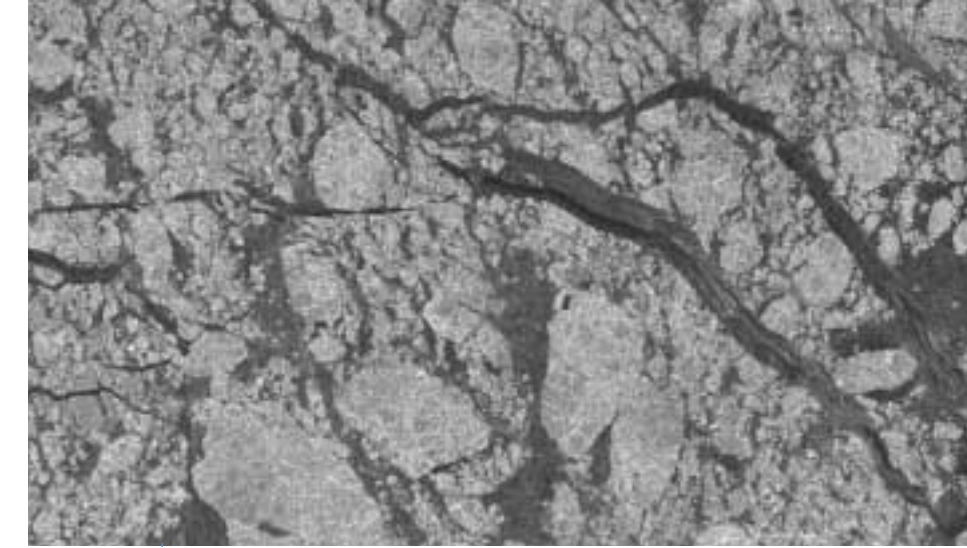
kommen, sind ideale Sonnenkollektoren. Konsequenz: Die polaren Fluten erwärmen sich und das Eis geht noch weiter zurück.

Zeigt die Fieberkurve nach oben? Die Symptome sind verdächtig, aber auch verwirrend. Im zentralen Nordpolarmeer wurde das Eis während der letzten Jahrzehnte um 40 Prozent dünner, im Randgebiet der Polarzone ist das Eis eher angeschwollen. Handelt es sich dabei um eine natürliche Erscheinung? Gab es ähnliche Schwankungen in der Vergangenheit? Ein Blick in die Erdgeschichte könnte helfen, die aktuellen Befunde einzuordnen. In den Sedimentschichten des polaren Meeresbodens vermutet man eines der detailliertesten Klimaarchive unseres Planeten. Tiefseebohrungen wurden bereits in allen Weltmeeren durchgeführt, für die Arktis fehlte bisher die Technik. Noch vor Ende des Jahrzehnts soll nun ein Forschungsschiff vom Stapel laufen, mit dem die Wissenschaft zum ersten Mal in den arktischen Untergrund vorstoßen möchte: Die Aurora Borealis.

Der Eisbrecher, an dessen Entwicklung das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung beteiligt ist, soll von einem Konsortium europäischer Partner betrieben werden. Mit der Aurora Borealis wäre es erstmals möglich, den Meeresboden unterhalb der Eisdecke in Augenschein zu nehmen. Hierfür plant man, das Schiff mit einem speziellen Antrieb auszustatten: Schwenkbare Propeller unter der Wasserlinie könnten dafür sorgen, dass es im drängenden Packeis seine Position behält.

## // SCHWIMMENDES LABOR

Über einen Kilometer unterhalb der eisigen Oberfläche ragen die Gipfel gewaltiger Gebirgszüge aus dem Meeresboden. Diese Formationen – arktische Rücken genannt – gehören zu den Zielen des Bohrprogramms. Hier und an anderer Stelle soll sich der Bohrkopf der Aurora Borealis eines Tages mehrere hundert Meter weit in den Untergrund vortasten – und



## INFO ARKTISCHE OSZILLATION

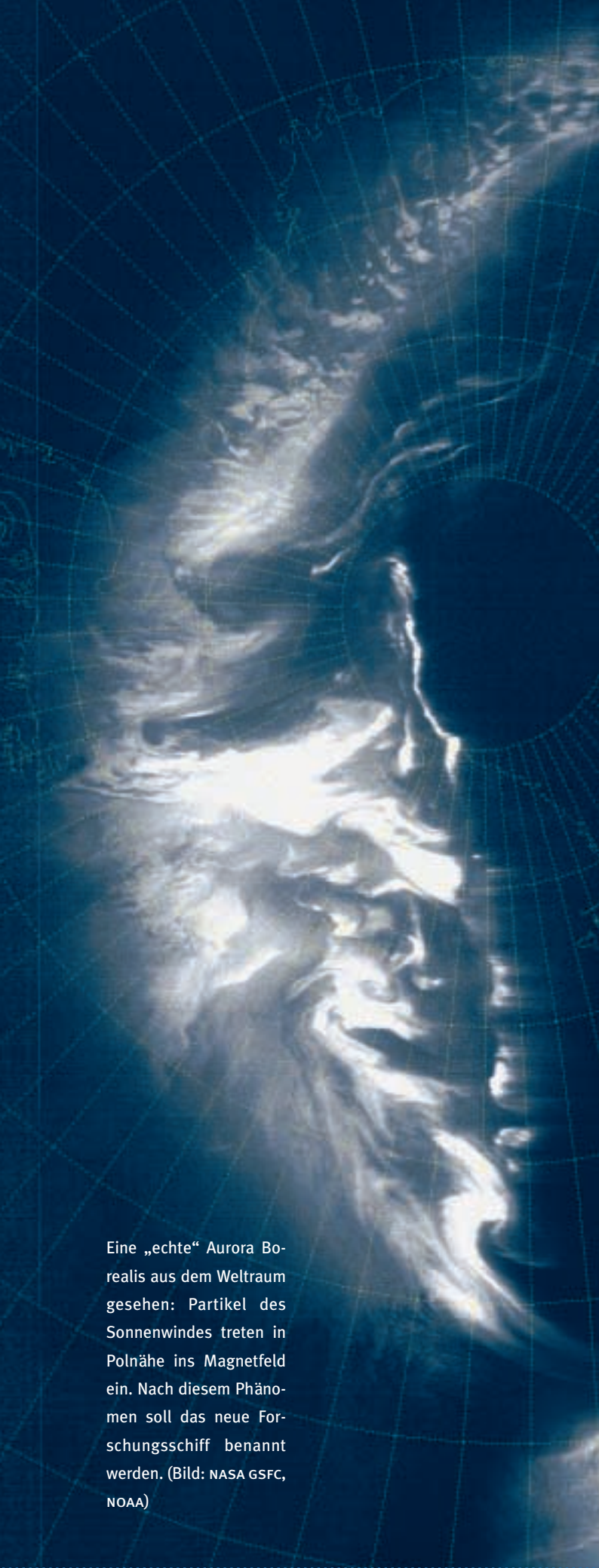
Über der nördlichen Polarregion beobachtet man periodisch wechselnde Luftströmungen und Änderungen des Luftdrucks, dadurch gelangt mal mehr mal weniger Warmluft in die Arktis. Ein natürliches Phänomen, das sich auf das Packeis und sogar auf das Klima in Nordeuropa auswirkt.

Arktischer Winter: Innerhalb von neun Tagen bildete sich nördlich der Küste Alaskas junges Eis. Dunkle Kanäle (oben) sind unten von Eisplatten verschlossen. Das Bild zeigt einen Ausschnitt von 96 x 128 km. (Bild: NASA JPL/ UAF)

damit 60 Millionen Jahre zurück in die Vergangenheit. Von den Proben aus der Tiefe verspricht sich die Forschung ein Klimaregister, das bis zu den letzten Tagen der Dinosaurier reicht. Geowissenschaftler erwarten außerdem, Informationen über den Ursprung des arktischen Meeresbeckens sowie Hinweise auf Rohstoff-



GANZ ANDERE EINSTELLUNG HABEN ALS DIE, DEN VERSUCH ZU MACHEN, AUS DER GESCHICHTE ZU ...



Eine „echte“ Aurora Borealis aus dem Weltraum gesehen: Partikel des Sonnenwindes treten in Polnähe ins Magnetfeld ein. Nach diesem Phänomen soll das neue Forschungsschiff benannt werden. (Bild: NASA GSFC, NOAA)

**INFO**  
**KLIMAARCHIV**

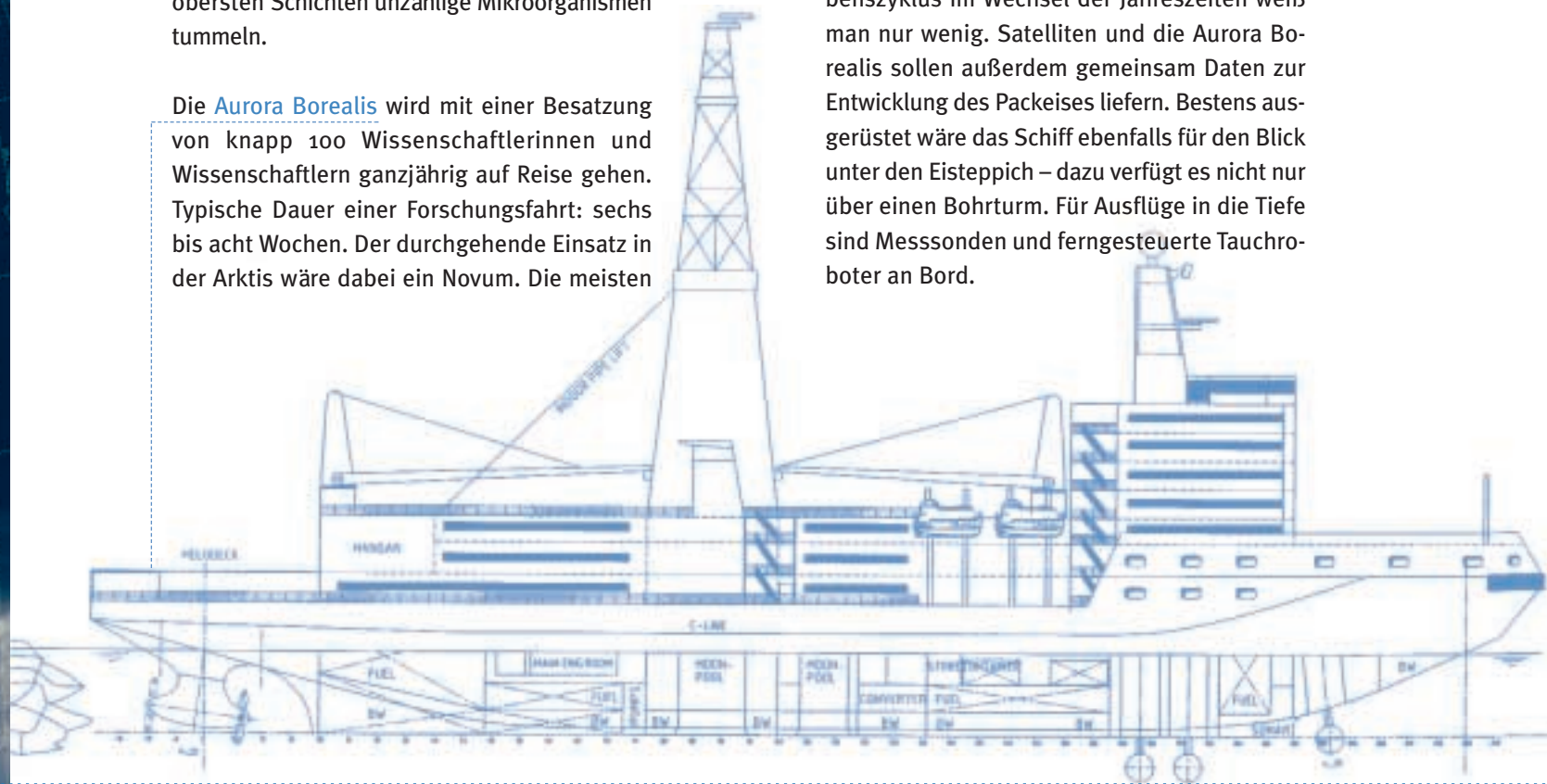
Ähnlich wie die Wachstumsringe eines Baumes erzählen Sedimentschichten die Geschichte der Erde. Ablagerungen auf dem unberührten Meeresgrund bergen Material, das sich im Laufe von Jahrtausenden angesammelt und übereinander gestapelt hat. Diese Reliquien sind Zeitzeugen des einstigen Klimas. Für die Datierung einzelner Schichten gibt es verschiedene Möglichkeiten: Zum einen orientiert man sich an außergewöhnlichen Ereignissen wie massiven Vulkanausbrüchen, deren Asche sich in Sedimenten wiederfindet. Auf der anderen Seite enthalten Sedimentschichten auch natürliche, radioaktive Substanzen, die sich mit der Zeit verändern. Der Meteoriteneinschlag, der mit dem Aussterben der Dinosaurier in Verbindung gebracht wird, wurde auch durch Bohruntersuchungen nachgewiesen.

lager zu finden. Biologen sind auf die Ablagerung auf dem Meeresgrund ebenfalls gespannt: Von anderen Ozeanen weiß man, dass sich in den obersten Schichten unzählige Mikroorganismen tummeln.

Die **Aurora Borealis** wird mit einer Besatzung von knapp 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern ganzjährig auf Reise gehen. Typische Dauer einer Forschungsfahrt: sechs bis acht Wochen. Der durchgehende Einsatz in der Arktis wäre dabei ein Novum. Die meisten

Expeditionen beschränkten sich bisher auf den Sommer, da zu dieser Jahreszeit die Region für die Schifffahrt am zugänglichsten ist. So pendelt das deutsche Forschungsschiff Polarstern seit 20 Jahren zwischen nördlicher und südlicher Hemisphäre hin und her. Von der Flotte arktischer Eisbrecher ist sonst nur der US-amerikanische Healy für anspruchsvolle Messkampagnen geeignet. Wenn – wie vorgesehen – die Polarstern in den nächsten Jahren dauerhaft in die südliche Hemisphäre verlegt wird, stünde die Aurora Borealis uneingeschränkt für den nördlichen Polarkreis zur Verfügung.

Die Tiefseebohrungen sind für die Sommermonate geplant, wenn das Eis dünn und brüchig ist. Während der übrigen Jahreszeiten soll die Aurora Borealis atmosphärische Beobachtungen durchführen, die Meeresströmung sowie das arktische Ökosystem untersuchen. Das so steril anmutende Eis beherbergt tatsächlich Krebse, Algen und zahlreiche Kleinstlebewesen, die auf die frostige Umgebung bestens eingestellt sind. Wie überstehen sie den eisigen, stockfinsternen Polarwinter? Über ihren Lebenszyklus im Wechsel der Jahreszeiten weiß man nur wenig. Satelliten und die Aurora Borealis sollen außerdem gemeinsam Daten zur Entwicklung des Packeises liefern. Bestens ausgerüstet wäre das Schiff ebenfalls für den Blick unter den Eisteppich – dazu verfügt es nicht nur über einen Bohrturm. Für Ausflüge in die Tiefe sind Messsonden und ferngesteuerte Tauchroboter an Bord.



Zeichnung: HSWA

**HALO**

Flugzeug zur Atmosphärenforschung und Erdbeobachtung, ausgelegt für Interkontinentalflüge und große Flughöhen. Als Plattform dient ein umgerüsteter Business-Jet. Betreiber: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und Max-Planck-Gesellschaft (MPG). Der Einsatz von HALO steht offen für Forschungsanträge aus dem In- und Ausland.

**FORSCHUNGSFELDER**

Wetter-, Klima- und Polarforschung, Erdbeobachtung

**GEPLANTER STANDORT**

Heimatbasis ist das DLR-Zentrum in Oberpfaffenhofen bei München.

**ZEITPLANUNG**

Projekt ist bewilligt; Umbau des Flugzeuges ab Mitte 2004 geplant; Inbetriebnahme 2007

**KOSTEN**

97 Mio. Euro, Betriebskosten 3,8 Mio. Euro jährlich

**AURORA BOREALIS**

Eisbrecher mit der Fähigkeit für Tiefenbohrungen im Meeresgrund unterhalb der Eisdecke. Es gibt weltweit kein Forschungsschiff, das diesen Anforderungen genügt. Betreiber: Europäisches Konsortium, federführend ist das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven (AWI).

**FORSCHUNGSFELDER**

Polarforschung, Klimaforschung, Ozeanographie, Geologie, Meeresbiologie

**GEPLANTER STANDORT**

Haupteinsatzgebiet ist die nördliche Polarregion. Der Heimathafen steht noch nicht fest.

**ZEITPLANUNG**

Planungsverfahren noch nicht abgeschlossen; Inbetriebnahme frühestens 2006

**KOSTEN**

250 Mio. Euro, 10-25 Mio. Euro Betriebskosten jährlich.

// GOLDENE PHASE DER

# ASTROPHYSIK

DER BLICK INS UNIVERSUM

// **S**chwarze Löcher zählen zum Gewaltigsten, was die Natur zu bieten hat: Sie sind so schwer, dass sie Materie und Licht verschlingen, wohl auf Nimmerwiedersehen. Sie verrühren die Raumzeit durch ihre Masse wie zähen Honig. Und stürzen sie ineinander, dann erschüttern sie den gesamten Weltraum mit Gravitationswellen.

Auch die Galaxie, in der wir leben (die Milchstraße) enthält ein Schwarzes Loch von etwa drei Millionen Sonnenmassen. Das bewies erst kürzlich eine deutsche Forschergruppe.

Die vergangenen Jahre sind voll von astrophysikalischen Neuentdeckungen. Kein Wunder: Moderne Teleskope wie das europäische Very Large Telescope (VLT) oder das Hubble-Space-Telescope und deren Detektoren werden immer leistungsfähiger. Immer schnellere Com-

puter helfen den Astronomen, Datenberge zu analysieren: Bei einer einzelnen Beobachtung können mehrere Terabyte Bilddaten anfallen. Moderne Teleskope blicken tief in den Weltraum und damit fast 13,7 Milliarden Jahre in die Vergangenheit. Eine Entwicklung, die noch lange nicht zu Ende ist.

Ein wichtiges Forschungsgebiet der Zukunft sind Quasare – kompakte und hell strahlende Kerne von Galaxien. Man nimmt heute an, dass

Zwei schwarze Löcher umkreisen einander und stürzen schließlich zusammen. Die entstehenden Gravitationswellen soll zum Beispiel das Satelliten-Trio LISA dokumentieren. (Bild: AEI)

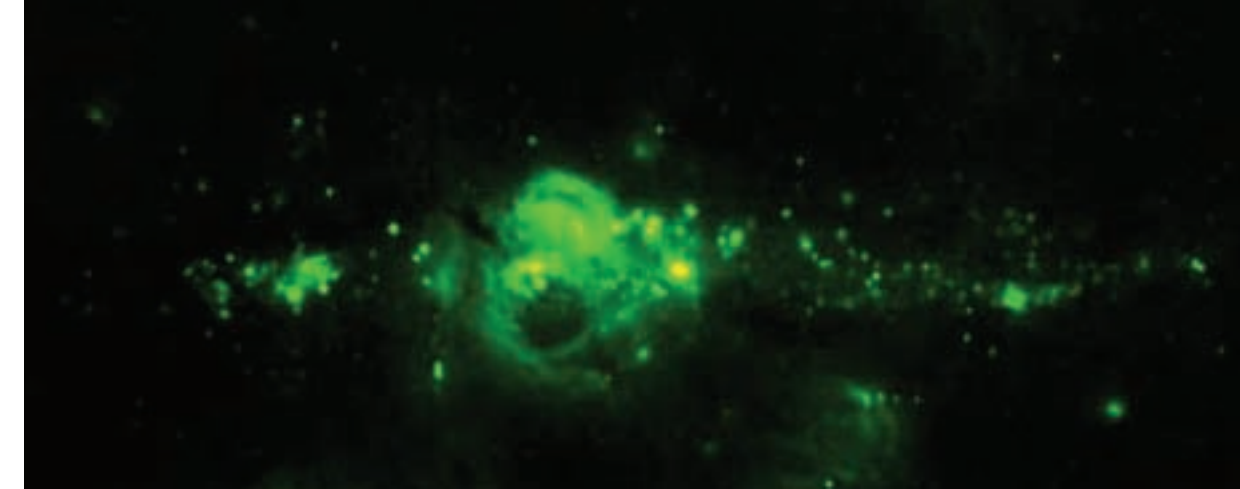


❖ Das „Overwhelmingly Large Telescope“ (OWL, links) ist der geplante Nachfolger des „Very Large Telescope“ (VLT, rechts). Das OWL ist ein geplantes 100m-Teleskop der European Southern Observatory (ESO). Baubeginn: Möglicherweise in 15 Jahren. (Bilder: ESO)



## OWL

Die „Eule“ ist ein Nachfolger des VLT, das die ESO derzeit betreibt. OWL soll mit einer „adaptiven Optik“ ausgestattet werden, wie sie Deutsche Forscher bereits in ähnlicher Weise für das VLT entwickelt haben. Solche Optiken „dellen“ Teleskop-Spiegel an vielen Stellen um einige Mikrometer ein und können so Bildstörungen durch die Erdatmosphäre ausgleichen.



Ein sehr massives Schwarzes Loch im Zentrum unserer Milchstraße. Mehr als zweitausend Röntgenquellen wurden hier registriert – mehr als in allen anderen Regionen unseres Universums. (Bild: NASA/CXC/MIT/F. K. Baganoff et al)

jeder Quasar ein Schwarzes Loch mit einigen zehn oder hundert Millionen Sonnenmassen enthält. Erstaunlicherweise sind es oft genau diese dunklen Zentren, die Quasare für Astronomen sichtbar werden lässt. Denn in ihrem gefräßigen Inneren verschwindet nicht nur Materie: Die beschleunigten Teilchen in der Nähe von Schwarzen Löchern strahlen auch Röntgenlicht ab und das **Schwarze Loch** heizt die Umgebung durch Rotations- und magnetische

Energie auf. Durch solche Mechanismen setzt das Schwarze Loch bis zu zehntausend Mal mehr Energie frei als alle Sterne der Milchstraße zusammen, und das allein in einem Bereich von der Größe unseres Planetensystems. So konnten Astrophysiker beispielsweise mit dem in Deutschland entwickelten Röntgenweltraumteleskop ROSAT herausfinden, dass die Röntgenhintergrundstrahlung im Weltall von unzähligen Quasaren aus der Frühzeit des Universums stammt. Eine solch bedeutende Rolle hätte man den Galaxie-Kernen vor einigen Jahren noch gar nicht zugetraut.

### // HEUS

Zur genaueren Untersuchung der Röntgenquellen des Alls plant die European Space Agency (ESA) den Röntgensatellit xeus. Ein Roboter soll auf der Internationalen Raumstation ISS dessen Spiegelsystem mit zehn Metern Durchmesser und 50 Metern Brennweite zusammenbauen.



xeus, der Röntgensatellit, soll von Robotern im All zusammengebaut werden. (Bild: ESA)

Damit wird xeus dann die Röntgenstrahlung **junger Quasare** und der zugehörigen (vermutlich ebenso jungen) Galaxien ins Röntgenauge fassen. An ihnen will man studieren, wie unsere eigene Milchstraße entstanden ist. Bei der Suche nach solchen Objekten gelang der entscheidende Durchbruch in den letzten fünf Jahren durch die Kombination des 10m-Keck-Teleskops auf dem Mauna Kea in Hawaii und des Hubble-Weltraumteleskops. xeus wird diese Entwicklung fortsetzen.

### // ALMA

Junge Galaxien soll auch das geplante Radioteleskop ALMA aufstöbern: Das „Atacama Large Millimeter Array“ in der chilenischen Atacama-Hochwüste ist das größte erdgebundene Vorhaben, das amerikanische und europäische Astrophysiker derzeit weltweit in den Schubladen haben. ALMA ist ein Verbund aus 64 Antennen mit je 12 Metern Durchmesser.

### BLICK IN DIE VERGANGENHEIT

INFO?

Wenn wir ferne Objekte im Universum beobachten, dann blicken wir zugleich in die Vergangenheit des Universums. Man fand schon Quasare in einer Phase, als das Universum weniger als eine Milliarde Jahre alt war. Von dort brauchte das Licht rund zehn Milliarden Jahre bis zur Erde. Der fernste Blick ins Universum reicht fast bis zum Urknall, 13,7 Milliarden Jahre zurück.

Diese nehmen synchron Strahlungsquellen im All ins Visier, und zwar im Bereich jenseits der Wärmestrahlung (Submillimeter- und Millimeterwellen). Solche Strahlung durchdringt auch dunkle Gas- und interstellare Staubwolken und eröffnet so den Blick auf die dahinter entstehenden Sterne und Planetensysteme.

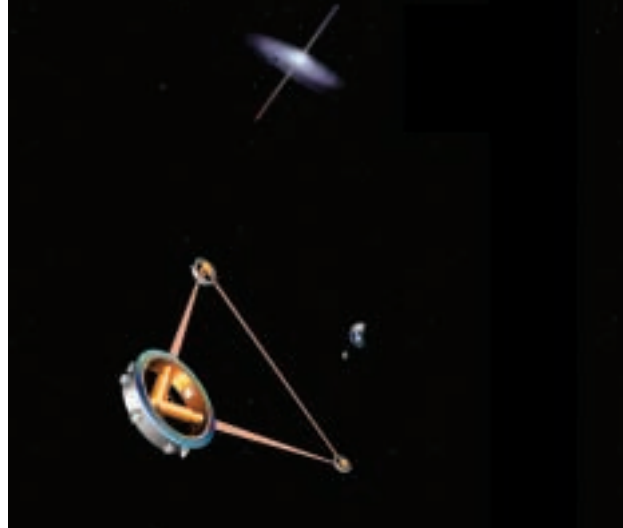
Durch das Zusammenschalten der Antennen wirkt ALMA wie ein einziges großes Radioteleskop mit einer Empfangsfläche größer als ein Fußballfeld. Das macht ALMA zehn bis 30 Mal empfindlicher als bestehende Anlagen.

Das Zentrum unserer Milchstraße in zwei verschiedenen Strahlungsbereichen: Oben im Infraroten, unten im Radiobereich. (Bild: NASA/UMASS/D. Wang et al.)

» DER ZUFALL SPIELT IN DER ENTSTEHUNG DES UNIVERSUMS EINE ENTSCHEIDENDE ROLLE. «

Dadurch können Astronomen die Verteilung und Bewegungen der Staub- und Gasmassen in jungen Galaxien untersuchen – und ihre Rolle bei der Entstehung und Entwicklung von Galaxien. ALMA soll auch sehr schwach leuchtende neue Objekte und Objekte in größerer Entfernung entdecken.

❖ LISA: Das Satelliten-Trio soll Gravitationswellen im Weltall nachweisen. (Bild: JPL NASA)



## // LISA

Viel länger als die Wellenlängen, die ALMA beobachtet – nämlich einige hundert bis tausend Kilometer – sind dagegen die der Gravitationswellen, die Albert Einstein schon 1916 vorgeschagt hat. Physiker versuchen diese Wellen mit dem Experiment „GEO600“ seit 2001 bei Hannover nachzuweisen, in internationaler Zusammenarbeit mit dem amerikanischen LIGO- und dem italienischen VIRGO-Experiment. Einen ähnlichen Versuch wollen NASA und ESA im Weltraum starten, allerdings mit viel längeren Lichtwegen. Das Satelliten-Trio LISA (Laser

Wenn große Massen stark beschleunigt werden, dann senden sie GRAVITATIONSWELLEN aus. Ähnlich wie bei einem Stein, der in einen See geworfen wird, breiten sich diese Wellen dann im ganzen All mit Lichtgeschwindigkeit aus und verformen dabei den Raum kurzzeitig.

Interferometer for Space Application) soll ein Dreieck aus Laserstrahlen mit fünf Millionen Kilometern Kantenlänge bilden. Damit kann man, anders als mit irdischen Gravitationswellendetektoren, auch nachweisen, wenn sehr schwere Schwarzer Löcher in den Zentren von Galaxien verschmelzen.

## // DUNKLE MATERIE UND DUNKLE ENERGIE

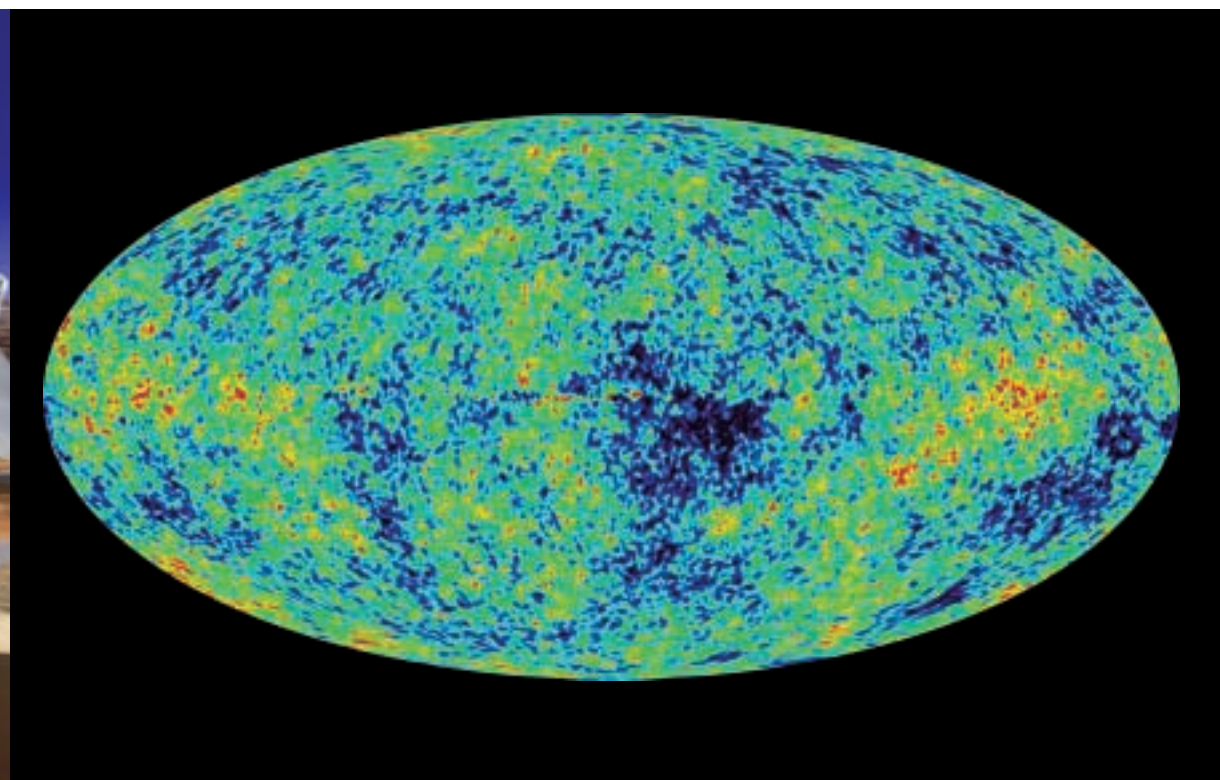
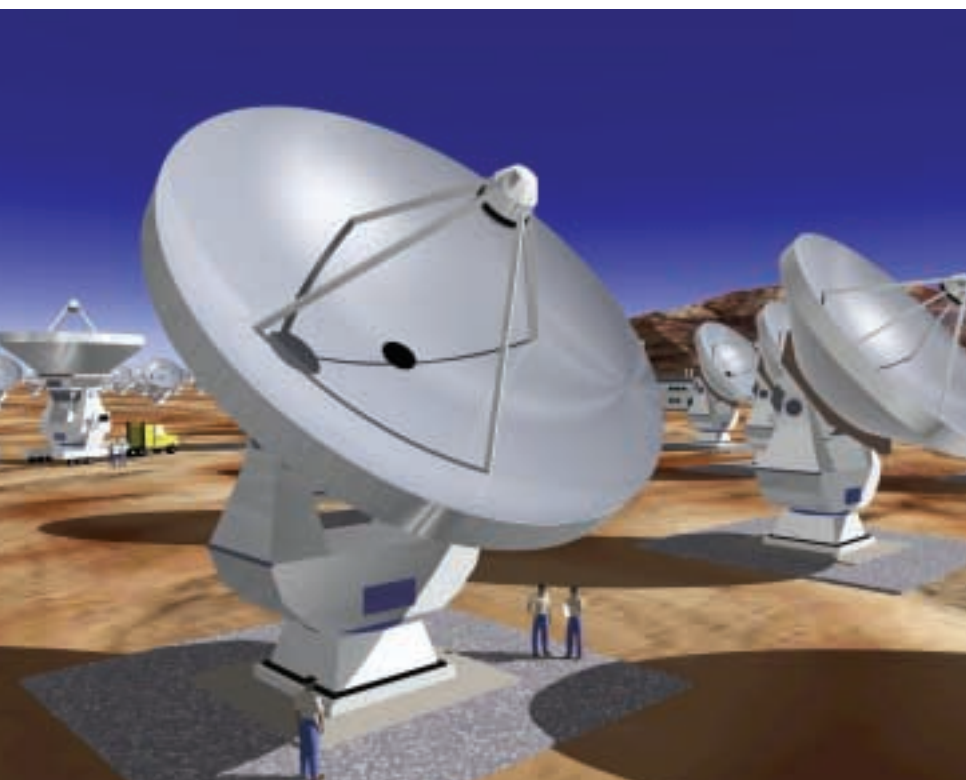
Die wohl rätselhafteste Komponente der Kosmologie aber bereitet den Physikern noch viel Kopfzerbrechen: Die Dunkle Materie. Sie lässt sich nicht durch Emission oder Absorption von Strahlung nachweisen, macht sich aber durch ihre Schwerkraftwirkung bemerkbar. Die „nor-

male“, so genannte baryonische Materie, aus der alle sichtbaren Objekte bestehen, macht nur wenige Prozent der Materie im Universum aus. Der Rest ist unsichtbar: Vermutlich enthält das Universum 96 Prozent Dunkle Materie und Dunkle Energie. Nicht zu sehen – aber keineswegs ohne Einfluss: Man geht davon aus, dass die Dunkle Materie im frühen Universum die ersten Verdichtungen bildete. In ihren Schwerkraftfeldern bildet sich dann die normale Materie und kondensierte zu Galaxien.

Woraus die Dunkle Materie besteht, ist jedoch noch weitgehend unklar. Theoretiker glauben an eine bislang unbekannte Klasse kleinster Partikel. Elementarteilchenphysiker entwickeln daher derzeit Modelle, um die Natur der Dunklen Materie zu klären. Und lenken so den Blick vom All zurück auf die Welt der kleinsten Teilchen – das Universum der Quarks und Leptonen.

❖ Durchforstet man das Universum im Bereich der Mikrowellenstrahlung, dann wirft man einen Blick in die Jugendzeit des Alls: Gelb sind die Regionen, in denen sich das Urgas verdichtete. Daraus entstanden später Galaxien. ALMA wird helfen, diese großteils noch unverstandenen Prozesse besser zu verstehen. (Bild: NASA)

❖ ALMA, das Radioteleskop. Die Empfangsfläche der Antennen ist insgesamt größer als ein Fußballfeld. (Bild: eso)



# IMPRESSUM

## HERAUSGEBER

Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (DPG)

## WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT

Prof. Dr. Helmut Dosch  
Prof. Dr. Hartmut Fieß  
Prof. Dr. Gregor E. Morfill  
Prof. Dr. Roland Sauerbrey (Vorsitzender)  
Prof. Dr. Andreas Schäfer  
Prof. Dr. Eberhard Umbach  
Prof. Dr. Dietrich Wegener

## TEXTE, REDAKTION & GESTALTUNG

iserundschmidt  
Kreativagentur für PublicRelations GmbH  
Bad Honnef – Berlin

## INFORMATIONEN ZUM INHALT

Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.  
Pressestelle  
Hauptstraße 20a  
53604 Bad Honnef  
Tel. (0 22 24) 95 195 - 18  
Fax (0 22 24) 95 195 - 19  
presse@dpg-physik.de

GEFÖRDERT VOM

