



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

bmb+f



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

bmb+f

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlbewerbern oder Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Stein der Weisen

Themenheft



BMBF PUBLIK

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Öffentlichkeitsarbeit
53170 Bonn
E-Mail: information@bmbf.bund.de
Internet: <http://www.bmbf.de>

Autor

Dr. Mathias Schulenburg

Informationen zum Inhalt

Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
Pressestelle
Hauptstrasse 20 a
53604 Bad Honnef
Telefon: (0 22 24) 9 51 95-18
Telefax: (0 22 24) 9 51 95-19
E-Mail: presse@dpg-physik.de

Redaktion, Konzept und Gestaltung

Iser & Putscher
Kreativagentur für PublicRelations GmbH,
Bad Honnef

November 2000

Titel

Große Abbildung: Sand und Siliziumscheibe (Wafer):
Den Rohstoff für Computer-Chips gibt es „wie Sand
am Meer“ – es ist einfacher Quarzsand (Quelle:
Infineon Technologies)
Kleine Abbildung: Logo „2000: das Jahr der Physik“

Bildnachweis:

AMD, Bayer, Bergerhof Studios: Suzy Coppens, dpa,
Egmont Ehapa Comic Collection (Stuttgart): Régis
Loisel, eye of science: Oliver Meckes, Forschungs-
zentrum Jülich, Forschungszentrum Karlsruhe, IBM,
IFW Dresden, IMM Mainz, Infineon Technologies,
Institut für Anorganische Chemie der Universität GH
Essen, Institut für Experimentalphysik der Freien
Universität Berlin, Institut für Experimentelle und
Angewandte Physik der Universität Kiel, Institut für
Kristallographie der Universität Köln, Philip Morris
Stiftung, Physikalisches Institut der Universität
Münster, Rice University, Siemens, Universität Leipzig:
Ralf Stannarius, W. P. Schneider, Wacker Siltronic,
Wilfried Kurz (Lausanne), Zeitschrift für Angewandte
Chemie

2000
das Jahr der physik

Stein Themenheft der Weisen

Titelseite:
Sand und Siliziumscheibe (Wafer):
Den Rohstoff für Computer-Chips
gibt es „wie Sand am Meer“ – es
ist einfacher Quarzsand (Quelle:
Infineon Technologies)

Bild rechts:
Kristall-Küche: Silizium ist der
Stein der Weisen des Computer-
Zeitalters. Allerdings kommen in
der Natur keine reinen Silizium-
kristalle vor. Deren Produktion ist
sehr aufwendig, sie müssen aus
einer glühenden Schmelze über
mehrere Tage hinweg „herange-
zchtet“ werden. (Quelle: Wacker
Siltronic)

„Physik ist lebendig, aufregend und immer wieder überraschend. Sie beantwortet Fragen unter anderem nach Ursprung und Schicksal des Universums, der Struktur der Materie und der Entstehung von Leben auf unserem Planeten. Gleichzeitig besitzt sie eine Schlüsselfunktion in der modernen Technik“, so Alexander M. Bradshaw, Präsident der [Deutschen Physikalischen Gesellschaft \(DPG\)](#). Beim Jahr der Physik arbeitet das [Bundesministerium für Bildung und Forschung \(bmb+f\)](#) eng mit der DPG zusammen. Neben fünf zentralen Veranstaltungen in Berlin und Bonn finden überall in Deutschland an Universitäten, an Forschungseinrichtungen und an Schulen Aktionen zur Physik statt.

Das Jahr der Physik finden Sie im Internet unter www.physik-2000.de



wissenschaft ■ im dialog

Die Bundesministerin für Bildung und Forschung, Edelgard Bulmahn, hat zusammen mit den großen Forschungsorganisationen die bundesweite Initiative [„Wissenschaft im Dialog“](#) gestartet. „Wir müssen deutlich machen, dass Forschung für die Menschen da ist und gleichzeitig Innovation und Arbeitsplätze schafft“, so beschreibt die Ministerin den Leitgedanken der Initiative. Die Wissenschaft öffnet sich der Gesellschaft, indem aktuelle Erkenntnisse vieler Fachgebiete spannend, kontrovers und publikumsnah präsentiert werden. Die Initiative startet im Jahr 2000 mit dem Jahr der Physik. Mehr dazu im Internet: www.wissenschaft-im-dialog.de

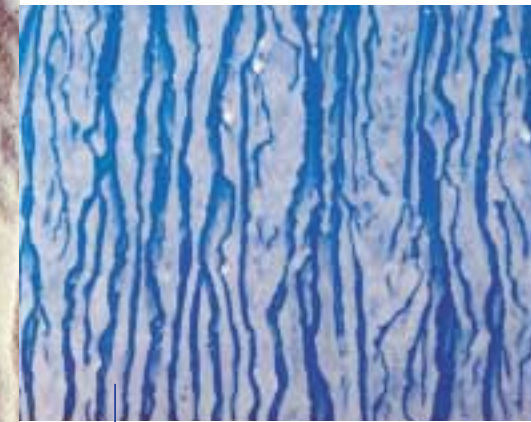
Kondensierte Materie: Geschichten aus der Welt zwischen Quarks und Quasaren

- 4 Der Stein der Weisen
- 8 Enthüllung der Struktur
- 12 Filigrane Flächen
- 16 Abstecher ins Quantenland
- 18 Physik eiskalt serviert
- 20 Komplexe Materie
- 25 In der Welt der Zwerge

„Wendy“
(Régis Loisel: Peter Pan, Egmont Ehapa
Comic Collection Stuttgart)



Der Stein der Weisen



Wendy im Buttermilch-Universum: Buttermilch, dezidiert „weiche Materie“, bildet, wie Bier, selbstorganisierte, charakteristische Fließmuster an der Glaswand. Selbst Bierflecken haben eine akademische Betreuung gefunden, am National High Magnetic Field Laboratory der Florida State University: <http://micro.magnet.fsu.edu/beershots/index.html>. Und auch Wolken und Wellen können auffällige Strukturen zeigen. (Fotos Buttermilch und Wolken: Bergerhof Studios, Suzy Coppens)

Archäologie 2250

Die Szene war wie aus dem Reiseprospekt – weißgelber Strand mit Palmen, türkisfarbenes Wasser. Wendy lag bäuchlings im Sand und ließ sich von ihrer Neigung, in allem und jedem ein Muster sehen zu wollen, ablenken: sie sah die gestaffelten Schaumkämme der Wellen, Rippel und Schichten im Sand, Walzenwolken am Himmel, die regelmäßigen Buttermilch-Schlieren an den Wänden ihres Glases. Für das Erkennen von Mustern – nicht dieser – wurde sie im Moment sogar bezahlt, als Technikhistorikerin sollte sie im Sand Interessantes finden: Mikroteile, die sie zur Epochenbestimmung benutzte wie Naturhistoriker Pflanzenpollen.

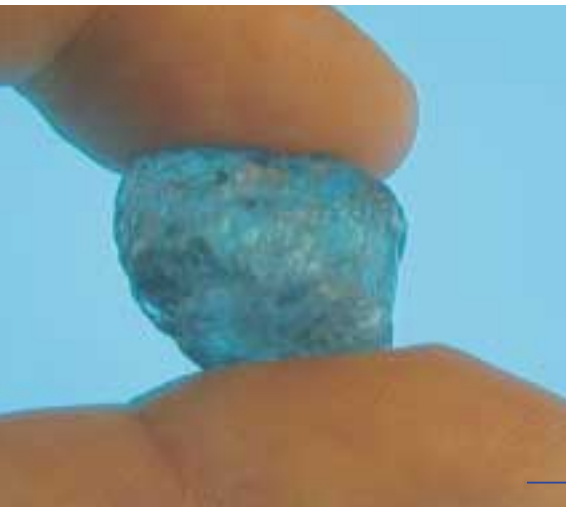
Wendy trug Haftschalen aus selbstformender Opto-Gallerte, die ihren Augen auf Wunsch die Eigenschaften eines Mikroskops gaben, so dass sie Zehntel Millimeter feine Details im Sand ohne Mühe erkennen konnte. Wenn sie ab und an scheinbar angestrengt die Augenbrauen zusammen zog – eine Geste, die ihr Partner immer ganz reizend fand – löste sie lediglich die Übertragung des Gesehenen in den fotografischen Speicher ihres Gedächtnisses aus. Neben Bil-

dern von ordinären Sandkörnern und naturgemachten Kalk- und Kieselpanzern hatte sich hier schon allerhand künstliches Strandgut angesammelt: Bruchteile von mikroskopisch kleinen Zahnrädern, Spindeln, Ratschen, Kanülen, Spiegeln, Manipulatoren; Bündel von Buckytubes – es war klar, dass der Strandsand die Reste von Produkten und Maschinen einer Fabrik enthielt. Nur: einer Fabrik wofür?

Die Erleuchtung kam, als Wendy im Sand ein scheinbar vom Wind bewegtes Stück schwarz-grünen Gewebes sah, das bei näherem Hinsehen weder Stoff war, noch vom Wind bewegt wurde. Es war ein Fetzen mineralischen Muskelmaterials, das Licht aufsaugte und die Energie in Wellenbewegungen wieder abgab ... Smaug?! Dann würden auch die Buckytube-Bündel im Sand Sinn machen. „Smaug“ hatte bereits Sehnen aus Buckytube-Bündeln gehabt, tausendfach stärker als Stahl. Sollte hier eine Hausdrachenfabrik gewesen sein? Wendy hatte die liebsten Erinnerungen an ihren künstlichen Hausdrachen Smaug, den ihr Vater, ein Tolkien-Fan, ihr geschenkt hatte, vor fast 200 Jahren. Wenn Smaug sich mit Son-

nenlicht voll gesaugt hatte, konnte er das Kind aus eigener Kraft sicher hunderte Meter hoch tragen, in aufsteigenden Luftsäulen weiter steigen ... sie waren kreischend auf das Wasser herunter gestürzt, Smaug hatte einen Fisch gefangen ...

Wir wissen nicht, ob Wendy jemals wahr wird, oder ihr Hausdrache; aber bedenken wir die These des britischen Autors Arthur C. Clarke: „Die Produkte einer hochentwickelten Technologie sind für Angehörige weniger fortgeschrittener Kulturen nicht von Zauberei zu unterscheiden.“ Funktelefone und Fernsehübertragungen hätten vor 200 Jahren als Magie gegolten, und es ist anzunehmen, dass viele der in 200 Jahren käuflichen Produkte auf uns jetzt gleichermaßen utopisch wirken würden.



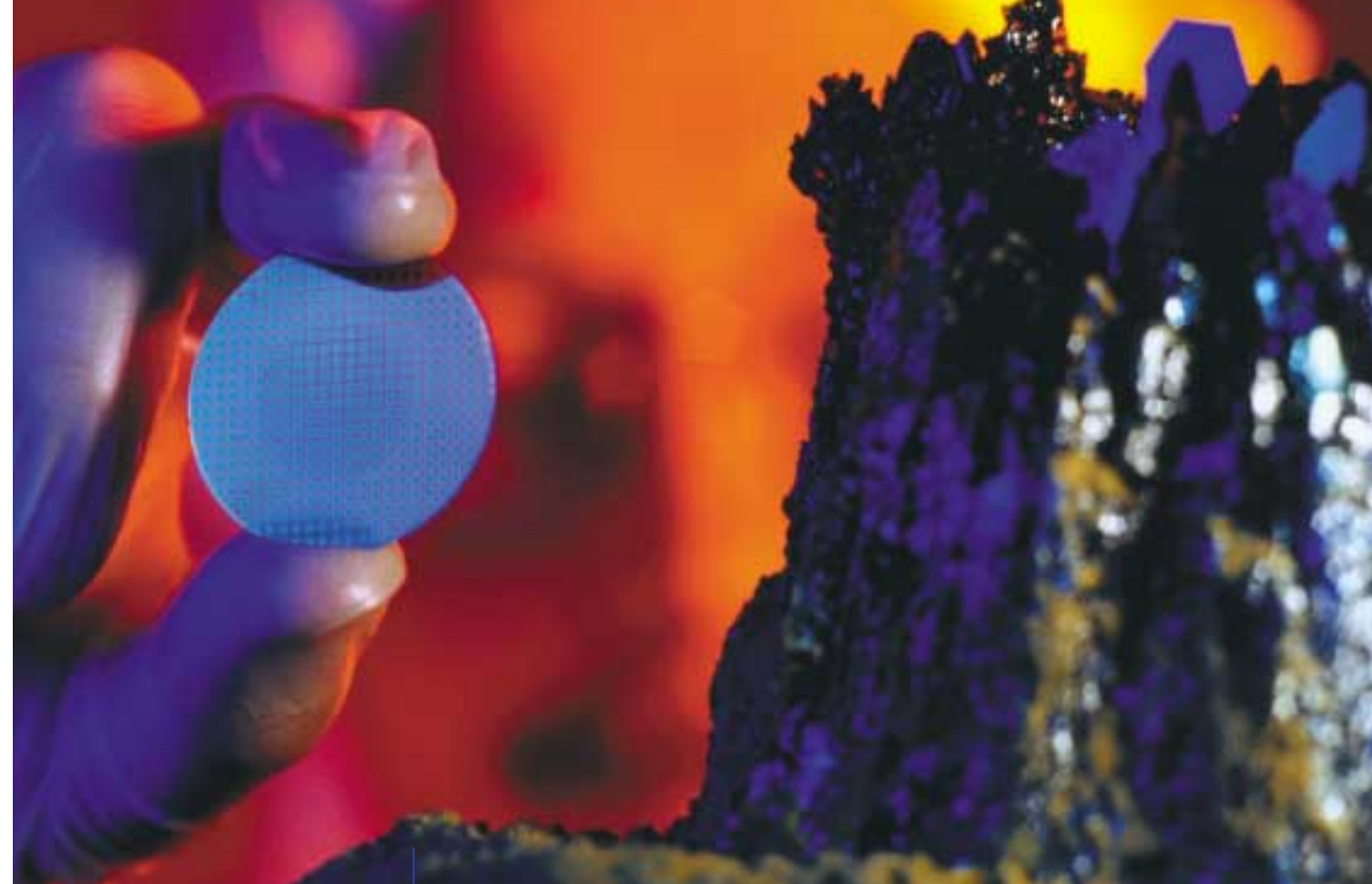
Auf der Suche

Das ganze technisch-wissenschaftliche Feuerwerk der Gegenwart begann mit der Suche nach dem Stein der Weisen, deren Anfänge im Dunkeln liegen. Die Suche könnte begonnen haben im Zwielficht der Arktis, etwa in der Hand des Navigators eines Wikinger-Schiffes. Tatsächlich orientierten sich die Wikinger bei Abenddämmerung mit Hilfe eines „Sonnenstein“ genannten Minerals (Cordierit): Gedreht im polarisierten Himmelslicht nach einem Sonnenuntergang, changierte dieser Stein so zwischen Gelb und Blau, dass der Sonnenstand wieder auszumachen war.

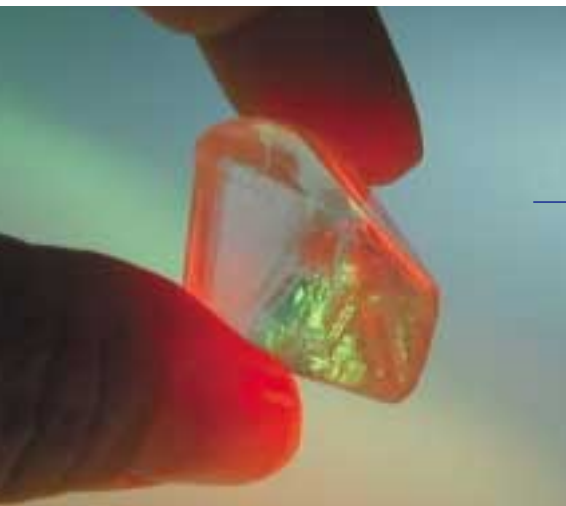
Das [Wechselspiel von Licht und Steinen](#) wurde offenbar zu allen Zeiten für bedeutsam gehalten; 1603 erregte ein anderer „Sonnenstein“ Aufsehen, als Vincenzo Cascariolo, ein Bologneser Alchemist, eine Mischung von Schwespat- und Kohlepulver erhitzte und entdeckte, dass das Reaktionsprodukt (Bariumsulfid) nachts bläulich schimmerte und sich tags wieder mit Sonnenlicht „aufladen“ ließ. Die Alchimisten hofften sogleich, den wahren Stein der Weisen gefunden zu haben, der gewöhnliche Metalle in Gold verwandeln konnte.

Den bankrotten Hamburger Kaufmann und Alchimisten Henning Brand trieb die Erwartung, die Urmaterie für einen Stein der Weisen könne sich in Körperflüssigkeiten finden, gar in die Aborte Hamburger Kasernen. Nach dem Eindampfen einer Tonne Urin erhielt Brand eine rote Flüssigkeit, aus der Kristalle ausfielen. Nach deren Glühen blieb ein weißer Staub zurück, der im Dunkeln leuchtete: Brand hatte, 1669, elementaren Phosphor hergestellt, dessen Name von „phosphorus“ – Lichtträger – abgeleitet wurde. Gold freilich konnte man aus Phosphor nicht machen.

Dass derlei mit einem Stein der Weisen gelingen könnte, wurde aber weiter behauptet, so auch von Johann Friedrich Böttger, einem talentierten Alchimisten im Dienste von August dem Starken.



High-Tech aus Dreck: Ein grober Siliziumkarbid-Kristall (rechts), in einem Elektrofen aus pulverisierter Kohle und Quarzsand synthetisiert. Nach sorgfältiger Rekristallisation lassen sich daraus Wafer (links) für eine schnelle, hohe Spannungen vertragende Leistungselektronik herstellen, etwa für die Steuerung von elektrischen Antrieben. Transistoren aus diesem Material funktionieren noch bei 600 Grad Celsius. (Quelle: Siemens)



Lichtwandlung heute: Mit höchster Effizienz kann Wismutborat infrarotes Licht in grünes, kürzere Wellenlängen sogar in blaues Licht umwandeln; die Fachwelt spricht von „Frequenzverdopplung“. Optische Effekte sind eine tragende Säule der Festkörperphysik. (Quelle: Institut für Kristallographie der Uni Köln, Foto: Bergerhof Studios, Suzy Coppens)

Auch Böttger fand – natürlich – kein Gold. Dafür stieß er 1707, mit Ehrenfried Walter von Tschirnhaus, einem Physiker, auf das Geheimnis des echten chinesischen Porzellans. Eine Entdeckung, die den Reichtum der berühmten Meissner Manufaktur begründete.

Die Idee eines Steins der Weisen für die Umwandlung von Elementen hatte also durchaus ihre Meriten, und sei es nur als Motiv, überhaupt eine Art Materialforschung in Gang zu setzen – an deren Ende heute Möglichkeiten stehen, neben denen der Traum von der Verwandlung unedler Metalle in Gold völlig verblasst. Bahnbrechende Entdeckungen hatten dabei in den meisten Fällen gar nichts mit der ursprünglichen Idee zu tun.

Wer weiß, wie es geht, kann heute aus Abfall High-Tech machen: Die Elemente Silizium und Kohlenstoff kommen in den Schalen von Reiskörnern in einem so günstigen Verhältnis vor, dass beim Verkoken dieses Abfallproduktes fadenförmige, hochtemperaturbeständige Kriställchen aus [Siliziumkarbid](#) heranwachsen, die sich für die Verstärkung von Metallen wie Titan eignen. Das Material ist für die Hülle neuer Raumgleiter in der

Entwicklung – eine echte Aschenputtel-Karriere.

Schließlich ist mit Silizium heute tatsächlich eine Art Stein der Weisen gefunden worden. In der Gestalt von Computer-Chips hat das unscheinbare Element der Welt einen phantastischen Technologiesprung gebracht. Und es könnte mit etwas Glück dazu beitragen, das Ende der Ära von Dampfturbine und Explosionsmotor einzuläuten: Solarzellen stinken nicht, sie glitzern nur.

In der Zwischenwelt

Das Glitzern der neuen Technologien ist ganz wesentlich das Werk der *Physik der kondensierten Materie*, enger: der Physik der festen Körper. Während aber Kosmologie und Elementarteilchenphysik die Phantasie durch Vorstellungen von unendlich Großem und unendlich Kleinem reizen, scheint die Wissenschaft der festen Materie eher dem Alltäglichen verhaftet. Dabei besitzt die *Festkörperphysik* ihre eigenen romantischen Qualitäten: In der Welt zwischen den Quarks und den Quasaren, zwischen Atomkernen und Galaxien liegt das Reich der unendlich vielen Dinge.

Die gesamte uns umgebende Natur besteht letztlich aus nur etwa 100 verschiedenen Bausteinen, den chemischen Elementen – jedoch in abermilliardenfach unterschiedlicher Zusammensetzung. Allein die daraus zusammengesetzte „tote“ [Materie](#) existiert in einer Vielzahl von Zuständen: in Kristallen und Gläsern, in Flüssigkeiten, Gasen und Dämpfen, in Nordlichtern und Blitzen. Wir finden Steine und Sanddünen, Wolken und Wasserwirbel, wir sehen sie brechen und fließen, verdampfen und gefrieren in regelmäßigen und unregelmäßigen Strukturen. Die Physik der kondensierten Materie navigiert auf einem unendlich ausgedehnten Meer kaum fassbarer Wandlungsfähigkeit und Komplexität. Dieses Heft ist die Seekarte dazu – wenn auch nur mit sehr grobem Maßstab.

Ich brauche nicht jeden Nagel des Schiffes zu kennen. Ich muss aber den Menschen den Drang zum Meer vermitteln ...

Antoine de Saint-Exupéry

Jedoch:

Nicht jeder, der nach Indien fährt, entdeckt Amerika.

Erich Kästner

Trotzdem: Wendy's Hausdrachen kann fast versprochen werden.

Materiezustände

Ein und derselbe Stoff kann – je nach Temperatur, Druck und anderen Gegebenheiten – in verschiedener Gestalt auftreten, etwa fest, flüssig oder gasförmig. Wenn fest, dann sowohl kristallin, die Atome also in Gittern wohlgeordnet; oder amorph, dann mit eher chaotisch arrangierten Atomgruppen, wie bei Glas. Je nach Art der chemischen Bindung werden metallische, ionische oder molekulare Festkörper unterschieden. Der flüssige Status kennt ebenfalls Zwischenstufen; Flüssigkristalle etwa sind teilgeordnet. Wenn die Atome hoch erhitzter Gase Teile ihrer Elektronenhülle verlieren, spricht man von einem Plasma – kurzum, die Ordnungszustände der Materie sind reichhaltig und keineswegs erschöpfend erforscht.

Wismut, ein Metall, das bizarre Kristalle ausbildet. Das Element tritt am augenfälligsten in Verbindung mit Sauerstoff und Chlor in Erscheinung, so nämlich kann es Lippenstift, Nagellack und Lidschatten perligen Glanz geben. Ernsthafte Arbeit verrichtet es z. B. als Bestandteil von Hochtemperatur-Supraleitern. (Quelle: Institut für Kristallographie der Uni Köln, Foto: Bergerhof Studios, Suzy Coppens)



Turmalin
Ein komplexes Borsilikat, in Holland „Asantrekker“ getauft, weil die Kristalle bei Erwärmung Oberflächenladungen ausbilden, die eben auch Asche anziehen. Dieser „pyroelektrische Effekt“ ist eine von vielen kristallinen Eigenarten, die die Neugier der Alchimisten anstachelten und schließlich von einer soliden Wissenschaft tiefgründig erklärt werden konnten. (Fotos Turmalin und Kalialaun: Bergerhof Studios, Suzy Coppens)

Rätselhafte Effekte ...

Im Jahre 1703, so die Legende, beobachteten holländische Gelehrte einen **Turmalin**-kristall, „welcher die Eigenschaft hätte/ dass er die Turff-Asche auf der heißen oder glühenden Turff-Kohle/... wie ein Magnet das Eisen/an sich ziehe ...“ Der so genannte pyroelektrische Effekt, eine neue Quelle statischer Elektrizität, war entdeckt; die richtige Deutung ließ allerdings fast 200 Jahre auf sich warten.

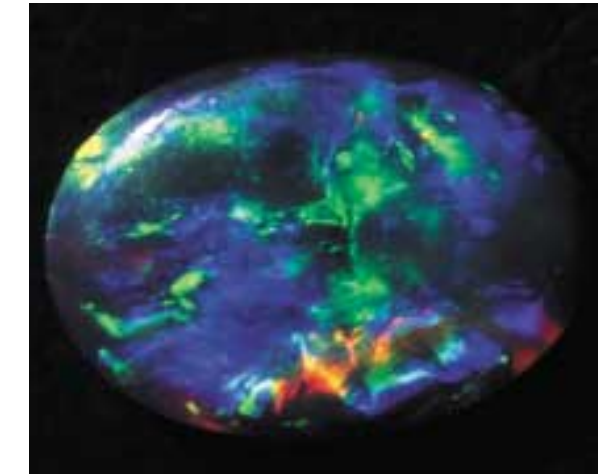
Mit kräftigen Schlägen hätten die Holländer dem Turmalin elektrische Funken entlocken können. Turmalin nämlich ist – wie Quarz – nicht nur pyroelektrisch sondern auch piezoelektrisch: Bei Deformation solcher Kristalle werden elektrische Ladungen frei. Wird, umgekehrt, an einen solchen Kristall eine elektrische Spannung angelegt, dann verformt er sich.

... und ihre atomaren Ursachen

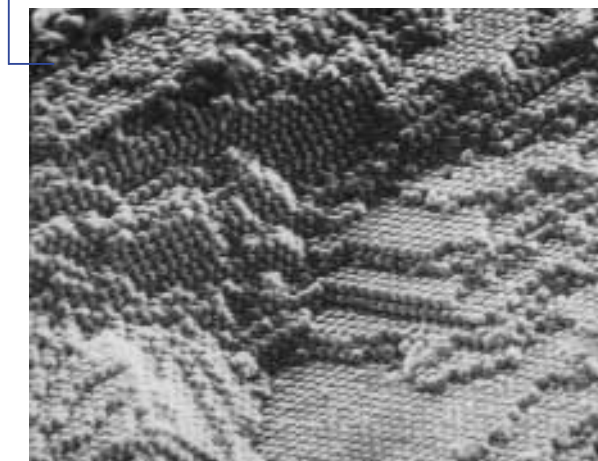
Der piezoelektrische Effekt war eine der vielen Eigentümlichkeiten von Kristallen, die im 19. Jahrhundert entdeckt wurden. Deren Ursache schien in der inneren Struktur der Kristalle zu liegen: Forscher vermuteten, dass Kristalle aus einer regelmäßigen Anordnung von Atomen – einem so genannten Gitter – aufgebaut sind. Der unmittelbare Beweis dafür gelang jedoch erst 1912.

Die Beweistechnik lässt sich am Beispiel eines glitzernden **Opals** erklären. In einem solchen Edelstein sind Mikrometer kleine **Kügelchen** aus wasserhaltigem Siliziumdioxid (aus dem auch Sand besteht) regelmäßig geschichtet – wie Orangen in einem Stapel. Trifft weißes Licht auf dieses Kugeligitter, so wird es in seine Spektralfarben aufgefächert („gebeugt“): Die unterschiedlichen Bestandteile des Lichts werden je nach Farbe, also Wellenlänge, in verschiedene Richtungen abgelenkt. Wenn das gestreute Licht wieder zusammentritt und sich die Wellenzüge der einzelnen Komponenten überlagern, leuchten manche Farbanteile stärker, manche schwächer – der Opal schillert. Aus diesem Farbmuster lässt sich im Prinzip die innere Grobstruktur des Opals rekonstruieren: die Lage der das Licht beugenden Kugelebenen sowie die Größe der Kugeln.

Kalialaun, eine Substanz, die unter anderem zum Versiegeln von Rasierwunden verwendet wird, bildet große Kristalle. Aus deren regelmäßiger Form haben Wissenschaftler einst auf die Existenz atomarer Baublöcke geschlossen.

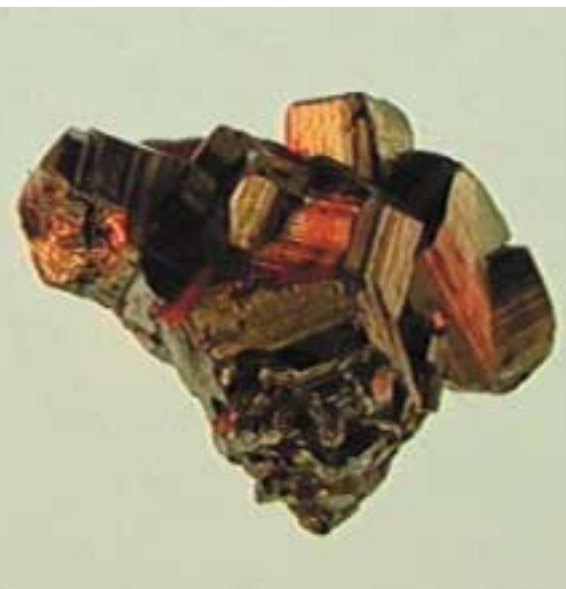


Opal
Wenn einfarbiges Licht ein winziges Hindernis trifft, erscheinen dahinter leuchtende Flecken. Weißes Licht erzeugt ein buntes Muster, da die Auffächerung von der Wellenlänge, also der Lichtfarbe, abhängt. Wird Licht von vielen dicht aneinander liegenden Rillen gestreut, wie bei den „Pits“ einer CD, so überlagert sich das gebeugte Licht jeder Rille mit dem jeder anderen („Interferenz“); das Ergebnis sind Regenbogenreflexe. Beim Opal wird das Farbenspiel von regelmäßig angeordneten Siliziumdioxid-Kügelchen hervorgerufen. (Quelle: Institut für Kristallographie der Uni Köln)



Das Rasterelektronenmikroskop zeigt das Kugeligitter eines funkelnden Opals. Ähnlich arrangieren sich die – zehntausendfach kleineren – Atome oder Moleküle in einem Kristall. (Quelle: Institut für Kristallographie der Uni Köln)

Enthüllung der Struktur



Pyrit, aus Eisen und Schwefel zusammengesetztes Mineral, das Schatzsucher schon mal als „Katzengold“ in die Irre führt. Die innere, atomare Struktur lässt sich aus den Reflexen von Röntgenlicht rekonstruieren, hier ein so genanntes „Laue-Diagramm“ (Bild oben). Jeder Punkt repräsentiert eine atomare Ebene. (Quelle: Institut für Kristallographie der Uni Köln, Foto: Bergerhof Studios, Suzy Coppens)

Die Wellenlänge von Röntgenstrahlen ist tausendfach kleiner als die von sichtbarem Licht und liegt damit im Bereich atomarer Dimensionen. Eine Regel besagt, dass nennenswerte Beugungserscheinungen nur dann auftreten, wenn beugende Struktur und Wellenlänge der Strahlung ähnlich groß sind. Sollte sich mit Röntgenlicht – 1895 von Wilhelm Conrad Röntgen entdeckt – die Atomgitterhypothese beweisen, die Feinstruktur von Kristallen entschlüsseln lassen, in Analogie zum Opal?

Viel mehr als das. 1912 traktierten zwei Studenten des Göttinger Physikprofessors Max von Laue auf dessen Anregung einen Kupfersulfatkristall mit Röntgenstrahlung: Auf einem Film erhielten sie eine Serie von **Punktmustern**, die als Beweis für die Existenz von Atomgittern gelten konnten. Ein Jahr später hatte der Brite Lawrence Bragg einen mathematischen Zusammenhang zwischen den Punktmustern und der Anordnung der Atome im Kristall hergestellt, so dass man fortan den atomaren Aufbau eines Kristalls anhand seines Beugungsmusters ermitteln konnte. Damit war die Kristallstrukturanalyse geboren und mit ihr eines der wichtigsten Instrumente der Festkörperphysik. Phänomene wie die Piezoelektrizität konnten jetzt atomar gedeutet werden.

So auch die materielle Basis des Lebens. Im April 1953 veröffentlichten James Watson und Francis Crick in der britischen Wissenschaftszeitschrift Nature die Struktur der Erbsubstanz DNS – das größte Geheimnis, das die belebte Natur zu bieten hat, gelüftet mit verfeinerten Mitteln der Kristallstrukturanalyse.

Synchrotron-Strahlung für komplexe Kristalle

In einem Atom umschwirren Elektronen den Kern wie Bienen ihren Stock. Viele Materialeigenschaften – ob fester, flüssiger oder gasförmiger Stoffe – werden durch die Gestalt der Elektronenwolke bestimmt: Sie entscheidet, ob ein Material metallisch, halbleitend oder isolierend ist. Da Röntgenwellen bevorzugt von Hüllenelektronen gestreut werden, liefert die Probenanalyse mit Röntgenstrahlung wichtige Informationen über Struktur und Eigenschaften des untersuchten Materials.

Wenn fast lichtschnelle, geladene Partikel in eine Kreisbahn gezwungen werden, entsteht Synchrotron-Strahlung, eine besondere Art der Röntgenstrahlung. Entlang einer Kreisbahn ändert sich beständig die Bewegungsrichtung der Ladung, die Ladung wird also beschleunigt. Beschleunigte Ladungen aber strahlen elektromagnetische Energie ab, unter den richtigen Gegebenheiten eben auch Röntgenstrahlung.

Die Strahlung eines Synchrotrons ist um Größenordnungen intensiver als die gewöhnlicher Röntgenquellen. Damit ausgestattet, wagen sich Forscher an die Aufklärung der Struktur komplexer Proteine (Eiweiße). Solche Biomoleküle sind keine starren Gebilde, sie reagieren auf ihre Umgebung und können dabei blitzschnell die Form ändern. Mit der Röntgenstrukturanalyse lassen sich selbst unterschiedliche Bewegungsstadien unter die Lupe nehmen. Eines der ehrgeizigsten Ziele: die Entschlüsselung der Ribosomen; jener Mikromaschinen im Inneren der Zellen, die mit Erbsubstanzschnipseln als Programm Proteine herstellen.

Mit dem Jülicher Neutronenspinecho-Spektrometer lässt sich die Bewegung von Polymermolekülen verfolgen. (Foto: FZ Jülich)



Neutronen für die Strukturanalyse

Auch Neutronen sind begehrte Detektive, ähnlich wie Röntgenstrahlen helfen sie der Festkörperwissenschaft, Materialstrukturen aufzuklären. **Neutronen** kommen in den meisten Atomkernen vor, als Quelle freier Neutronen dienen im Allgemeinen besondere Forschungsreaktoren. Wie alle sub-mikroskopischen Partikel zeigen auch Neutronen eine Anfälligkeit zur „Persönlichkeitsspaltung“: Sie haben sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften. Wobei die Wellenlängen im Bereich atomarer Distanzen liegen. Während Röntgenwellen besonders empfindlich auf die Elektronenhüllen der Atome reagieren, sind die ungeladenen Neutronen subtiler, sie erfüllen Eigenschaften der Atomkerne. So sind die stabilen Isotope des Wasserstoffs – Hydrogenium und Deuterium – zwar chemisch identisch, für Neutronen aber sehr unterschiedlich. Dies lässt sich ausnutzen, um die genaue Gestalt eines geknäuelten Polymermoleküls in einer Schmelze aus gleichen Polymermolekülen zu bestimmen. Zunächst erscheint dies so aussichtslos wie der Versuch, den Weg einer Nudel in einer Portion Spaghetti zu verfolgen. Durch Beimischung einiger mit Deuterium markierter Moleküle wird dies mit Neutronen aber leicht möglich. Messbar sind auch Kräfte zwischen Atomen sowie elastische Eigenschaften molekularer Gebilde.

Neutronen sind außerdem kleine Magnetsonden: Sie spüren den Magnetismus auf atomarer Skala und erlauben einzigartige Einblicke in die mikroskopischen Eigenschaften magnetischer Materialien. Neben der Analyse mit Röntgen- oder Neutronen-Wellen ist mittlerweile eine Vielzahl weiterer „Spektroskopie-Methoden“ entwickelt worden, wie etwa die Elektronen- oder Helium-Beugung. All diese Verfahren ergänzen sich gegenseitig bei der Aufklärung der atomaren Struktur und der Dynamik der Dinge, die uns umgeben.

Silizium-Wafer mit modernen Logik-Chips (AMD K6-2). Neueste Designs bringen 35 Millionen Transistoren auf der Fläche eines Daumennagels unter. Um 2012 herum dürfte die Industrie auf eine prinzipielle Schranke für weitere Verkleinerungen stoßen: die Körnigkeit der Materie. (Quelle: Advanced Micro Devices)

Filigrane Flächen

Wie der Transistor in die Welt kam

Für die Elektronik war die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts das Zeitalter der Elektronenröhre. Sie erlaubte die Entwicklung des Radios, der Telekommunikation, des Fernsehens und der ersten digitalen Computer. Letztere hatten allerdings den Stromverbrauch einer Kleinstadt und lagen häufig still – die Röhren waren unzuverlässig. Die Industrie suchte nach einer Alternative in der Gestalt eines festen, kristallinen Verstärkers für schnelle elektrische Schwingungen.

Der Vorläufer der ersten wirklich tauglichen Kristallverstärker entstand am 23. Dezember 1947, als Walter Brattain in den New Yorker Bell Laboratories ein mit einer dünnen Goldschicht bedampftes Plastikdreieck nahm, mit einer Rasierklinge einen Schlitz quer über die Dreiecksspitze machte und die geschlitzte Spitze mittels einer verbogenen Büroklammer auf einen Germaniumblock presste. Diese Anordnung verschiedener Elektroden an einem Kristall verstärkte bei Zimmertemperatur Wechselspannungssignale mit Frequenzen im Kilohertz-Bereich, erreichte also das „hohe C“. Der [Transistor](#) war erfunden.

Das Ergebnis schien Brattains Arbeitsgruppe, zu der noch John Bardeen und William Shockley gehörten, so bemerkenswert, dass sie das Militär zu Rate zog: ob da nicht etwas zu fördern oder gar geheimzuhalten sei. Das Militär verneinte nach einem kurzen Blick auf die Erfindung, und die Bell Laboratories stellten den Transistor am 30. Juni 1948 der Öffentlichkeit vor.

Die war nicht sonderlich beeindruckt. Die New York Times schrieb anderntags auf der vorletzten Seite: „Gestern wurde von den Bell-Telephone-Laboratories, 463 West Street, zum erstenmal ein Transistor genanntes Bauelement vorgestellt, das in einem Radio Verwendung

Der Ur-Transistor, ein Replikat: Zwei dicht benachbarte Kontakte, der Emitter und der Kollektor, werden mittels einer Büroklammer auf die Oberfläche eines Germanium-Kristalls, die Basis, gepresst. Das v-förmige Objekt ist

ein mit einem Goldband überzogenes Plastikdreieck, das an der Spitze mit einer Rasierklinge geritzt wurde, um die dicht benachbarten Kontakte zu schaffen. (Foto: FZ Jülich, W.P. Schneider)

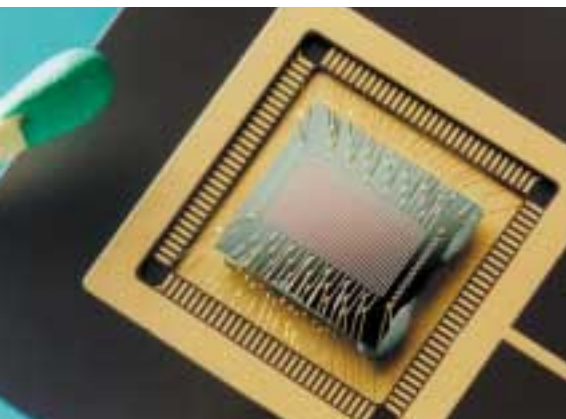


finden und die bisher übliche Vakuumröhre ersetzen kann ... Es wurde aber behauptet, dass man mit dem Transistor auch Radiowellen erzeugen und empfangen könne ...“

Ein eher lauwarmer Empfang für eine der folgenreichsten Erfindungen in der Geschichte der Menschheit, die – schließlich in der Gestalt des Elements Silizium – zu einem wahren Stein der Weisen mutieren sollte.

Transistoren sind Bauelemente, mit denen sich elektronische Signale schalten und verstärken lassen. In der Regel haben Transistoren drei elektrische Kontakte – der Stromfluss über zwei dieser Kontakte lässt sich durch den dritten steuern. Heute gibt es Transistoren, die mit der Leistung eines wechelnden Amperenfühlers einen Elektroherd schalten könnten.

Die Massenfertigung von Bauelementen aus Silizium begann um 1960, als es gelang, [Silizium](#) hochrein herzustellen. Silizium ist ein „Halbleiter“, ein Stoff mit besonderen elektronischen Eigenschaften. Das Element wurde schnell zum Material der Wahl, weil es, zum einen – als Siliziumdioxid in gewöhnlichem Quarzsand steckend – sehr verbreitet und damit billig ist. Zum anderen bildet Silizium an seiner Oberfläche einen sehr stabilen, fest haftenden, bestens isolierenden Oxidfilm aus, wenn es unter Sauerstoff erhitzt wird. Dieser Film lässt sich fotolithografisch zu einer filigranen Maske ätzen, durch deren Aussparungen Fremdatome so in das Silizium einwandern, dass kleine Transistoren und andere elektronische Komponenten entstehen. Silizium macht mithin „integrierte Schaltungen“ möglich, in denen viele miteinander verbundene Transistoren, Dioden, Widerstände, Kondensatoren auf einem Siliziumkristallstück, dem „Chip“, arrangiert sind.



Schnüffel-Chip
Pfenniggroßes Herzstück einer elektronischen Nase, die unterschiedlichste Gase erschnuppern kann. (Quelle: FZ Karlsruhe)

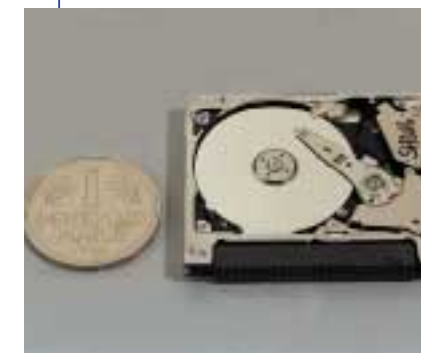
Einkristall
Das hochreine Material für Silizium-Wafer wird durch langsames Drehen und Ziehen eines Kristallkeims aus einer Siliziumschmelze herangezogen. Der bislang übliche Durchmesser von 20 Zentimetern soll jetzt auf 30 Zentimeter vergrößert werden; die Industrie erhofft sich davon eine weitere Erhöhung der Produktivität. (Quelle: Wacker Siltronic)



Computergedächtnis

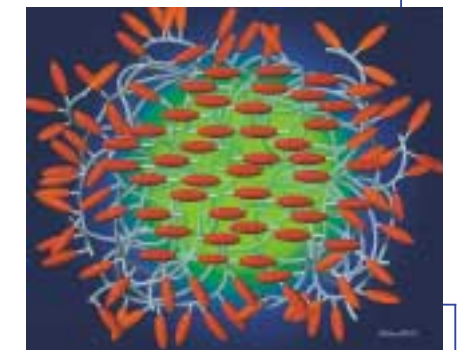
Die Rechenleistung moderner Chips hätte wenig Wert, stünde ihr nicht ein großes, schnelles Gedächtnis in der Gestalt einer Festplatte zur Seite. [Die Entwicklung](#) der Festplattenspeicher ist ein weiterer Triumph der Festkörperphysik, die der Chip-Entwicklung an Dynamik nicht nachsteht. Die Kapazität der Festplattenspeicher stieg in den 1980er Jahren bis zu 30 Prozent pro Jahr; das jährliche Wachstum beschleunigte sich in den 1990ern auf 60 Prozent. Derzeit verdoppeln sich die Festplattenkapazitäten alle neun Monate und lassen damit die Verdopplungsraten der Chip-Leistung weit hinter sich. Der rasante Fortschritt wird von einem Effekt beflügelt, der zwischen 1986 und 1988 bei Grundlagenstudien am Forschungszentrum Jülich entdeckt wurde: Magnetfelder verändern in einem Stapel hauchdünner Metallschichten den elektrischen Widerstands. Die Entdeckung dieses Riesen-Magnetowiderstandseffekts (engl. giant magnetoresistance effect, kurz GMR) wurde 1998 mit dem Zukunftspreis des Bundespräsidenten ausgezeichnet.

Das Phänomen lässt sich nutzen, um extrem empfindliche Magnetfeld-Sensoren herzustellen, etwa für die [Leseköpfe](#) neuer Festplattenspeicher. Wie dicht Informationen auf eine Festplatte gepackt werden können – die Kleinheit der magnetischen Schrift – hängt von der Empfindlichkeit ab, mit der ein Lesekopf Änderungen der magnetischen Feldstärke wahrnimmt. GMR-Sensoren sind hier besonders feinfühlig. Die mit GMR-Technik bald mögliche Speicherdichte wird auf mindestens zehn Gigabit pro Quadratzentimeter geschätzt. Das ist ungefähr die hundertfache Speicherdichte einer CD.



Entwicklung der Speichertechnik: Von den frühen Lochkarten (die abgebildeten sind ungestanzt) über den Ringkernspeicher aus den 1960ern (512 Byte) bis zur Festplatte Baujahr 1998 (340 Megabyte). (Quelle: FZ Jülich, W.P. Schneider und IBM)

Schreib-/Leseköpfe eines Festplattenspeichers können die beschichteten Scheiben – über die sie im Abstand des Fünftausendstels des Durchmessers eines Haars „fliegen“ – blitzschnell in winzigen, konzentrischen Arealen magnetisieren und die Magnetisierung bereits beschriebener Areale lesen; neuere Köpfe nutzen dabei den Riesen-Magnetowiderstandseffekt. Selbst schwache Magnetfelder lassen sich so über die Messung eines elektrischen Widerstands aufspüren.



PAP auf molekularer Ebene: Die stäbchenförmigen Moleküle liegen im „unbeschriebenen“ Polymerfilm völlig ungeordnet vor (Bild oben). Um Information zu speichern, wird der Polymerfilm mit Laserlicht bestrahlt, dadurch richten sich die Moleküle aus – das PAP wird beschrieben. (Quelle: Bayer)

Optische Speicher für Hollywood

Gleichermaßen interessant ist die Fortentwicklung optischer Speichermethoden. Ein neuartiges, bei Bayer-Leverkusen entwickeltes „photoadressierbares Polymer“ (PAP) wechselt unter Laserbestrahlung seine [Molekülstruktur](#). Eine punktuelle Veränderung, die sich wiederum mit Laserlicht, diesmal abgeschwächt, auslesen lässt. Das Material ist geeignet für die holographisch-optische Speicherung, die auch das Volumen, die Tiefe, eines Materials ausnutzt. Ein Polymerspeicher von der Größe einer CD würde mit dieser Technik mehr als das Tausendfache des Informationsgehaltes einer herkömmlichen CD tragen. Mehr noch: die Schreib- und Lesegeschwindigkeit wäre mit einigen Gigabit pro Sekunde für Multimedia-Anwendungen mehr als schnell genug; die ersten, in vielleicht fünf Jahren zu erwartenden Produkte sollen denn auch Speicher für die Filmindustrie sein.

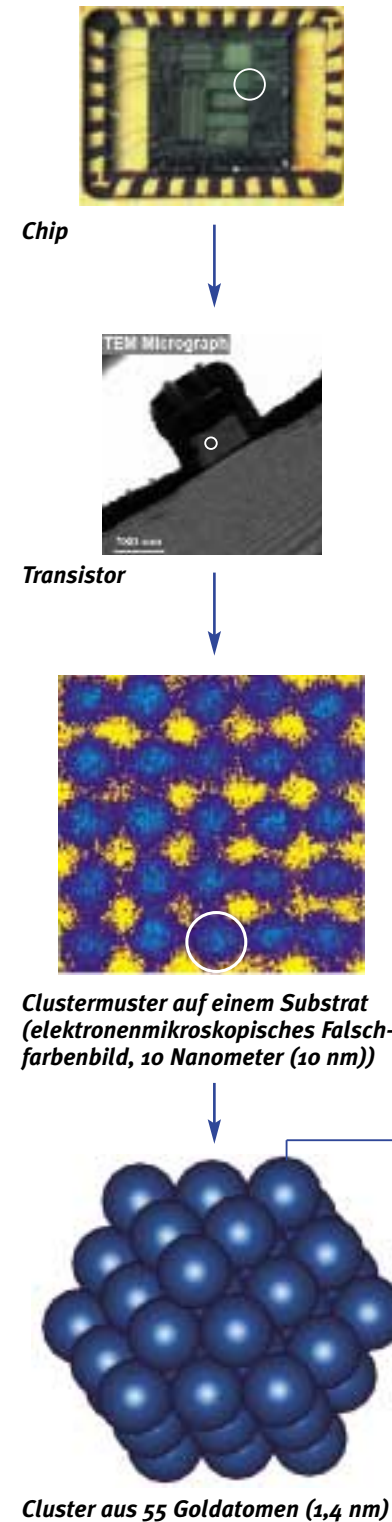
Abstecher ins Quantenland

Quantenblume
Elektronischer Zustand einer Silberinsel mit neun Nanometern Durchmesser. Rastertunnelmikroskope ermöglichen seit wenigen Jahren eine neue Art von Experimenten bei tiefen Temperaturen: Mit hoher Energie- und Ortsauflösung können die elektronischen Zustände und Schwingungsmoden von einzelnen Atomen oder Molekülen auf Oberflächen spektroskopiert werden. (Quelle: Institut für Experimentelle und Angewandte Physik der Uni Kiel)

„Moore's Gesetz“, bereits 1965 von Gordon Moore aufgestellt, besagt, dass sich die Computerleistung ungefähr alle anderthalb Jahre verdoppelt. Ein Grund für diesen ungebrochenen Fortschritt ist die ständige Verkleinerung der Chip-Strukturen, die es gestattet, immer mehr Transistoren zu integrieren – wer einen Bleistift auf einen modernen Chip setzt, darf heute bis zu hunderttausend und mehr Transistoren unter der Spitze vermuten. Eine Entwicklung, die aber vor allem immer kürzere Signallaufzeiten zur Folge hat. Die Chip-Designer rechnen tatsächlich mit jedem Millimeter; die Lichtgeschwindigkeit, die mit 300.000 Kilometer pro Sekunde einst stattlich schien, ist ihnen längst zu einer lästigen Beschränkung geworden.

Der Verkleinerung der Chip-Strukturen aber ist eine natürliche Grenze gesetzt: der atomare Aufbau der Materie, ihre Körnigkeit. Und: mit den schrumpfenden Dimensionen schrumpft auch die Zuständigkeit der klassischen Physik, beginnen Quantenphänomene zu dominieren, und die sind überaus merkwürdig.

So treten Photonen, die Träger des Lichtes, sowohl in Wellengestalt wie als Teilchen auf: Eine bunte Seifenblase kündigt, ähnlich wie ein Opal, von der Welleneigenschaft des Lichtes. Das Foto der Seifenblase zeugt dagegen vom Partikelcharakter des Lichtes: Die mikroskopisch kleinen Silberhalogenidkörner des Films sind offenkundig von scharf lokalisierten Teilchen getroffen worden. Umgekehrt verhalten sich die atomaren Bauteile der Materie – wie Neutronen und Elektronen – nicht nur als Partikel, sondern auch als Wellen, wenn sie in Streuexperimenten Kristallgitter durchdringen.



Größenvergleich: Die filigranen Strukturen eines Computer-Chips sind mit bloßen Augen gerade noch zu erkennen. Um Cluster sichtbar zu machen, ist schon ein Elektronenmikroskop nötig. (Quelle: Institut für Anorganische Chemie der Universität GH Essen und Zeitschrift für Angewandte Chemie)

Die Quantenmechanik kann solche Phänomene in der Sprache der Mathematik präzise beschreiben. Sie ist die am genauesten überprüfte physikalische Theorie überhaupt und bietet Erklärungen über Vorgänge im Inneren eines einzelnen Atoms genauso wie über die Lebensgeschichte „Weißer Zwerge“ – jener Sternart, die das Endstadium auch unserer Sonne darstellen wird.

Jedoch: Der Versuch, die Quantenmechanik mit den bewährten Mitteln des „gesunden Menschenverstandes“ auszuloten, führt in unauflösbare Paradoxa. Wirkungen ohne Zeitverzögerung scheinen möglich; ein Ding scheint an verschiedenen Orten zugleich sein zu können; verschiedene Teile treten zu einem Einigen zusammen und können als Ganzes zwei Spalte in einer Wand durchlaufen, was nach überkommenem Denken eigentlich eine Teilung voraussetzt. Theoretiker unter den Festkörperphysikern haben dabei ihre besonderen Schwierigkeiten: Die Wechselwirkung von sehr vielen Quanten-„Teilchen“ – etwa den Elektronen eines Festkörpers – ist so schwierig zu fassen, dass bisher dafür entwickelte Theorien immer nur Teilaspekte richtig behandeln.

Die Festkörperphysik hat zum einen geholfen, die experimentellen Mittel für die Erkundung von derlei Unbegreiflichem zu finden, zum anderen hat sie überaus nützliche Entdeckungen machen können, wie den „Quanten-Hall-Effekt“. Klaus von Klitzing (Nobelpreis 1985) hatte am Hall-Effekt zeigen können, dass bestimmte elektrische Eigenschaften in präzisen Sprüngen auftreten: Wenn quer zu einem stromdurchflossenen Stab ein Magnetfeld wirkt, entsteht an den Rändern des Stabes eine elektrische Spannung, die Hall-Spannung. Normalerweise ist die Kennkurve zwischen Spannung und Strom eine glatte Linie. Jedoch geht bei sehr starken Magnetfeldern und sehr tiefen Temperaturen die glatte Linie in eine präzise gestufte Treppe über. Die Sprünge sind so markant, dass sie heute weltweit zur Definition der Maßeinheit für den elektrischen Widerstand genutzt werden.

Es kamen weitere Überraschungen. Bei noch stärkeren Magnetfeldern können in Mikrostrukturen eingeschlossene Elektronen in den bizarren Zustand einer Quantenflüssigkeit geraten. Sie scheinen als Quasiteilchen plötzlich Bruchteile der eigentlich unteilbaren Elementarladung, der Ladung des Elektrons, zu tragen. Für Entdeckung und Deutung dieses Effektes gab es 1998 den Nobelpreis für Physik, unter anderem für den Deutschen Horst Störmer. Derartige Phänomene sind im Alltag durchaus nützlich. Sie befördern die ständige Verfeinerung der Mess- und Signaltechnik, was etwa das Satellitennavigationssystem GPS ermöglicht hat.

Quanteneigenschaften kommen auch zutage, wenn Elektronen in Metall-Cluster, winzigen Atomhaufen, eingeschlossen werden. Solche Cluster könnten eines Tages als elektronische Schalter dienen: So wie eine Haselnuss eine Hamsterbacke beult, ändert der Zutritt einer einzigen Ladung die elektronischen Eigenschaften eines Clusters so drastisch, dass mit einzelnen Elektronen ein Schaltzustand, ein Bit, repräsentiert werden könnte – wenn sich eine zuverlässige Schreib-/Lese-prozedur fände. Da sich Cluster durch Selbstordnungs-kräfte in einem perfekten Gitter arrangieren, wäre es möglich, auf der Fläche eines heutigen Transistors viele tausend „Quantenschalter“ unterzubringen. Könnte man diese Technik mit den Konzepten eines Quanten-Parallel-Computers verbinden, so ließe sich die Rechenleistung der größten heutigen Computer in einen Stecknadelkopf packen: Eine atemberaubende Vorstellung!

Wie sich dies alles wirklich entwickeln wird, können wir heute kaum abschätzen. Doch im Übrigen gilt, was Michael Faraday, der englische Altmeister des elektrischen Experimentierens, einem Finanzminister sagte, der nach dem Sinn seines Treibens fragte: „Sir, eines Tages werden Sie es besteuern können!“

Physik eiskalt serviert

Seit der Holländer Heike Kamerlingh Onnes 1911 entdeckt hatte, dass Quecksilber bei 4 Grad über dem absoluten Temperatur-Nullpunkt von minus 273,15 Grad Celsius („Null Kelvin“) jeglichen elektrischen Widerstand verliert, waren Wissenschaftler auf der Suche nach Materialien, die dieses vorteilhafte Phänomen auch bei höheren Temperaturen zeigen – denn elektrischer Widerstand verursacht Verluste bei der Übertragung elektrischer Energie. Der nur schleichende Fortschritt bei der Steigerung der kritischen Temperatur, unterhalb derer der Widerstand verschwindet, erfuhr 1986 unerwartet einen Sprung, als der Schweizer K. Alexander Müller und der Deutsche J. Georg Bednorz nach jahrelanger Forschung ein Metalloxid fanden, das auch bei 30 Kelvin – etwa minus 243 Grad Celsius – noch verlustfrei leitete.

Der – mit dem Nobelpreis gewürdigte – konzeptuelle Durchbruch führte zur Entwicklung der so genannten Hochtemperatur-Supraleiter, deren Betriebstemperatur über dem Siedepunkt des flüssigen Stickstoffs, bei minus 196 Grad Celsius, liegt. Ueingeweihte müssen das immer noch als tödliche Kälte empfinden – aber Stickstoff, das war es: Wenn Supraleiter mit billigem Stickstoff gekühlt werden konnten, sollten sich, im Vergleich zur bis dahin notwendigen Helium-Kühlung, die Kühlkosten um den Faktor 100 reduzieren lassen. Der Weltrekord für die höchste kritische Temperatur liegt zur Zeit bei minus 138 Grad Celsius (135 Kelvin).

In einem Supraleiter schließen sich Elektronen zu einem großen Clan, einem makroskopischen Quantenzustand zusammen. Ein supraleitendes Material verhält sich wie ein „Riesenatom“: Etwa wie die Elektronen in einem einzelnen Atom verlustfrei auf stabilen Bahnen laufen, so bewegen sie sich in Supraleitern ungestört auch über weite Entfernungen. Für normale Supraleiter ist dieses Phänomen weitgehend verstanden, doch der genaue Mechanismus der Hochtemperatur-Supraleitung ist bislang ungeklärt.

Die kritische Temperatur ist nicht die einzige Eigenschaft, die einen Supraleiter praxistauglich macht. Die Verarbeitbarkeit ist eine zweite, und da haben die neuen Supraleiter einen Nachteil: sie sind spröde. Kabel aus Hochtemperatur-Supraleitern werden unter hohem Aufwand produziert und sind daher sehr teuer. Dennoch kann ihr Einsatz lukrativ sein, wenn etwa in einem Ballungsgebiet die Kapazität einer vorhandenen konventionellen Kabeltrasse ohne große Baumaßnahmen vergrößert werden soll. Supraleitende Kabel könnten ein Vielfaches an Energie transportieren. Das praktische Potential solcher Kabel wird derzeit an mehreren Stellen der Welt getestet. Im Übrigen lassen sich mit Stromspulen aus Supraleitern besonders starke Magnetfelder erzeugen. Solche Spulen kommen unter anderem in Kernspin-Tomographen zum Einsatz, die in der Medizin zur schonenden Untersuchung innerer Organe benutzt werden.

Bestimmte Supraleiter können sich an Magnetfeldern „festhalten“ und somit ihre Lage im Raum fixieren. Innerhalb eines ungleichmäßigen Magnetfeldes versucht ein solcher Supraleiter seine Position zu halten – er kann sogar in der Schwebelage bleiben. Dank dieses Phänomens lassen sich reibungsfreie Transportsysteme und magnetische Lager konstruieren, die nicht geregelt werden müssen. Derzeit wird hierfür eine keramische Verbindung aus Yttrium, Barium und Kupferoxid favorisiert.

Mit den neuen Supraleitern lassen sich auch winzige Mikrowellen-Schaltkreise für die Empfangs- oder Sendestufen von Satelliten- und Mobilfunksystemen herstellen. Schließlich sind mit Supraleitern auch SQUIDS (engl. superconducting quantum interference devices) möglich geworden – hochempfindliche Sensoren, die noch ein Milliardstel der Stärke des Erdmagnetfeldes nachweisen können. In der mit Erdmagnetphänomenen befassten Geophysik ist der Einsatz von SQUIDS mittlerweile Routine. SQUIDS sind tatsächlich so empfindlich, dass sich mit ihnen Magnetogramme einzelner Organe, etwa des Gehirns, aufzeichnen lassen.



Supraleitende Strombegrenzer können potentiell verheerende Stoßströme niedrig halten, wie sie etwa bei Kurzschlüssen auftreten. (Quelle: Siemens)

Supraleiter in einem Magnetfeld zeigen außergewöhnliche Eigenschaften: Manche Supraleiter verdrängen Magnetfelder komplett aus ihrem Inneren. Andere wiederum schnüren Magnetfelder zu kleinen Bündeln, so genannten Flussschläuchen, die das Material durchdringen. Diese Flussschläuche können an Materialfehlern dauerhaft verankert werden, das Magnetfeld ist „eingefroren“. Während das Innere der Flussschläuche normalleitend ist, bleibt zwischen ihnen die Supraleitung bestehen. In den Flussschläuchen wird das Magnetfeld quasi eingedämmt – wird es zu stark, dann bricht die Supraleitung im gesamten Material zusammen.



Sicherheitskontrolle vor Ort: SQUIDS (Supraleitende Quanteninterferenz-Detektoren) werden unter anderem zur Materialprüfung eingesetzt. Mit ihnen lassen sich verborgene Risse in der Außenhaut von Flugzeugen aufspüren. (Quelle: FZ Jülich)

Modelllok, die dank Supraleitern magnetisch in der Schwebelage gehalten wird. (Quelle: IFW Dresden)

Seifenblasen sind besonders simple selbstorganisierende Strukturen. In den Wänden stecken dicht an dicht Kaulquappen ähnliche Moleküle, deren Schwänze in die Luft, deren Köpfe in das Wasser der Seifenlösung weisen. Die verschiedenen Vorlieben der Enden der Seifenmoleküle sind der Grund für die Reinigungskraft der Seife: Seife kann Schmutzfett mit Wasser verbinden und macht es so entfernbar. (Quelle: Ralf Stannarius, Universität Leipzig)

Komplexe Materie

Als der deutsche Augenarzt Mettenheimer im Jahre 1895 flüssiges Myelin mit seinem Polarisationsmikroskop betrachtete (Myelin ist eine Nervenfasern umhüllende Substanz) sah er unter den gekreuzten Polarisatoren – besonderen Lichtfiltern, die sich auch in Sonnenbrillen finden – helle, leuchtende Farben, was für Flüssigkeiten ganz ungewöhnlich ist. Flüssigkeiten sind unter gekreuzten Polarisatoren gewöhnlich dunkel, weil sie den Polarisationszustand des Lichtes nicht verändern. Myelin dagegen verhielt sich optisch wie ein „doppelbrechender“ Kristall, der die Polarisationssebene des Lichtes beeinflusst. Mettenheimer wusste diese Eigenschaft des Myelins nicht zu deuten; heute wissen wir: Myelin ist ein Flüssigkristall.

Flüssigkristalle

Flüssigkristalline Substanzen weilen in einem eigentümlichen Zustand zwischen fest und flüssig; sie fließen wie Flüssigkeiten, jedoch sind ihre länglichen Moleküle auf bestimmte Richtungen fixiert wie die Sardinen in einem Sardinenschwarm. Diese Eigenschaften haben Flüssigkristallen ein breites Anwendungsfeld erschlossen, etwa bei Flachbildschirmen (LCDs). In der Natur sind Flüssigkristalle etwas durchaus Gewöhnliches, sogar Unentbehrliches; selbst der einfachste Einzeller hat eine Außenhaut aus Flüssigkristallen.

Weiche Materie: Polymere

Flüssigkristalle sind heute zusammen mit anderen neuen und alten Materialien (wie feuchtem Ton) als „weiche Materie“ oder „weiche kondensierte Materie“ mehr und mehr Gegenstand auch der Physik. Aus teils sehr handfesten Gründen: mit Polymeren, Kolloiden und Flüssigkristallen setzt die Industrie Milliarden um. Andererseits ist „weiche Materie“ auch theoretisch reizvoll. So hat die statistische Analyse von Seifenschäumen gewisse Ähnlichkeit mit der String-Theorie, die die Quantenphysik mit den Gesetzen der

Polarisationszustand

Eine auf und ab geschwungene Wäscheleine gleicht einer Welle, die nur in einer Ebene schwingt. Bei einer Lichtwelle spricht man dann von polarisiertem Licht. Normales Licht ist ein in vielen Ebenen schwingendes Wellengemisch. Polarisationsfilter machen daraus pola-

risiertes Licht. Zwei Filter hintereinander, die senkrecht zueinander schwingende Wellen erzeugen, sperren das Licht ganz aus. Liegt aber zwischen den Filtern eine Substanz, die die Polarisationsform des Lichts verändert, dann erscheint nach dem zweiten Filter meist etwas Bunt.



In vielen Kristallen, aber auch in verspannten Materialien wie einem gequetschten Pudding, teilt sich das Licht und läuft verschiedene Pfade mit verschiedenen Geschwindigkeiten entlang. Bei „gekreuzten“ Polarisationsfolien überlagern sich die Teilwellen

am Ende so, dass einzelne Farben ausgelöscht werden: die Verspannung wird als Regenbogen-Spektakel sichtbar. Die Spannungsoptik studiert mit diesem Effekt die Belastungsspitzen von Brückenkonstruktionen etc.. (Foto: Bergerhof Studios, Suzy Coppens)

Schwerkraft zu vereinigen sucht. Und die für die Elementarteilchenphysik entwickelte Theorie der „Renormierungsgruppen“ taugt auch für die Deutung der spontanen Strukturbildung in weicher und körniger Materie, die Entstehung von Wolken, Wellen, oder Riffeln im Sand.

Zu den derzeit ökonomisch attraktivsten Formen weicher Materie gehören Polymere. Polymere sind Materialien aus großen Kettenmolekülen, die wiederum meist aus Aneinanderreihungen vieler, bis zu Zehntausenden simpler Untereinheiten, so genannter Monomere, bestehen.

Polymere gibt es mit einer Vielzahl von Eigenschaften, abhängig von ihrer chemischen und topologischen Struktur. Zur Stoffklasse der Polyimide gehören Materialien, die noch Temperaturen von 300 Grad Celsius standhalten; Siloxane sind noch bei minus 20 Grad Celsius flexibel.

Auch Polymere können Flüssigkristallphasen bilden, in denen sich die Makromoleküle parallel in einer Vorzugsrichtung orientieren. Im festen Zustand sind diese Materialien – etwa Kevlar – extrem belastbar, und Fasern daraus können stärker als Stahl sein.

Leuchtende Polymere

Für die universelle Tapete der Zukunft stehen mittlerweile Polymere bereit, die – von einem milden Strom durchflossen – in den Farben Rot, Grün oder Blau leuchten. Mit Rot, Grün und Blau lässt sich Weiß mischen – eine Tapete aus diesen Polymeren könnte also weiß leuchten, aber auch in jeder anderen Farbe. Ließe sich die Polymertapete Punkt für Punkt ansteuern – etwa mit Hilfe feiner Leiterbahnen – so wäre sie als biegsamer Bildschirm verwendbar. Erste Bildschirme aus leuchtenden Polymeren gibt es bereits, wenn auch nur im Kleinformat.



Eine Cashcard für den Anfang: Leuchtende Polymere, Plastikmaterialien, werden schon bald weite Teile des Display-Marktes bestimmen und womöglich eine Art Tapetenfernseher realisierbar machen: einen Flachbildschirm, der zugleich Lichtquelle ist, sich rollen lässt etc.. Die Entwicklung könnte so billig werden, dass die Wände jeder Keksdose eine Bildgeschichte zu erzählen beginnen. (Quelle: Siemens)

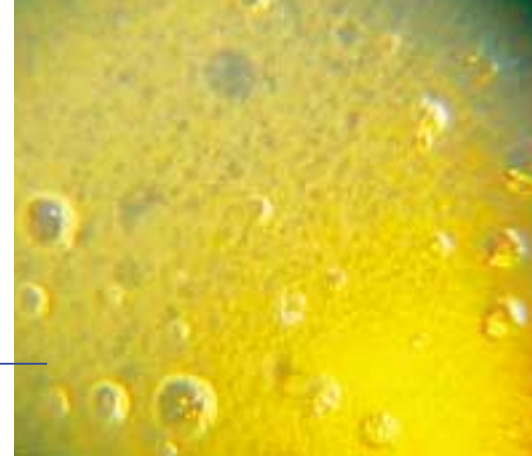
Kolloide

Kolloide sind mikroskopisch kleine Partikel, fein verteilt in einem homogenen Medium. **Kolloide** sind allgegenwärtig: Milch und Blut sind Kolloide, Nebel (Wassertropfchen in Luft) und Mayonnaise (Öltropfchen in Essigwasser) ebenso, aber auch Malerfarben enthalten Kolloide.

Wenn ein Material in der Form sehr kleiner Partikel vorliegt, können sich seine Eigenschaften deutlich von denen unterscheiden, die es als großer Brocken hat. Ein Grund: Bei kleinsten Partikeln liegt ein großer Teil der Atome an der Partikeloberfläche und Oberflächenatome sind, mangels Bindungspartnern, sehr reaktionsfreudig. Dies nutzt man bei der chemischen Katalyse aus. Das Institut für Neue Materialien in Saarbrücken hat Filter für Dunstabzugshauben mit Nanometer großen Teilchen entwickelt, die Küchengeschmacksstoffe katalytisch zerlegen.

Kolloide stabil zu halten ist bislang eher eine Kunst als eine Wissenschaft gewesen; erst in den letzten Jahren hat sich das Verhältnis umgekehrt. In der Folge ist eine chemische Nanotechnologie entstanden, die die Produktion exotischer Materialien ermöglicht. So werden Mikropartikel häufig mit einem elektrisch geladenen Schleier verhüllt, damit die Teilchen in Lösung nicht aneinander kleben. Ganz ähnlich macht es die Natur bei roten Blutkörperchen: deren Außenhaut ist negativ geladen.

Ein sehr angenehmes Kolloid-System ist die **Sauce Bearnaise**, so genannt zu Ehren des großen französischen Königs Henri IV, der 1553 in Bearn geboren wurde. In der Sauce sind wässrige und ölige Komponenten mikrometerfein topologisch auf das Wohlschmeckendste verschachtelt.



Schalottensud-Tröpfchen in Öl, ca. 1/10 Millimeter Durchmesser. Die Kunst, Kolloid-Systeme wie diese stabil zu halten, wissen die Produzenten von Mayonnaise, Sonnenmilch und Anstrichfarben hoch zu schätzen. (Fotos: Bergerhof Studios, Suzy Coppens)



Sauce Bearnaise
Drei Schalotten und zwölf Estragon-Blätter fein hacken, in einer Kasserolle zusammen mit einem Glas Weißwein und einem halben Glas Weinessig auf ein Viertel der ursprünglichen Flüssigkeitsmenge einkochen.

Inzwischen zwei Eigelbe mit Salz und Pfeffer in eine Schüssel schlagen, einen halben Teelöffel Butter dazu tun. Dann den heißen Schalotten-Sud in dünnen Strahlen unter ständigem Rühren mit den Eigelben mischen und nach und nach in kleinen Portionen 200 Gramm Butter unterziehen. Das Ganze durch ein Sieb in einen Topf in einem Wasserbad schütten und cremig rühren. Zum Schluss ein paar Spritzer Zitronensaft dazu, gehackte Petersilie darüber streuen und lauwarm servieren.

Henri IV von Frankreich hat dieses königliche Rezept mehr als verdient, schließlich war er es, der jedem Bewohner seines Reiches einmal in der Woche ein Huhn im Topf gewünscht hatte, was Dank seiner Regierungskunst denn auch in Erfüllung ging.

Zusammenspiel und Selbstorganisation: Ordnung im Chaos

In der belebten Natur werden Komponenten der „weichen Materie“ – wie Flüssigkristalle, Polymere, Kolloide – in einem wilden Wirbel aus Membranen, Micellen und Vakuolen zu immer neuen Formen verwoben. Dabei ordnet sich Materie bisweilen spontan in regelmäßige Strukturen (Selbstorganisation). In harten Festkörpern wie Metallen und Keramiken können so genannte Ausscheidungen und Mikrokristallite entstehen. Werkstoffe mit solch einer Mikrostruktur widerstehen extremen Belastungen oder erinnern sich als „Gedächtnis-Legierungen“ an eingeprägte Formen. Es gibt aber auch Sand und Geröll, strömende Flüssigkeiten und Luftturbulenzen, Wanderdünen und Wolkentürme: Umformung und Bewegung im Überfluss. Steckt hier überhaupt irgendein begreifbares System dahinter?

Erst in den letzten Jahrzehnten wurde erkannt, dass sich wirklich universelle Ordnungsprinzipien hinter Selbstorganisation und Strukturbildung der Materie verbergen. Selbst scheinbar zufälliges Chaos folgt solchen Regeln! Ein Schlüssel war die Entdeckung, dass solche wirren, „fraktalen“ Formen oft durch „Skalengesetze“ charakterisiert werden können: Betrachten wir eine fraktale Struktur etwa mit einem Zoom-Objektiv, so sehen wir bei beliebiger Vergrößerung – also auf allen Skalen – immer wieder das gleiche Bild. Diese Selbstähnlichkeit **fraktaler Gebilde** erlaubt es, sie durch recht einfache mathematische „Potenz-Gesetze“ zu beschreiben. Erstaunlich ist die Tatsache, dass diese Skalengesetze nur von ganz wenigen Eigenschaften des Systems abhängen: Die Gesetze sind nicht materialspezifisch, sie gelten jeweils für riesige Klassen von Festkörpern oder Flüssigkeiten, magnetischen oder elektrischen Phänomenen.

Dieser Durchbruch im Verständnis komplizierter Systeme wurde möglich dank der in der Physik entwickelten mathematischen Methode der Renormierungs-



Fraktale Formen: Romanesco (Türmchenkohl), ein Verwandter des weißen Blumenkohls, zeigt auffällige Selbstähnlichkeit. Die Struktur der Röschen wiederholt sich im Großen und im Kleinen. (Foto: Institut für Theoretische Physik der Uni Gießen, Stefanie Ruß) Und auch metallische Kristallite können in auffälliger Form erstarren. (Bild rechts: Wilfried Kurz, EPFL, Lausanne)



gruppen. Sie ist eine der bemerkenswertesten Leistungen der Physik der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Hinter dem Verfahren steckt die Idee, Wechselwirkungen zwischen einzelnen Molekülen stufenweise durch effektive Wechselwirkungen zwischen immer größeren Molekülgruppen zu ersetzen. Durch diesen, sich wiederholenden Prozess gehen die unwichtigen mikroskopischen Details nach und nach auf in den makroskopischen Eigenschaften des Systems.

Diese Vorgehensweise hat sich als eines der mächtigsten Werkzeuge zur genauen Beschreibung komplexer Prozesse erwiesen. Ferner symbolisiert sie den Über-

gang von einer linear geprägten Physik – mit einfachem Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung – zur Welt der Nichtlinearitäten. Es wird sogar vermutet, dass die Renormierungsgruppen-Methode bei der Erklärung von Mechanismen der biologischen Evolution eine wichtige Rolle spielen könnte. Für Festkörperphysik (die unendlich vielen Dinge), Elementarteilchenphysik (das unendlich Kleine) und Kosmologie (das unendlich Große) markiert die Renormierungsgruppen-Methode schließlich den Beginn einer wunderbaren Freundschaft!

Von Fettaugen zu fernen Galaxien

In den 1940er Jahren experimentierte in den Philips-Laboratorien, Niederlande, ein Wissenschaftler namens Overbeek mit Aufschlämmungen von Quarzsand, die in der Produktion eine Rolle spielten. Er fand, dass die gängige Theorie dazu nicht ganz stimmen konnte: die Kräfte zwischen den Sandkörnern fielen mit dem Abstand von Sandkorn zu Sandkorn schneller ab, als vorhergesagt.

Overbeeks Äußerungen brachten die Kollegen Casimir und Polder dazu, sich genauer mit der Theorie der Van-der-Waals-Wechselwirkung zu beschäftigen. Diese schwache chemische Bindung ist für viele Lebensprozesse genauso bedeutsam wie für das Färben von Jeans, sie hält Geckos an der Decke, sie bestimmt die Form von Fettaugen auf einer Fleischbrühe und eben die Konsistenz nassen Sandes.

Casimir und Polder fanden, dass sich die Sandkörner bei größeren Entfernungen in der Tat schwächer anziehen als vorhergesagt, und damit hätte es sein Bewenden haben können, hätte Casimir nicht weiter nach den physikalischen Hintergründen gefragt und Niels Bohr getroffen, den dänischen Altmeister der Atomphysik. „Nett. Etwas Neues“, murmelte der und „Nullpunktsenergie des Vakuums.“ Er setzte Casimir damit auf eine neue Spur, die zu einer merkwürdigen quantentheoretischen Rechnung führte: Zwei elektrisch leitende, aber ungeladene Metallplatten in einem gewöhnlichen Vakuum, wie man es in jeder Fernsehrohrle findet, sollten sich anziehen, wenn man die Platten sehr dicht aneinander bringt. Der Effekt wurde erst 1997 glaubhaft experimentell bestätigt.

Der Casimir-Effekt wird heute sogar zur Deutung der Expansion des Universums herangezogen, als eine Art Antigravitation. Damit ist der Casimir-Effekt das – im Wortsinne – wohl weitreichendste Phänomen, das in der Festkörperphysik je entdeckt wurde – in einem Eimer nassen Sandes.

Kleine Kraft – große Wirkung: Nähern sich Atome einander an, kommt es zwischen ihnen zur so genannten van-der-Waals-Wechselwirkung. Einer subtilen, meist anziehenden Kraft, benannt nach dem niederländischen Physiker Johannes Diderik van der Waals (1837 - 1923). Dieses Phänomen macht sich auch der Gecko zunutze. Er trägt an den Fußsohlen Millionen von Härchen, die in Aber-tausenden winziger Kissen enden. Jedes dieser mikroskopischen Kissen haftet per van-der-Waals-Wechselwirkung an den Molekülen der Unterlage, über die sich der Gecko bewegt – er kann so an Wänden und Decken entlang laufen. (Foto: dpa)

In der Welt der Zwerge

Nanotechnologie

Ein Nanometer ist der millionste Teil eines Millimeters und damit dasjenige metrische Maß, das der Welt der Atome am nächsten ist. Atome sind nur noch etwa zehnmal kleiner. Das Wörtchen „Nano“ ist aus dem griechischen Ausdruck für Zwerg abgeleitet. Der Schlüssel zur Zwergenwelt wurde 1981 in Gestalt des Rastertunnelmikroskops (engl. scanning tunneling microscope, kurz STM) gefunden. Der deutsche Forscher Gerd Binnig und sein Schweizer Kollege Heinrich Rohrer wurden hierfür mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

Das STM ist mit einer feinen Metallspitze ausgestattet, die mittels eines genialen Piezo-Antriebs sehr dicht an eine leitfähige Probe herangeführt und dort auf Bruchteile eines Atomdurchmessers positioniert werden kann. Ein Piezo-Kristall wird hierzu über Spannungssignale gestreckt und gestaucht und bewegt dabei die Metallspitze. Was wäre wohl passiert, hätten Forscher bereits im 19. Jahrhundert (siehe „Rätselhafte Effekte ...“, Seite 9) die Möglichkeiten erkannt? Wird eine kleine elektrische Spannung zwischen Mikroskopspitze und Oberfläche angelegt, so fließt ein so genannter Tunnelstrom: Ein eigenartiges Phänomen der Quantenphysik, denn Messnadel und Probenoberfläche berühren sich nicht – sie stehen nur extrem nahe beieinander. Der Tunnelstrom hängt stark vom Abstand zwischen Messspitze und Probe ab, so dass nur die äußersten Atome von Spitze und Oberfläche am Stromfluss teilnehmen. Die Messspitze „sieht“ deshalb immer nur einen winzigen Ausschnitt der Probenoberfläche. Die Metallspitze wird zeilenweise über die Probe geführt („gerastert“), ein Computer baut dabei Rasterpunkt für Rasterpunkt ein Abbild der Oberfläche zusammen: Unter geeigneten Bedingungen erscheinen auf dem Monitor Reihen präzise arrangierter Einzelatome und breite Terrassen mit Stufen von gerade einer Atomdicke.

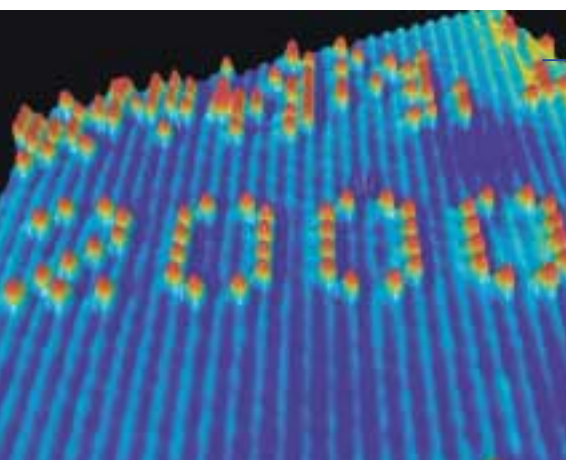
Sensible Nadel: Messspitze eines Rastertunnelmikroskops über einer fingernagelgroßen Graphit-Probe (Quelle: Philip Morris Stiftung)

Binnig und Rohrer werden bei ihren Messungen den Atem angehalten haben – das erste STM war außerordentlich erschütterungsempfindlich. Heute sind die Geräte robuster und haben mitunter Fingerhutformat. In der Oberflächenanalytik ist die Tunnelmikroskopie mittlerweile ein gängiges Verfahren, aus dem sich eine ganze Familie von Rastersondenmethoden entwickelt hat. Sondenmikroskope können Details sichtbar machen, die für ein normales Lichtmikroskop viel zu klein sind. Beim so genannten Kraftmikroskop erinnert die Sonde an eine miniaturisierte Plattenspielnadel, die die Oberfläche quasi ertastet. Mit diesem Mikroskop lassen sich – was mit dem STM kaum möglich ist – auch nichtleitende Werkstoffe untersuchen, ja sogar Zellen in wässriger Umgebung studieren. Und die Technik schreitet ständig voran: 1999 haben Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried bei München herausgefunden, dass eine Sonden spitze auch die charakteristischen Infrarotschwingungen des Oberflächenmaterials erfassen kann. Wie auch mit der an vielen Universitäten eingesetzten „Tunnelspektroskopie“ kann auf diese Weise die chemische Zusammensetzung des

Probenmaterials mit atomarer Auflösung „erfühlt“ werden.

Selbst die Funktion einzelner Atom-Gruppen innerhalb eines Moleküls lässt sich unter die Lupe nehmen. Eine STM-Spitze kann Moleküle zum Leuchten bringen – die vielleicht kleinste Glühbirne der Welt ist ein einzelnes „Fußball-Molekül“ (engl. buckyball). Nanoforscher der Universität Hamburg und anderer Institute können den magnetischen Zustand einer Materialoberfläche Atom für Atom bestimmen. Und dies ist noch nicht alles. Die Spitze eines STM ist nicht nur als Messfühler verwendbar, sondern auch als Werkzeug. Einzelne Atome lassen sich damit auf Kristall-Oberflächen wie Bauklötzchen zu Mustern zusammenfügen, mit ungeahnten Perspektiven für Nano-Ingenieure: Atomare Manipulation!

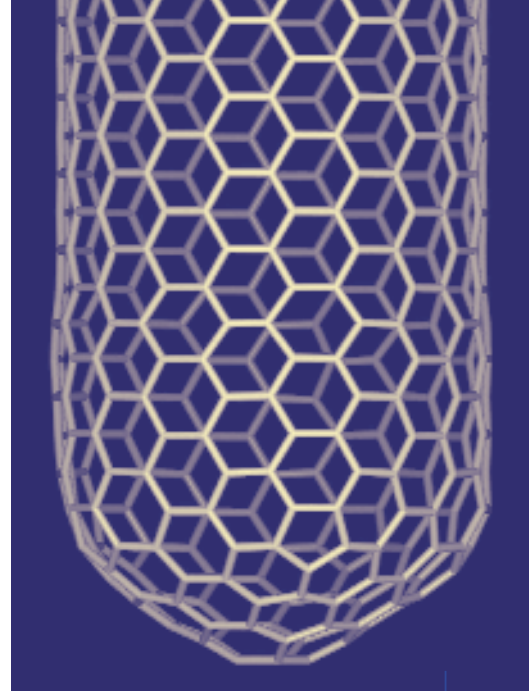
Würden magnetische wie andere Speicher tatsächlich einmal nur mehr ein Nanometer als Abmessung für einen Speicherpunkt benötigen, ließen sich auf einem Quadratzentimeter zehntausend Gigabyte unterbringen. Eine mit dieser Speicherdichte gesegnete CD hätte eine Musik-Laufzeit von 100 Jahren.



Das Millennium lässt grüßen: Einzelne Kohlenmonoxid-Moleküle, die mit Hilfe eines STM auf einem Metallsubstrat arrangiert wurden. Die „Zebrastrreifen“ sind einzelne Atomreihen. (Quelle: Institut für Experimentalphysik der FU Berlin)



Dieser Picasso ist fünfmal schmäler als ein Menschenhaar. Das Muster wurde mit einem optischen Sondenmikroskop „gezeichnet“ und mit einem Kraftmikroskop abgebildet. Auf der Fläche dieses Picassos ließe sich die molekulare Millenniumszahl millionenfach unterbringen. (Quelle: Physikalisches Institut der Uni Münster)



Buckytube
Computerdarstellung einer Kohlenstoff-Nanoröhre. Jeweils sechs Kohlenstoff-Atome sind zu einem Waben-Muster verstrickt. Dieses einwandige Buckytube hat einen Durchmesser von etwa einem Millionstel Millimeter. Es lassen sich auch ineinanderverschachtelte Röhren mit größerem Durchmesser herstellen, die ähnlich wie eine russische Puppe aufgebaut sind. Eine Röhre kann einige Millimeter lang sein. Ihre physikalischen Eigenschaften – etwa die elektrische Leitfähigkeit – hängen ab von der genauen Anordnung der Waben. Buckytubes sind unter anderem als Wasserstoff-Speicher für Brennstoffzellen und für extrem belastbare Verbundwerkstoffe im Gespräch. (Quelle: Rice University)

Nanomuskeln für Hausdrachen

Natürlich ist unter den kommenden Kunststoffen auch das künstliche Muskelgewebe für Wendy's fliegenden Hausdrachen – dank Nanotechnologie: Am 21. Mai 1999 erschien im amerikanischen Wissenschaftsmagazin Science ein Artikel über Kunstmuskeln aus so genannten Buckytubes, nur Nanometer weiten Röhren aus netzartig verknüpften Kohlenstoff-Atomen. Ein synthetisches Gewebe aus diesen Kohlenstoff-Nanoröhren, so Science, verforme sich unter elektrischer Spannung – es setze somit elektrische Energie in mechanische Bewegung um. An der Entwicklung waren nicht weniger als neun hochkarätige Institutionen beteiligt, darunter das Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart. Wendy's Hausdrachen ist offenbar keine riskante Prognose.

Mikrosystemtechnik

Die für die Chip-Herstellung entwickelte Technik lässt sich auch für andere Zwecke nutzen. So entstehen die feinen Wurmlöcher des porösen Siliziums durch Selbstorganisation beim Ätzen. Auf diese Weise werden im Forschungszentrum Jülich raffinierte Lichtfilter mit einstellbarem Brechungsindex hergestellt. Die Mikrosystemtechnik, eine Spezialität des Forschungszentrums Karlsruhe, erlaubt heute die ebenso preiswerte wie präzise Massenfertigung kleinster dreidimensionaler Elemente. Mikrozahnräder, Positionierungselektroden, Spiegel, Ratschen, finden zunächst wohl weniger in Wendy's Drachen als in „Labs-on-a-chip“, Verwendung – winzigen, dabei hochkomplexen Analysegeräten, wirklich „weisen Steinen“. Mit solchen Mikrolaboratorien werden völlig neue Möglichkeiten der minimalinvasiven Diagnose und Therapie von Krankheiten denkbar.

Was die Zukunft an neuartigen Fertigungstechniken, sogar „intelligenten“ Materialien oder Maschinen bringen wird, können wir nur ahnen. So arbeiten Ingenieure der microTEC Duisburg an winzigen U-Booten, die – eventuell mit Medikamenten beladen – eines Tages durch die menschliche Blutbahn patrouillieren könnten. Schon heute hat die Suche nach dem Stein der Weisen alle Erwartungen weit übertroffen, wenn wir die derzeitige Wertschöpfung der Wissenschaft von der kondensierten Materie sehen. In zwanzig, dreißig Jahren erwarten namhafte Fachleute nichts weniger als „Systeme, die einfachen lebenden Systemen ähneln“. Ob Wendy's Hausdrachen dabei ist?

Bald auf Tauchfahrt? Prototyp des so genannten „micro-U-Boots“ in einer Ader (ohne Blut und außerhalb des Körpers). Das Bild wurde mit einem Elektronenmikroskop aufgenommen und nachträglich eingefärbt. (Quelle: eye of science, Oliver Meckes)



Dieses „Chip-Labor“ trennt biologische Proben in ihre Bestandteile auf – und zwar mit Hilfe elektrischer Felder. Über einen angeschlossenen Computer kann der Chip bis zu 96 flüssige Substanzgemische nahezu gleichzeitig analysieren,

er kommt dabei mit winzigen Stoffmengen aus. Zwischen den kammartigen Elektroden erkennt man die haarfeinen Trennkanäle. Anwendungsgebiete: Medizinische und biochemische Forschung. (Quelle: IMM, Mainz)

