



Tanz

der Elemente

Partner:



Mit Unterstützung von:



INHALT



4



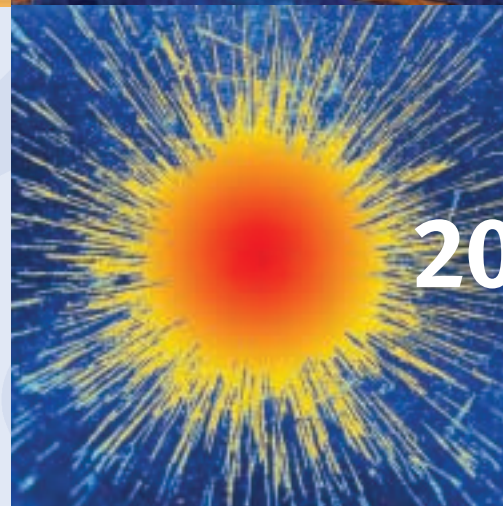
6



12



16



20



24

- 4** Tanz in allen Töpfen
- 6** Von der Ursuppe zur harten Materie
- 12** Die Entdeckung der Weichheit
- 16** Magischer Tanz im Oktett
- 20** Kurze Geschichte des Zerfalls
- 24** Die Bausteine des Lebens

IMPRESSUM

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

AUTOR
Roland Wengenmayr

WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG
Prof. Dr. Helmut Eschrig
Dr. Silke Ottow

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

REDAKTION, KONZEPT UND GESTALTUNG
iserundschmidt
Kreativagentur für PublicRelations GmbH
Bad Honnef – Berlin

Juni 2003



Tanz in allen Töpfen

„Wir kennen die Temperatur im Inneren eines fernen Sternes, wissen aber nicht, wie es in einem Soufflé aussieht.“

NICOLAS KURTI (1908 – 1998)
PHYSIKER, OXFORD

Hart knirschen die Kristalle in der Salzmühle. Zertrümmert zu feinen Kristalliten fallen sie durch die sprudelnde Wasseroberfläche, und tobende Wassermoleküle lösen die Natrium- und Chlor-Atome aus ihrem engen Verbund. Ein Paar hantiert in der Küche. Auf mehreren Flammen entsteht hier ein opulentes Menü. An der Salzmühle betätigt sich eine Frau im Abendkleid. Sie kocht Erbsen. In ihrem Topf mischen sich die Elemente

und umspülen als siedende Lösung das organische Gewebe des garenden Gemüses.

Eigentlich ist die Salzmühle ein Witz, denn Salz verliert ja beim Lagern seinen Geschmack nicht. Daher muss es auch nicht „frisch“ gemahlen werden. Aber die Mühle ist schick und macht Spaß, und das ist auch nicht ganz unwichtig. Übrigens dient das Salz im Kochwasser gar nicht als Gewürz. Es hat nur indirekt Einfluss auf den Geschmack der fertigen Erbsen. Dennoch ist es von großer Bedeutung: Es sorgt dafür, dass die Erbsen ihren Mineralgehalt nicht verlieren. Denn in ungesalzenem Wasser wandern Natrium, Kalium und andere Mineralien, die in den Zellen der Erbsen gelöst sind, durch deren Membranhäute ins Kochwasser. Die Erbsen werden regelrecht ausgewaschen und schmecken fade. Eine genügend hohe Konzentration an Natrium im Kochwasser gleicht das Kon-

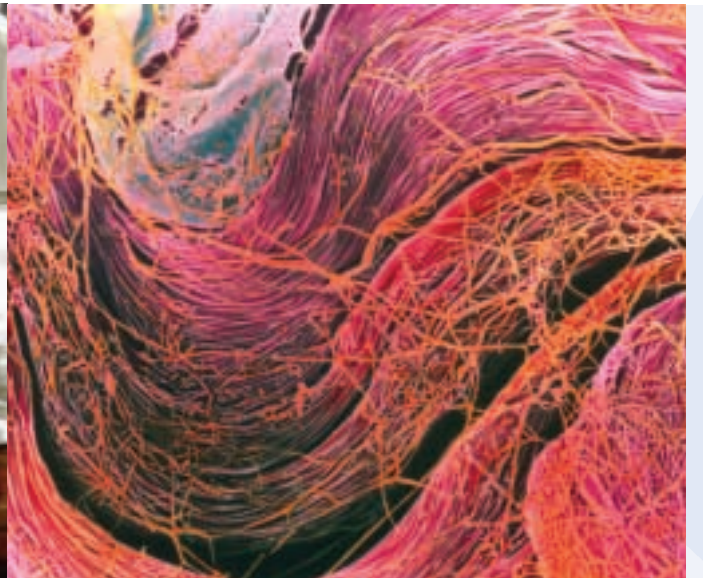
zentrationgefälle aus und verhindert so den drohenden Aromaverlust. Sie wirkt wie eine Waage mit gleichen Gewichten auf den Waagschalen.

Jetzt ist der Koch an der Reihe. Routiniert gibt er ein Steak in die Pfanne. Brutzelnd verdampft das Wasser aus den äußeren Gewebeschichten, zischt als Tröpfchen durch das heiße Öl, das optimale Brattemperatur hat. Diese liegt ein gutes Stück über 140 Grad Celsius, aber noch unter 200 Grad, damit das Fleisch nicht anbrennt. So bekommt es eine braune, aromatische Kruste. Es ist allerdings ein Irrglaube, dass das Fleisch dabei seine Poren schließt. In seiner Außenschicht laufen chemische Reaktionen ab, die nach dem Biochemiker Louis Camille Maillard (1878–1936) benannt sind. Der französische Forscher hatte entdeckt, dass beim Erhitzen in den Zellen des Fleisches Proteine mit dem ent-



☞ Auch in der Küche begegnen uns die chemischen Elemente. In den unterschiedlichsten Kombinationen bilden sie Topf und Pfanne, Suppe, Salat, Hauptgang und Dessert. In diesen Erscheinungsformen reagieren die Elemente wie überall im Universum. (Fotos: photocase.de)

☞ Kollagen ist das häufigste Protein der Säugetiere. Die einzelnen Kollagenfasern bestehen aus großen Molekülen, die eine stabile Helixstruktur – eine Art dreifacher Wendeltreppe – bilden. Das Bild zeigt Kollagenfasern aus dem Bindegewebe. (Foto: sciencephoto.com)



haltenen Zucker reagieren. Das sorgt für die karamellbraune Färbung und den Bratengeschmack. Da sehr viele verschiedene Maillard-Reaktionen möglich sind, kann ein erfahrener Koch den Geschmack des Fleisches breit variieren. Er kann sie zum Beispiel durch Einpinseln mit einer zuckerhaltigen Marinade noch fördern: Honigmarinade auf dem Enten- oder Gänsebraten sorgt so für ein volles Aroma.

Hinter den routinierten Handgriffen der Köchinnen und Köche verbirgt sich eine nur wenig erforschte Welt, denn der Tanz im Suppentopf folgt einem komplexen Regelwerk aus physikalischen und chemischen Gesetzmäßigkeiten. Die meisten Abläufe sind bis heute nicht umfassend verstanden. Die Hauptdarsteller dieses Tanzvergnügens sind jedoch alte Bekannte. Es sind die chemischen Elemente, die uns in den verschiedensten Materieformen

im Kochtopf begegnen: Salz und Zucker als kristalline, feste Materie, Fleisch oder Gemüse aufgebaut aus komplexen Biomolekülen, aber auch in Form der wunderlichen weichen Materie, zu der Gefrierbeutel aber auch die Mayonnaise zählen. In diesen Erscheinungsformen reagieren die Elemente wie überall im Universum: Sie bilden neue Substanzen und Gemische und setzen dabei Energie um. Mal gelingt das, und es entsteht etwas neues, manchmal zerfällt aber auch alles wieder in seine Bestandteile, wie eine schlecht gerührte Vinaigrette.

Diesmal jedoch ist alles geglückt. Der Salat glänzt frisch unter seiner würzigen Ölhaut, die Steaks sind auf den Punkt gegart und trotz aller Hektik ist sogar das Abendkleid sauber geblieben. Die Gäste sitzen bereits drüben an ihren Plätzen. Es kann losgehen!

STEAK HAWAII

Köche wollen, dass das Fleisch butterweich und saftig wird. Beim Garen nutzen sie aus, dass Hitze die Fleischfasern aus Kollagen aufbricht und in weichere Gelatine-Moleküle zerfallen lässt. Durch einen chemischen Trick lässt sich dieser Effekt noch unterstützen, denn Kollagen kann man auch anders knacken. Ananas enthält, wie auch Feigen oder Papaya, ein Enzym, das die stabile Struktur des Kollagens zersetzt. Wer das weiß, wird bald die zartesten Steaks zustande bringen. Mit einer Injektionsnadel kann man den frischen (!) Fruchtsaft leicht in das Fleisch hineinspritzen. Danach müssen die Enzyme einige Stunden wirken. Dazu schlägt man die Steaks in Aluminiumfolie und legt sie bei etwa 70 Grad Celsius (nicht heißer!) in den Backofen. Anschließend wie gewohnt in der Pfanne braten – fertig ist eine physikalisch-chemische Köstlichkeit!

(Foto: photocase.de)



Von der Ursuppe zur harten Materie

„Es gibt nichts Praktischeres als eine gute Theorie.“

IMMANUEL KANT (1724-1804)
DT. PHILOSOPH

Der Urknall hatte eine unvorstellbare Hitze entfaltet. Als das junge Universum danach abkühlte, entstand erst langsam die Materie. Nach den leichten, einfachen Elementen bildete sich nach und nach das ganze Spektrum der Atome, wie wir es heute kennen.

Zunächst bevölkerten Wasserstoff, Helium und das Metall Lithium den Weltraum in großen kosmischen Gaswolken. Doch an einigen Orten verdichteten sie sich zu Sternen, und dort setzte sich ein völlig neuer Mechanismus in Gang, der noch heute an verschiedenen Orten im Weltall

immer wieder abläuft. Bei großer Hitze von einigen Millionen Grad verschmelzen Wasserstoffatome zu Helium. Sobald ein Stern seinen Wasserstoffvorrat verbrannt hat, bläht er sich zum so genannten Roten Riesen auf und produziert immer schwerere Atome bis hinauf zum Eisen, die ersten 26 Elemente des Periodensystems. Die restlichen Elemente entstehen nur, wenn große Sterne sterben: Gigantische **Supernova-Explosionen** brüten Kobalt, Nickel, Kupfer sogar das schwere Uran aus und schleudern sie in die Weite des Alls.

114 verschiedene Atomsorten kennt unser Periodensystem heute, rund 90 kommen auf natürliche Weise auf der Erde vor. Mit einer verblüffend kleinen Auswahl davon begnügt sich ausgerechnet die komplexeste irdische Materie, die lebenden Or-

ganismen. Unser Körper besteht hauptsächlich aus Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlenstoff und Stickstoff. Hinzu kommt eine Prise Calcium für die Knochen, Eisen für die roten Blutkörperchen und einige Spurenelemente. Aus diesen wenigen Bausteinen bestehen die Milliarden verschiedenartiger Moleküle, die in den Zellen unseres Körpers ihr kompliziertes biochemisches Ballett tanzen. Die atomaren Bausteine entstammen dem Kosmos – wir sind also nichts als Sternenstaub.

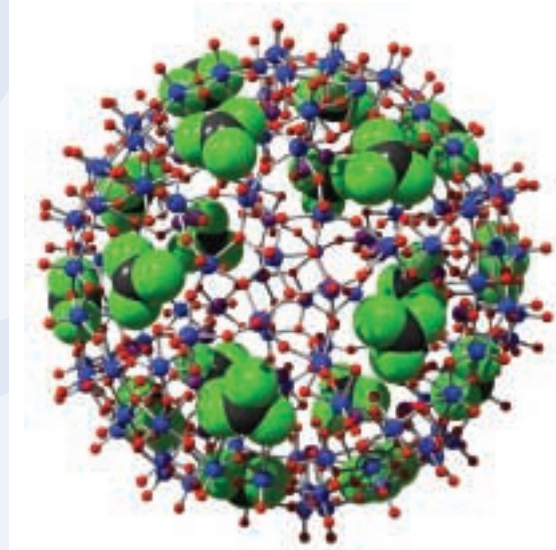
Wie wir selber bestehen auch die einzelnen Atome aus wenigen, einfachen Bausteinen. Jedes Atom enthält nur drei verschiedene Bestandteile: Elektronen bilden seine Hülle, Protonen und Neutronen den winzigen Kern. Eine Ausnahme ist der sparsame Wasserstoff, der mit einem Pro-

ton und einem Elektron auskommt. Die Zahl Drei spielt offenbar eine besondere Rolle in der Natur, denn die Protonen und Neutronen bestehen wiederum aus jeweils drei Teilchen, den berühmten Quarks. Physikern gelang es nach und nach, diese Welt von größter Einfachheit zu entdecken und immer noch erschließen sie die ungeheure Komplexität und Vielfalt, die in der Kombination ihrer Bestandteile begründet liegt.

Jedes Element hat besondere chemische Eigenschaften, die vom inneren Aufbau der zugehörigen Atomsorte abhängen. Die Materialien unserer Umwelt bestehen aus vielen Atomen. Ihre Eigenschaften hängen von den chemischen Bindungen ab, mit denen sich die Atome zu größeren Struk-

turen organisieren. Dafür sind die Elektronen aus der äußersten „Schale“ der Atome zuständig. Aus Sicht eines Atomkerns sind diese Elektronen ferne Trabanten – ungefähr wie der Planet Pluto von der Sonne aus gesehen. Da sie relativ frei beweglich sind, können sie mit den Außenelektronen anderer Atome Bindungen eingehen. Je nach Art der chemischen Bindung bauen sie verzweigte Moleküle oder regelmäßige Kristalle.

Auf der Erde begegnet uns Materie in den drei Aggregatzuständen gasförmig, flüssig und fest. Welchen Aggregatzustand ein Stoff einnimmt, bestimmen die Bindungen zwischen seinen Atomen oder Molekülen. Ist dieser Elektronenkitt schwach,



→ Diese „Zauberkegel“ ist ein riesiges Molekül aus 132 Molybdän-Atomen (blau) und anderen Atomen. Es besitzt 20 Poren, in die kleinere Moleküle (große grüne und schwarze Kugeln) hinein passen. (Grafik: A. Müller, Uni Bielefeld)

↔ Der Krabbennebel ist der Rest einer Supernova. Solche Supernovae und normale Sterne wie unsere Sonne (unten) brüten fast alle Elemente unserer Welt aus. (Fotos: ESO, ESA)



GIBT ES ATOME?

„Haben’s schon eins gsehn?“, kanzelte Ernst Mach alle Kollegen ab, die ihm mit Atomen kamen. Der berühmte österreichische Physiker des 19. Jahrhunderts wurde später mit der Maßeinheit „Mach“ für die Schallgeschwindigkeit unsterblich. Beim Atom aber irrte er sich gewaltig: Vehement bekämpfte er die Atomisten wie Ludwig Boltzmann, seinen genialen Wiener Widersacher. Zwar hatten die Griechen schon in vorchristlicher Zeit die Idee vom Atom als kleinstem Materiebaustein entwickelt. Doch im Zuge der wissenschaftlichen Entwicklung hatte man diese Vorstellung – gemeinsam mit der Vier-Elemente-Lehre – mittlerweile über Bord geworfen. So dauerte es eine ganze Weile, bis das Atom wieder zu wissenschaftlicher Glaubwürdigkeit kam. Mach selber konnte erst überzeugt werden, als ihm nach der Jahrhundertwende in einem Experiment die Wirkung einzelner Atome als Lichtblitze vorgeführt wurden.

dann ist der Stoff bei den Temperaturen und dem Druck unserer Atmosphäre ein Gas. Seine Moleküle fliegen frei durch den Raum, wie die Kugeln eines dreidimensionalen Billards.

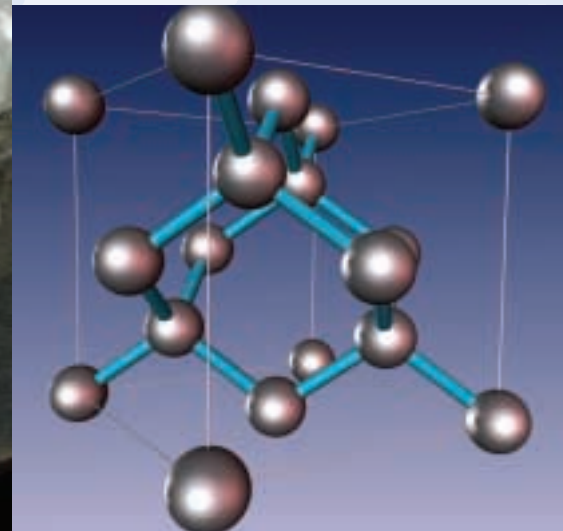
Mit stärkeren Bindungskraften wird ein Stoff flüssig. Die Atome oder Moleküle gleiten eng aneinander vorbei, wie Tänzer auf einer sehr vollen Tanzfläche. In Festkörpern sind die Bindungskräfte am stärksten: Fast wie die Stecker von Legosteinen fügen sie die Atome aneinander

INFO



☞ Druck, Temperatur und andere Umgebungsbedingungen beeinflussen das Kristallwachstum. Sie prägten die Gestalt dieses Bergkristalls. (Foto: T. Seilnacht, www.seilnacht.tuttlingen.de)

☞ Ein Eiskristall wächst im Labor in eineinhalb Stunden zu einem Dendriten mit einem Durchmesser von über 2 cm. (Fotos: K. Libbrecht, CALTECH, Pasadena)



☞ Rohdiamanten und geschliffene Brillanten sind Kristalle aus Kohlenstoff-Atomen. Bei rund 800°C brennen sie sogar an der Luft. (Fotos: De Beers)

☞ Das Kristallgitter eines Diamanten ist vollständig aus Kohlenstoff-Atomen aufgebaut. (Grafik: U. Schwarz, MPI für chemische Physik fester Stoffe)



INFO WIE KANN MAN KRISTALLGITTER „SEHEN“?

Röntgenlicht oder Neutronenstrahlen können Kristallgitter sichtbar machen, weil ihre Wellenlängen ähnlich groß sind, wie die Abstände der Atome im Gitter. Jedes Atom bricht diese Wellen in alle Raumrichtungen. Es wirkt dadurch fast wie ein kleiner Sender, der Störwellen ausstrahlt. In manchen Ausbreitungsrichtungen löschen sich die überlagerten Wellen aller Atom-„Sender“ aus, in anderen verstärken sie sich. Ein Film oder Schirm kann das als Muster aus Lichtpunkten sichtbar machen. Jedes Punktmuster enthält dann Informationen über die räumliche Struktur des Kristallgitters. Daraus können Physiker dann den exakten Aufbau des Kristallgitters berechnen.

und ordnen sie zu wundervoll gleichmäßigen Kristallgittern. Bei fehlerfreier Perfektion sprechen Physiker vom idealen Kristall. Die meisten harten Materialien unserer

Umwelt sind allerdings weder ideal noch reine Kristalle. Und auch zwischen flüssig und fest gibt es einen Spielraum: Viele Materialien sind weich. Sie bestehen aus großen Molekülen, die sich zu noch größeren Strukturen anordnen.

Nicht alle Kristalle sind hart und durchsichtig wie Kochsalz oder Bergkristall. Auch Metalle bestehen zum Beispiel aus winzigen Kristallen. In metallischen Kristallgittern sind die äußeren Elektronen der Atome relativ frei und verbinden die Atome nicht so fest. Deshalb leiten Metalle gut elektrischen Strom oder Wärme und können sich plastisch verformen. Manche Elemente können sogar – abhängig von den äußeren Bedingungen – unterschiedliche Kristallgitter aufbauen: Reiner Kohlenstoff formiert sich zum Beispiel unter hohem Druck zum harten Diamantkristall, sonst bevorzugt der Verwandlungskünstler den weniger festen, schmierig-glänzenden Graphitkristall.

Kristalle wachsen auf sehr komplexe Weise. Deshalb weicht ihre äußere Gestalt oft stark vom geometrischen Aufbau ihres Atomgitters ab. Das Atomgitter verhält sich zum Kristall wie eine Ziegelmauer zu einem Haus: Dessen äußere Form hängt nicht von der Art ab, wie die Ziegel aneinander gesetzt sind. Ebenso wenig sagt die Gestalt eines Bergkristalls etwas über sein atomares Kristallgitter aus. Sie gibt dafür Hinweise auf Temperatur, Druck und andere Bedingungen während seines Wachstums. Je nach Umweltbedingungen können Kristalle in vielfältig verästelten Formen wachsen, die Dendrite genannt werden. In einer kalten Wolke entstehen zum Beispiel Eiskristalle als Dendrit-Sterne. Gemeinsam bilden diese dann die Schneeflocken.

Doch nicht nur die Natur, auch wir Menschen können aus kristallinem Material winzige Strukturen herstellen: Mikrochips

aus Silizium sind Alltag geworden. Um in Zukunft noch feinere Strukturen verfügbar zu machen, gibt es verschiedene Ansätze. Eine Idee fasziniert die Forscher besonders: Sie möchten den natürlichen Drang von Atomen und Molekülen ausnutzen, von selbst Strukturen zu bilden.

☞ Eine Reihe von Kobaltatomen auf einer Oberfläche aus Platinatomen. Dieser „Nanodraht“ verhält sich wie ein kleiner Magnet, obwohl er nur ein Atom dick ist! (Bild: K. Kern, MPI für Festkörperforschung)



Ein Testfeld für solche selbstorganisierenden Strukturen können Kristalloberflächen sein. Stuttgarter Physiker brachten beispielsweise einzelne Kobaltatome dazu, sich auf einer gestuften Platinoberfläche in gleichmäßigen, nur ein Atom dicken Reihen anzuordnen. Die Atome richteten sich in den Reihen von allein zu einem gemeinsamen Magnetfeld aus, wie die Eisenatome in einem massiven Magneten. Die Physiker nutzten dabei einen besonderen Effekt: Kobaltatome wirken wie kleine Kompassnadeln mit einem Nord- und einem Südpol. Vielleicht führt diese Entdeckung eines Tages zur Entwicklung magnetischer Datenspeicher mit extrem hoher Kapazität.

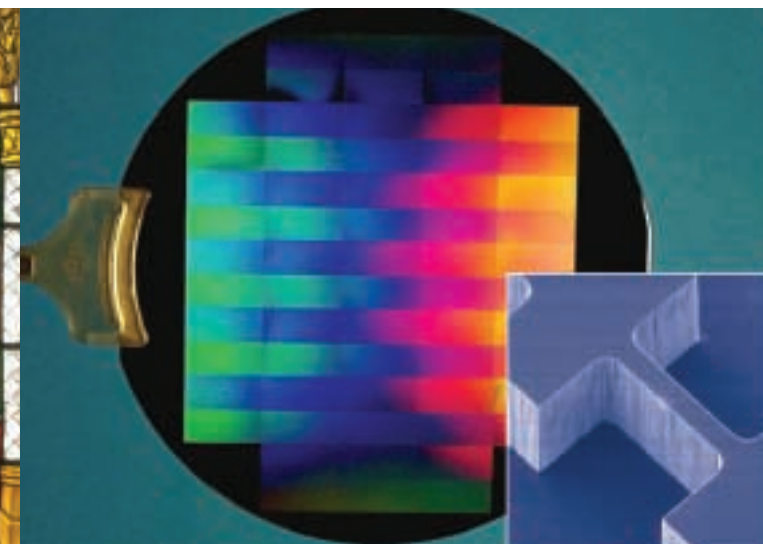
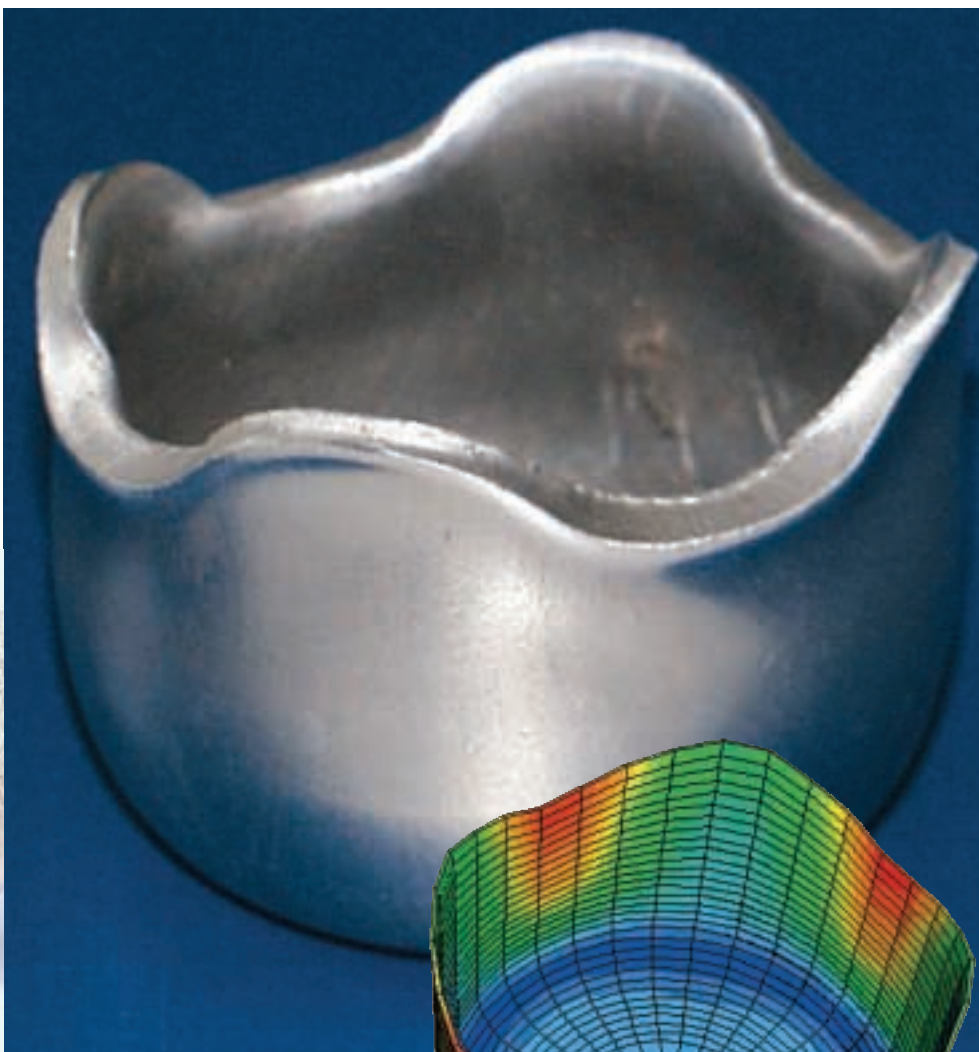
Zur Selbstorganisation ist auch der Tausendsassa Kohlenstoff fähig. Forscher können ihn mittlerweile dazu bringen, aus vielen Tausend Atomen sehr gleichmäßige Nanoröhrchen

EINFACH IDEAL!

Idealisieren macht's einfacher. Nach diesem Motto arbeiten Physiker, um die komplexen Vorgänge der Natur berechnen zu können. Wenn das Ergebnis stimmt, lassen sie dafür schon mal alle Fünfe gerade sein. Wenn man z.B. ausrechnen will, wie lange eine Kaffeetasse vom Schreibtisch zum Boden braucht, muss man nicht für jedes einzelne Atom eine neue Flugbahn kalkulieren. Es reicht, sich die Tasse als kompakten Klotz zu denken – und nur ein Malheur zu berechnen. Ähnlich ist es beim idealen Kristall, der Vorstellung eines absolut regelmäßigen Kristallgitters ohne Fehler. In der Natur gibt es diesen Kristall nicht. Doch das Bild taugt als Modell zur Vereinfachung vieler Berechnungen. Manchmal jedoch versagt es auch völlig: Sandstein etwa verhält sich gar nicht ideal, denn er besteht aus unzähligen Einzelkristallen, die selbst wiederum voller Fehler sind. Es liegt im Geschick der Physiker zu erkennen, wann ihre Modellvorstellung statthaft ist und wann nicht.

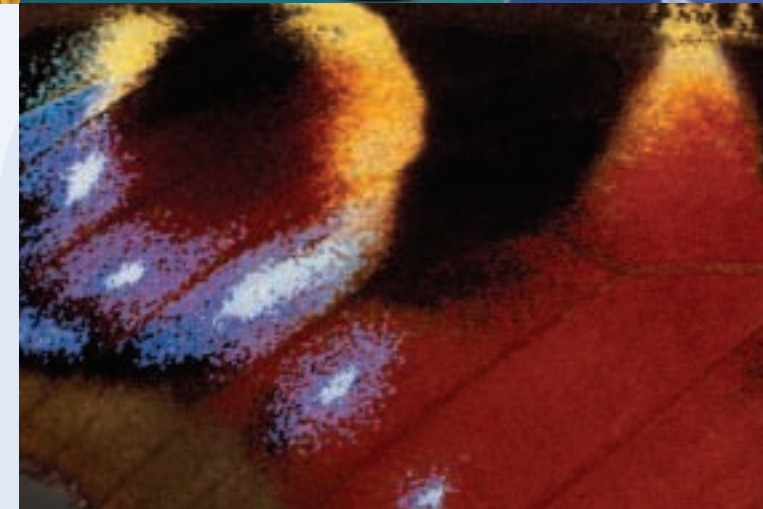
zu bilden. Diese winzigen, sehr harten Röhrcen öffnen vielleicht die Tür zur Entwicklung ganz neuer Materialien.

Die Herstellung solcher Strukturen ist immer schwierig, denn auch in der Welt der kleinsten Teilchen benötigt der Aufbau und Erhalt von Ordnung sehr viel Energie. Nur mit hohem Aufwand und peinlicher Sauberkeit gelingt es daher der Halbleiterindustrie, künstlich fast 100%ig ideale „Einkristalle“ aus Silizium zu ziehen. Die Natur bevorzugt dagegen einen Mittelweg, eine gepflegte Unordnung: Natürliche Kristalle sind voller Fehler, selbst wenn sie



☞ Sind alte Kirchenfenster unten dicker, weil das Glas über die Jahrhunderte unter der Schwerkraft fließt? Zum Glück nicht. Das Foto zeigt einen Ausschnitt des Passionsfensters im nördlichen Seitenschiff des Kölner Domes. (Foto: Dombaupflege Köln)

☞ Presst man aus einem Metallblech einen „Napf“, dann bildet dieser am oberen Rand unerwünschte Zipfel. Das liegt daran, dass die Atome beim Umformen in manche Richtungen besser fließen als in andere. Diese Computersimulation kommt der Wirklichkeit schon sehr nahe. (Bilder: D. Raabe, MPI für Eisenforschung)



BRILLANTER DURCHBLICK

Materialforscher können heute über zehn Zentimeter große Scheiben aus künstlichem Diamant herstellen. Dazu benutzen sie ein Gasgemisch aus Wasserstoff und Methan. Bei Temperaturen von 800 Grad Celsius reagieren die beiden Gase chemisch und setzen Kohlenstoff-Atome frei. Ein trickreiches Verfahren bringt den Kohlenstoff dazu, sich auf einer kühleren Oberfläche zu einer gleichmäßigen Scheibe aus kleinen Diamantkristallen abzulagern. Solche superharten Fenster werden in Laseroptiken oder Hochleistungs-Mikrowellenröhren eingesetzt. Physiker arbeiten auch an elektronischen Chips aus Diamant für Spezialanwendungen. (Foto: P. Koidl, Fraunhofer-IAF)

perfekt aussehen. Chemische Verunreinigungen geben ihnen Farbe und schaffen die bunte Palette der Edelsteine und Halbedelsteine. Fast immer verzerren Störstellen und Versetzungen die Kristallgitter.

Unter mechanischer Spannung breiten sich diese Fehler im Kristall aus. Ist er hart und spröde, dann reißt er und zerspringt. Bei Metallen dagegen kann das weiche Kristallgitter der Spannung durch Versetzungen ausweichen, und das Stück verformt sich. Materialforscher können diesen Prozess mittlerweile auf Supercomputern simulieren. So können sie studieren, wie technische Bauteile ermüden.

Die Grundlage einer solchen Simulation ist immer ein mathematisches Modell, das die Abläufe im Inneren der Materialien möglichst detailgetreu beschreibt. Ideale, hoch geordnete Kristalle können die Forscher schon lange sehr gut mit den Mitteln der Quantentheorie erfassen: Das Verhalten der Atome und Elektronen im Kristallgitter erinnert an die schwingenden Saiten einer riesigen Harfe, deren harmonischer Gesamtklang sich elegant in mathemati-

sche Formeln fassen lässt. Das verhält auch der Halbleitertechnologie mit ihren fast perfekten Kristallen zum Durchbruch.

Metalle und viele andere Werkstoffe wie Steine oder Sandkörner sind nun aber ein Gemisch aus vielen kleinen Kristallen. Diese so genannten Kristallite verhalten sich im Materialverbund wie ein ganzes Orchester voller Harfen, die alle wild durcheinander tönen. Welche dieser Harfen nun den Ton angeben, welche Schwingungseigenschaften also für das Materialverhalten entscheidend sind, ist schwer zu beurteilen. Nur mühsam gelingt es den Forschern, entsprechende Formelsätze zu entwickeln. Mittlerweile kann man auf dem Computer

das **Fließen von Metallen** beim Verformen sehr realistisch nachbilden. Unter Druck verhalten sie sich wie zäher Honig, aber mit einem wichtigen Unterschied: Die Atomgitter der Kristallite sorgen dafür, dass das Metall nicht in jede Richtung gleich gut fließt. Presst man aus einem Blech einen Becher, dann treibt dieses ungleiche Fließen unerwünschte Zipfel aus seinem Rand heraus. Ein neues Computermodell simuliert diese Zipfelbildung sehr erfolgreich. Das ist besonders für die Autoindustrie interessant, die ihre Karosserieteile möglichst ohne solche Materialfehler pressen möchte.

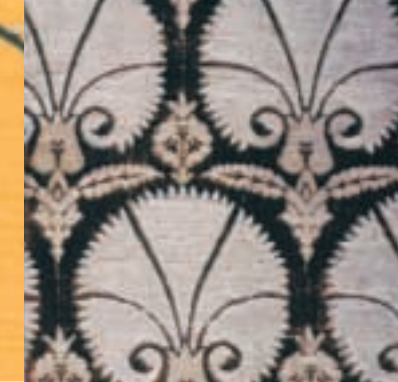
Augenscheinlich klar und makellos sind dagegen Gläser. Doch weit gefehlt! Gläser treiben die innere Unordnung auf die Spitze. In ihnen bilden die Atome ein völlig unregelmäßiges räumliches Netzwerk. Zwar ordnet sich jedes Atom mit seinen

nächsten Nachbarn noch wie in einem Kristall an. Aber schon die übernächsten Nachbarn brechen aus dieser Ordnung aus: Weil Gläser die atomare Fernordnung eines regelmäßigen Kristallgitters fehlt, ähneln sie eher einer Flüssigkeit. Schuld daran ist die extreme Zähigkeit einer abkühlenden Glasschmelze: Beim Erstarren bleiben die Atome auf dem Weg zu einem ordentlichen Kristallgitter einfach stecken.

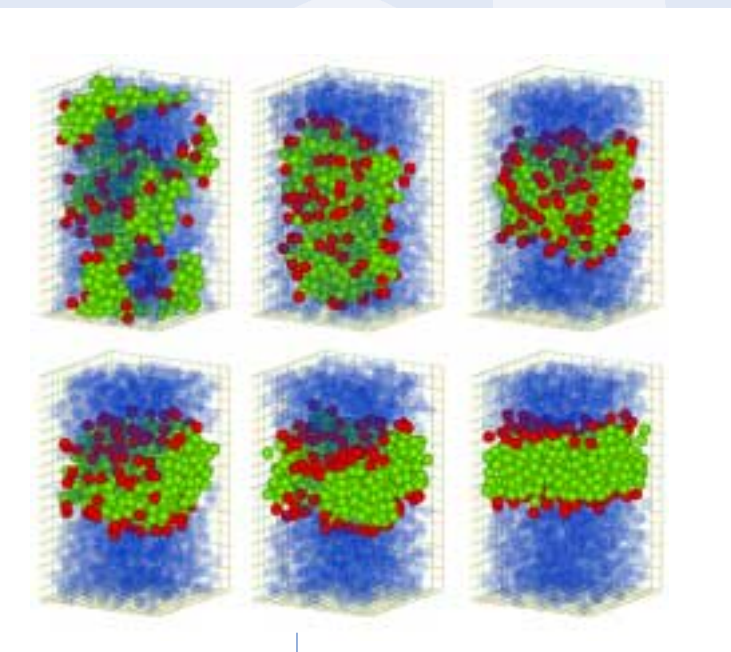
Sind Gläser also vielleicht sehr langsam fließende Flüssigkeiten? Haben Jahrhunderte alte **Kirchenfenster** unter dem Einfluss der Schwerkraft messbar dickere „Füße“ bekommen? Zum Glück für unsere Kulturschätze ist das nicht der Fall. Erst nach einem Vielfachen der rund 15 Milliarden Jahre, die unser Universum alt ist, wäre ein solches Fließen messbar.

SCHMETTERLINGE BEFLÜGELN DEN COMPUTER

Schmetterlinge schillern in den schönsten Farben des Sonnenlichts, denn ihre Flügel enthalten winzige Strukturen mit besonderen Eigenschaften. Forscher imitieren diesen Effekt in photonischen Kristallen. Das sind künstliche Kristallgitter aus einem lichtdurchlässigen Material. Im Gegensatz zu echten Kristallen sind ihre Gitterbausteine aber deutlich größer. So groß, dass die Wellen des sichtbaren Lichtes in den Zwischenräumen zu schwingen beginnen, wie eine Klavierseite. Dank dieser Mikrostruktur ist der Kristall in der Lage, Licht in seine Farben zu zerlegen, festzuhalten und sogar zu speichern. Aus photonischen Kristallen könnten vielleicht einmal Schaltkreise für Computer entstehen, die mit schnellem Licht anstatt vergleichsweise langsamen Elektronen arbeiten. (Fotos: S. Tränkner, Forschungsinstitut Senckenberg; U. Gösele, MPI für Mikrostrukturphysik)



↓ Diese Computersimulation zeigt von links oben nach rechts unten, wie sich in Wasser aus 840 Wassermolekülen (blau) 100 amphiphile Moleküle zu einer Zweischicht-Membran organisieren: Deren Wasser liebende Köpfe sind rot, die Fett liebenden Füße grün dargestellt. Jeder „Schnappschuss“ repräsentiert einen Zeitschritt von etwa einer Femtosekunde, das ist der Millionste Teil einer Milliardstel Sekunde! (Grafik: R. Lipowsky, www.mpikg-golm.mpg.de/lipowsky)



↑ Die Moleküle weicher Materie ordnen sich in Strukturen an, die mit einem Fischschwarm vergleichbar sind. (Foto: stock.xchng)

↻ Seide ist eine sehr feine und zugleich feste Naturfaser. Menschen schätzen sie schon seit Jahrtausenden. Die Bilder zeigen Fragmente historischer Seidenstoffe, wie sie über die Seidenstraße gehandelt wurden. (Fotos: Deutsches Textilmuseum Krefeld)

12 Die Entdeckung der Weichheit

„Die Tragödie der Wissenschaft – das Erschlagen einer schönen Hypothese durch eine hässliche Tatsache.“

THOMAS HENRY HUXLEY (1825-1895)
BRIT. ZOOLOGE

Die großen Epochen der menschlichen Kultur tragen die Namen harter, kristalliner Werkstoffe: Steinzeit, Bronze- und Eisenzeit. Eigentlich ist das ungerecht, denn seit grauen Vorzeiten sind auch weiche Materialien für uns lebenswichtig. Aus Leder und Naturfasern machen Menschen seit Jahrtausenden Schuhe, Kleider oder Segel. Eine uralte Handelsroute trägt sogar den Namen einer edlen Naturfaser, die Seidenstraße.

Unter dem Begriff „weiche Materie“ fassen die Physiker sehr verschiedene Materialien zusammen. Sie können ziemlich flüssig wie Mayonnaise sein oder relativ fest wie ein Gefrierbeutel oder eine Seidenfaser. Doch auch eine zähe Faser verhält sich nur beim Ziehen fest. Sie lässt sich aber leicht zusammen knäulen.

All diese weichen Materialien sind aus großen Molekülen aufgebaut. Weich sind sie deshalb, weil ihre Moleküle kein Kristallgitter bilden, sondern untereinander verschiebbar bleiben. Dennoch können sich die einzelnen Moleküle zu großen Strukturen anordnen. Ihr Verhalten erinnert an Fische eines Schwarms: Jeder einzelne Fisch ist relativ frei, trotzdem zeigt der Schwarm von weitem betrachtet eine innere Ordnung. Das liegt

daran, dass alle Fische koordiniert ihre Nase in eine Richtung drehen. Verhielte sich der Schwarm wie ein Kristall, dann müsste jeder Fisch eine starre Position einnehmen. Der Schwarm könnte nur als steifer Block durchs Wasser ziehen.

Ein anderes Extrem sind Fische, die sich kaum um ihre Nachbarn kümmern. Sie koordinieren ihre Bewegungen nicht gemeinsam, sondern schwimmen als ungeordneter Haufen durcheinander. Ungefähr so verhalten sich die Moleküle, die eine einfache Flüssigkeit bilden. Wasser zählt dazu, allerdings mit Einschränkungen. Tatsächlich können seine Moleküle nämlich auch oberhalb des Gefrierpunkts in fast kristallinen Formationen tanzen, die aber sehr schnell wieder zerfallen.

Weiche Materie ist also ein Zwischending. Sie bezieht ihre Eigenschaften aus einem Wechselspiel zwischen Ordnung und Unordnung. Deshalb verhält sie sich sehr komplex, wie zum Beispiel als Flüssigkristall in einem LCD-Bildschirm: Elektrische Felder können seine Moleküle zu lesbaren Zeichen anordnen. Mit Wasser oder Salatöl ginge das nicht.

Eine vertrautere Form weicher Materie sind Emulsionen wie Milch, Mayonnaise – oder Waschwasser. In ihnen mischen sich eine wässrige und eine ölige Phase, was eigentlich unmöglich ist. Stabile Emulsionen entstehen erst, wenn Amphiphile mitmischen. Ihr Name stammt aus dem Altgriechischen und heißt „beides liebend“: Die eine Seite eines amphiphilen Moleküls „liebt“ Wasser, die andere Fett. So können sie als dün-

ne Schicht Wasser- und Öl-Moleküle miteinander verbinden, indem sie winzige Öltröpfchen in Wasser emulgieren – oder umgekehrt. Im Waschmittel sorgen sie als Tenside dafür, dass hartnäckige Fettflecken mit dem Waschwasser gelöst werden.

Aufsehenerregend sind die stabilen, feinen Mikroemulsionen. In ihnen mischen sich die wässrige und die ölige Phase nicht als Tröpfchen. Sie durchdringen sich als verzweigte, bewegliche Röhren, deren Wände aus einer Amphiphilschicht bestehen.

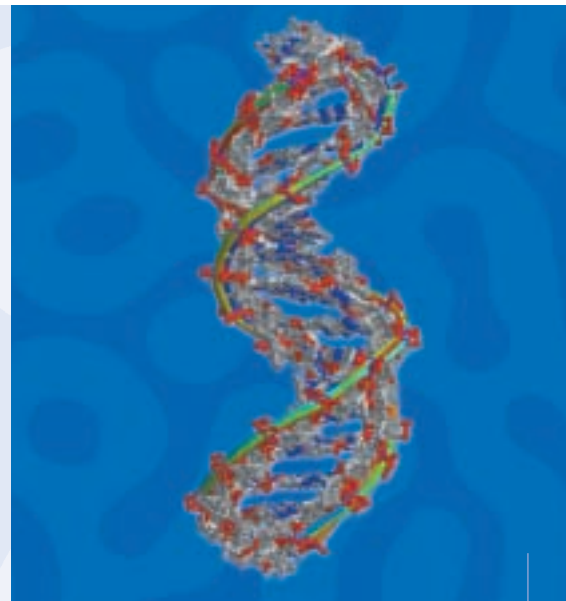
Zum wahren Meister der weichen Materie hat es aber die Natur gebracht. Jeder lebende Organismus baut komplexe weiche Strukturen. Dabei scheinen die Moleküle von selbst zu „wis-

sen“, wie sie sich mit anderen Molekülen verbinden müssen. Zellmembranen etwa, die in der Natur sehr unterschiedliche Aufgaben erfüllen, bestehen aus Amphiphil-Molekülen in einer Doppelschicht. Da in der Natur ihre Umgebung praktisch immer wässrig ist, strecken sie auf beiden Seiten der Membran ihre Wasser liebenden Köpfe nach außen. Ihre Fett liebenden Füße stecken im Inneren der Membran zusammen. Eine Computersimulation zeigt, wie sich Amphiphile von selbst im Wasser zu einer Doppelschicht-Membran organisieren.

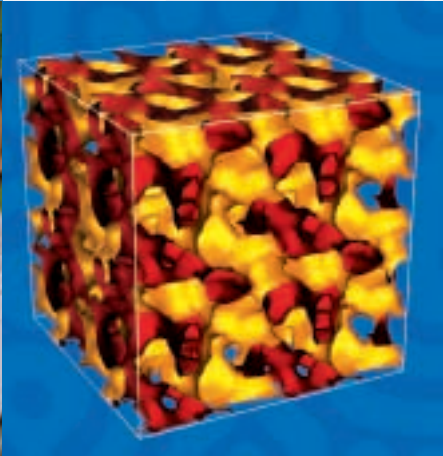
Der Mensch hat längst von der Natur gelernt: Heute leben wir im Zeitalter der weichen Materie schlechthin, denn zu ihr zählen auch die allgegenwärtigen Kunststoffe. Es gibt sie in jeder erdenk-



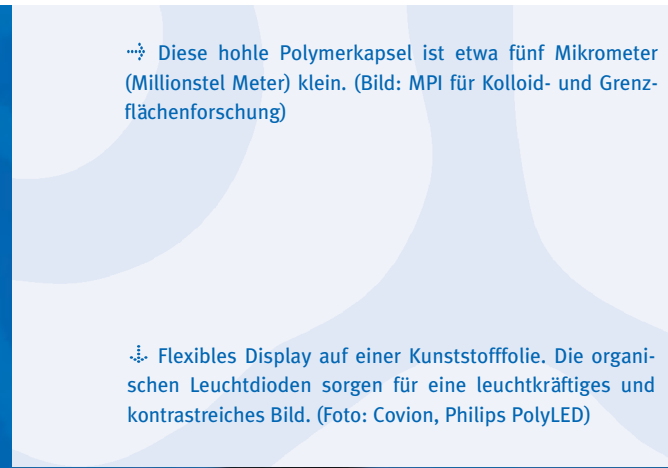
☞ Kontaktlinsen bestehen aus einem Netzwerk von Polymermolekülen. Die Anforderungen an das Material sind hoch: Der Linsenhersteller muss sie präzise bearbeiten können. Sie müssen gute optische Eigenschaften haben. Und das empfindliche Auge muss sie vertragen, weshalb sie zum Beispiel ausreichend Sauerstoff durchlassen müssen. Zugleich dürfen sich keine gefährlichen Bakterien in den Poren ansiedeln. (Foto: wöhlk-contact-linsen)



☞ Die Erbsubstanz DNA ist ein Biopolymer. Bei Bakterien besteht sie aus einigen Millionen Monomer-Grundbausteinen. Bei Säugetieren erreicht sie mit rund drei Milliarden Monomeren eine Länge von einem Meter. (Grafik: H. M. Berman et al., The Protein Data Bank)



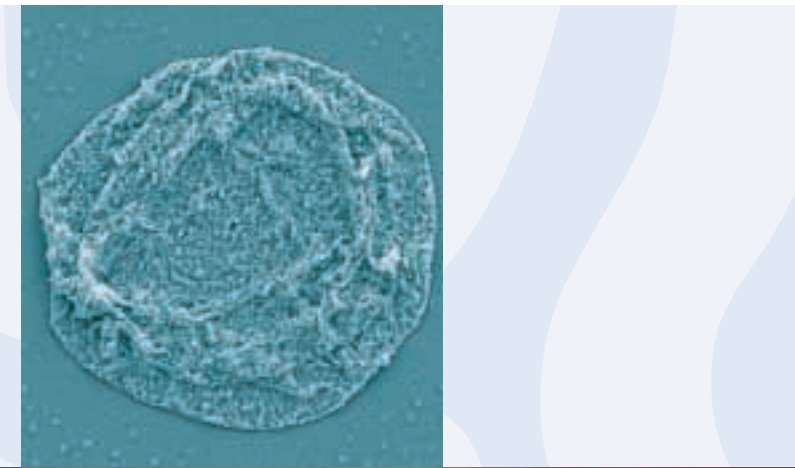
☞ Computersimulation einer Mikroemulsion aus Öl, Wasser und Amphiphilen: Die gleichen Anteile von Wasser und Öl mäandern durcheinander, ohne Tröpfchen zu bilden. Mikroemulsionen sind besonders feine, stabile Mischungen. (Grafik: G. Gompper, Forschungszentrum Jülich)



☞ Diese hohle Polymerkapsel ist etwa fünf Mikrometer (Millionstel Meter) klein. (Bild: MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung)



☞ Flexibles Display auf einer Kunststoffolie. Die organischen Leuchtdioden sorgen für eine leuchtkräftiges und kontrastreiches Bild. (Foto: Covion, Philips PolyLED)



☞ Flexible Polyimid-Folie mit organischer Elektronik. Selbst wenn man die knapp acht Zentimeter große Folie scharf biegt, arbeitet die Elektronik noch. (Foto: Philips Research)

DER WASCH-TURBO

Wissenschaftler des Forschungszentrums Jülich entdeckten eher zufällig, dass ihr neues Polymer ein Wasch-Turbolader ist: Es kann die Effizienz von Tensiden (waschaktive Substanzen) um fast 1000 Prozent erhöhen. Dr. Hitoshi Endo zeigt links ein Glas mit einem herkömmlichen Tensid: Zwischen der wässrigen und der öligen Phase sitzen nur ein paar Zentimeter Emulsion, in der das unfrisierte Tensid Öl und Wasser mischt. Nach Zugabe des Jülicher Polymers dehnt sich die Emulsionsphase plötzlich auf das komplette Glas aus, wie Dr. Jürgen Allgaier rechts stolz zeigt. Tenside sind auch wichtige Bestandteile von Hautcremes, Lotionen, Farben und Lacken. (Foto: Forschungszentrum Jülich)

Kunststoffe bestehen aus einem Netzwerk großer Polymermoleküle. Polymere sind lange Molekülketten, die aus kleinen immer gleichen Grundbausteinen aufgebaut sind, den Monomeren. Ihr Name kommt von den altgriechischen Wörtern „mono“ und „méros“, was zusammen „ein Teil“ heißt. Wie Perlen reihen sich Monomere zu einer Kette und bilden so ein Polymer („viele Teile“). Solche Molekülketten können sich sehr variabel aneinander lagern und untereinander verschiedene chemische Bindungen eingehen. Das beeinflusst entscheidend die Eigenschaften des Materials. An Polymeren zeigt sich deutlich das – für weiche Materie typische – Wechselspiel zwischen Unordnung und Ordnung: So verknäult ein Molekül auch im Material stecken mag – es bleibt doch eine hochgeordnete Kette von immer gleichen Monomerbau-

steinen. Nicht nur Kunststoffe, sondern auch viele Biomoleküle sind Polymere: Dazu gehören einige Eiweiße, Collagen, Zellulose oder die **DNA**.

Polymere dringen heute sogar schon in das Gebiet der Elektronik vor, eigentlich eine Domäne harter kristalliner Halbleiter. Das ist erstaunlich, weil Kunststoffe wegen ihrer schlechten elektrischen Leitfähigkeit bislang eher als Isolatoren – zum Beispiel zur Ummantelung von Kabeln oder als Isolierband – eingesetzt werden. Chemiker und Physiker haben aber entdeckt, wie sie Polymeren die Eigenschaften von elektrischen Leitern oder Halbleitern beibringen können.

Herausgekommen sind dabei „organische“ Elektroniken auf Kunststoff-Folien. Diese Folien ermöglichen zwar längst

nicht so fein strukturierte, also hoch integrierte und schnelle Schaltkreise wie das herkömmliche Silizium. Dafür sind sie aber viel billiger und außerdem **biegsam**. Wo es also weniger auf Leistungsfähigkeit ankommt, könnten sie bald ihre Vorteile ausspielen: als elektronisches Papier, intelligente Warenetiketten und Verpackungen, in Kleidung und vielen anderen Alltagsgegenständen.

Vielleicht begegnen sie uns zuerst als Handy-Displays. Solche Organischen Displays bestehen aus **OLEDs**, Organischen Leuchtdioden. Diese sind leuchtkräftiger als heutige Flüssigkristall-Bildschirme. Und sie sind auch noch schräg ablesbar, was bei Flüssigkristallen wegen des polarisierten Lichts nicht geht. Noch leiden OLED-Displays an ihrer geringen Haltbarkeit. Aber die Chancen

stehen gut, dass sie schon bald den Flüssigkristall-Anzeigen kräftig Konkurrenz machen.

Aus Polymeren können auch Materialien mit völlig neuen Eigenschaften entstehen. Forscher können zum Beispiel hohle Polymerkapseln herstellen, die nur wenige Mikrometer (Millionstel Meter) groß sind. Dazu beschichten die Forscher zuerst kleine Teilchen mit Polymermolekülen. Danach lösen sie diese Teilchen auf, und die Überreste wandern durch die poröse Polymerwand hindurch nach draußen. Fertig ist eine leere Kapsel. Durch die poröse Wand können die Forscher die Kapseln nicht nur leeren, sondern auch neu befüllen. Eines Tages könnten sie als „Mini-U-Boote“ medizinische Wirkstoffe durch die feinsten Äderchen unseres Körpers transportieren.

BIEGSAME SOLARZELLEN

Warum sind Farbstoffe farbig? In den Farbstoff-Molekülen schlucken Elektronen bestimmte Licht-Wellenlängen aus dem Spektrum des weißen Lichts. Dabei nehmen sie deren Energie auf. Trickreiche Materialstrukturen können diese Energie in elektrische Energie umwandeln: So funktionieren Solarzellen. Die neuste Entwicklung sind Solarzellen auf Basis von Polymer-Farbstoffen. Diese Solarzellen wandeln sehr effektiv Licht in elektrische Energie um. Zudem sind sie flexible Folien. Das unterscheidet sie von heutigen Solarzellen aus kristallinen Halbleitern. Die Foliensolarzellen könnten eines Tages – auf der Kleidung getragen – das Handy bei einem Spaziergang aufladen.

lichen Form. Ihre Materialeigenschaften reichen vom reißfesten Autogurt bis hin zur weichen, aber optisch präzisen Kontaktlinse.



Magischer Tanz im Oktett

„Wo damals die Grenzen der Wissenschaft waren, da ist jetzt die Mitte.“

GEORG CHRISTOPH LICHTENBERG (1742-1799)
DT. APHORISTIKER UND PHYSIKER

Die Materie der Erde ist in ständigem Wandel, dafür sorgen chemische und physikalische Prozesse. Materie trifft auf Materie und bildet neue Materie – manchmal sogar **Riesenkugeln**. Was hierbei zwischen den Molekülen passiert, bestimmen hauptsächlich die Außenelektronen der Atome. Wie bei einer Zwiebel sind die Elektronen eines Atoms in verschiedenen Schalen übereinander angeordnet. Daher können nur die Elektronen der äußeren Schale mit der Umgebung in Kontakt treten. Maximal acht Elektronen

finden dort Platz. Bei den meisten Elementen ist die Außenschale nur teilweise gefüllt. Diese Atome suchen sich Partner, mit denen sie gemeinsam die Elektronenzahl in der äußeren Schale vervollständigen können – sie teilen sich dabei eine Außenschale. Das bringt den Reaktionspartnern einen Energiegewinn: Sie verhalten sich wie eine Fahrgemeinschaft, die Sprit sparen will, indem sie ihr Auto möglichst voll besetzt. Dieses Bestreben der Atome, eine mit acht Elektronen vollbesetzte Außenschale zu bekommen, nennt man Oktettregel. Wasserstoff und Helium bilden eine Ausnahme, denn sie verfügen nur über eine einzige Schale, die maximal zwei Elektronen aufnehmen kann.

Das Streben nach einer vollbesetzten Elektronenschale ist der Motor und Choreograph jeder chemischen Reaktion. Daher

bestimmt die Zahl seiner Außenelektronen die chemischen Eigenschaften eines Elements. Es gibt acht verschiedene Typen von Atomen, man teilt sie in Hauptgruppen ein. Die Elemente der ersten Hauptgruppe haben nur ein Außenelektron. Ihre Chancen, einen Sitz in einer „Fahrgemeinschaft“ zu erhalten, stehen hoch: Natrium reagiert daher selbst mit Wasser heftig. Ihr ähnlich reaktionsfreudiger Gegenpart sind die Elemente der siebten Hauptgruppe, etwa Fluor oder Chlor. Diese wollen mit aller Gewalt ihre mit sieben Elektronen besetzte Außenschale auffüllen. Die Edelgase der achten Hauptgruppe sind dagegen chemisch sehr träge; sie sind ja schon voll besetzt. Reagieren ein Element mit wenig Außenelektronen und eines mit fast voll besetzter Schale, dann wird viel Energie frei. Ein Beispiel ist die Knallgas-Reaktion: Ein mit

← Henri Matisse „Der Tanz“, 1910 (Foto: Mauritius)

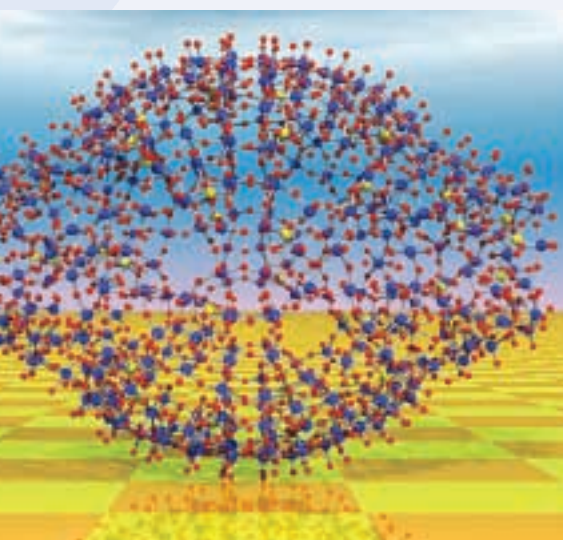
→ Ein Fahrzeugkatalysator ist ein heterogener Katalysator mit einer großen Oberfläche, die eine dünne Schicht aus einer Platin-Rhodium-Legierung trägt. Sobald diese heiß ist, oxidiert sie gefährliche Substanzen zu Kohlendioxid und Wasser. Das Treibhausgas Kohlendioxid lässt sich leider noch nicht vermeiden. (Bild: OMG AG, Hanau-Wolfgang)

↕ Dieses Riesenkugeln-Molekül ist etwa sechs Nanometer (Milliardstel Meter) groß. Es besteht aus fast 2000 Molybdän- und Sauerstoffatomen. Seine Schöpfer, Chemiker der Uni Bielefeld, nennen es „Nanoigel“. Als molekularer Käfig kann es in seinem Inneren etwa 400 Wassermoleküle aufnehmen. Es erlaubt so die Erforschung der mikroskopischen Struktur von Wasser. (A. Müller, Universität Bielefeld)



↕ Dieses chinesische Schriftzeichen heißt Heiratsvermittler und zugleich Katalysator. (Bild: P. Kreitmeier, O. Reiser, Univ. Regensburg)

触媒



sechs Außenelektronen ausgestattetes Sauerstoff-Atom reißt die beiden Elektronen von zwei Wasserstoffatomen an sich. Es knallt heftig, die Wasserstoffatome bleiben an ihm kleben, und ein H₂O-Molekül ist entstanden.

Tatsächlich steuert also das Energieverhältnis alle chemischen Reaktionen: Entweder es wird Energie frei oder sie muss von außen zugeführt werden, zum Beispiel in Form von Wärme oder elektrischem Strom. Freiwillig läuft eine Reaktion nur dann ab, wenn sie Energie freisetzen kann – wie etwa eine Verbrennung. Fast neunzig Prozent aller chemischen Reaktionen auf der Erde setzen Energie frei, laufen aber dennoch nicht freiwillig ab. In diesen Fällen verhindert ein so genannter Energieberg die Reaktion. Er liegt als gewaltiges Hindernis vor dem günstigen Energietal,

das die Reaktionspartner erreichen wollen. Solche Reaktionen muss man anschieben. Entweder schubst man sie mit viel Kraft – also Energie – über den Berg hinweg, oder man setzt einen „Bergführer“ ein, der den Reaktionspartnern eine Abkürzung ins Energietal weist. Diesen Bergführer nennt man Katalysator. Man kann ihn sich auch als einen Heiratsvermittler vorstellen. Die Chinesen verwenden in der Tat für beide das gleiche **Schriftzeichen**. Während der Reaktion verbraucht sich ein Katalysator nicht. Er steht also sofort dem nächsten „heiratswilligen“ Molekülpaar zur Verfügung.

Es gibt sehr unterschiedliche **Katalysatoren**: Die großen Enzym-Moleküle zum Beispiel besetzen als Katalysatoren eine wichtige Rolle im biochemischen Spiel des Lebens. Auch die Oberflächen von

WAHLVERWANDTSCHAFTEN

Heute wissen wir, dass Energien entscheidend für den Ablauf chemischer Reaktionen sind. Diese Erkenntnis ist nicht selbstverständlich. Zu Goethes Zeiten vermutete man eine Art innere Verwandtschaft bestimmter Stoffe zueinander. Reagierten zwei Stoffe heftig miteinander zu einem stabilen dritten, schloss man auf starke Verwandtschaft. Wenn eine dritte Substanz aber in der Lage war, diese Verbindung wieder aufzulösen, um mit einem der beiden Ausgangsstoffe eine neue Verbindung einzugehen, hieß der Effekt „Wahlverwandtschaft“. Nach diesem chemischen Fachbegriff benannte Goethe seinen berühmten Roman. Hier sind es keine chemischen Stoffe, die Verbindungen eingehen, sondern Menschen, die zum Paar werden und sich wieder trennen. Der Experimentator Goethe benutzte sogar einen Katalysator: Ein dubioser Mann namens „Mittler“ beschleunigt die menschlichen Bindungsprozesse. Heute müsste der Roman wohl „Reaktionskinetik“ heißen.



↳ Lithium-Polymer-Akkus können sehr flach gefertigt werden. Da sie in eine Folie eingeschweißt sind, bleiben sie flexibel. (Foto: Solid Energy/Fraunhofer Gesellschaft)

↳ Bus mit Elektroantrieb, den eine Brennstoffzelle mit Strom versorgt. Im Dach sind Drucktanks für den Wasserstoff untergebracht. Der Prototyp wird seit 2000 getestet. (Foto: MAN/Siemens)

↳ Großer Brennstoffzellen-Stapel für ein Kraftwerk. (Foto: Siemens)



DER KAFFEEHAUS-KATALYSATOR

Ein Experiment für den Chemieunterricht im Straßencafé: Ein Zuckerwürfel brennt nicht. Davon kann man sich mit einem Feuerzeug schnell überzeugen. Die Oberfläche verkohlt zwar ein wenig, doch eine von selber weiterlaufende Verbrennung will nicht in Gang kommen. Das ändert sich schlagartig, wenn man den Würfel mit etwas Zigarettenasche bestäubt. Plötzlich lässt er sich leicht entzünden. Die Zigarettenasche übersteht den Brand unverändert. Das beweist ihre Rolle als Katalysator.

kristallinen Materialien können als Katalysatoren wirken. Für diese heterogenen Katalysatoren interessieren sich vor allem Physiker und Physikochemiker. An der Oberfläche bricht das räumliche Atomgitter eines Kristalls abrupt ab. Die an der Oberfläche sitzenden Atome haben deshalb freie Elektronenschalen-Anschlüsse – wie die äußeren Tänzer

einer Tanzgruppe, die noch eine Hand frei haben. Nähern sich fremde Moleküle dieser Oberfläche, können sie dort andocken. Die reaktive Oberfläche bricht diese Moleküle dann auf und ihre Bruchstücke können auf der Katalysator-Tanzfläche neue chemische Bindungen eingehen.

Um Energie zu speichern, werden chemische Reaktionen manchmal so lange an ihrem Ablauf gehindert, bis ihre Energie benötigt wird. Man kann sich das wie die Feder einer aufgezogenen mechanischen Uhr vorstellen, die ihre innere Spannung kontrolliert an das Uhrwerk weitergibt.

Nach diesem Prinzip funktionieren Batterien und Akkumulatoren. Die chemische Reaktion in deren Innerem läuft nur solange ab, wie man Strom entnimmt. Schaltet man ab, wird die Reaktion angehalten.

Solche „elektrochemischen Zellen“ haben zwei Elektroden: eine positive Anode und eine negative Kathode. Beide stehen über einen Elektrolyten – zum Beispiel Batteriesäure – in Kontakt. Leider können solche Zellen nur sehr wenig Energie speichern. Ein Kilogramm Benzin enthält 300mal soviel nutzbare Energie wie ein Bleiakku gleichen Gewichts. Um so weit wie ein Benzin-PKW mit vollem Tank fahren zu können, müsste ein Elektroauto also erheblich schwerer sein.

Auf der Suche nach besseren Technologien entstand der Lithium-Akku. Er kann immerhin bis zu einem 80stel des Energieinhalts von Benzin speichern. Lithium ist nach dem altgriechischen líthos für Stein benannt und das Leichteste aller Metalle. Es ist das dritte Element des Periodensystems und das erste, dessen äußere

↳ Eine kleine Brennstoffzelle, die zum Beispiel ein Laptop betreiben kann. Zukünftige Mikrobrennstoffzellen sollen samt einer Brennstoffkartusche sogar in ein Notebook hinein passen. Sie würden ihm zu längeren Betriebszeiten verhelfen – und zu einem Auspuff! (Foto: Smart Fuel Cell)

re Elektronenschale volle acht Plätze besitzt. Dieser „Achtsitzer“ ist allerdings sehr dürrtzig mit nur einem einzigen Elektron ausgestattet. Deshalb gibt das Lithium sein freies Elektron gerne mit besonders viel Energie an einen Partner ab. Das nutzen Lithium-Batterien und -Akkus aus. Sie erreichen so Betriebsspannungen bis zu 3,7 Volt. Das ist das Dreifache einer herkömmlichen Nickel-Cadmium-Zelle.

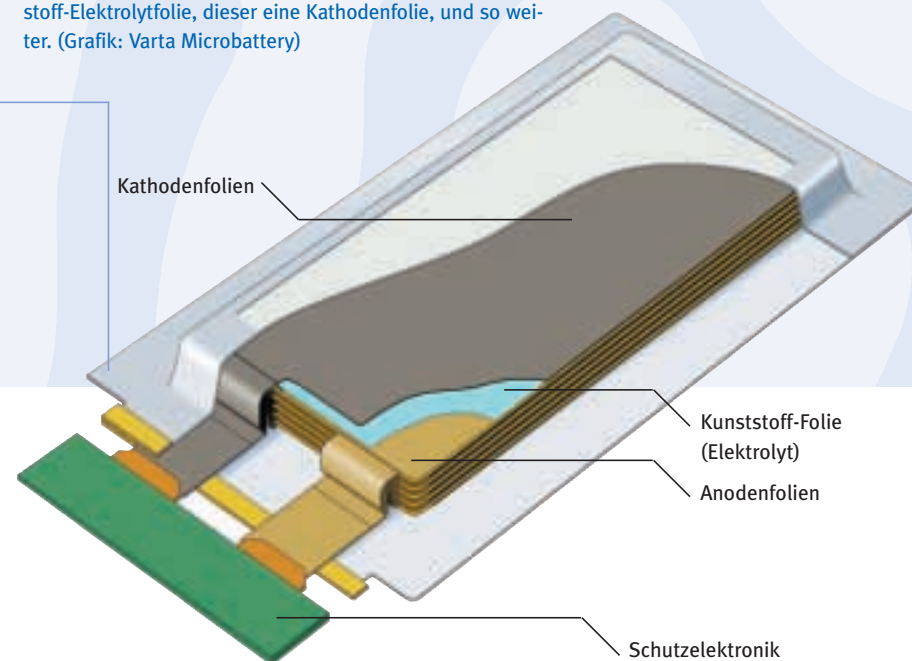
Batteriehersteller entwickeln zurzeit sogar Lithium-Akkumulatoren, die flach und biegsam sind. Diese Lithium-Polymer-Akkus haben Folienelektroden. Eine Kunststoffolie übernimmt die Rolle des Elektrolyten, so kann keine ätzende Flüssigkeit mehr auslaufen. Solche Akkus könnten als dünne Folie sogar hinter dem Bildschirm eines Notebooks verschwinden und so ein viel flacheres Gehäusedesign ermöglichen.

Brennstoffzellen sind leere elektrochemische Zellen. Sie speichern keine Energie sondern verbrauchen einen externen Brennstoff. Der besteht aus Wasserstoff und Sauerstoff, den Komponenten von Knallgas. Anstatt die Mischung aber explodieren zu lassen, lässt die Brennstoffzelle beide Stoffe gemächlich miteinander reagieren – zum Beispiel durch eine Membran. Die bei der Reaktion auszutauschenden Elektronen werden dabei über einen äußeren Stromkreis von der einen Seite der Zelle zur anderen geleitet und verrichten als elektrischer Strom nützliche Arbeit. Das einzige Abgas ist reiner Wasserdampf. Brennstoffzellen können stationär in kleinen oder großen Kraftwerken arbeiten. Als mobile Stromerzeuger können sie Elektroautos versorgen – oder sogar als **Mikrobrennstoffzellen** tragbare Elektrogeräte.

Allerdings bereitet der Wasserstoff große Probleme. Es gibt ihn zwar fast unbegrenzt im Wasser. Ihn daraus chemisch zu gewinnen, braucht aber viel Energie. Seine



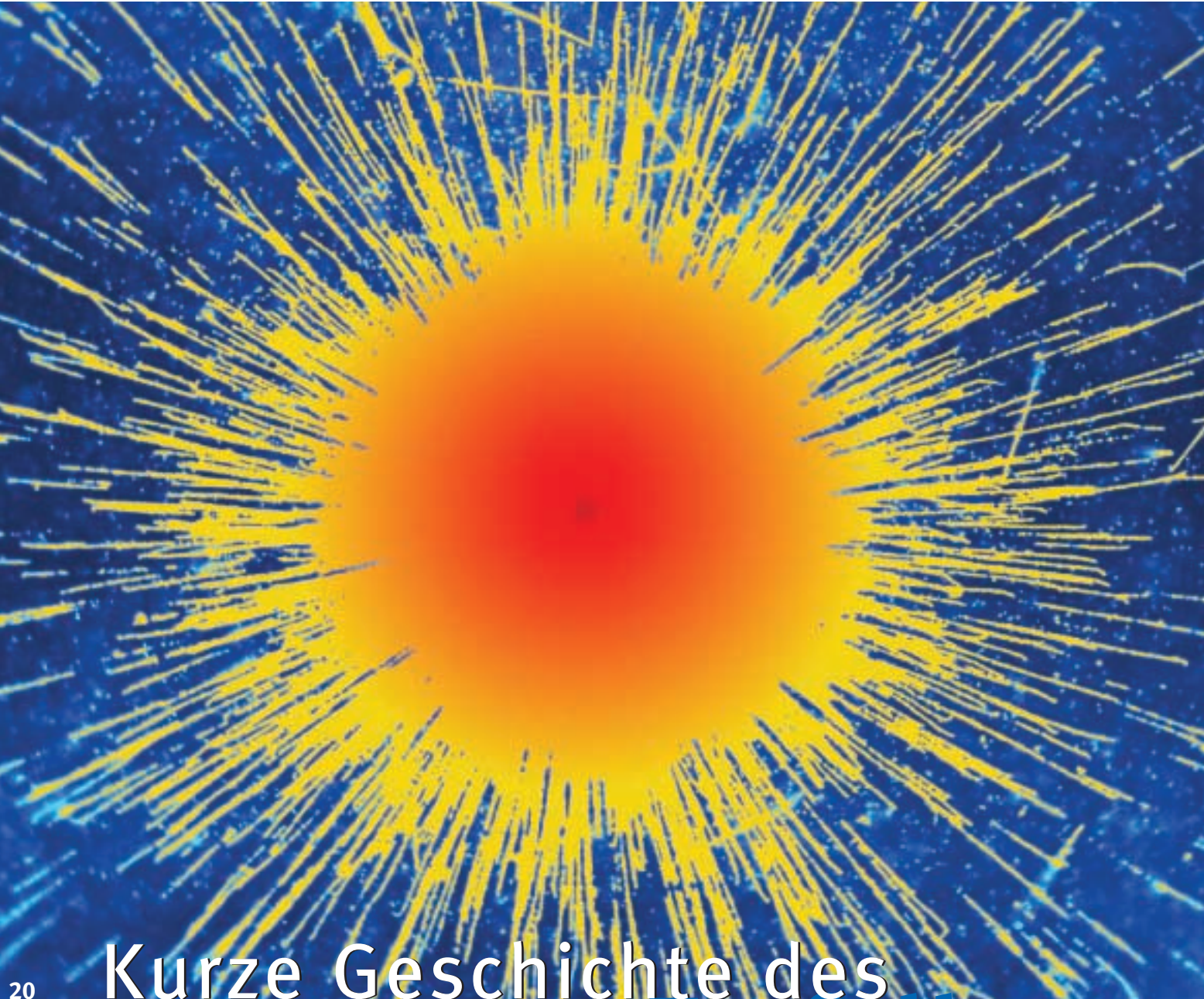
↳ Innen sieht ein Lithium-Polymer-Akku wie ein Sandwich aus: Schicht auf Schicht folgt einer Anodenfolie eine Kunststoff-Elektrolytfolie, dieser eine Kathodenfolie, und so weiter. (Grafik: Varta Microbattery)



Produktion darf außerdem nur wenig Treibhausgas Kohlendioxid freisetzen. Auch Lagerung und Transport sind aufwendig. Nur als hoch komprimiertes Gas oder sehr kalte Flüssigkeit von -253 °C erreicht Wasserstoff eine praktikable Energiedichte: Drei Liter flüssigen Wasserstoffs enthalten ungefähr so viel freisetzbare Energie wie ein Liter Benzin.

Zum reinen Wasserstoff gibt es Alternativen, wie den Alkohol Methanol. Er enthält viel Wasserstoff in chemisch gebundener Form. Daher muss die Brennstoffzelle erst für das Methanol „fit“ gemacht

werden: Sie muss aus ihm den Wasserstoff freisetzen können. Das ist bei Niedertemperatur-Brennstoffzellen, die als einzige für den mobilen Einsatz geeignet sind, ein großes Problem. Heute setzen die Brennstoffzellen-Forscher vor allem auf die Direktmethanol-Brennstoffzelle, die das Methanol direkt in ihrem Inneren chemisch zersetzt. Allerdings werden dabei auch geringe Mengen von Kohlenmonoxid frei: Das droht die Zelle genau wie einen lebenden Organismus zu vergiften. Man sieht: Die Entwickler von Brennstoffzellenautos müssen noch viele Probleme lösen.



Kurze Geschichte des Zerfalls

„Das Zerfallen des Atoms war in meiner Seele dem Zerfall der ganzen Welt gleich. Plötzlich fielen die dicksten Mauern. Alles wurde unsicher, wackelig und weich.“

WASSILY KANDINSKY (1866-1944)
RUSS. MALER & GRAFIKER

Während der österreichische Physiker Ernst Mach die Existenz von Atomen noch vehement bestritt, entdeckte im März 1896 der französische Forscher Antoine-Henri Becquerel schon die Spuren des Zerfalls ihrer Kerne: In seiner Schublade hatte Uransalz durch eine Lichtschutzverpackung hindurch Fotoplatten belichtet. Dieses Phänomen untersuchten Becquerels Doktorandin Marie

Curie und ihr Mann Pierre Curie genauer und nannten es Radioaktivität. 1903 erhielten Becquerel und die Curies dafür den Nobelpreis für Physik.

Heute wissen wir, dass neunzig Prozent aller Atomkerne radioaktiv zerfallen. Bei Radioaktivität denken wir sofort an Kernreaktoren und Kernwaffen. Dabei vergessen wir oft ihre wichtige Rolle in der Natur: Natürliche radioaktive Stoffe kommen überall auf unserem Planeten vor. Sogar in unserem Körper zerfallen pro Sekunde etwa 8000 Atomkerne.

Für diese Verwandlung von Atomkernen sorgen zwei Mechanismen. Der Erste führt zum so genannten **Alpha-Zerfall**, der Zweite verantwortet den Beta-Zerfall. Für den ersten Mechanismus sind zwei einander entgegengesetzte Kräfte verantwortlich,

die im Atomkern um die Vorherrschaft ringen. Die starke Coulomb-Kraft will die positiv geladenen Protonen auseinander treiben, denn gleichnamige Ladungen stoßen sich ab. Die noch stärkere Kernkraft hält die Kernbausteine jedoch zusammen. Die Kernkraft hat aber nur eine sehr kurze Reichweite. Deshalb kann die weitreichende Coulomb-Kraft größere Kerne leichter zerreißen. Siegt irgendwann die Coulomb-Kraft, dann schießt ein Viererpaket von je zwei Neutronen und zwei Protonen aus dem Kern: ein Alpha-Teilchen. Wegen der kurzen Reichweite der Kernkraft gibt es mit wachsendem Atomgewicht – also immer größerem Kernradius – immer mehr instabile Atomkerne. Die künstlich erzeugten superschweren Elemente jenseits des Urans zerfallen so schnell, dass man Schwierigkeiten hat, ihre Existenz überhaupt festzustellen.

Element 110, das **Darmstadtium**, „lebt“ zum Beispiel nur wenige Hundert Millionstel Sekunden.

Quarks sind die Akteure des Betazerfalls. Die Kernbausteine Neutron und Proton enthalten jeweils drei Quarks. Diese Winzlinge sind noch mindestens Zehntausendmal kleiner als ein Atomkern. Ein Neutron besitzt ein Up-Quark und zwei Down-Quarks. Beim Beta-Zerfall wandelt sich eines der Down-Quarks in ein Up-Quark um. Damit ist aber aus dem Neutron ein Proton geworden. Der Atomkern hat ein Proton hinzugewonnen. Zur Erhaltung der elektrischen Ladung bildete sich gleichzeitig ein Antineutrino und ein Elektron. Aus dem Atom ist ein neues chemisches Element entstanden, das im Periodensystem auf den nächsten Platz nach oben rückt. Aus Sauerstoff würde so plötzlich Fluor, wenn dieses Element nicht – zum Glück für uns – so stabil wäre.

Radioaktive Kerne können auch Gammastrahlung aussenden. Wie das Licht ist sie eine elektromagnetische Strahlung. Sie enthält aber noch viel mehr Energie als Röntgenstrahlung und ist für uns daher sehr gefährlich. Sie kann dicke Betonmauern durchdringen und in unserem Körper Krebs auslösen.

Dennoch sind natürliche Radionuklide, also radioaktive Elemente, wichtig für uns und unsere Umwelt. Ein Beispiel ist die Erdwärme. Sie ist nach der Sonnenenergie die zweitgrößte Energiequelle auf der Erdoberfläche. Ein großer Teil dieser Wärme kommt gar nicht aus dem heißen Kern der Erde. Sie entsteht direkt unter unseren Füßen, weil in der rund 35 Kilometer dünnen Erdkruste natürliche Radionuklide zerfallen. Auf diese Weise erzeugen die Granitgesteine der Kontinentalplatten 50 bis 80 Prozent der gesamten **Erdwärme**.

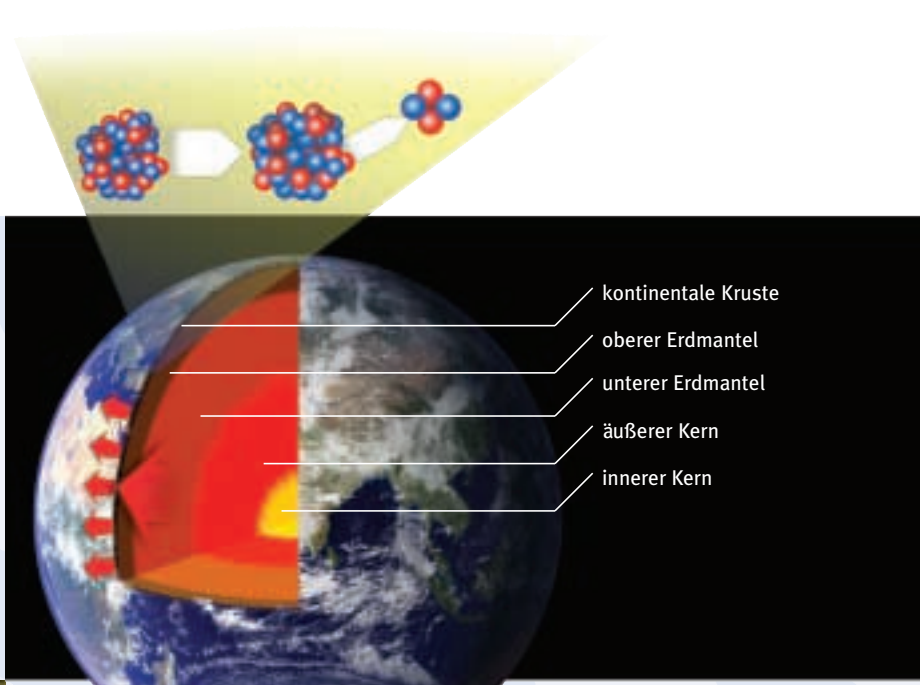
ISOTOPE UND HALBWERTSZEITEN

Die chemischen Eigenschaften eines Elements sind bestimmt durch die Zahl seiner Protonen und Elektronen. Die Zahl der Neutronen kann variieren. Diese Variationen heißen Isotope. Uran zum Beispiel hat 92 Protonen. Das häufigste Uranisotop heißt Uran-238, denn es hat 146 Neutronen, also insgesamt 238 Kernbausteine. Isotope eines Elements sind unterschiedlich stabil, weil ihre Kerne verschieden aufgebaut sind. Viele Protonen auf engem Raum können durch eine große Zahl von Neutronen zusammen gehalten, also stabilisiert werden. Uran-238 ist viel stabiler als das leichtere Uran-235. Wann ein bestimmtes Atom zerfällt, kann die Physik nicht voraussagen. Sie kann aber sicher sagen: Von einer Anzahl mehrerer Atome eines Isotops ist nach Ablauf einer charakteristischen Zeitspanne nur noch die Hälfte übrig. Man nennt diese Zeitspanne Halbwertszeit.

INFO

☞ Alpha-Zerfall des Elements Radium, der stärksten bekannten radioaktiven Substanz. Die Strahlung ist eine Millionmal so stark wie die des Urans. (Foto: C. Powell, P. Fowler, D. Perkins / Science Photo Library)

☞ Auf den Kontinenten kommt der größte Teil der Erdwärme nicht aus dem Erdinneren. Sie entsteht zu 50 bis 80 Prozent in den Granitgesteinen der nur 35 km dünnen Erdkruste. Diese beherbergt relativ hohe Konzentrationen der Alphastrahler Uran-238, Uran-235, Thorium-232 und des Betastrahlers Kalium-40. Oben: ein Alpha-Zerfall. (Grafik: R. Wengenmayr, Foto der Erde: NASA)



☞ Das Darmstadtium entstand erstmals 1994 in den Beschleunigeranlagen der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt. Hier sieht man den Linearbeschleuniger UNILAC. (Foto: A. Zschau, GSI)



☛ Die Überreste eines der zwei Milliarden Jahre alten natürlichen Kernreaktoren von Oklo (gestrichelt umrandet): Heute sind sie für Menschen ungefährlich. (Foto: R. Loss, Curtin University of Technology, Australien)

☛ Uranpechblende (Urannitrit), das in das Mineral Dolomit eingewachsen ist. Es stammt aus der Lagerstätte Schlema-Aberoda. (Bild: Wismut GmbH)



☛ Officialglas aus Uran, wie es früher in Apotheken verwendet wurde. Die getönten Flaschen sollten empfindliche Substanzen vor Licht schützen. (Fotos: R. J. Schwankner, FH München)



☛ Der Übertage-Uranbergbau riss tiefe Wunden in die Landschaft. Das Bild zeigt die Hammerberg-Halde Schlema. (Bild: Wismut GmbH)



INFO URAN UND CO.

Das Uran und seine Zerfallsprodukte liefern den Hauptbeitrag zur natürlichen Radioaktivität in der Erdkruste. Uran ist das schwerste Metall in der Natur. Es kommt überwiegend in Form des Isotops Uran-238 vor. Dessen Halbwertszeit von rund 4,5 Milliarden Jahren entspricht fast genau dem Alter der Erde. Deshalb besitzt die Erde heute etwa die Hälfte ihres ursprünglichen Uranvorrats. Nur 0,7 Prozent des Urans entfallen auf das spaltbare Isotop Uran-235, denn mit einer Halbwertszeit von 710 Millionen Jahren zerfällt es sechsmal schneller als Uran-238. Ein Produkt des Uran-Zerfalls ist das radioaktive Edelgas Radon.

1938 stießen der Chemiker Otto Hahn, sein Assistent Fritz Straßmann und die Physikerin Lise Meitner auf die Kernspaltung. Otto Hahn erhielt für seine Laborarbeit 1944 den Nobelpreis für Chemie. Die Natur war den Forschern allerdings längst zuvorgekommen: 1972 fanden Wissen-

schaftler in den Uranerzminen von Oklo die Reste natürlicher Kernreaktoren. Oklo liegt auf dem afrikanischen Kontinent nahe dem Äquator, in Gabun.

Die **Oklo-Reaktoren** waren vor zwei Milliarden Jahren aktiv. Sie funktionierten im Prinzip wie unsere heutigen Leichtwasser-Reaktoren: Regenwasser bremste die Neutronen aus dem radioaktiven Gestein so ab, dass eine Kettenreaktion in Gang kam. Die Brennstoffmischung bestand damals zu etwa 97 Prozent aus Uran-238 und zu drei Prozent aus spaltbarem Uran-235. Als alles spaltbare Material verbraucht war, kam die Reaktion von selbst zum Stillstand. Solche natürlichen Reaktoren gibt es schon lange nicht mehr, weil heutige Uranerze zu wenig Uran-235 enthalten. Wegen der hohen Zerfallsgeschwindigkeit dieses Isotops sind die natürlichen Vorräte stark zusammengeschrumpft. In den Brennstäben heutiger Reaktoren muss daher der Uran-235-Anteil durch Anreicherung künstlich erhöht werden.

Aus dem **Uranerz** Pechblende isolierte Marie Curie erstmals das berühmte Element Radium. Dafür bekam sie 1911 einen zweiten Nobelpreis, diesmal für Chemie. Die Pechblende stammte aus den riesigen Uranerz-Vorkommen im Erzgebirge. Damals war sie nutzlos und kündigte den Bergleuten das traurige Ende einer Silberader an. Erst ab Mitte des 19. Jahrhunderts begannen die Menschen, Uran zu verarbeiten. Die ersten Anwendungen waren farbenprächtiges Uranglas und Uranglasuren.

Die Bergleute im Erzgebirge litten häufig an einer tödlichen Krankheit. Zwei Ärzte aus Schneeberg erkannten im 19. Jahrhundert, dass es Lungenkrebs war. Später entpuppte sich das radioaktive Edelgas Radon als Ursache. Es entsteht beim Zerfall von Uran im Erz und kann sich in der Grubenluft der Bergwerke gefährlich konzentrieren. Die hohe Sterblichkeit der Bergleute war allerdings schon früher bemerkt worden. Joachimstal (Jachimov) im

heutigen Tschechien trug unter Eingeweihten einen schaurigen Namen: Tal der jungen Witwen.

Anfang des 20. Jahrhunderts sorgte das Radon allerdings zunächst für ein kleines Wirtschaftswunder im Erzgebirge: Die vielen stark radonhaltigen Quellen galten als gesundheitsfördernd, und so war der Besuch eines Radon-Heilbades in Mode.

Später wurde das westliche Erzgebirge zu einem Schauplatz des kalten Krieges. Von 1946 bis 1991 förderte die Wismut SDAG in Sachsen und Thüringen 231.000 Tonnen Uran, überwiegend für die Kernwaffenproduktion der Sowjetunion. Die DDR war damals der viertgrößte Uranlieferant der Welt.

Doch Mensch und Natur zahlten einen hohen Preis für die Uranförderung. Viele wurden krank, ganze Ortschaften fielen dem **Übertageabbau** zum Opfer. Am Schluss türmten sich tausend Millionen Tonnen Erzabfall zu riesigen, radioaktiven Halden.

Heute saniert der Nachfolger Wismut GmbH im Auftrag der Bundesrepublik aufwendig die Gruben, Halden und unterirdischen Gänge.

Die Geschichte des Urans zeigt die gefährliche Schattenseite mancher Entdeckungen: Noch heute bedroht uns das Uran aus dem Erzgebirge in vielen Kernwaffen und als radioaktiver Abfall. Keiner der Forschungs-Pioniere konnte das voraussehen. Nach den ersten Atombombenabwürfen auf Japan begann Otto Hahn, sich energisch gegen die Herstellung von Kernwaffen zu engagieren. Gemeinsam mit vielen Kolleginnen und Kollegen machte er der Politik und der Öffentlichkeit die Katastrophe eines drohenden Atomkriegs deutlich. Wie jede bedeutsame Entdeckung bedeutete die Erkundung der Radioaktivität Chance und Risiko zugleich. Mit unserem Wissen wächst immer auch unsere Verantwortung. Heute ist diese Verantwortung vor allem in zwei Bereichen der Naturwissenschaften deutlich: in der Kernphysik und in der Biologie.

INFO DIE GEFÄLSCHTE MUMIE

Im Jahr 2000 wurde in Pakistan eine Mumie entdeckt. Angeblich sollte sie eine Tochter des persischen Königs Xerxes (519-465 v. Chr.) sein. Doch eine Archäologin bekam Zweifel und wandte sich an ein Team deutscher Physiker. Die Forscher bestimmten den Gehalt des radioaktiven Kohlenstoff-Isotops C-14 in der Mumie. Mit dieser so genannten C-14 Methode kann man das Alter organischer Fundstücke feststellen. In jedem lebendigen Organismus ist das Verhältnis der Kohlenstoff-Isotope C-12 und C-14 konstant. Wenn der Organismus aber stirbt, nimmt der Anteil an C-14 ab, denn das Isotop zerfällt mit der Zeit. Durch Zurückrechnen auf das ursprüngliche Verhältnis lässt sich deshalb ermitteln, wann ein Organismus zuletzt gelebt hat. Im Falle der Mumie war das Ergebnis schockierend: Die Frau hatte 1995 noch gelebt. So wurden Wissenschaftler zu Detektiven und ein Sensationsfund zum Kriminalfall. (Foto: G. Morgenroth, Physik in unserer Zeit)



Die Bausteine des Lebens

„Die Wissenschaft fängt eigentlich erst da an interessant zu werden, wo sie aufhört.“

JUSTUS VON LIEBIG (1803-1873)
DT. CHEMIKER

Naturforscher stecken seit Jahrhunderten ihre Nase mitten ins Leben – oder dessen Überreste: Stinkender Fisch, verrottendes Holz und faulende Kalbshaxen lagen vor etwa 330 Jahren in einer abgedunkelten Kammer eines Londoner Herrenhauses. Vermutlich um Atem ringend beugten sich Robert Boyle und sein Assistent darüber. Sie wollten das geheimnisvolle Leuchten des verwesenden organischen Materials enträtseln, die Biolumineszenz. Heute wissen wir, dass

Bakterien aus der Zersetzung Energie gewinnen und dabei leuchten: Ein biologischer Organismus produziert also durch chemische Energiegewinnung das physikalische Phänomen Licht.

Die Biophysik erforscht kleine Dinge wie einzelne Moleküle, aber auch Objekte von geradezu astronomischer Komplexität wie das Gehirn. Im Mikrokosmos der Moleküle gibt es extrem geordnete Strukturen, für die sich Biophysiker besonders interessieren. Das sind die Membranen, die lebende Zellen und deren Organellen wie Häute umhüllen. Diese Membranen müssen das Innere der Zelle oder Organelle schützen und zugleich für den Austausch lebenswichtiger Substanzen durchlässig sein. Trotz ihres einfachen Grundaufbaus

aus nur zwei Molekülschichten sind sie komplexe Gebilde, in denen sich viele verschiedene Biomoleküle mit speziellen Funktionen finden.

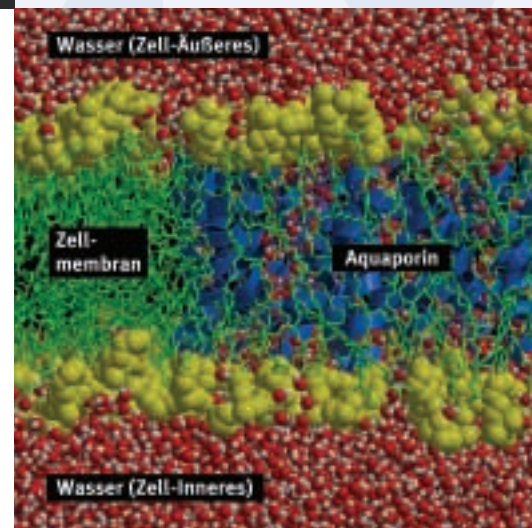
Besonders faszinierende Membranträger sind die Mitochondrien. Diese Zellorganellen sind die Kraftwerke der Zellen. Mit ihrer Energie laden sie Transporter-Moleküle auf, die sie dann dorthin bringen, wo sie gebraucht wird. Dieser Transporterstoff heißt ADP (Adenosindiphosphat). Ein ADP-Molekül kann man sich wie eine kleine Federmechanik vorstellen, die durch das Mitochondrium gespannt wird. Tatsächlich geschieht das nicht mechanisch, sondern chemisch. Dabei wird das ADP zu ATP (Adenosintriphosphat), das nun seine Energieladung zu einem Verbraucher, bei-



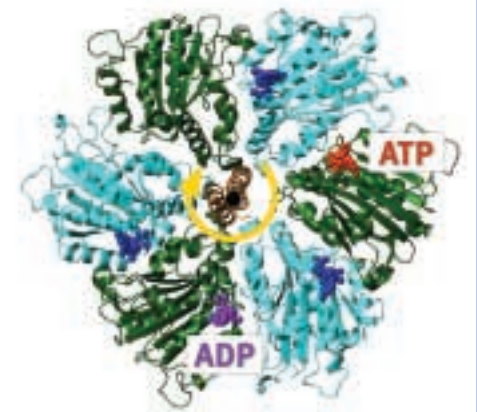
Biolumineszenz nennt man es, wenn Lebewesen Licht erzeugen. Die bekannteste lebende Lampe ist der Leuchtkäfer, auch bekannt als Glühwürmchen. (Foto: www.dietmar-nill.de)

Ein Opfer für die Wissenschaft: Robert Boyle und sein Assistent untersuchen organischen Abfall. (Karikatur: Roland Wengenmayr / Nachrichten aus der Chemie)

Die Abbildung zeigt, wie das Protein „Aquaporin“ mithilfe seiner feinen Kanäle Wasser durch eine Zellmembran transportiert. Die Wasser liebenden Köpfe der amphiphilen Phospholipid-Moleküle sind als gelbe Kugeln, die Fett liebenden Füße im Inneren der Membran durch grüne „Fäden“ dargestellt. (Grafik: B. L. de Groot, H. Grubmüller, Science)



spielsweise der Zelle einer Muskelfaser, transportiert. Dort löst es seine „Feder“ aus und kurbelt einen biochemischen Prozess an. Wieder als ADP kehrt es danach zum Mitochondrium zurück. Die Mitochondrien unseres Körpers produzieren täglich zusammen 50 Kilogramm ATP für den Energiekreislauf. Ohne diesen Stoff wären wir in wenigen Minuten tot.



DIE KLEINSTE MASCHINE DER WELT

Links: Die F-ATPase sitzt in der Membran des Mitochondriums (blau). Die grauen Zylinder unten stellen vereinfacht den molekularen Elektromotor dar, der die „Kurbelwelle“ (orange) im Kopf (grün) des Moleküls antreibt. Ein Strom aus elektrisch geladenem Wasserstoff (H⁺, rote Pfeile) treibt ihn an. Der gelbe Pfeil zeigt die Drehrichtung. Der Kopf ist über einen Halter (gelb, stark vereinfacht) fixiert und hier vorne aufgeschnitten.

Rechts: Blick von unten in den Kopf. In den dunkelgrünen „beta-Untereinheiten“ sitzen drei Taschen, in denen die Kurbelwelle das ADP (lila, unten) zu ATP (rot, rechts) auflädt. Die dritte Tasche links oben ist gerade entleert.

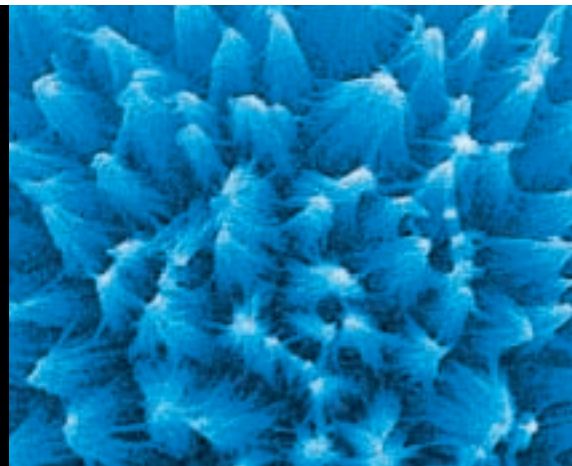
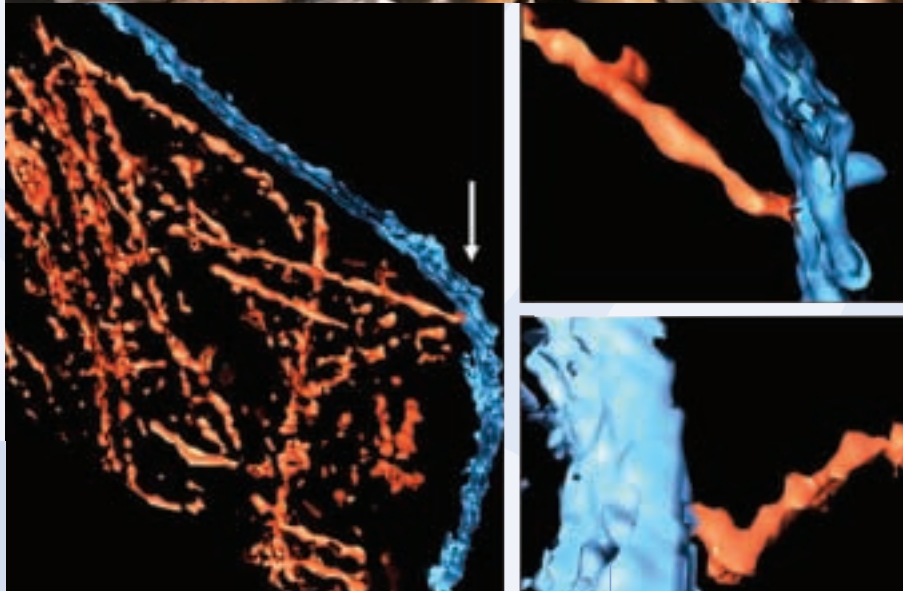
Erst kürzlich gelang es den Forschern zu demonstrieren, wie die ATP-Produktion funktioniert. Dazu ließen sie einen Supercomputer zwei Jahre lang mit 200.000 virtuellen Atomen jonglieren. Das Ergebnis war ein Film mit einer Hauptdarstellerin, die in der Membran des Mitochondriums verankert ist: das Enzym F-ATPase. Dieses große Biomolekül ist eine molekulare Dreitaktmaschine. In seinem Inneren rotiert eine Kurbelwelle und „spannt“ die ADP-Feder zum ATP. Mit nur 20 Nanometern (Milliardstel Meter) ist die F-ATPase die kleinste bekannte Nanomaschine der Welt.

Eine Stufe höher in der Hierarchie der Biomembranen steht die Hülle der kompletten Zelle, die Zellmembran. In ihr reihen sich Phospholipid-Moleküle in einer doppelten Molekülschicht. Diese Struktur

erlaubt es den Molekülen, ihre Fett liebenden „Füße“ vor dem Wasser zu verstecken, das die Membran außerhalb und

☞ Zähne sind nicht nur das härteste Material, das ein lebender Organismus hervorbringt, sondern auch sehr dauerhaft: Diese stammen aus einem mittelalterlichen Friedhof bei Lauchheim. (Foto: W. Filser, MaxPlanck Forschung)

☞ Dieser Blick in eine lebende Zelle zeigt, wie Aktinfilamente (rötlich braun) des Zellskeletts an die Zellmembran (blau) binden (Pfeil). (Bild: O. Madelia et al., Science)



☞ Künstlich hergestellte Biomineralien, der Baustoff von Knochen und Zähnen. Im Gelatinegel wachsen je nach Bedingungen kugel-, igel- oder hantelförmige „Komposite“ aus organischem und kristallinem Material. Sie kommen der natürlichen Materialzusammensetzung von Knochen und Zähnen schon sehr nahe. (Bilder: O. Hochrein, MaxPlanckForschung)

☞ Ein Chip der „Gedanken liest“: Die Elektronik nimmt Signale von lebenden Nervenzellen auf, verarbeitet sie und gibt sie an ein Computersystem weiter. (Foto: Infineon Technologies/Max-Planck-Institut)

INFO FORTPFLANZUNG IN DER MOLEKÜLSCHAUKELE

Die Zellmembran spielt aktiv bei der Zellteilung mit, dem Fortpflanzungsprozess der Zellen. Bei der Teilung muss die Zelle ihre Membran an der richtigen Stelle einschnüren, meist in der Mitte. Wenn das schiefgeht, bleibt eine der Tochterzellen unvollständig und ist nicht lebensfähig. Wie eine Zelle ihre Mitte findet, untersuchen Biologen am Darmbakterium *Escherichia coli*. Beobachtungen zeigen, dass im Bakterium drei Proteine eine Art Molekülschaukel bilden. Diese Schaukel schwingt zwischen den beiden Enden des stäbchenförmigen Einzellers hin und her. Die Biologen vermuten, dass die Schaukel mit ihrem tiefsten Punkt die Mitte der Zelle und damit die richtige Stelle zum Teilen markiert. Physikern gelang es, diesen Prozess im Computer zu simulieren. Sie griffen dazu in den mathematischen Werkzeugkasten der „nichtlinearen Dynamik“, zu dem auch die Chaostheorie gehört. Und tatsächlich schaukelten in ihrem virtuellen Bakterium die Moleküle fast wie im echten *E. coli* – ein wichtiger Schritt zum Verständnis der Zellteilung.

innerhalb der Zelle umgibt. Trotz ihres fetten Innenlebens muss die Membran aber das lebenswichtige Wasser ins Zellinnere transportieren können. Die Forscher konnten in einer Simulation zeigen, wie das funktioniert. Den Wassertransport übernimmt ein spezielles Protein namens Aquaporin. Es bildet in der Membran eine Pore mit winzigen Kanälen, die reinstes Wasser transportieren. An dieser Pforte endet eine lange Reise durch den Körper, die mit einem kräftigen Schluck begann.

Physikalische Methoden wie die Mikroskopie eröffnen den Wissenschaftlern immer tiefere Einblicke in ihre Untersuchungsobjekte. Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts enthüllte die Röntgenstrukturanalyse erstmals den Aufbau biologischer Makromoleküle. So bahnte die

Physik den Weg zur Entschlüsselung der DNA-Struktur. Allerdings lieferte sie zunächst nur ein großes Puzzle. An einem legendären Samstagmorgen des Jahres 1953 setzten der Physiker Francis Crick und der Genetiker James Watson es dann richtig zusammen. Den zwei jungen Forschern, die an ihrer Universität in Cambridge den zweifelhaften Ruf von „Klassenclowns“ genossen, gelang damit ein Volltreffer. Zusammen mit dem Physiker Maurice Wilkins, der die Röntgenstrukturmessungen gemacht hatte, erhielten sie den Nobelpreis für Medizin.

Wissenschaftler träumen schon lange davon, dem Tanz der Moleküle in einer noch lebenden Zelle zuschauen zu können. Zehn Jahre haben Forscher an einer Methode gefeilt, die das ermöglicht. Sie ähnelt der Computertomographie, benutzt

aber Elektronen als Strahlung und kann so molekulare Strukturen sichtbar machen. So gelangen sensationelle Schnappschüsse von verästelten Aktinfilamenten in einer lebenden Zelle. Diese Proteine stützen nicht nur die Zelle als Skelett, sondern bilden auch „Highways“ für den Transport von Stoffen im Zellinnern. Ein weiteres Wunder des Körpers sind unsere Zähne. Es ist erstaunlich, dass weiche, lebende Materie etwas so Hartes herstellen kann. Knochen oder Zähne sind so genannte Composite aus einem organischem Material und winzigen Mineralkristallen wie Apatit. Mittlerweile züchten Forscher solche Composite im Reagenzglas nach. Ihnen gelangen dabei kugel- oder hantelförmige Körper aus Mineralkristallen und Gelatine. Diese künstlichen Gebilde sehen nicht gerade wie Zähne aus. Ihre Zusammensetzung entspricht aber schon

sehr genau dem Zahnschmelz und sie sollen einmal einen neuen Zahnersatz ermöglichen.

In den biochemischen Labors schließt sich ein Kreis. Die Forscherinnen und Forscher bringen weiche, lebende Materie erfolgreich in eine enge Verbindung mit harten, leblosen Kristallen: Lebende Nervenzellen sitzen auf Halbleiterchips und tauschen mit der Elektronik Signale aus. Wir können heute nur darüber spekulieren, ob uns implantierte Chips eines Tages befähigen werden, allein über Gedanken mit Maschinen zu kommunizieren. Vielleicht bringt uns diese Forschung auch etwas ganz Anderes. Lassen wir uns überraschen.

