



2012
highlights der **physik**

Rätsel der Materie

Wissenschaftsmagazin

Rätsel der Materie



IMPRESSUM

HERAUSGEBER

Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Deutsche Physikalische
Gesellschaft e. V. (DPG)

AUTOREN

Roland Wengenmayr
Prof. Dr. Eberhard F. Wassermann

INFORMATIONEN ZUM INHALT

Medienbüro „Highlights der Physik“
c/o Iserundschmidt GmbH
Bonner Talweg 8
53113 Bonn
Tel. (0228) 55 525 - 18
Fax (0228) 55 525 - 19
ius.pr@dpg-physik.de

KONZEPT, LAYOUT UND REALISIERUNG

Iserundschmidt
Kreativagentur für PublicRelations GmbH
Bonn
(Verantwortlich: Timo Meyer,
Marleen Schwalm, Jana Koliotassis)

September 2012





INHALT

- 4 Stoffe und Strukturen
- 12 Unter Beobachtung
- 18 Neues aus dem Forscherland

Stoffe und Strukturen

Steinzeit, Bronzezeit, Eisenzeit – Materialien kennzeichnen die Epochen unserer Entwicklungsgeschichte. Doch wie werden Archäologen später wohl die Epoche nennen, in der wir heute leben? Viele Dinge, die unseren Alltag revolutioniert haben, zum Beispiel Handys, enthalten eine Vielzahl von Hightech-Materialien mit erstaunlichen Eigenschaften. Und ständig kommen neue hinzu. Weil Physiker vor rund einem Jahrhundert den atomaren Aufbau der Materie entschlüsselten, ermöglichen heute vielfältige Materialien – ob Metalle, Keramiken, Gläser oder Polymere – mit maßgeschneiderten Eigenschaften neue Errungenschaften.

Das Atomium – Elementarzelle des Alpha-Eisens

Das wohl berühmteste Wahrzeichen Brüssels ist das [Atomium](#). Sein Erbauer, der Ingenieur André Waterkeyn, hatte es als Symbol für das Atomzeitalter erdacht. Es zeigt – rund zweihundertmilliardenfach vergrößert – eine sogenannte Elementarzelle des Eisens, aufgebaut aus insgesamt neun Eisenatomen, acht an den Ecken und eins in der Mitte.

Elementarzellen sind der atomare Grundbaustein kristalliner Materialien, zu denen

auch das Eisen zählt. Würde man unter immer stärkerer Vergrößerung in einen Eisenblock hineinschauen, so stieße man irgendwann auf eine regelmäßige Struktur kleinster Einheiten – die Elementarzellen. Wie winzig diese Strukturen sind, kann man sich anhand des Atomiums klar machen: Sein gigantischer Würfel steht auf der unteren Spitze, und zur Kugel an der oberen Spitze muss man mit dem Fahrstuhl 102 Meter hinauffahren. In einer atomaren Elementarzelle des Eisens hätte man dabei nur die winzige Strecke von 0,49 Nanometern zurückgelegt, also 0,000.000.000.49 Meter. Doch woher weiß man das so genau?

Den Grundstein zur Vermessung der Kristallstruktur legte Wilhelm Conrad Röntgen 1895 mit seiner Entdeckung der Röntgenstrahlen, für die er 1901 den ersten Nobelpreis für Physik erhielt. Elf Jahre später konnte [Max von Laue](#) zeigen, dass Röntgenstrahlen elektromagnetische Wellen sind mit extrem kurzen Wellenlängen, sehr viel kürzer als beim sichtbaren Licht und etwa so groß wie die Abstände in atomaren Elementarzellen. Da Wellen am stärksten von Objekten beeinflusst werden, deren Maße in etwa der Wellenlänge entsprechen, machte das die Röntgenstrahlen zur perfekten Messsonde für atomare Strukturen.

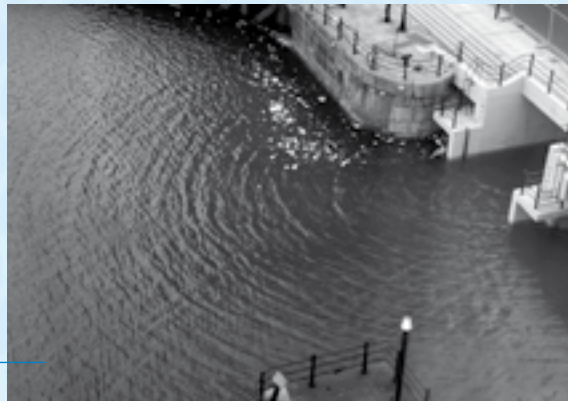
Treffen Wellen auf passende Hindernisse, dann kommt es zum Phänomen der Beugung, bei dem die Wellen auch in Bereiche vordringen können, die eigentlich vom Hindernis abgeschattet werden. [Wasserwellen zeigen dieses Verhalten](#) z.B. an engen Hafeneinfahrten. Sind die Hindernisse regelmäßig angeordnet, dann werden die

► Von Laues Beugungsmuster auf einer Sonderbriefmarke von 1979.

▼ Max von Laue (Bild: Bundesarchiv, Bild 183-U0205-502 / Foto: o. Ang. / 1929)



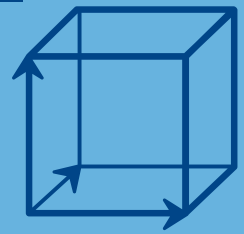
◀ Das Atomium in Brüssel. Entworfen wurde das gewaltige Eisenkristallmodell für die EXPO '58, die erste Weltausstellung nach dem 2. Weltkrieg. (Bild: © www.atomium.de – SABAM 2011 - Alexandre LAURENT (AERIAL))



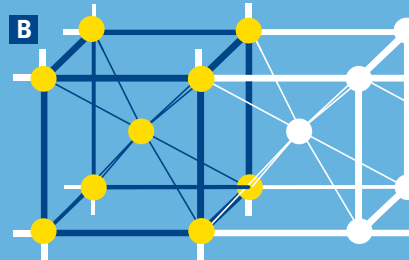
▲ Bogenförmige Wasserwellen entstehen durch Überlagerung von Wellen hinter einem Hindernis. (Bild: Andrew Hall)

► Durch drei Vektoren aufgespannte Elementarzelle [A] sowie drei typische Gitterstrukturen: kubisch-raumzentriert wie beim Alpha-Eisen [B], kubisch-flächenzentriert wie beim Gamma-Eisen [C] und hexagonal wie beim Epsilon-Eisen [D]. Am Gitter [B] ist einmal exemplarisch gezeigt, wie die einzelnen Zellen als periodisches Raumgitter in Kristall angeordnet sind. (Infografik: Timo Meyer, Jana Koliotassis)

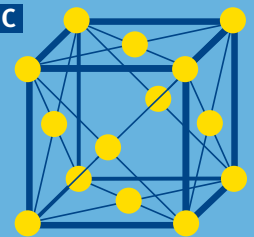
A



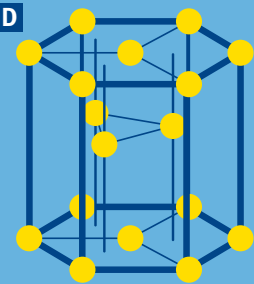
B



C



D



Wellen in bestimmten Richtungen verstärkt und in anderen Richtungen ausgelöscht – ein charakteristisches Interferenzmuster entsteht, aus dem man den Abstand der Hindernisse ermitteln kann, wenn man die Wellenlänge kennt. Und genau das machten sich Walter Friedrich und Paul Knipping zunutze. Sie ließen auf Anregung von Max von Laue Röntgenstrahlen auf einen großen Einkristall aus Zinksulfid fallen und fanden auf einer dahinter angebrachten Fotoplatte ein regelmäßiges Muster aus schwarzen Punkten, den „Reflexen“. Diese entstehen durch Überlagerung aller vom Kristall zurück reflektierten Röntgenwellen, bei denen Wellenberg auf Wellenberg trifft. An den Stellen, an denen Wellenberg auf Wellental trafen, löschten sich die Intensitäten aus – der Schirm blieb hier unbelichtet.

Von Laue konnte aus dem entstandenen [Punktmuster](#) ausrechnen, wie die Atome im dreidimensionalen Gitter einer Elementarzelle des Zinksulfid-Kristalls angeordnet sein müssen.

Dafür erhielt er 1914 den Nobelpreis für Physik. Mit dem Laue-Verfahren werden noch heute die Abmessungen (Gitterkonstante) und die geometrische Anordnung der Atome in den Elementarzellen unbekannter Materie bestimmt.

Die vielen Gesichter des Eisens

Ob als Hauptbestandteil von Stahl in Form eines Autokotflügels oder einer Eisenbahnschiene, oder milliardenfach vergrößert als Atomium – Eisen begegnet uns überall. Allerdings ist die Alpha-Eisen genannte Variante – wie beim Atomium – nicht die einzig mögliche Anordnung der Eisenatome. Eisen hat mehrere Gesichter. Erhitzt man Eisen auf mehr als 911°C, wandelt es in eine andere stabile Struktur, Gamma-Eisen, um. Dessen Elementarzelle ist auch würfelförmig, weist jedoch eine sogenannte [kubisch-flächenzentrierte](#)

Struktur auf. Diese besitzt zwar auch, genau wie die „kubisch-raumzentrierte“ des Alpha-Eisens, acht Atome an den Würfel-ecken, jedoch statt eines mittigen Atoms je ein Eisenatom in der Mitte der Würfel-flächen. Diese Struktur ist im Periodensystem der Elemente weit verbreitet. Kupfer, Silber, Gold, auch Aluminium kristallisieren in dieser Form.

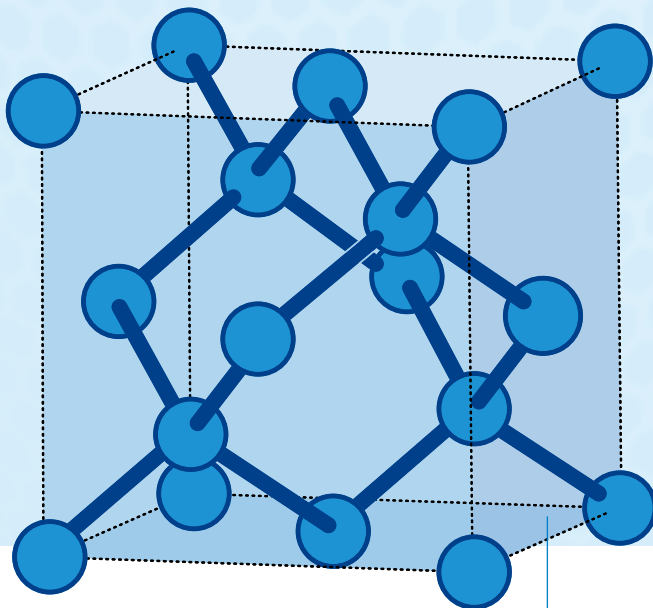
Die unterschiedliche Kristallstruktur von Alpha- und Gamma-Eisen spiegelt sich auch in ihren physikalischen Eigenschaften wieder. Alpha-Eisen ist relativ weich und reagiert leicht mit Sauerstoff zu Eisenoxid, also Rost. Außerdem ist es ferromagnetisch, wird also von Magneten angezogen. Gamma-Eisen hingegen ist weniger anfällig gegen Korrosion, härter und nicht ferromagnetisch. Seine kubisch-flächenzentrierte Form lässt sich statt durch Temperaturerhöhung auch durch Beigabe anderer Elemente wie Nickel oder Kohlenstoff erzeugen; dies ist die physikalische



◀ Schneide eines Brieföffners aus Damaszenerstahl. Das Material besteht aus insgesamt 288 Lagen, bei denen sich harte und weiche Stahlkomponenten abwechseln. (Bild: Heiko Voss Metallgestaltung)

▼ Man muss das Eisen schmieden, solange es heiß ist. Die Anfänge der Schmiedekunst reichen zurück bis ca. 6000 v. Chr. (Bild: Jeff Kubina unter cc-by-sa)

▼ Diamant-Kristallgitter (Grafik: ius)



6

Basis zur Herstellung von Stählen mit maßgeschneiderten und gegenüber Alpha-Eisen viel robusteren Eigenschaften.

Bei allen historischen Methoden der Eisengewinnung aus Erz und Holzkohle entstand immer – zunächst unbeabsichtigt – Eisen mit einem beträchtlichen Gehalt an Kohlenstoff. Und die Schmiede der Antike wussten, wie man daraus elastische Schwerter mit scharfer Klinge schmiedet. Bei der schnellen Abschreckung der rot glühenden Schwerter gaben sie ihnen eine neue und besonders harte Struktur, den Martensit. Jedes Samuraischwert, jede Messerklinge und auch die schon von den Kreuzrittern gefürchteten [Damaszener Klingen](#) sind martensitisch gehärtet.

Alpha- und Gamma-Eisen sind jedoch nur zwei mögliche Eisenarten. Es gibt noch weitere Kristallvarianten, z.B. das Epsilon-Eisen. Seine sechseckige (hexagonale) Struktur ist unter normalem Druck nicht

stabil und existiert erst bei Drücken und Temperaturen, wie sie im Innersten der Erde erreicht werden. In seiner hexagonalen Elementarzelle bilden sieben Atome die Basisfläche, in den Senken zwischen ihnen liegen in der nächsthöheren Ebene drei Atome, darüber formen wieder sieben Atome die Deckfläche.

Eisen hat also viele Gesichter. In der Physik heißt das „polymorph“. Der physikalische Grund für diese Vielfalt wird im Detail von Theoretikern noch diskutiert. Sicher ist allerdings: Verantwortlich dafür ist der Magnetismus des Eisens, und für den sorgen die Elektronen. Auch sie sind übrigens im Brüsseler Atomium verewigt: als Verbindungsrohre zwischen den Kugeln.

Alleskönner Kohlenstoff

Polymorphie ist nicht nur dem Eisen vorbehalten. Auch das Element Kohlenstoff,

Grundbaustein aller organischen Verbindungen und damit allen Lebens auf der Erde, kann in ganz unterschiedlichen Erscheinungsformen auftreten. Die wohl prominenteste unter ihnen schmückt schon seit Jahrtausenden gekrönte Häupter, in neuerer Zeit auch [Bohrkronen](#) und Glasschneider: Diamanten. Sie gehören zu den seltensten, teuersten und härtesten Materialien der Welt. Dabei bestehen sie nur aus reinem Kohlenstoff. Das was Diamanten so besonders macht, ist ihre Kristallstruktur. Beim [Diamantgitter](#) besteht eine Elementarzelle aus zwei ineinander gestellten kubisch-flächenzentrierten Gittern, die schräg gegeneinander verschoben sind.

Doch warum genau ist Diamant so hart? Warum ist er durchsichtig, ganz im Gegensatz zur ebenfalls aus Kohlenstoff bestehenden Kohle? Es sind die Elektronen, die diese Eigenschaften bestimmen. Jedes Kohlenstoffatom nutzt die vier Elektronen



◀ Diamanten kann man sich nicht nur an den Finger stecken, sondern dank ihrer Härte auch handwerklich nutzen. Dieser 40mm-Bohrkopf ist mit ca. 3700 synthetischen Diamantkörnern bestückt, die zusammen 0,4 Gramm, also 2,0 bis 2,2 Karat schwer sind. Industrielle Verfahren zur Herstellung von Diamanten basieren meist auf der Umwandlung von Graphit in Diamant bei extrem hohen Drücken von ca. 1400 bar und Temperaturen von bis zu 1400°C. (Foto: Bosch)

► Ein besonders großes Diamantenexemplar hält Minenbetreiber Johan Dippenaar hier in Händen: den 507 Karat (etwas mehr als 100 Gramm) schweren und 2009 in Südafrika gefundenen Rohdiamanten „Cullinan Heritage“. (Bild: © Petra Diamonds)



in seiner äußeren Schale zur atomaren Bindung, streckt also vier chemische Bindungsarme zu seinen vier Nachbaratomen aus. Der Winkel von 109,5 Grad zwischen ihnen sorgt dafür, dass sie alle Raumrichtungen gleich gut abdecken. Es sind starke Arme beim Diamant, die sich nicht recken oder knicken lassen und im Vakuum selbst bei 3500°C nicht nachgeben. Die Gitterstruktur bedingt auch, dass Diamant hervorragend Wärme leitet. Juweliere prüfen die Echtheit der glitzernen Ware deshalb nicht nur mit den Zähnen, sondern auch mit einem kleinen Wärmeleitmessgerät. So hervorragend er sich als Wärmeleiter macht, als Leiter für elektrischen Strom ist er gänzlich ungeeignet. Es fehlen die dafür notwendigen freien Ladungsträger, da im Diamant alle Elektronen gebunden sind. Das macht ihn zum perfekten elektrischen Isolator.

Gleicher Grundstoff, vollkommen anderes Erscheinungsbild – auch Graphit besteht

aus Kohlenstoff, aber im Vergleich zum Diamant erscheint er unspektakulär. Dabei sind die Unterschiede zwischen einem der härtesten und einem der weichsten Stoffe auf atomarer Ebene winzig. Im Graphitgitter besitzt jedes Kohlenstoffatom nur noch drei Bindungsarme in einer Ebene zu seinen nächsten Nachbarn. Das ergibt eine zweidimensionale hexagonale Schichtstruktur, Sechseck an Sechseck wie in einer Bienenwabe. Zwischen den Ebenen wirkt nur eine schwache Bindungskraft, die Van-der-Waals-Kraft. Da sie zwischen den Ebenen mehr als hundert Mal schwächer als innerhalb der Wabenebenen ist, lassen sich die Kohlenstofflagen des Graphits leicht gegeneinander verschieben. Genau das passiert, wenn man mit einem Bleistift auf Papier schreibt. Die Schichten gleiten aneinander entlang und bleiben als Abrieb am Papier hängen. Daher hat Graphit auch seinen Namen, abgeleitet vom altgriechischen Wort „gráphein“ für „schreiben“. Dass der Bleistift trotzdem

INFO

Hightechprodukt Getränkedose

Mit „Yes, we can“ hätte Barack Obama auch die „can“, also die Getränkedose meinen können. Zum einen leeren seine Landsleute jährlich 130 Milliarden der Dosen, zum anderen wurden sie sogar in den USA erfunden.

Ursprünglich musste man den Aludeckel des Gefäßes aus verlötetem Eisenblech mit dem „Church key“, einem mitgelieferten Dosenöffner, aufhebeln. 1962 kam der Ringöffner mit Aufreißlasche auf den Markt. Er wurde jedoch schnell zum Umweltproblem. Wildtiere verschluckten ihn; Strandbesucher verletzten sich an den Füßen. 1978 wurde der „Stay-on-Tab“ erfunden, der nach dem Öffnen an der Dose bleibt. Neue Erkenntnisse über die mikroskopischen Prozesse beim Umformen von Metallen ermöglichten diese Technik. In den Deckelroling presst man eine erhabene ovale Zone, in der sich das Aluminium verfestigt, und erzeugt dann durch Prägeritzen eine ringförmige Versprödungslinie, längs der sich mit dem festgenieteten Aluringhebel die Dose aufreißen lässt. Trotzdem muss die Dose 6 bar Überdruck standhalten und man darf sich an der Bruchkante nicht schneiden – wahre High-Tech-Anforderungen.

Auch die Dosen selbst haben es technisch „in sich“. Sie werden mit Wandstärken so dünn wie ein menschliches Haar (0,097 mm) in 15 Arbeitsschritten durch „Tiefziehen“ aus einer Aluminiumscheibe gepresst. Geringe Zusätze von Mangan und Magnesium verbessern die Fließeigenschaften von Aluminium und vermindern gleichzeitig die „Umformungstextur“. Auch die Wölbungen von Boden und Deckel sind bis ins Detail so optimiert, dass sich bei steigendem Druck die Dosenflüssigkeit in ein Totvolumen ausdehnen kann. Eigentlich schade, dass wir diese Hightech-Produkte gedankenlos wegwerfen.

(Oberes Bild: Marcos André unter cc-by-sa)



nicht Graphitstift heißt, liegt an einer uralten Verwechslung. Das für die Minen verwendete Graphit hielt man lange Zeit für das Bleierz Galenit.

Das superflache Wundermaterial

Im Jahr 2004 stellten die beiden russischstämmigen Physiker Andre Geim und Konstantin Novoselov in einem so simplen wie genialen Versuch ein ganz neues Material aus Graphit her. Durch Aufdrücken eines Klebestreifens auf einen Graphitblock und anschließendes Abziehen erhielten sie eine dünne Graphitschicht auf dem Klebeband, die durch mehrfache Wiederholung der Prozedur mit jeweils einem frischen Klebeband Atomlage um Atomlage abgetragen wurde. So bleiben schließlich einzelne Lagen des Stoffes auf dem ursprünglichen Klebestreifen zurück, die man vom mehrlagigen Graphit im Mikroskop durch ihr Schil-

lern unterscheiden kann. Mit einer Dicke von nur einem einzigen Kohlenstoffatom ist dieses „Graphen“ das dünnste Material der Welt.

Eigentlich, so vermuteten Theoretiker, sollte Graphen gar nicht stabil sein. Den Nobelpreis bekamen Geim und Novoselov 2010 deshalb nicht nur für ihre Hartnäckigkeit, Graphen zu erzeugen, sondern auch für die Erforschung der verblüffenden Eigenschaften des Materials. Sie eröffneten ein ganz neues Forschungsgebiet. Die Kohlenstoffwabenfolie ist 125 Mal zugfester als Stahl. Auch ihre elektronischen Eigenschaften sind faszinierend. Mit technischen Kniffen kann man Graphen in einen Halbleiter umwandeln und so superdünne, extrem schnell schaltende Transistoren herstellen. Allerdings ist die Graphen-Elektronik noch reine Grundlagenforschung. Bis zur technischen Anwendung ist der Weg weit, weil das für eine Elektronik nötige fehlerfreie Graphen noch schwer herstellbar ist.

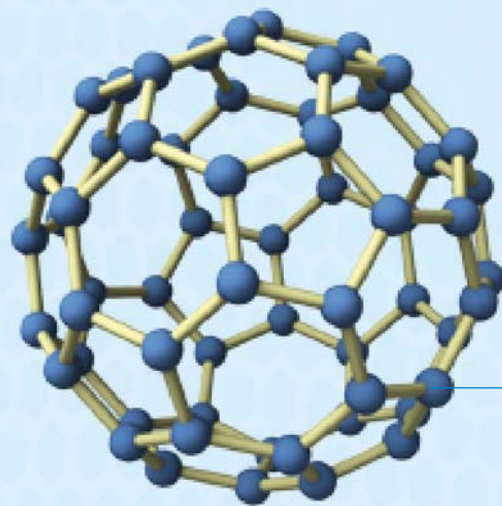
Fullerene und Nanoröhren

Graphen ähnelt in seinem Aussehen einem Maschendrahtzaun aus Kohlenstoffatomen. Und wie einen Maschendraht kann man das Material zu winzigen [Kohlenstoff-Nanoröhrchen](#) aufrollen. Auch doppelwandige Rollen und schräg gerollte Röhren sind denkbar. Das Erstaunliche: es gibt diese „allotropen“ Formen des Kohlenstoffs schon längst. Sie wurden viele Jahre vor dem Graphen entdeckt. 1991 fand der japanische Physiker Sumio Iijima sie in einer grauen Brühe aus aufgelöstem Ruß, den er aus einer starken Bogenentladungslampe gewonnen hatte.

Bereits sechs Jahre zuvor hatten die amerikanischen Chemiker Robert F. Curl, Harold W. Kroto und Richard E. Smalley „Nanofußbälle“ aus jeweils sechzig Kohlenstoffatomen entdeckt, im Prinzip Graphen in Kugelform. Das Trio taufte die



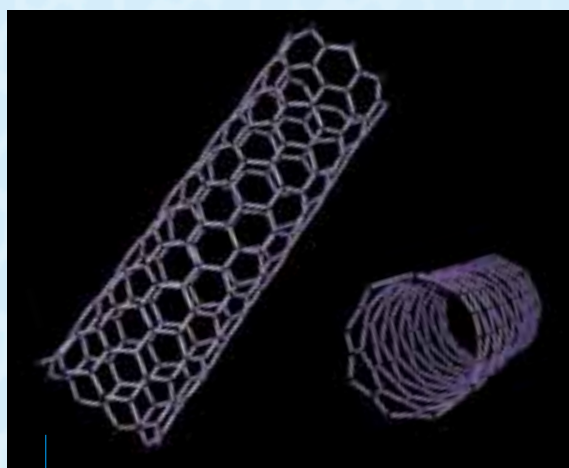
◀ Eine von Richard Buckminster Fullers geodätischen Kuppelkonstruktionen: das „Spaceship Earth“ im Herzen des Vergnügungsparks Epcot bei Orlando, Florida. (Bild: chensiyuan unter cc-by-sa)



▲ Modell eines aus 60 Kohlenstoffatomen zusammengesetzten Buckyballs (Bild: Rob Hooft unter cc-by-sa 3.0)

◀ Die Simulation zeigt aufgerollte Graphenflächen – die „Nanotubes“. (Bild: Swiss Nanoscience Institute)

◀ Graphen ist nicht der einzige Rekordhalter unter den Feststoffen. Hier eine kleine Auswahl an Wunderstoffen inklusive ihrer jeweiligen Spezialgebiete. (Infografik: Timo Meyer, Jana Koliotassis; Stand: August 2012)



Moleküle medienwirksam „Buckyballs“, da sie an die Kuppelentwürfe des amerikanischen Architekten Richard Buckminster Fuller erinnerten. Curl, Kroto und Smalley erhielten für die Entdeckung der Fullerene, wie Fußballmoleküle und Nanoröhrchen aus Kohlenstoff wissenschaftlich heißen, 1996 den Nobelpreis für Chemie. Zunächst sorgten die Buckyballs für die größte Aufmerksamkeit. Später jedoch rückten die nur einen Millionstel Millimeter dünnen Nanoröhrchen und ihre bemerkenswerten physikalischen Eigenschaften und deren mögliche Anwendungen in den Fokus. So machen sie beispielsweise Kunststoffe leitfähig und verbessern deren Steifigkeit und Festigkeit. Letzteres wird bereits bei der Herstellung verschiedener Sportartikel wie etwa Eishockey- und Baseballschläger genutzt. Große Einsatzchancen haben Nanotubes auch in Rotorblättern von Windkraftanlagen.

Kohlenstoff-Nanoröhrchen leiten zudem Wärme doppelt so gut wie Diamant. Und

dem elektrischen Strom setzen sie tausend Mal weniger Widerstand entgegen als Kupfer. Theoretisch könnte man durch ein Kabel aus Nanoröhrchen mit einem Quadratzentimeter Querschnitt einen elektrischen Strom mit einer Stärke von einer Milliarde Ampere schicken. Normale Metallkabel würden dabei einfach verdampfen.

Aber auch ihre Eignung als Wasserstoffspeicher, als Elektroden für Lithium-Ionen-Akkus, ultrafeine Filter oder Solarzellen wird erforscht. Es gibt eigentlich kaum ein Gebiet, wo die Superlative nicht zutreffen. Auf dem Markt allerdings findet man die Röhrchen bislang kaum. Dabei haben Menschen diesen Werkstoff unwissentlich schon vor 2000 Jahren zu ihrem Vorteil eingesetzt. Forscher haben entdeckt, dass der Damaszenerstahl seine Festigkeit letztendlich den Kohlenstoffnanoröhrchen verdankt: Die Schmiede hämmern sie beim Falten der Klingen in den Stahl ein. Vielleicht werden die Nano-

röhrchen tatsächlich ein Kohlenstoffzeitalter neuer Werkstoffe und Elektronik einläuten – noch ist das offen.

Geordnete Unordnung

1984 machte der israelische Physiker Daniel Shechtman eine merkwürdige Entdeckung. Als er mit der Laue-Methode eine Aluminium-Mangan-Legierung untersuchte, erhielt er ein Röntgen-Beugungsmuster mit fünfzähliger Symmetrie, das nur mit einer Elementarzelle aus zehn Flächen – einem Ikosaeder – erklärbar war. Ikosaeder kann man nämlich auf jeder der drei Raumachsen fünfmal um sich selbst drehen, und jedes Mal sehen sie so aus wie zuvor.

Einen Raum kann man durch Aneinanderfügen von Ikosaedern jedoch nicht lückenlos ausfüllen. Ikosaeder „funktionieren“ deswegen als Elementarzellen für



INFO

Auf Sand bauen ist schlau

Gut sechzig Prozent aller Rohmaterialien, die wir Menschen weltweit verarbeiten, bestehen aus einer besonderen Art ungeordneter Materie: granulare Materie. Sand ist der bekannteste Vertreter. Auch Puder, Mehl, Reis oder Kies sind Granulate. Granulare Materie besteht aus vielen kleinen, festen Partikeln wie Körnern oder Kugeln, die viel größer als Moleküle sind. Sie unterliegen damit nicht mehr den Gesetzen der Quantenwelt.

Granulare Materie kann wie eine Flüssigkeit rinnen. Auf der anderen Seite kann man ohne zu versinken über Sand laufen, über Wasser nicht. Vor allem die Reibungskraft zwischen den Sandkörnern bestimmt dieses Verhalten des Sands – aber nur, wenn er trocken ist. Sobald er nass ist, bekommt er völlig neue Eigenschaften, wie jedes Kind vom Sandburgenbauen weiß. Die Ölindustrie investiert sogar viele Millionen Euro in die Erforschung nasser granularer Materie. Bei der Förderung stößt sie oft auf Schichten, in denen sich Sand, Wasser und Öl mischen. Diese Granulate zeigen ein äußerst komplexes Verhalten, das wissenschaftlich noch nicht völlig verstanden ist.

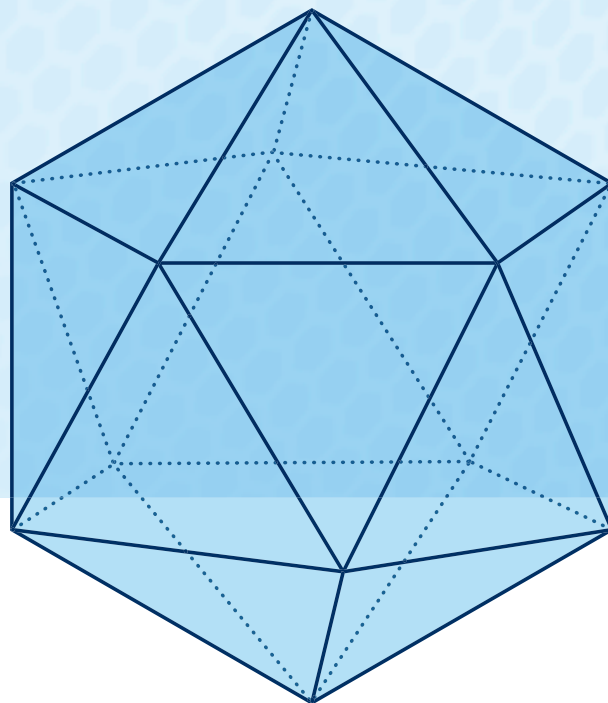
Auch andere wichtige Fragen, etwa wie Lawinen abgehen oder wie sich lose Schüttungen von Frachtgut an Bord schwankender Schiffe verhalten, kann man nur beantworten, wenn man die Physik granularer Materie besser versteht. Sandburgen sind also auch faszinierende Forschungsobjekte.

◀ Der für solche Riesensandburgen verwendete Spezi­alsand hat eine eckige Körnung, was die Burgen wesentlich stabiler macht. (Bild: © www.sculpturefestival.be)

▶ Girih-Kacheln an der Unterseite der Kuppel des Hafez-Mausoleums im iranischen Shiraz. Sie bestehen aus einem Satz von 5 Fliesen, die in der Legetechnik an die Musterung von Quasikristallen erinnern. (Bild: Pentocelo unter cc-by-sa)



▶ 12 Ecken, 30 Kanten und 20 Dreiecksflächen bilden ein Ikosaeder. (Grafik: ius)



den Aufbau von Kristallen nicht. Aus diesem Grund zweifelten die meisten Forscher anfangs an Shechtmans Entdeckung. Kleine Verzerrungen erlauben es jedoch, das Stapel-Problem zu lösen. Die „Elementarzellen“ sehen dann zwar nie gleich aus und es gibt keine wirkliche kristalline (Fern-)Ordnung mehr aus Grundbausteinen, die sich wiederholen. Aber es ergibt sich eine raumfüllende dreidimensionale Struktur, genannt Quasikristall. Die berühmten [Girih-Kacheln](#) an mittelalterlichen arabischen Moscheen sind nach solch einem System verlegt. Sie füllen eine Fläche lückenlos, wobei sich kein Muster wiederholt. 2011 bekam [Daniel Shechtman](#) für seine Entdeckung den Chemie-Nobelpreis.

Mit zunehmender Kenntnis über die atomare Struktur von Festkörpern zeigte sich,

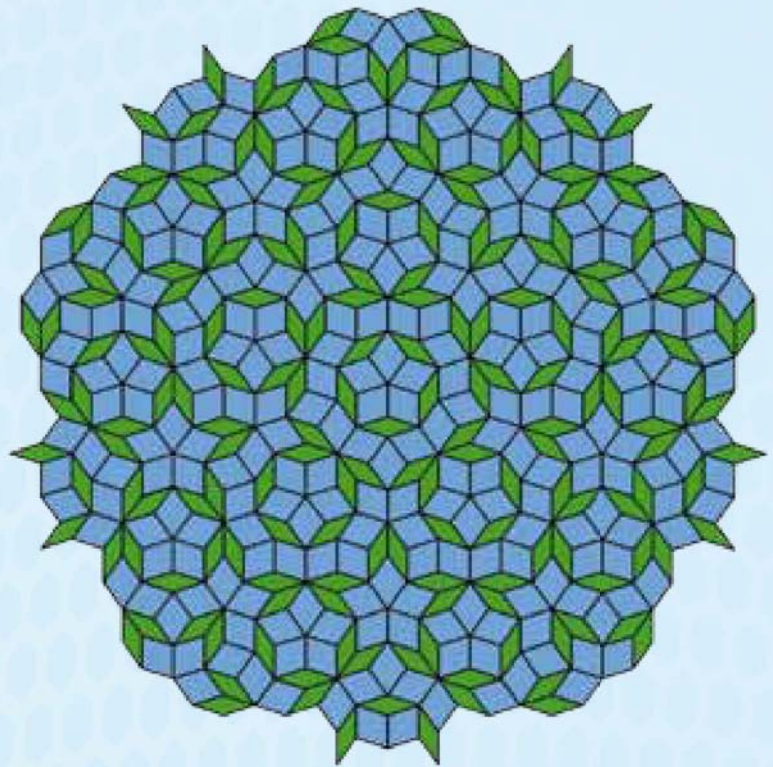
dass fünfzählige Quasikristalle gar nicht so selten sind. Sie sind zum Beispiel durch schnelles Abschrecken bestimmter Metalllegierungen herstellbar, denn dann haben die Atome keine Zeit, sich vor dem Erstarren in eine perfekte Ordnung zu begeben.

Das Ordnungsprinzip verschwindet ganz in einem Werkstoff, der so alt wie faszinierend ist: Glas. In Gläsern bilden die Atome ein ungeordnetes Netzwerk, das weder Wiederholung noch Symmetrie kennt. Man bezeichnet seine Struktur als amorph, was auf den altgriechischen Begriff „ohne Gestalt“ zurückgeht. Ganz richtig ist das allerdings nicht, denn Gläser besitzen, wie man heute weiß, eine Nahordnung.

Neben gewöhnlichem Kalk-Natron-Glas und Quarzglas, das für Brillen und Linsen



◀ Metallische Gläser kommen auch auf dem Golfplatz zum Einsatz. Ihre hochelastischen Eigenschaften – aufgenommene Energie wird nicht in Verformungsenergie umgewandelt, sondern wieder komplett abgegeben – machen sie zum perfekten Material für Golfschläger. (Bild: Caliban unter cc-by-sa)



◀ Der israelische Physiker und Chemie-nobelpreisträger Daniel Shechtman. (Bild: Technion - Israel Institute of Technology unter cc-by-sa)

▲ Penrose-Gitter: 2-dimensionale Anordnung eines Gitters mit fünfzähliger Symmetrie (Grafik: Inductiveload)



des alltäglichen Gebrauchs auch mit Zusätzen von Natrium- oder Kaliumoxid versehen ist, sind uns metallische Gläser weniger bekannt. Sie sind seit den 1960er Jahren in den Fokus der Forschung gerückt. In Göttingen wurden sie durch Aufdampfen von Legierungen auf extrem kalte Unterlagen bei -269°C erzeugt. Die industrielle Fertigung von dünnen, schnell abgeschreckten Bändern amorpher magnetischer Materialien begann 20 Jahre später in den 1980er Jahren. Die Haupteinsatzgebiete: Kerne für spezielle Transformatoren sowie Warensicherungsetiketten in Kaufhäusern.

In beiden Sorten Gläsern, sowohl in den Silikatgläsern als auch in den metallischen Gläsern, sorgt die atomare Unordnung für faszinierende Eigenschaften. Während ge-

ordnete Kristalle unter Stress entlang einer Ebene abscheren, gibt es solche atomaren Sollbruchstellen in Gläsern nicht. Keramische Gläser sind immer sehr hart und spröde und brechen plötzlich. Metallische Gläser hingegen sind hochelastisch und brechen schwer – was übrigens auch ihren Einsatz in den Kaufhäusern erklärt. In den kleinen Sicherheitsetiketten der Waren sind amorphe magnetische Legierungsstreifen eingebaut. Sie geben wie beim Sicherheitscheck auf dem Flughafen „Signal“, wenn man durch die Schranke geht. Die amorphen kleinen Streifen kann man beruhigt hin und her biegen. Ihre magnetischen Eigenschaften verändern sich dadurch nicht, ganz anders als bei den preiswerteren Etiketten aus normalen Metallen, die sicherheitshalber in dicken Plastikhüllen verpackt werden müssen.

Die Entschlüsselung des atomaren Aufbaus der Materie hat es Physikerinnen und Physikern erlaubt, aus dem Labor heraus neue Materialien zu entwickeln, die mit maßgeschneiderten Eigenschaften zum großen Teil fester Bestandteil unseres Alltags geworden sind. Wesentliche Erkenntnis war dabei, dass neben dem mikroskopischen Aufbau – ob kristallin oder amorph – insbesondere das Zusammenspiel mit den Elektronen im Festkörper die physikalischen Eigenschaften des Materials bestimmt.

Unter Beobachtung

Mikroben, Moleküle, Atome – erst mit der Erfindung des Lichtmikroskops begann unsere Reise in die Welt des Winzigen. Heute gibt es eine Vielfalt unterschiedlicher mikroskopischer Methoden. Manche nutzen Elektronen statt Licht, andere tasten gefühlvoll mit einer superfeinen Nadelspitze über eine Probenoberfläche, wieder andere nutzen Röntgenlicht oder Neutronenstrahlen. Sogar einzelne Atome und den Ablauf chemischer Reaktionen können wir damit heute direkt bewundern.

Pioniere gestern und heute

Kilometergroße Maschinen sind die modernen Pioniere der Reise ins Innere der Materie. Sie liefern ganz neue Einblicke in einen Teil der Welt, der sich unserer normalen Wahrnehmung durch seine Winzigkeit entzieht. Deutschland baut in den nächsten Jahren mit dem europäischen Röntgenlaser European XFEL bei DESY in Hamburg und der Beschleunigeranlage für Forschung mit Antiprotonen und Ionenstrahlung FAIR bei der GSI in Darmstadt zwei solcher Großgeräte, die, mit Fördergeldern des BMBF, dabei helfen sollen, die Rätsel der Materie zu entschlüsseln. Ihren Anfang nahm diese Reise im

17. Jahrhundert mit der Erfindung des Lichtmikroskops. Galileo Galilei kombinierte bereits 1609 zwei Linsen zu einem Mikroskop. Doch schlechte Schliffe führten zu so starken Linsenfehlern, dass man mit den frühen Mikroskopen nicht viel Neues entdecken konnte. Erst dem Niederländer [Antonie van Leeuwenhoek](#) gelang in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts das erste wirklich brauchbare Mikroskop, das nur eine einzige, nahezu perfekt geschliffene Linse mit millimeterkleinem Durchmesser enthielt.

Das moderne Lichtmikroskop existiert seit dem späten 19. Jahrhundert. Besonders wichtig für seine Entwicklung war der deut-

sche Physiker Ernst Abbe. Dieser stieß allerdings auch auf die ultimative Grenze der klassisch abbildenden Mikroskopie: Objekte, die kleiner als die halbe Wellenlänge des verwendeten Lichts sind, kann sie nicht sichtbar machen. Der Grund liegt in der Wellennatur des Lichts und zwar in den Beugungseffekten, die die Auflösung des sichtbaren Lichts auf 200 Nanometer begrenzen.

Abbilden mit Elektronen und Laserlicht

Den Durchbruch zur abbildenden Mikroskopie mit kürzeren Wellenlängen brachte erst die Quantenphysik in den 1920er Jahren. Entscheidend war die Erkenntnis von Louis de Broglie, dass alle Quantenteilchen auch Welleneigenschaften haben – und umgekehrt. 1929 erhielt er dafür den Nobelpreis für Physik. Die Wellenlänge eines Quantenobjekts – nach ihm „de Broglie-Wellenlänge“ genannt – ist dabei umgekehrt proportional zur Masse und

◀ Die Mikroskopie erlaubt beeindruckende Einsichten in die Nanowelt. Hier dargestellt ist eine regelmäßige Anordnung von zwölf Eisenatomen, aufgenommen mit einem Rastertunnelmikroskop. (Bild: Sebastian Loth/CFEL)

▶ Von Ernst Ruska gefertigter Nachbau des allerersten Elektronenmikroskops, das er zusammen mit Max Knoll in den 1930er Jahren entwickelt hatte. (Bild: J. Brew)

▼ Antonie van Leeuwenhoek circa 1680 auf einem Gemälde des Niederländers Jan Verkolje (I)



13

Geschwindigkeit des Teilchens. Das bedeutet, dass fliegende Elektronen extrem kurze Wellenlängen haben. Ihre Flugbahn kann man zudem durch elektromagnetische Felder verändern. Diese üben eine Kraft, die Lorentz-Kraft, auf die geladenen Teilchen aus. Auf diese Weise lässt sich ein Elektronenstrahl fokussieren, genau wie eine konvex gewölbte Glaslinse das mit Licht macht. Diese Technik steckte bereits im [ersten Elektronenmikroskop](#), das die beiden deutschen Elektroingenieure Ernst Ruska und Max Knoll 1931 konstruierten. Ruska erhielt dafür 1986 den Nobelpreis für Physik.

Das Urelektronenmikroskop von Ruska und Knoll war ein Durchstrahlungsmikroskop, auch Transmissionselektronenmikroskop, kurz TEM, genannt. Es durchstrahlt eine Probe mit Elektronen und erzeugt damit das Bild. Aufgebaut ist es wie ein auf dem Kopf stehendes Lichtmikroskop, bei dem statt einer Lampe eine

Elektronenkanone mithilfe einer glühenden Wolframdrahtspitze Elektronen erzeugt, die dann mittels Hochspannung beschleunigt werden. Im Mikroskop herrscht Vakuum, damit die Teilchen nicht durch Luftmoleküle abgebremst werden. Eine Magnetfeldlinse, die genau wie beim Lichtmikroskop Kondensorlinse heißt, fokussiert den Strahl und beleuchtet das Objekt. Die Elektronen durchdringen es und durchlaufen zwei weitere Magnetlinsen, Objektiv und Projektiv genannt. Das Bild betrachtet man am unteren Ende der Säule durch ein Fenster auf einem Leuchtschirm.

Zwei verschiedene Arten der Abbildung kann man mit diesen beiden Linsen erzeugen. Setzt man die Bildebene zwischen Objektiv und Projektiv, dann erhält man von einer kristallinen Probe ein Beugungsbild. Dieses Punktmuster ähnelt dem von Max von Laue entdeckten Röntgenbeugungsbild. Aus dem Muster lässt sich auf die atomare Struktur der

Probe zurückschließen. Schiebt man die Bildebene dagegen hinter das Projektiv und blendet die zur Seite gestreuten Elektronen mit einer Lochblende aus, dann erhält man statt eines zu interpretierenden Musters ein „echtes“ Mikroskopbild. Diese Bilder nimmt heute ein digitaler Bildsensor auf. Auch Elektronenmikroskope haben „Linsenfehler“. Mit ganz neuen, von Forschern in Jülich, Darmstadt und Heidelberg entwickelten Korrekturlinsen kann man heute Elektronenmikroskope bauen, die nicht nur einzelne Atome auflösen, sondern Strukturen, die hundert Mal kleiner als der Durchmesser eines Atoms sind. Damit können für die physikalischen Eigenschaften von Materialien entscheidende Größen direkt bestimmt werden.

Nach einem anderen Prinzip funktioniert das Rasterelektronenmikroskop (REM). Man scannt das zu vergrößernde Objekt mit einem sehr fein gebündelten Elektronenstrahl ab, der aus den obersten



INFO

Großgeräteforschung mit Neutronen

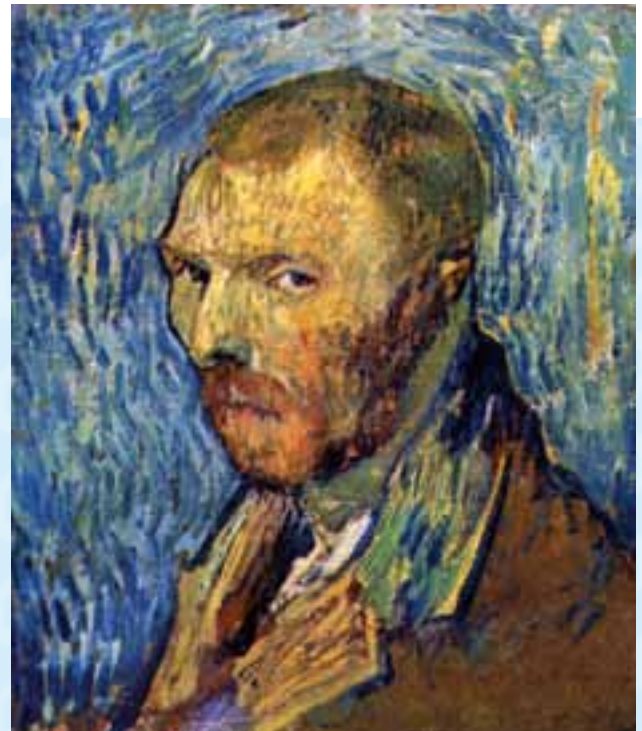
Die Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) in Garching bei München ist mit einer Nennleistung von 20 Megawatt der derzeit leistungstärkste deutsche Forschungsreaktor. Der FRM II produziert freie Neutronen mit niedriger Energie, sogenannte thermische Neutronen, die als Sonden in der Physik, Chemie, Biologie und den Materialwissenschaften eingesetzt werden. Wichtige Arbeitsgebiete am FRM II sind auch die extrem gleichmäßige Dotierung von Silizium für Hochleistungselektronik, die Herstellung von Radiopharmaka und die Direktbestrahlung oberflächen-naher Tumore mittels schneller Neutronen zur Krebsterapie.

Die Neutronenstreuung hat andere Stärken als die Röntgenstreuung. Neutronen sind elektrisch neutral und durchdringen vergleichsweise viel dickere Proben. Man kann also mit ihnen ins Innere metallischer Proben schauen. Thermische Neutronen haben Wellenlängen in der Größenordnung der Atomabstände und Bewegungsenergien in der Größe atomarer Schwingungsenergien. Das bedeutet, dass man sowohl die atomare Struktur als auch die Gitterdynamik, also die Bewegungen der Atome, sichtbar machen kann.

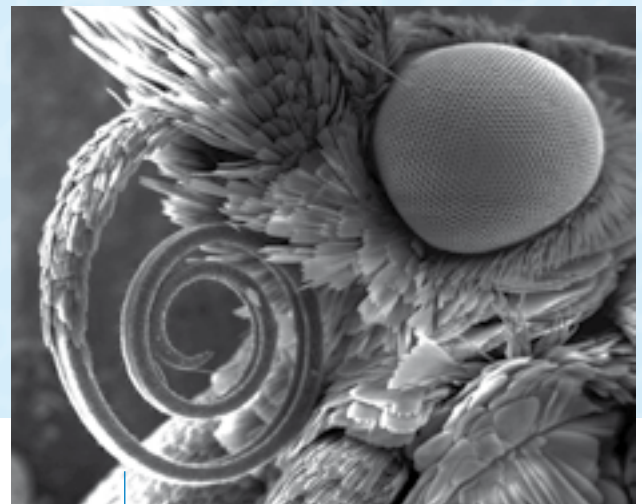
Ab dem Jahr 2019 soll im schwedischen Lund die Europäische Spallationsquelle ESS – die dann größte Neutronenquelle Europas – betrieben werden. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt im Rahmen der ESFRI Initiative das Engagement deutscher Forschungseinrichtungen mit 15 Millionen Euro (Gesamtkosten ca. 1,4 Mrd. Euro).

◀ Visualisierung der ESS
(Bild: ESS AB)

► Experten streiten über die Echtheit dieses Van Goghs. Dabei kann man heutzutage mit Elektronenmikroskopen die Materialzusammensetzung von Gemälden analysieren und damit individuelle Materialvorlieben und Maltechniken eines Künstlers identifizieren. Und die unterscheiden einen echten von einem falschen Van Gogh.



► Falter unter dem Elektronenmikroskop. Das Insekt wurde zuvor mit einer dünnen Goldschicht bedampft. Erst die leitende Hülle ermöglicht die Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop. (Bild: Dartmouth College Electron Microscope Facility)

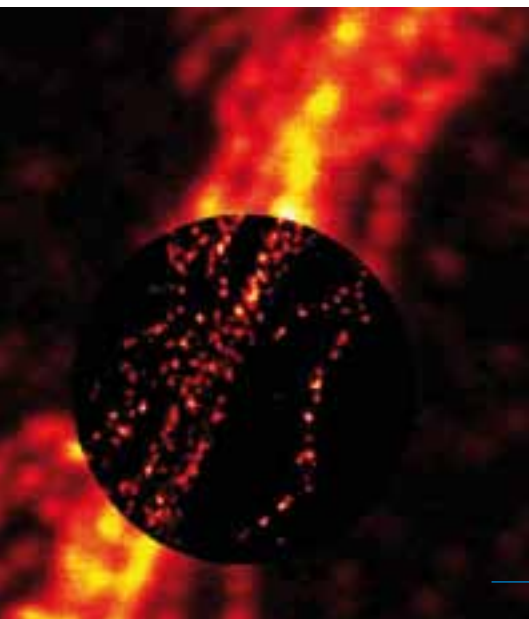


Schichten der Probenoberfläche niederenergetische Elektronen freisetzt. Diese fängt man in einem speziellen Detektor ein und errechnet am Schluss aus den aufgenommenen Zeilen ein Bild des Objekts. Da die Sekundärelektronen aus der Oberfläche des Objekts selbst stammen, entsteht ein extrem kontrastreiches, tiefscharfes Bild, auf dem die Probe wie aus Richtung des Detektors beleuchtet zu sein scheint. Ist das zu untersuchende Objekt nicht metallisch, zum Beispiel das Auge einer Fliege, so muss man die Fliege vorher mit einer dünnen Goldschicht bedampfen, sie metallisieren.

Die Elektronen können zudem zusätzliche Informationen über das Objekt liefern. Werden sie von dessen Oberfläche reflektiert, dann erzeugen sie ein herkömmliches Bild, so wie Licht, das von einem Gegenstand zurückgeworfen wird. Mit höherer Energie können die Elektronen aber auch Prozesse in den Elektronenschalen

der getroffenen Atome anstoßen. Zum Beispiel können sie die Atome zum Ausenden von Röntgenstrahlung oder von anderen Elektronen anregen. Dabei verrät sich jedes chemische Element durch einen charakteristischen „Fingerabdruck“. Elektronenmikroskope können so Bilder mit Informationen über die chemische Zusammensetzung des Objekts erzeugen.

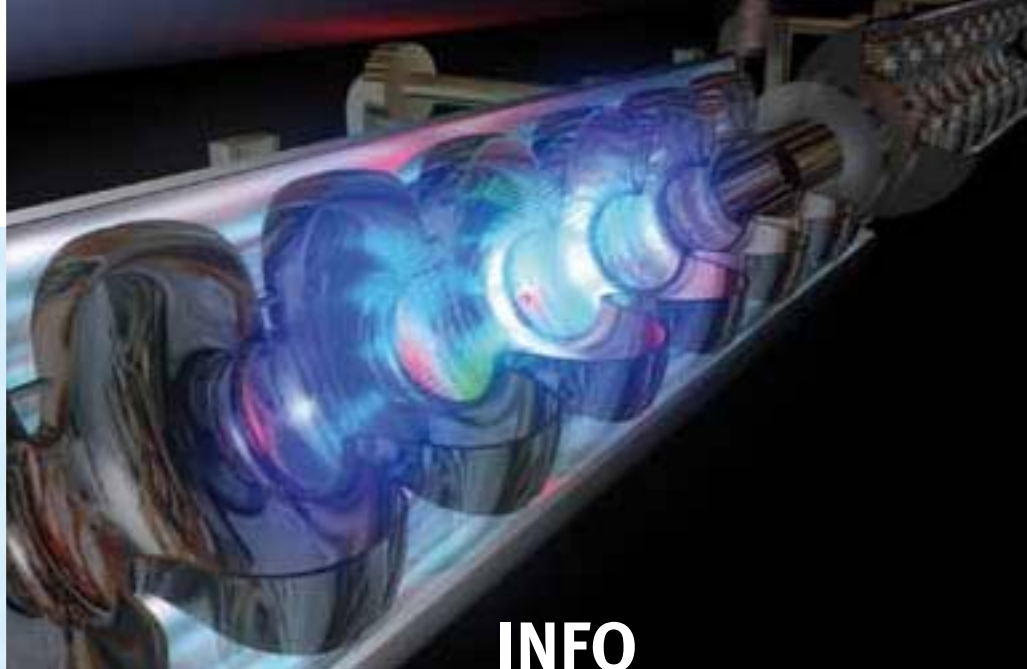
Die Entwicklung hin zu immer besseren Abbildungsmethoden findet aber nicht nur auf dem Gebiet der Elektronenmikroskopie statt. Auch in der Lichtmikroskopie steht die Welt nicht still. Mikroskope, die Objekte mit einem sehr feinen Laserstrahl abrastern, können aus den aufgenommenen Zeilen ebenfalls Bilder mit extremer Tiefenschärfe erzeugen. Kleines Manko: Auch sie können das Abbesche Limit von minimal 200 Nanometern Auflösung für sichtbares Licht nicht durchbrechen. Das liegt daran, dass der feine Laserstrahl durch eine Optik abgebildet werden muss



und dadurch mindestens auf den Durchmesser dieser Optik aufblüht.

Dank des Göttinger Physikers Stefan Hell kann man allerdings sogar einzelne Moleküle auf der Nanometerskala mit Licht sichtbar machen. Das funktioniert jedoch nur mit Proben, die Farbstoffmoleküle enthalten. Diese Moleküle leuchten im Laserlicht auf, sie fluoreszieren. Diese Farbstoffmethode ist in der Biophysik und den Lebenswissenschaften wichtig. Lebende Zellen zum Beispiel sind so durchsichtig, dass man sonst kaum ihre Strukturen auf der Nanoskala unterscheiden kann.

Dieses neue **STED-Mikroskop** von Hell nutzt aus, dass man solche leuchtenden Farbstoffmoleküle auch mit Licht einer bestimmten Wellenlänge dunkel schalten kann. Das STED-Mikroskop benutzt dazu zwei feine Laserstrahlen, die ineinander „gesteckt“ sind. Die Wellenlänge, also



INFO

Großgeräteforschung mit Photonen

1964 ging in Hamburg das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY in Betrieb. Ursprünglich war es als Großforschungseinrichtung gedacht, in der man mit hoch beschleunigten Elektronen mehr über den Aufbau der Atomkerne erfahren wollte. Doch dann stellte man fest, dass Ringbeschleuniger auch ideale „helle Lampen“ für die Festkörperforscher sind. Wenn Elektronen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit um die Kurve gelenkt werden, senden sie Synchrotronstrahlung aus – intensives feingebündeltes Licht, dessen Wellenlängen man zwischen dem Infraroten bis in den Röntgenbereich variieren kann. Das öffnet vielseitige Anwendungsbereiche in Physik, Medizin, Chemie, Werkstoffwissenschaften, Biologie und angewandter Forschung.

Heute gibt es – gefördert vom BMBF – viele Synchrotronstrahlungsquellen: BESSY 2 in Berlin, die Europäische Synchrotronquelle in Grenoble und bei DESY in Hamburg Petra III sowie den Röntgenlaser FLASH. Ab 2015 gibt es bei DESY dann außerdem das neue „Traumgerät“, den Freie Elektronen Laser „European XFEL“. Mit ihm können ultrakurze und kohärente Lichtblitze im Röntgenbereich erzeugt werden, um damit z.B. 3D-Bilder von Biomolekülen aufzunehmen und chemische Reaktionen zu filmen.

▲ Elektromagnetische Felder beschleunigen die Elektronen in den supraleitenden Resonatoren. (Bild: © DESY 1999)

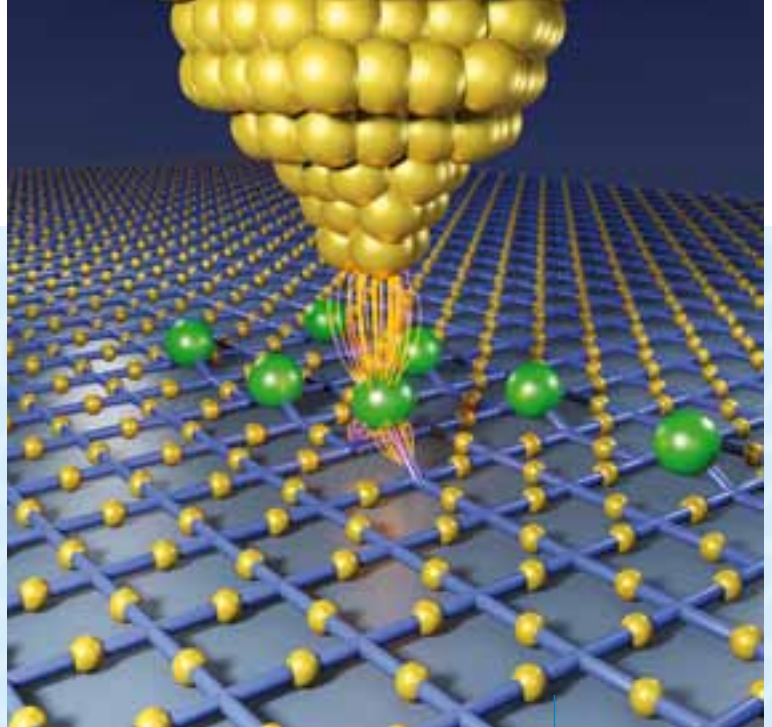
◀ Die STED-Mikroskopie (inneres Bild) liefert hier zirka zehnmal schärfere Details von Filamentstrukturen einer Nervenzelle als ein herkömmliches Mikroskop (äußeres Bild). Die Besonderheit der STED-Mikroskopie liegt darin, dass man beispielsweise auch schnelle dynamische Prozesse und das Innere von Zellen untersuchen kann. (Bild: G. Donnert, S.W. Hell, Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie)

◀ Eine für die elektronenmikroskopische Untersuchung mit Gold beschichtete Spinne. (Bild: Toby Hudson unter cc-by-sa)

Farbe, des einen Strahls lässt die Farbstoffmoleküle aufleuchten, die Wellenlänge des anderen schaltet sie dunkel. Zusammen bilden sie im Strahlquerschnitt ein ringförmiges Lichtprofil. Das knipst im äußeren Ring die winzigen „Moleküllampen“ aus, im inneren Fleck lässt es sie hell. Dieser Leuchtfleck hat nun einen viel kleineren Durchmesser als das Abbesche Limit von 200 Nanometern. Damit kann das STED sogar einzelne Moleküle sichtbar machen, woran normale Lichtmikroskope scheitern.

Mikroskopie mit Tunneleffekt

Kinder rattern gerne mit Stöcken über Latenzäune, weil das so schön Lärm macht. Vielleicht hat dieses Spiel den deutschen Physiker Gerd Binnig und seinen Schweizer Kollegen Heinrich Rohrer Anfang der 1980er Jahre zu ihrer Erfindung inspiriert. Ihr Rastertunnelmikroskop fährt mit einer



◀ Adolf Martens (1850-1914) – Begründer der wissenschaftlichen Metallprüfung und Vorreiter beim Einsatz des Lichtmikroskops in der Metallkunde. Er polierte metallische Proben auf Hochglanz, ätzte sie mit Mischungen aus verschiedenen Säuren und Salzen an und betrachtete sie in einem Lichtmikroskop (eine seiner Zeichnungen, die Mikrostruktur einer speziellen Eisenlegierung, zeigt die untere Abb.). Solche Schliffbilder sagen viel über die mikrokristalline Struktur eines Materials, zeigen Einschlüsse und Materialfehler. Das Metallgefüge, das bei schneller Abkühlung von Stahl entsteht, wird Martens zu Ehren Martensit genannt. (Bild: © BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung)

▲ Bauen mit atomarer Präzision. Mit der Spitze eines Rastertunnelmikroskops werden Eisenatome in einem regelmäßigen Muster auf einer Kupfernitrid-Oberfläche platziert. (Grafik: Sebastian Loth/CFEL)

superfeinen Spitze über die Probenoberfläche. Die besten Spitzen sind nur ein einziges Atom fein und können als Sonde einzelne Atome erspüren. Dies tun sie äußerst sanft: Die Spitze schwebt mit konstantem Abstand von etwa zwei Atomdurchmessern über die atomare Landschaft. Sie fährt über die Buckel der Atome, durch die Vertiefungen zwischen ihnen und erfasst so das Höhenprofil dieser Zehntelnanometerwelt.

Für den konstanten Abstand sorgt eine extrem empfindliche Regelung, die ein faszinierendes quantenmechanisches Phänomen ausnutzt. Es heißt Tunneleffekt und sorgt dafür, dass zwischen der Probenoberfläche und der Spitze, obwohl sie sich nicht berühren, ein schwacher elektrischer Strom fließen kann. Nach der klassischen Physik ist das nicht möglich. Doch nach dem Verständnis der Quantenphysik ist ein Elektron eben auch eine Welle und kann mit einer gewissen Wahr-
scheinlichkeit den eigentlich unüberwindlichen „Energieberg“, den das Vakuum zwischen Spitze und Probe darstellt, durchtunneln. Je schmaler der Energieberg ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass es gelingt. Im Mikroskop muss die Regelung nun nur noch diesen Tunnelstrom auf einem konstanten Wert halten. Dann behält die Spitze immer den gleichen Abstand zur Probe.

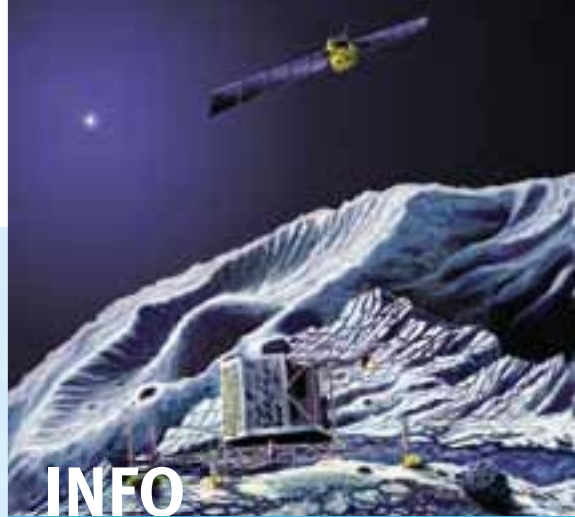
Die Mechanik, die diese Spitze steuert, muss unglaublich fein und präzise funktionieren. Die „Schrittmotorik“ beruht auf dem piezoelektrischen Effekt (siehe Kap. 3), präziser gesagt Aktoren aus Piezoelementen, die bei Anlegen einer elektrischen Spannung ihre Länge ändern. Das kann in Schrittlängen von Atomdurchmessern geschehen, sowohl in seitlicher Richtung zum Scannen in der Ebene als auch senkrecht dazu, um den Tunnelstrom konstant zu halten. Mit dieser genialen Erfindung eröffneten Binnig und Rohrer das völlig

neue Gebiet der Rastersondenmikroskopie, wofür sie 1986 den Nobelpreis für Physik erhielten. Als Sonden können heute eine Vielzahl von feinen Spitzen eingesetzt werden, die mit unterschiedlichen Methoden die atomare Landschaft von Proben abtastern.

Das ebenfalls von Gerd Binnig 1986 mitentwickelte Rasterkraftmikroskop ähnelt dem Kinderspiel mit dem Stock und dem Lattenzaun noch mehr. Es verwendet eine Spitze, die sich am Ende einer etwa 0,2 mm langen und extrem leichten Blattfeder aus Silizium befindet. Diese wird in permanente Schwingung versetzt und im Abstand weniger Nanometer zeilenweise über die Atome der Probenoberfläche hinweg geführt, wieder durch Piezokristalle gesteuert. Die Information über die Beschaffenheit der Probenoberfläche liefert die schwingende Blattfeder. Ihre Auslenkung ändert sich aufgrund anziehender und abstoßender sogenannter



► Hier aus Künstlersicht: Der Rosetta-Orbiter überfliegt den Kometen 67P und den gerade auf dessen Kraterlandschaft aufgesetzten Lander „Philea“. (Bild: Astrium – E. Viktor)



INFO

Weltraumlabor für Kometenstaub

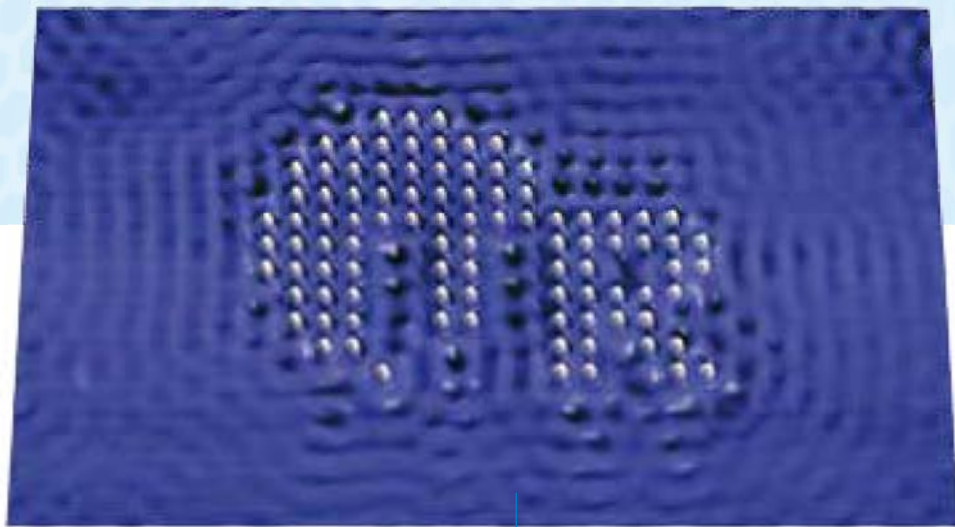
Kometen bestehen vermutlich hauptsächlich aus Wassereis und Urmaterie, die aus der Frühzeit unseres Sonnensystems stammt. Deshalb ist Kometenstaub für die Forschung so interessant. Doch wie kommt er ins Labor? Bis zur Erde sind es viele Millionen Kilometer. Ein Rückkehrmodul einer Kometensonde braucht viel Treibstoff und eine Landeeinheit mit Hitzeschild und Fallschirmen für die Erde. Die Entwickler der Rosetta-Sonde entschieden sich gegen diese schwere und damit teure Lösung. Stattdessen wollen sie das Labor zum Kometen bringen.

In Rosettas Lander „Philea“, der 2014 sanft auf dem Kometen 67P „Churyumow-Gerasimenko“ aufsetzen soll, steckt ein Mikroskop, dessen Leistungsfähigkeit alles Bisherige in der Raumfahrt in den Schatten stellt. Es ist ein Rasterkraftmikroskop und Teil des Staubanalysesystems namens MIDAS, das Forscher der Universität Graz entwickelt haben. Das Rasterkraftmikroskop in MIDAS scannt die eingefangenen Staubteilchen mit einer seiner 16 Spitzensonden zeilenweise ab. Diese Spitzen sind zehn Nanometer fein und können noch Strukturen auflösen, die nur einen Nanometer groß sind. Hat es ein Körnchen komplett erfasst, dann errechnet es davon ein dreidimensionales Bild und sendet es zur Erde. Die Landeeinheit der Sonde sowie wesentliche wissenschaftliche Experimente kommen von deutschen Forschungsinstituten.

Eine Raumfahrtmission mit einem so hochempfindlichen Gerät ist eine enorme technische Herausforderung. Beim Start muss es die hohe Beschleunigung und die heftigen Vibrationen der Rakete überstehen. Am Ziel muss es zuverlässig arbeiten, denn zum Reparieren ist es viel zu weit von der Erde entfernt.

▲ Schliffbilder erlauben auch Einblicke in fremde Welten, zum Beispiel in die innere Struktur von Eisenmeteoriten. Die Muster, die die Schnittflächen zeigen, heißen Widmannstätten-Strukturen. Sie entstehen, wenn Eisen-Nickel-Legierungen über Millionen von Jahre abkühlen. (Bild: J. Hennigan, Flickr.com)

▼ Das Bild zeigt einzelne Kupferatome (weiß) auf einer atomar glatten Kupferoberfläche, die das Logo der Uni Regensburg ergeben. Das Wellenmuster kommt durch den Wellencharakter der Elektronen in der Kupferoberfläche zustande. (Bild: Prof. Jascha Repp, Universität Regensburg)



van-der-Waals Kräfte, die die Atome in der abgetasteten Oberfläche auf das unterste Atom der darüber hinweg geführten Spitze ausüben. Gemessen wird die Auslenkung der Blattfeder mithilfe eines Laserstrahls, der von der Rückseite der Blattfeder reflektiert wird und auf eine Fozelle fällt, mit der die Intensitätsänderungen des reflektierten Lichts in eine Steuerspannung umgesetzt werden. Die Spitzen von Rasterkraftmikroskopen können auch als „Extrempinzette“ einzelne Atome aufnehmen und an anderer Stelle wieder absetzen. Die faszinierenden Möglichkeiten dieser „Nanoarchitektur“ haben Wissenschaftler schon des

Öfteren durch das Konstruieren winzigster Schriftzüge und Logos demonstriert.

Ist die Probe ferromagnetisch, so erspart das Magnetkraftmikroskop magnetische Kräfte, wenn man mit einer ferromagnetischen Spitze an einer schwingenden Blattfeder über die Oberfläche scannt. Die Kraftwirkung ist hier die in bereits größerer Entfernung zur Probenoberfläche spürbare magnetische Wechselwirkung wie zwischen den Polen eines Stabmagneten. Damit lassen sich z.B. die in magnetischen Festplatten eingeschriebenen Bits mit hoher Auflösung sichtbar machen.

Neues aus dem Forscherland



Computerfestplatten mit Speicherdichten von Terabyte pro Quadratcentimeter, briefmarkengroße Chips für tausende Bilder in Digitalkameras, Smartphones mit brillanten Displays – wir nehmen kaum mehr bewusst wahr, wie sehr die Entwicklung neuer Materialien und das Verständnis ihrer physikalischen Eigenschaften unseren Alltag prägt. Und weitere neue Wundermaterialien greifen zunehmend in unser tägliches Leben ein. Viel Forscherarbeit und technologische Entwicklung steckt dahinter.

Aerogele und Schäume

Leicht, superleicht, ultraleicht – eine Kategorie im Guinness-Buch der Rekorde widmet sich auch den Leichtgewichten unter den Feststoffen. Den Titel „leichtester Feststoff“ mussten die Autoren dabei in letzter Zeit öfter neu vergeben. Aktueller Rekordhalter ist der Anfang Juni 2012 von einer Kieler/Hamburger Forschergruppe vorgestellte „Aerographit“. Ein Kubikzentimeter wiegt gerade einmal 0,2 Milligramm. Damit verwies er die „Nickel-Mikrogitter-Strukturen“ – bei ihrer Vorstellung ließen Forscher dieses Material

mit einem spezifischen Gewicht von $0,9 \text{ mg/cm}^3$ auf einer Pusteblume schweben – sowie die Silikat-Aerogele (1 mg/cm^3) auf die Plätze zwei und drei. Gewogen werden all diese Hightechmaterialien ohne die Luft in ihren unzähligen Poren, denn die ist mit $1,225 \text{ mg/cm}^3$ schwerer als die Stoffe selbst. Doch was steckt hinter diesen Materialien?

Milchig weiß, wie gefrorener Rauch sieht ein Stück Silikat-Aerogel aus, weil es bis zu 99,98% aus Luft besteht. Sein Rückgrat wird durch ein Gel gebildet, ein fein verästelttes räumliches Gerüst aus Nano-

partikeln, das unzählige mikroskopische Poren mit Durchmessern im Bereich einiger Dutzend Nanometer umschließt. Die inneren Oberflächen können bis zu 1000 m^2 pro Gramm betragen. Dafür fühlt sich so eine zarte Erscheinung auf Druck überraschend fest an, bricht aber leicht, wenn man sie knickt. Rekordverdächtig ist auch ihre geringe Wärmeleitfähigkeit. Die größten Anwendungspotentiale liegen deshalb in der Gebäudeisolierung und im Feuerschutz. Auch die Energieforschung setzt große Hoffnungen vor allem auf den Aerographit als Elektrodenmaterial mit großer innerer Oberfläche für Batterien und Brennstoffzellen.

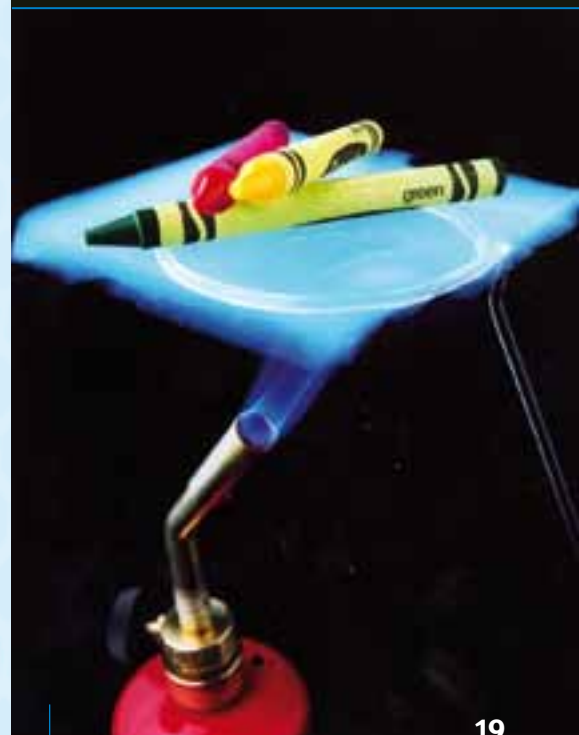
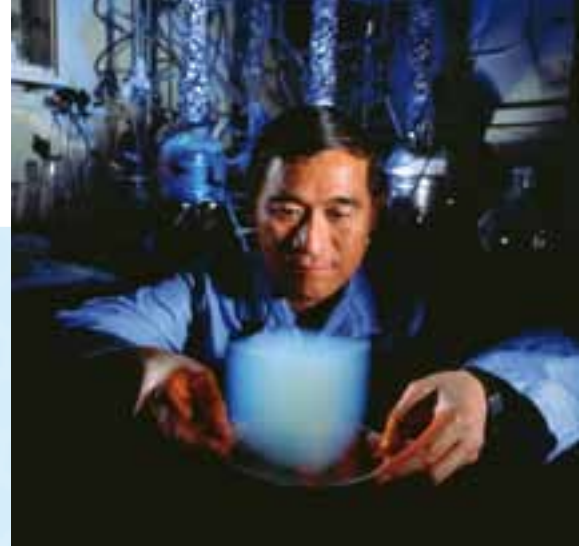
Die Gele unseres Alltags wie Frühstücksgelee oder Haargel sind alle dickflüssig und verstreichbar, weil ihre Poren mit Wasser gefüllt sind. Auch die Herstellung der Aerogele beginnt zunächst in einem nasschemischen Prozess. Die wahre Herausforderung liegt nun darin, Luft in das

◀ Superleichtes Material aus Nickelröhrchen, die wenige Millimeter lang und 100 bis 500 Mikrometer dick sind. Die Dichte des metallischen Gitters beträgt gerade einmal 0,9 Milligramm pro Kubikzentimeter. (Bild: Dan Little © HRL Laboratories, LLC.)

▶ Ein Mitarbeiter des US-amerikanischen JPL mit einem Würfel Aerogel (oberes Bild). Welche exzellenten thermisch isolierenden Eigenschaften das Material hat, das zeigt das untere Bild. Trotz Bunsenbrenner schmelzen die Farbstifte nicht. Dabei sind sie nur durch das Aerogel vor der offenen Flamme darunter geschützt. (Bilder: NASA/JPL-Caltech)



▲ Das zurzeit leichteste Material der Welt: Aerographit. (Bild: © picture alliance/dpa)



Gelnetzwerk hinein und die Flüssigkeit hinaus zu bekommen. Normale Trocknungs- und Verdunstungsprozesse können das feine Netzwerk der Poren beschädigen. Der Trick heißt „überkritisches Trocknen“. Man nutzt dabei aus, dass bei hohen Temperaturen und Drücken oberhalb des „kritischen Punktes“ flüssiger und dampfförmiger Zustand eines Stoffes nicht mehr zu unterscheiden sind. Man erhält eine Art „Flüssigdampf“, der unter langsamem Senken des Außendrucks dann schonend aus dem Aerogel heraus getrieben werden kann. Die Poren, durch den hohen Druck am Platzen gehindert, bleiben dabei stabil und sind am Schluss mit Luft gefüllt.

Preiswerter und produktionstechnisch einfacher ist die Herstellung von Schäumen. In der Kunststoffindustrie sind sie weit verbreitet. Schäume bläst man aus dem flüssigen Zustand auf und lässt sie dann erkalten. Das funktioniert sogar mit geschmolzenen Metallen. Metallschäume

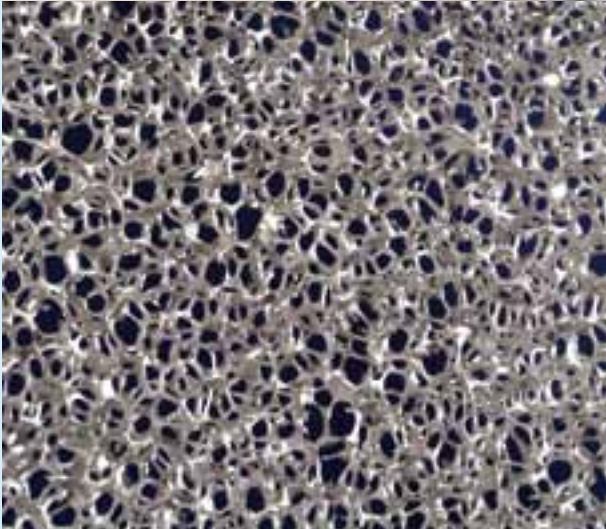
lassen sich auch herstellen, indem man ein Metall in Pulverform mit Titanhydrid, der chemischen Verbindung von Titan mit Wasserstoff (TiH_2), mischt und hoch erhitzt. Dann wird der Wasserstoff freigesetzt, die Metallschmelze schäumt auf und erstarrt zu festem Schaum beim Abkühlen. Im Prinzip wirkt das Metallhydrid wie Backpulver im Teig, das beim Erhitzen Kohlendioxid freisetzt, Blasen bildet und so den Kuchen aufgehen lässt.

Metallschäume werden auf verschiedensten Gebieten eingesetzt. Weit verbreitet sind Aluminiumschäume, die das ohnehin leichte Metall noch leichter machen. Zugleich sorgt die Schaumstruktur für eine hohe mechanische Festigkeit und erhöhte Elastizität. Die unzähligen Verästelungen und Querverbindungen können Kräfte aus allen Richtungen aufnehmen. Die Autoindustrie setzt deshalb Aluminiumschaum als leichten wie effizienten Stoßabsorber ein. In modernen Abgaska-

talysatoren werden keramische Träger des Katalysatormaterials durch Metallschäume ersetzt, weil sie das Abgas besser durchströmen lassen und weniger teures Edelmetall brauchen, um das Abgas effizient zu reinigen. Das liegt an der Beschaffenheit ihrer Porenoberflächen. Seit einigen Jahren entwickelt zudem die Medizin [Knochenprothesen](#) und Zahnimplantate, in denen Metallschäume aus Titan oder Tantal einen hoch belastbaren Anschluss zum lebenden Knochen bilden. Dabei wachsen die knochenbildenden Zellen (Osteoblasten) tief in die Poren dieser Metallschäume hinein und verzahnen so das Implantat fest mit dem Knochen.

Wunderstoffe aus der Natur

Apropos Knochen: Lebendes Knochengewebe steht in Verdacht, eine verblüffende Materialeigenschaft zu besitzen. Wahrscheinlich ist es auxetisch. Das Wort ist



▲ Exotische Struktur in einem exotischen Gefährt – das „Airbike“ wurde in einem 3D-Drucker aus Nylon-Pulver hergestellt. Der Sattel dieses superleichten und dabei extrem stabilen Gefährts ist aufgrund seiner auxetischen Struktur gut gepolstert. (Bild: © EADS)

◀ Metallschäume eignen sich auch als Knochenersatz. Die Bilder zeigen einen neuartigen Titan-Werkstoff, der mit seiner schaumartigen Struktur der Spongiosa im Knocheninneren ähnelt. (Bilder: © Fraunhofer IFAM Dresden)

vom altgriechischen auxetos abgeleitet, das sich frei mit „dehnbar“ übersetzen lässt. Auxetische Materialien sind sozusagen Querköpfe, wenn es um die mechanischen Eigenschaften geht. Zieht man an einem herkömmlichen Material, dann wird es dabei länger und zugleich dünner. Auxetische Materialien hingegen werden quer zur Zugrichtung dicker!

Auxetische Strukturen gibt es im Großen wie im Kleinen. Manche Moleküle sind auxetisch, aber auch Kunststoffschäume, deren Blasen geschickt deformiert wurden. Selbst Teflon ist auxetisch. Auxetische Materialien könnten theoretisch Stöße besser abfangen als herkömmliche Materialien. Deshalb sollen sie eines Tages zum Beispiel Knieschützer oder schussichere Westen verbessern.

Die Natur hat ein weiteres faszinierendes Material hervorgebracht, an dem weltweit intensiv geforscht wird. Seine Hersteller

haben acht haarige Beine und ähnlich viele Augen. Die Rede ist von Spinnenseide. Dieses Material ist ein Alleskönner, fünfmal belastbarer als Stahl und dabei bis zu 60 Prozent dehnbar. Sogar innere Schäden heilen von alleine aus, eine praktische Eigenschaft, wenn ein dicker Brummer ins Netz geknallt ist.

Die Fäden sind teilkristallin, nicht aus einzelnen Atomen aufgebaut, sondern aus blattartigen Proteinmolekülgruppen, den „Beta-Faltblättern“. Sie sind bei den stärksten Spinnseiden zwei bis vier Nanometer klein, und für ihre Verklebung zu Nanokristallen sorgen sehr viele chemische Bindungen über Wasserstoffatome. Eigentlich sind diese „Wasserstoffbrücken“ schwach, aber in der Summe sorgen sie für die außergewöhnlichen Eigenschaften der Seide. Unter starkem Zug können sie wie ein Reißverschluss aufreißen. Dabei gleiten die Beta-Faltblätter aneinander vorbei – der Faden gibt erst einmal nach und wird

länger. Sobald er das an ihm reißende Gewicht, sei es das einer Beute oder einer fallenden Spinne, etwas aufgefangen hat, passiert etwas Faszinierendes: Die langsamer gegeneinander gleitenden Beta-Faltblätter können mit ihren chemischen Greifhänden wieder zupacken und neue Wasserstoffbrücken herstellen. Der Faden heilt aus.

Einige Geheimnisse der Achtbeiner konnte die Forschung schon lüften. Die Abseilfäden bestehen aus speziellen Proteinen. Sieben verschiedene Sorten kann eine Kreuzspinne davon herstellen. Sie spritzt die Flüssigseide durch winzige Spinnrüden in die Luft. Dort erhärten die Nanofäden, und Hunderte dieser „Fibrillen“ formen den Spinnfaden.

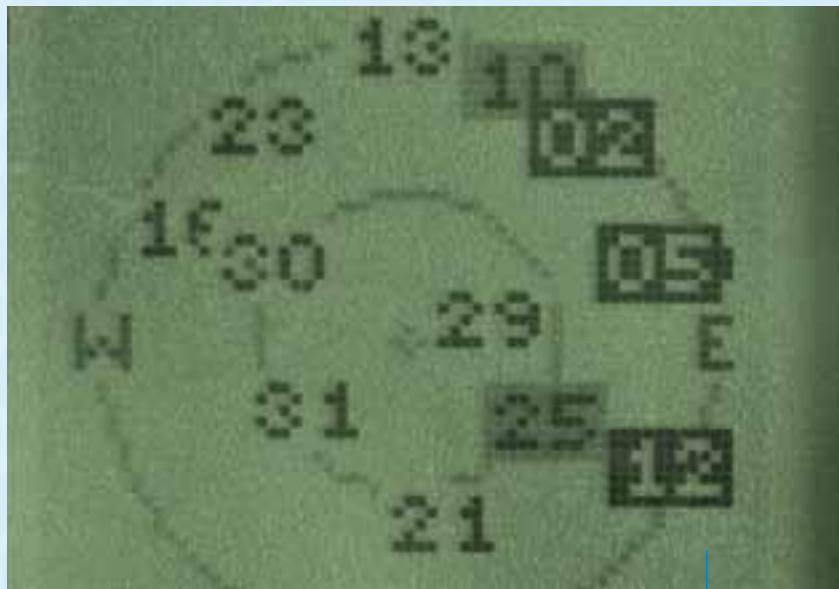
Mehr als nur Displays: Flüssigkristalle

Spinnfäden bestehen aus Flüssigkristallen, die uns in anderer Form in [LCDs](#)



◀ Kein Wunder, dass auch Superheld Spiderman auf Spinnenseide baut, um Verbrecher zu verfolgen und unschädlich zu machen. Das Wundermaterial ist extrem reißfest und stabil. (Bild: © ColumbiaTriStar/dpa)

▼ Eine Flüssigkristallanzeige (engl. „Liquid Crystal Display“, kurz LCD) besteht aus vielen einzelnen Segmenten. Diese Segmente können unabhängig voneinander ihre Transparenz ändern, indem man durch eine Spannung die Ausrichtung ihrer Flüssigkristalle ändert. (Bild: Jens Kube/ Welt der Physik)



◀ Kreuzspinne beim Bau eines regelmäßigen Radnetzes. (Bild: Felix Abraham unter cc-by-sa 3.0)

21

in Flachbildschirmen begegnen. Im Gegensatz zu normalen Flüssigkeiten, in denen die Moleküle keine richtungsabhängige Ordnung aufbauen – Flüssigkeiten sind amorph – wechselwirken die langgestreckten Moleküle von Flüssigkristallen untereinander über längere Distanzen und in bestimmten Richtungen. Sie beeinflussen sich gegenseitig in ihrer Orientierung. Im einfachsten Fall richten sich die stäbchenförmigen Moleküle eines Displays in einer Vorzugsrichtung aus. Man nennt das nematische Phase. Für die Verwendung als Display lässt sich durch Anlegen einer elektrischen Spannung die Ausrichtung der Flüssigkristalle steuern, und damit wiederum ändert sich die Durchlässigkeit für polarisiertes Licht, das mit einer Hintergrundbeleuchtung erzeugt wird.

Flüssigkristalle lassen sich aber auch als künstliche Muskeln einsetzen. Damit

sie in einem elektrischen Feld rotieren, muss man sie zunächst polarisieren, d.h. sie mit elektrisch positiv und negativ geladenen „Enden“ versehen. Weiterhin müssen sie in der Lage sein, ein mechanisches Drehmoment aufzunehmen – ohne „wegzufließen“. Dazu muss man die Molekülstäbchen fester miteinander verbinden, ohne dabei ihre Rotationsfähigkeit zu sehr einzuengen. Das gelingt durch das chemische Vernetzen zu einem elastischen Polymer. Dieser „Spezialgummi“ funktioniert tatsächlich wie ein künstlicher Muskel. Legt man eine elektrische Spannung an, drehen sich die Molekülstäbe im elektrischen Feld von einer Richtung in eine andere. Dadurch zieht sich der künstliche Muskel zusammen. Beim Abschalten der elektrischen Spannung wird er wieder länger. Er wird steuerbar und kann als „Aktor“, als Umwandler von elektronischen Signalen in mechanische Bewegungen eingesetzt werden.

Aktoren kann man aber auch aus anderen Komponenten bauen. So können zum Beispiel Formgedächtnislegierungen allein durch Änderung der Temperatur zwischen zwei Zuständen hin und her geschaltet werden. Dabei können sie eine Kraft ausüben, also aktorisch genutzt werden. Altbekannt sind auch „Piezoelektrische Materialien“. Sie ändern ihre Länge, wenn man ein elektrisches Feld aus- und einschaltet oder geben elektrische Ladung ab, wenn man sie mechanisch durch Druck belastet. Neuerdings kann man das auch allein durch Änderung eines äußeren Magnetfelds mit „Magnetischen Formgedächtnislegierungen“ erreichen. Hochinteressante neue Anwendungen ergeben sich auch, wenn man verschiedene Aktormaterialien in einem Sensor miteinander verbindet, zum Beispiel magnetische Formgedächtnislegierungen und [Piezos](#). Solche Bauelemente reagieren dann sowohl auf Änderungen eines magnetischen als auch elektrischen Feldes.



INFO

Gut in Form

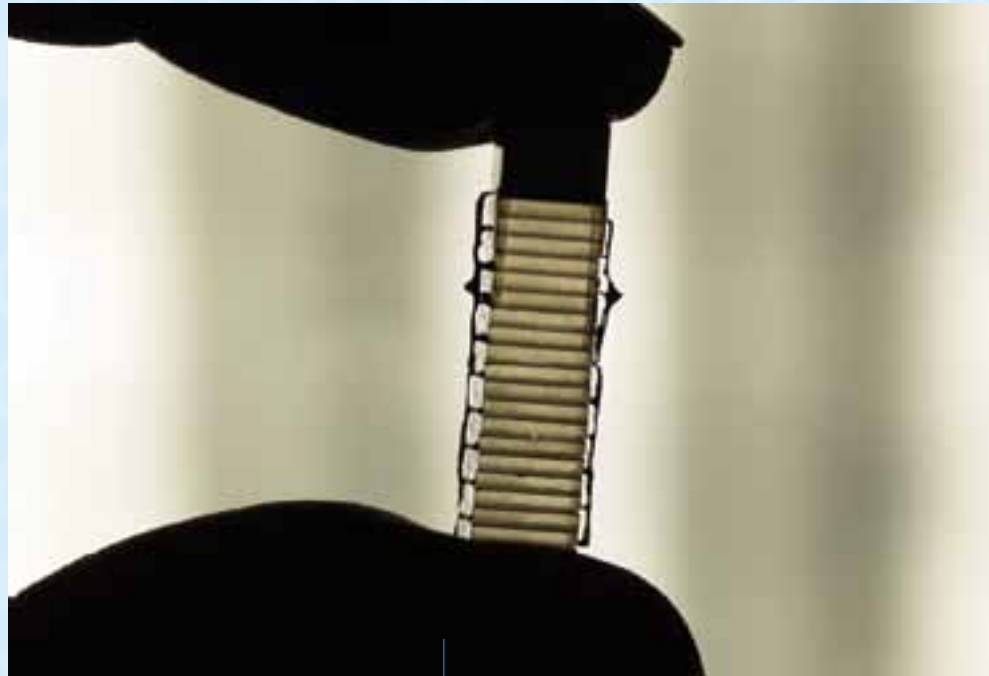
Formgedächtnislegierungen aus Nickel und Titan sind wahre Verwandlungskünstler. Durch thermische und mechanische Behandlungen kann man ihnen ein „Gedächtnis“ antrainieren. Verformt man sie dann, so „erinnern“ sie sich, nehmen beim Erwärmen ihre ursprüngliche Gestalt wieder an und behalten diese, auch wenn man sie wieder abkühlt. Das Phänomen nennt man „thermisches Formgedächtnis“, den Vorgang „Einweg-Effekt“.

Beim „mechanischen Formgedächtnis“ wiederum kann man das Material mühelos in die Länge ziehen. Lässt man los, kehrt es in seine Ausgangsform zurück. Diese anomale Elastizität hat mit „weichen“ Bindungskräften der Atome wie in Kunststoffen nichts zu tun. Man bezeichnet sie deshalb als Pseudoelastizität. Hintergrund beider Effekte ist die Umwandlung der kubischen Ausgangsstruktur der Legierung in eine Ziehharmonika ähnliche gefaltete martensitische Struktur, die man sowohl thermisch als auch durch eine äußere Kraft bewirken kann.

Die Eigenschaften der Formgedächtnislegierungen ermöglichen fantastische Anwendungen, z.B. in der Medizin: Zahnspangendrähte, die immer mit gleicher Kraft ziehen; OP-Bestecke, mit denen man „um die Ecke“ operieren kann; Stents, netzartige Röhrchen, die man zusammengefaltet in ein Herzkranzgefäß einführt und dann an der Engstelle entfaltet, um die Ader wieder zu weiten.

Den Einwegeffekt setzt man in Aktoren, Rohrverbindungen und Sprengvorrichtungen ein. Verformte Brillengestelle muss man nur anhauchen, damit sie wieder wie neu sind. In Satelliten genügt ein kurzer Stromstoß zur Erwärmung und schon entfalten sich ein Sonnensegel oder eine Antenne. Und an weiteren Einsatzgebieten wird schon geforscht – etwa an Autokarosserien, die ihre Form an den Fahrtwind anpassen oder Antiknitterfasern in Kleidung.

◀ Greifsystem unter Verwendung thermischer Formgedächtnislegierungen. Zur Steuerung der Fingerpositionen wird der lineare Zusammenhang zwischen elektrischem Widerstand und mechanischer Dehnung der eingesetzten Nickel-Titan-Kupfer-Legierung genutzt. Hauptanliegen der Arbeiten am Fraunhofer IWU ist die Entwicklung eines sensorlosen Antriebs- und Steuerungskonzeptes zur Ergänzung vorhandener Antriebssysteme von Fremdkraftprothesen oder Industriegreifern. (Bild: Fraunhofer IWU)



▲ Zu einem Aktor aufgestapelte Piezokristalle. (Bild: Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG)

Was das Smartphone smart macht

Ein Smartphone besteht aus zahlreichen Hightech-Materialien, und seine smarten Eigenschaften basieren letztlich auf Erkenntnissen physikalischer Grundlagenforschung. Durch Fortschritte der Quantenmechanik hat man z.B. das Zusammenspiel von Elektronen und Atomen in festen Körpern immer besser verstanden, und die durch immer verfeinerte Methoden entschlüsselten Strukturen haben zu einem besseren Verständnis der Eigenschaften von Materie auf der Nanometerskala geführt. Einer der Pioniere dieser Festkörperphysik war der Göttinger Physikprofessor Robert Wichard Pohl, der von 1916 bis 1952 den Lehrstuhl innehatte, den erstmals Georg Christian Lichtenberg 1770 besetzte. Pohl stellte 1933 zusammen mit seinem Schüler Rudolf Hilsch ein Experiment vor, das unter dem Namen „Die blaue Wolke“ Einzug in die Geschichtsbücher fand. Es war ein ent-

scheidendes Experiment zum Grundverständnis der Funktion eines Festkörperverstärkers, eines Transistors.

Damals wurden zur elektronischen Verstärkung noch [Elektronenröhren](#) eingesetzt, die groß waren, viel Strom fraßen, vor allem heizten und oft durchbrannten. Erst nach dem zweiten Weltkrieg begann sich ein Gebiet zu etablieren, das man heute Halbleiterphysik oder Halbleiterelektronik nennt. Entscheidend war dabei, dass man mit den ersten Neutronenquellen in den 1960er Jahren in der Lage war, Streuexperimente mit Neutronen durchzuführen. Mit diesen ließen sich nun Fehlstellen in Halbleiterkristallen identifizieren, auf denen die Funktionsweise von Halbleiterbauelementen basiert. Mitte der 1940er Jahre hatten so die drei Amerikaner John Bardeen, William Shockley und Walter House Brattain auch das theoretische Wissen beisammen, um 1947 den ersten funktionierenden Transistor zu bauen.



▲ Robert Wichard Pohl (Bild: Universität Göttingen)

◀ Alte Elektronenröhre aus einem Radio der 1960er Jahre (Bild: Kguirnela unter cc-by-sa)

INFO

Die Blaue Wolke

Für Wissenschaftler und Techniker werden Kristalle erst dann richtig interessant, wenn hier und da Atome im Kristallgitter fehlen („Leerstelle“), oder Atome anderer Elemente in das Kristallgitter eingebaut werden („Fremdatome“). Erst durch diese „Fehlstellen“ bekommen Kristalle neue, interessante Eigenschaften. Einer der Pioniere für diese Erkenntnis war Robert Wichard Pohl. In den 1920er Jahren experimentierte er mit seinen Mitarbeitern an Einkristallen wie zum Beispiel Kochsalz. Dabei entdeckte er viele neue optische und elektrische Eigenschaften, die mit Fehlstellen zusammenhängen, und die später zum Verständnis von Halbleitern grundlegend waren.

Ihr berühmtestes Experiment ist die Wanderung der „blauen Wolke“, bei der elektrische Leitungsvorgänge mit bloßem Auge sichtbar werden. Dazu versieht man eine Kristallplatte aus Kaliumbromid mit zwei Elektroden. Legt man eine elektrische Spannung an, so verfärbt sich der zuvor glas-klare Kristall nahe der negativen Elektrode tiefblau. Die blaue Wolke dehnt sich allmählich über den ganzen Kristall aus, dabei steigt seine elektrische Leitfähigkeit an. Aus einem Isolator wird eine Art Halbleiter. Pult man die Stromrichtung um, so wandert die blaue Wolke wieder zurück, der Kristall wird klar und nichtleitend. Die Göttinger fanden heraus, dass die Ursache für die Blaufärbung spezielle Fehlstellen im Kristallgitter sind. Diese „Farbzentren“ bestehen aus einer Leerstelle und einem Elektron, das die negative Elektrode liefert, und schlucken den rot-gelben Teil des Lichtspektrums. Daher erscheint der Kristall dort blau.

Bereits 1933 wies Pohl darauf hin, dass man Elektronenröhren durch kleine Kristall-Bauelemente ersetzen könne – eine Vorwegnahme der Festkörperelektronik. Die technische Realisierung erfolgte dann sehr viel später mit dem Transistor auf der Basis der Halbleiterkristalle Germanium und Silizium. Auch sie werden gezielt mit Fremdatomen verunreinigt.

Dafür bekamen sie 1956 den Physik-Nobelpreis. John Bardeen erhielt ihn sogar als bisher einziger Physiker noch einmal im Jahr 1972, zusammen mit seinen amerikanischen Kollegen Leon Cooper und Robert Schrieffer. Das Trio fand heraus, wie der Mechanismus der klassischen Supraleitung funktioniert.

Vom ersten Transistor bis zur ersten integrierten Schaltung dauerte es nur gut zehn Jahre. Der „Urchip“, den der Amerikaner Jack Kilby 1958 baute, enthielt nur zwei Transistoren, aber er brachte die Revolution der Mikroelektronik ins Rollen. Allerdings war zunächst ein radikaler Materialwechsel nötig. Während Kilby noch den Halbleiter Germanium verwendete, ist die heutige Mikroelektronik buchstäblich auf Sand gebaut. Sand besteht überwiegend aus Siliziumdioxid, also Quarz. Dieses Oxid des Halbleiters Silizium war der Schlüssel zur modernen Halbleitertechnologie. Es ist sehr stabil

und lässt sich extrem fein strukturiert auf reinem Silizium herstellen. Deshalb dient es in der Chipproduktion als Maske, um mikroskopische Halbleiterstrukturen bei Ätzprozessen zu schützen. Zudem isoliert es die stromleitenden Teile eines Mikrochips perfekt voneinander. Erst diese Eigenschaften erlaubten es, elektronische Bauelemente in Mikrodimensionen zu schrumpfen. Heutige Mikroprozessoren können mehrere hundert Millionen winzige Transistoren enthalten. Das macht auch ein kleines Handy so smart.

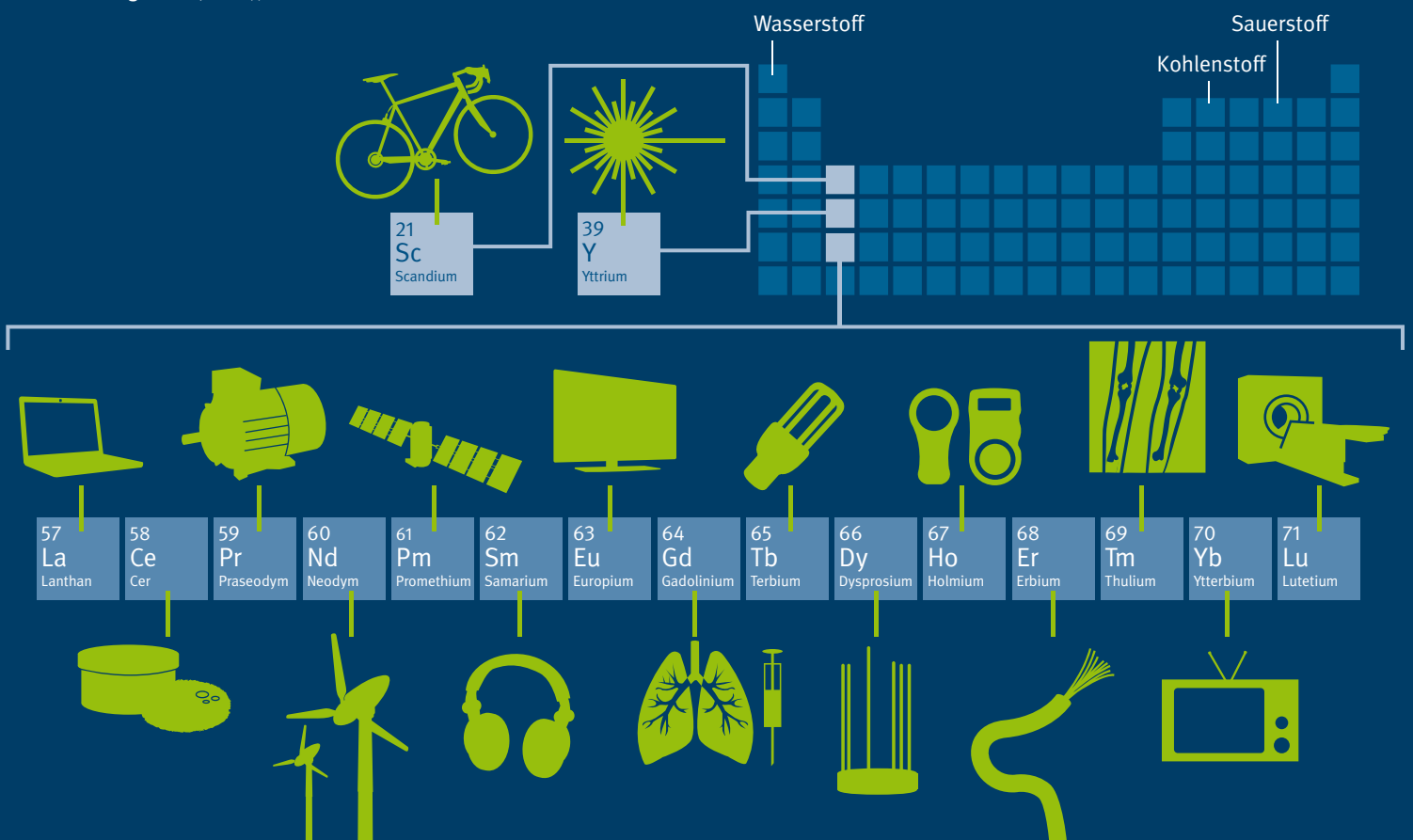
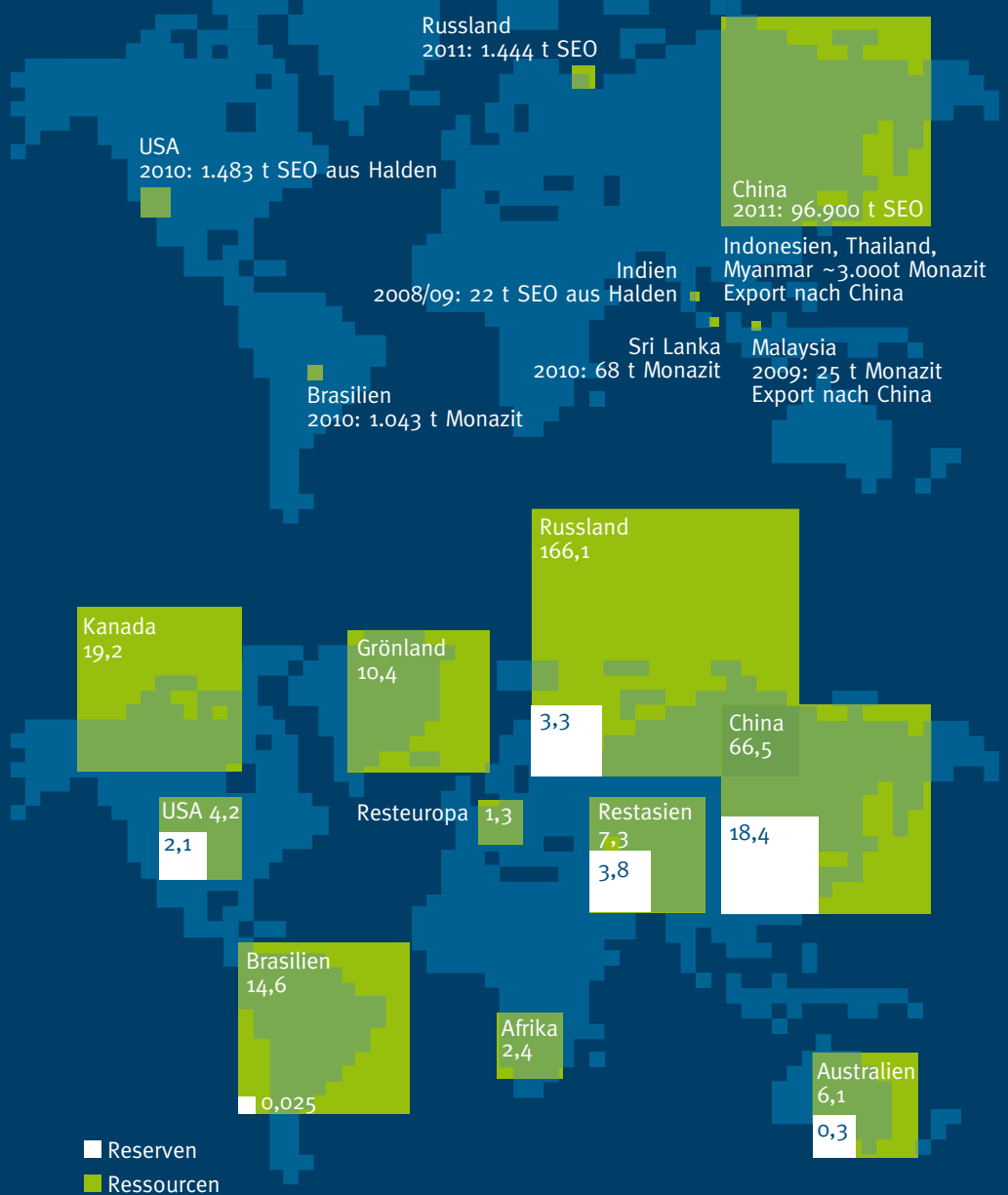
Ein wichtiger Schritt war die Verbindung der Halbleiterelektronik mit der Optik zur Optoelektronik. Das Display unseres Smartphones ist so brillant, weil es heute organische Leuchtdioden (OLEDs) anstelle von Flüssigkristallen besitzt. In einer solchen OLED ersetzt ein organischer Halbleiter die herkömmlichen anorganischen Halbleiter, zu denen Silizium gehört.

Seltene Erden

Unsere Smartphones, aber auch Elektromotoren und LEDs würden ohne sie nicht funktionieren: die „Metalle der Seltenen Erden“. Sie stecken in alltäglichen genau wie in Spezialanwendungen: Cer in Poliermitteln, Gadolinium in Kontrastmitteln der Kernspintomographie, Dysprosium in Regelstäben von Kernreaktoren, Holmium in Photometern, Erbium in Glasfaserkabeln und Lutetium in Positronen-Emissions-Tomographen, mit denen Ärzte in den menschlichen Körper schauen. Die unterste Grafik zeigt weitere Anwendungen und den Platz der Seltenen Erden im Periodensystem der Elemente. Eingesetzt werden die Seltenen Erden oftmals in den elektronischen Komponenten von Geräten, manchmal nur in winzigen Mengen.

Die obere Weltkarte zeigt die Bergwerksförderung bzw. Produktion Seltener Erden, die Karte darunter die Vorräte (in Mio. t SEO, Stand: Juni 2012). „Reserven“ meint dabei Vorkommen, die nach dem heutigen Stand der Technik wirtschaftlich abbaubar sind. Bei „Ressourcen“ hingegen handelt es sich um Vorkommen, die zwar nachweislich vorhanden sind, aber gegenwärtig noch nicht wirtschaftlich gefördert werden können. Die Metalle treten im Boden meist als Oxide (Seltene Erdoxide, „SEO“) oder gemischt auf, was ihre Förderung extrem aufwändig und zum Teil sehr umweltschädlich macht.

(Infografik: Timo Meyer, Jana Koliotassis; Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)/Deutsche Rohstoffagentur (DERA))





◀ Jack Kilby mit dem ersten integrierten Schaltkreis, hier eingeschlossen in einer schützenden Plastikhülle. (Bild: Courtesy of Texas Instruments)

► Der Vergleich mit einer US-amerikanischen 10 Cent Münze zeigt, welch winzige Dimensionen die Halbleiterindustrie bereits erreicht hat. Jeder einzelne der hier dargestellten Computerchips trägt 410 Millionen Transistoren. (Bild: Intel)



25

Die Optoelektronik spielt auch eine entscheidende Rolle, wenn wir mit Mobiltelefon oder PC im Internet surfen. Dabei nutzen wir ein weltumspannendes Netz von Glasfaserkabeln, durch die Bits und Bytes in Form von Licht jagen. Laserdioden – also LEDs, die Laserlicht aussenden – verwandeln die digitalen Bit-Pakete aus Elektronen in Lichtpulse. Der Vorteil dieser optischen Nachrichtenübertragung: Die Signalstärke lässt sich auch über große Distanzen kaum nach, ganz im Gegensatz zu den herkömmlichen Kupferkabeln mit Elektronen als Informationsträger. Außerdem sind sehr viel höhere Bandbreiten möglich. Die Elektronen im Kupferkabel schwingen mit einer Frequenz, die typischerweise fast 1 Mio. mal kleiner ist als die der Lichtwellen im Glasfaserkabel. Dabei gilt: Je höher die für die Übertragung benutzte Trägerfrequenz, desto mehr Informationen können übertragen werden.

Auch das Gegenstück der Optoelektronik kennen wir aus dem Alltag – zwar nicht von unserem Handy, aber von vielen

Hausdächern: die Photovoltaik. Sie ist aus der Halbleitertechnologie hervorgegangen. In einer Solarzelle verwandelt ein Halbleiter nicht wie in der LED Strom in Licht, sondern umgekehrt Sonnenlicht in elektrischen Strom. Im Prinzip ahmt die moderne Halbleitertechnologie damit eine uralte Erfindung der Natur nach, die Photosynthese. Allerdings erzeugt Photosynthese aus dem Sonnenlicht chemische, nicht elektrische Energie.

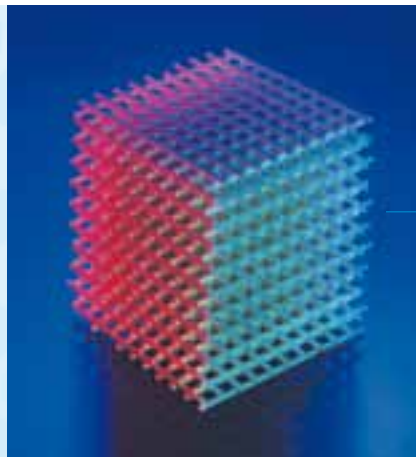
Von der Elektronik zur Spintronik

Computer und Mobiltelefone werden immer kleiner und leistungsfähiger. Doch allmählich stößt auch die Halbleiterelektronik an die Grenzen ihrer Miniaturisierung. Die Strukturen der kleinsten Transistoren auf den Chips messen inzwischen nur noch wenige Dutzend Nanometer. Das wirft zwei Probleme auf: Zum einen heizen auch schwache Ströme diese dicht gedrängten Nanostrukturen stark auf. Notebooks ver-

schleudern deshalb wertvolle elektrische Energie aus dem Akku in nutzlose Abwärme; moderne Mikroprozessoren müssen bei Volllast stark gekühlt werden. Zum anderen nähern sich solche winzigen Strukturen dem Regime der Quantenwelt, deren Effekte stören können.

Deshalb suchen Physikerinnen und Physiker schon seit einigen Jahren nach grundsätzlich neuen Lösungen. Eine besteht in einer Doppelnutzung des Elektrons als Informationsträger. Neben der elektrischen Ladung trägt das Elektron nämlich noch einen „Spin“ mit sich. Dieser „Spin“ ist so etwas wie ein Quantenkreis und der macht das Elektron zu einem winzigen Magneten, der sich über Magnetfelder steuern lässt. Auf dem Gebiet der Spintronik arbeiten Forscher nun an neuen Bauelementen, deren Funktionsweise darauf beruht, dass die Elektronen über sowohl ihre elektrische Ladung als auch ihren Spin gesteuert werden können. Allerdings müssen solche Spintransistoren

▼ Bisher nur als Fotomontage möglich: Ungefähr so würde eine Flüssigkeit mit negativem Brechungsindex (rechts) im Vergleich zu normalem Wasser (links) aussehen. (Bild: © TU Wien)



► Dieser Himmelsfalter verdankt seine schimmernden Flügel photonischen Kristallen. (Bild: Derkarts unter cc-by-sa)

◄ Modell eines Photonischen Kristalls. Mit Bausteinen aus solchen Kristallen könnte das Licht so kontrolliert werden, wie Halbleiterelemente dies mit elektrischem Strom tun. (Bild: Courtesy of the U.S. Department of Energy's Ames Laboratory)



26

aus extrem feinen, perfekten Nanostrukturen gebaut werden. Die ultimative Miniaturisierung wäre ein Spin-Transistor, der ein einzelnes Elektron manipulieren kann. Das Elektron könnte dann mit seiner Ladung und seinem Spin gleich zwei Informationen transportieren. Spintronische Bauelemente haben den Vorteil, dass sie sogar umso besser funktionieren, je kleiner sie sind.

Welches Potenzial in der Spintronik steckt, macht auch der Fortschritt bei den Computerfestplatten deutlich. Sie enthalten mit ihrem Schreiblesekopf das erste und bisher einzige spintronische Element, das Alltagsstechnik ist. Die Ausnutzung des sogenannten Riesenmagnetowiderstandes machte die Schreibleseköpfe so empfindlich, dass sie fortan sehr viel kleinere magnetische Bits auf der Festplatte lesen konnten. Das brachte den Durchbruch zu den [heutigen Terabyte-Laufwerken](#). Für

die Entdeckung des Riesenmagnetowiderstandes im Jahr 1988 bekamen der deutsche Physiker Peter Grünberg und der französische Physiker Albert Fert 2007 gemeinsam den Physik-Nobelpreis.

Von Metamaterialien zur Tarnkappe

Die Endstation auf unserer Reise durch die faszinierende Welt der Materialien sind die Metamaterialien. Darunter verstehen Forscher Materialien aus regelmäßigen Strukturen wie in Kristallen. Die Strukturen haben allerdings viel größere als atomare Abmessungen. Ihre Elementarzelle kann zum Beispiel anstatt einem halben Nanometer wie im Eisenwürfel stattliche 500 Nanometer groß sein. Ein solcher Kristall würde dann aufgrund seiner größeren Abmessungen nicht kurzwelliges Röntgenlicht wie in von Laues Ex-

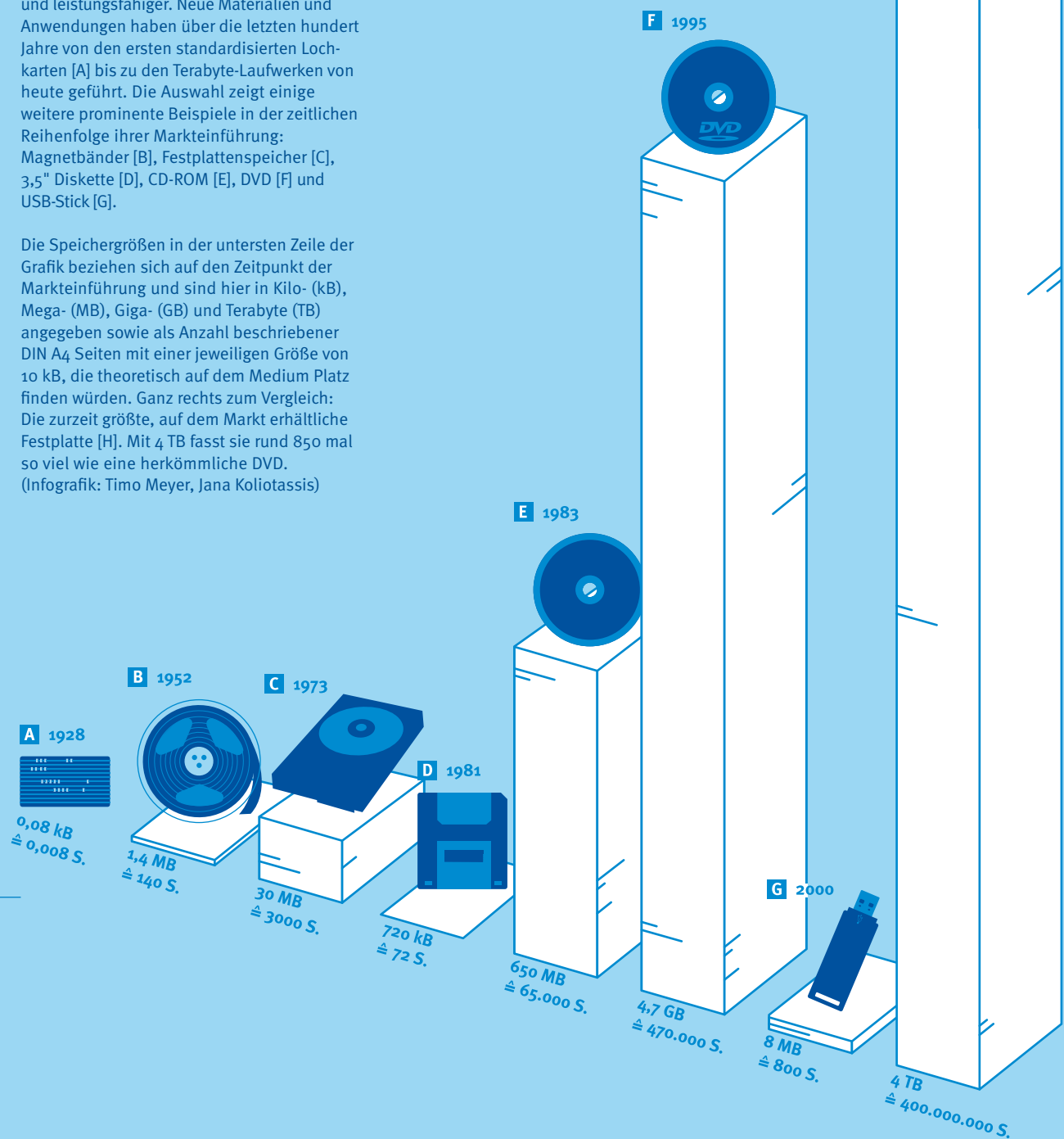
periment mit Zinksulfid beugen, sondern sichtbares Licht. Tatsächlich gibt es Materialien mit solchen optischen Eigenschaften schon lange in der Natur. Die [„Photonischen Kristalle“](#) lassen zum Beispiel Schmetterlingsflügel durch Beugungseffekte des Lichtes bunt schillern.

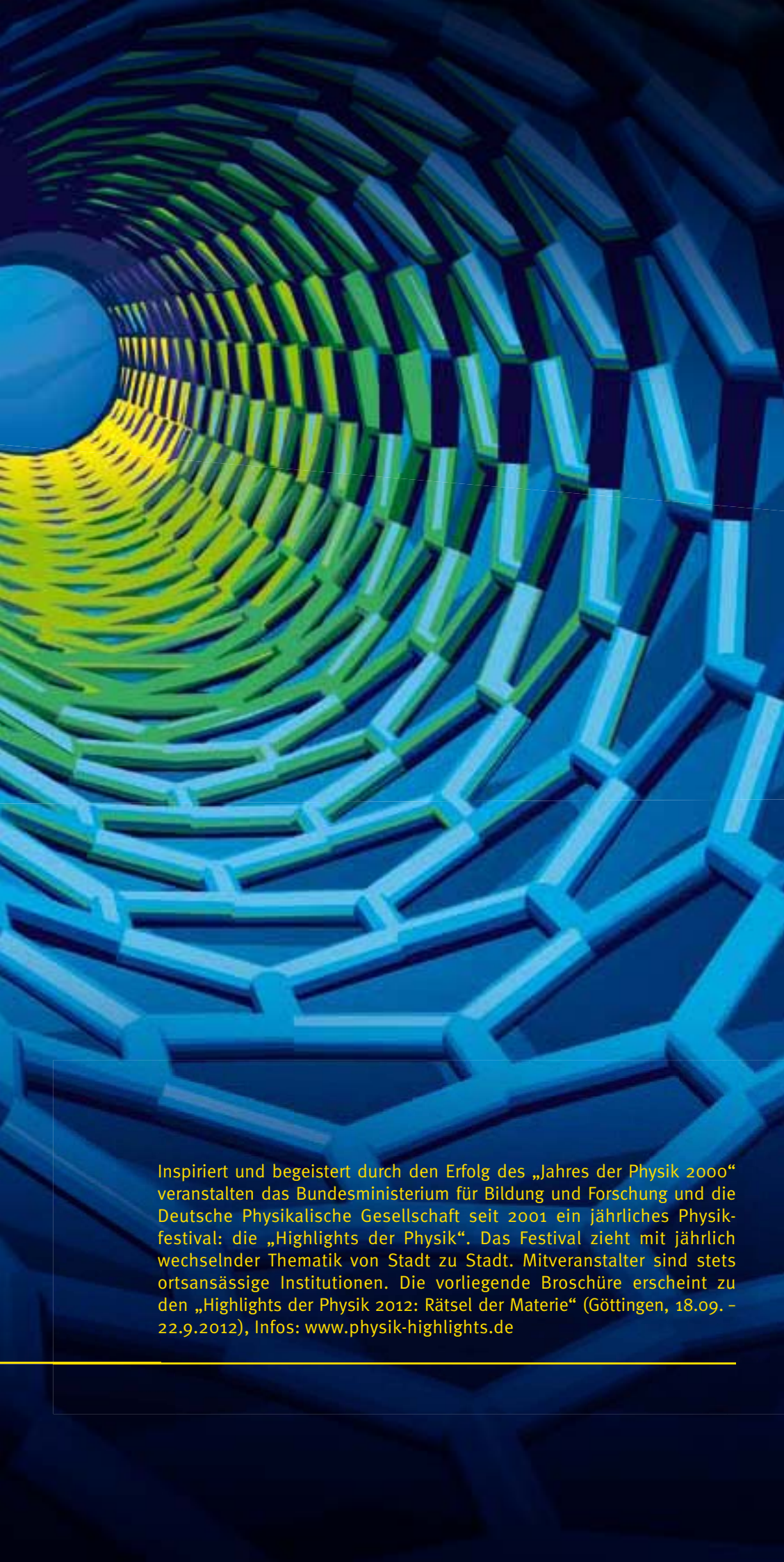
Doch Physikerinnen und Physiker gehen noch einen Schritt weiter. Sie arbeiten schon an Metamaterialien mit ganz neuen Brechungseigenschaften, wie sie Mutter Natur nicht hervorgebracht hat. Diese [Materialien mit negativen Brechungsindex](#) könnten Objekte vor unseren Augen scheinbar (zumindest beinahe) verschwinden lassen, ganz wie der Tarnumhang des Zauberschülers Harry Potter.



► Massenspeicher werden immer kleiner und leistungsfähiger. Neue Materialien und Anwendungen haben über die letzten hundert Jahre von den ersten standardisierten Lochkarten [A] bis zu den Terabyte-Laufwerken von heute geführt. Die Auswahl zeigt einige weitere prominente Beispiele in der zeitlichen Reihenfolge ihrer Markteinführung: Magnetbänder [B], Festplattenspeicher [C], 3,5" Diskette [D], CD-ROM [E], DVD [F] und USB-Stick [G].

Die Speichergrößen in der untersten Zeile der Grafik beziehen sich auf den Zeitpunkt der Markteinführung und sind hier in Kilo- (kB), Mega- (MB), Giga- (GB) und Terabyte (TB) angegeben sowie als Anzahl beschriebener DIN A4 Seiten mit einer jeweiligen Größe von 10 kB, die theoretisch auf dem Medium Platz finden würden. Ganz rechts zum Vergleich: Die zurzeit größte, auf dem Markt erhältliche Festplatte [H]. Mit 4 TB fasst sie rund 850 mal so viel wie eine herkömmliche DVD. (Infografik: Timo Meyer, Jana Koliotassis)





Inspiziert und begeistert durch den Erfolg des „Jahres der Physik 2000“ veranstalten das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die Deutsche Physikalische Gesellschaft seit 2001 ein jährliches Physikfestival: die „Highlights der Physik“. Das Festival zieht mit jährlich wechselnder Thematik von Stadt zu Stadt. Mitveranstalter sind stets ortsansässige Institutionen. Die vorliegende Broschüre erscheint zu den „Highlights der Physik 2012: Rätsel der Materie“ (Göttingen, 18.09. – 22.9.2012), Infos: www.physik-highlights.de

Veranstalter



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

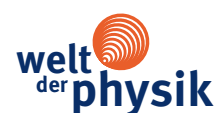


GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT
GÖTTINGEN

Partner



Klaus Tschira Stiftung
gemeinnützige GmbH



Eine Initiative des Bundesministeriums
für Bildung und Forschung

Wissenschaftsjahr 2012

Zukunftsprojekt

ERDE

Medienpartner

Göttinger Tageblatt



Hallo
Niedersachsen