

2002
highlights der **physik**

Die Welt **hinter** den Dingen

Imnressium

Herausgeber

Deutsche Physikalische
Gesellschaft e.V. (DPG)

Bundesministerium für
Bildung und Forschung (BMBF)

Autor

Dr. Mathias Schulenburg

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

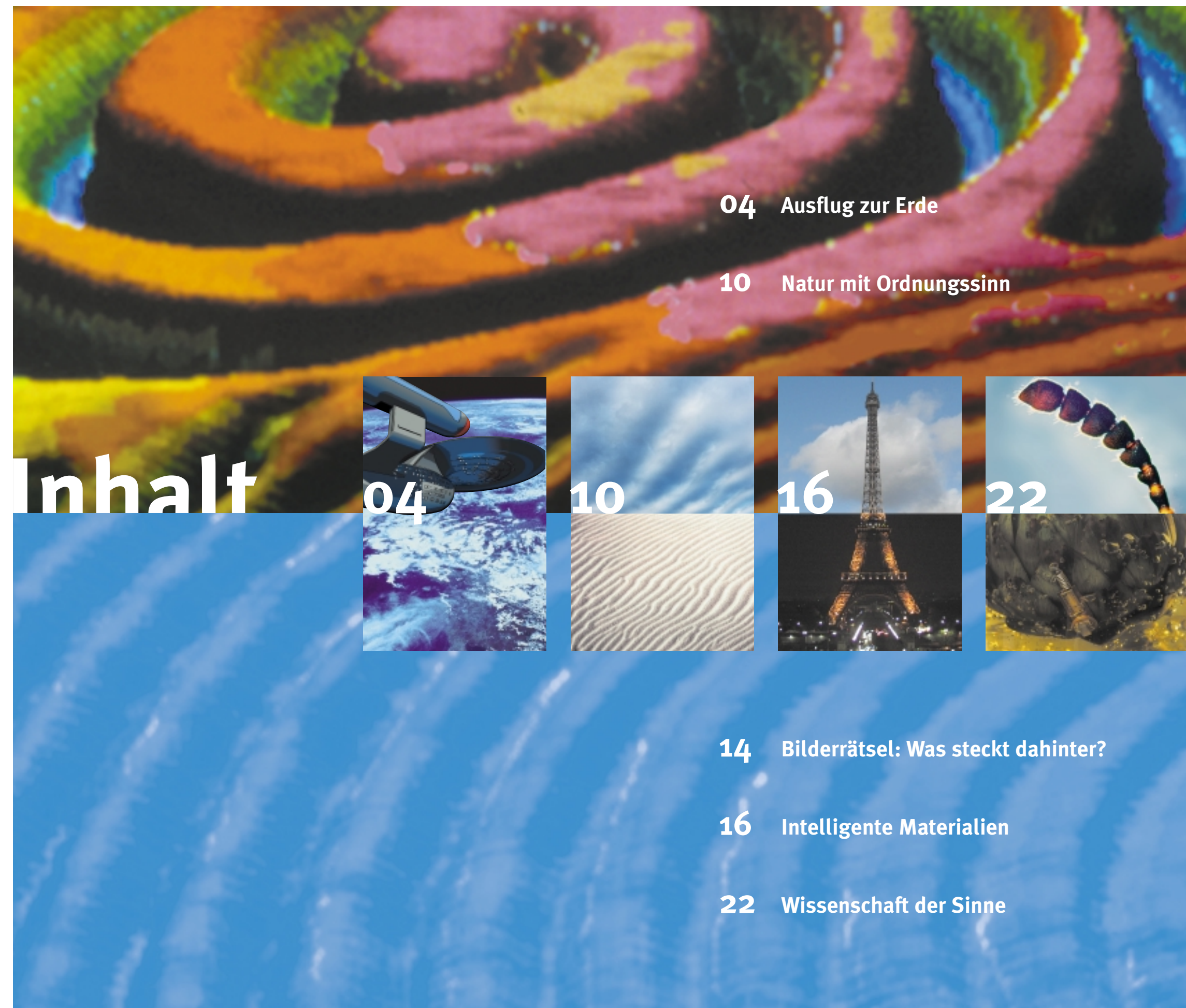
iserundschmidt

Kreativagentur für PublicRelations GmbH
Bad Honnef – Berlin

Juli 2002

Auflösung Bilderrätsel:

1c (E. Schaffner, MPI für Molekulare Zellbiologie und Genetik), 2a (W. Lopes/H. Jaeger, University of Chicago), 3a (M. D. Fairchild, University of Rochester), 4b (NASA), 5b (U. Beckhove, Uni Gießen), 6b (H.-C. Timm, Uni Hohenheim), 7c (E. Schaffner, MPI für Molekulare Zellbiologie und Genetik), 8c (H.-G. Purwins/I. Brauer, Uni Münster)



04 Ausflug zur Erde

10 Natur mit Ordnungssinn

04

10

16

22

14 Bilderrätsel: Was steckt dahinter?

16 Intelligente Materialien

22 Wissenschaft der Sinne



Ausflug zur Erde

Die dunklen Wolken aus interstellarem **Staub** in der Region Centaurus zeichnen sich durch eine hohe Gebärfruchtigkeit aus – was neue Sterne und Sonnensysteme angeht. Für wirklich brauchbare Planeten aber, mit Lagunen und Skigebieten, muss einiges zusammenkommen: die jeweilige Sonne darf nicht zu stark scheinen und nicht zu schwach, der Planet muss einen vernünftigen Abstand zur Sonne haben, einen passend dimensionierten Mond, der die Drehachse stabilisiert, und so weiter. Kurz: Es gibt genug zu tun für Leute wie Spock, der sich nach seiner Pensionierung dem Geschäft des „Planetforming“ gewidmet hat, der Steuerung neuer Welten ins Wohnliche. Dass die Früchte ihrer Arbeit erst in Millionen Jahren reifen stört Vulcanier wie Spock nicht – ein Förster bekommt die Verwandlung des von ihm gepflanzten Eichenwaldes in Möbel normalerweise ja auch nicht mit. Genügend Zeit al-

so, sich mal wieder den kleinen blauen Planeten anzuschauen, der es Spock schon vor ein paar Jahrzehnten angestanden hatte, gelegen am Rande eines unbedeutenden Arms einer eher durchschnittlichen Spiralgalaxie. Mit der von ihm günstig als Altersruhesitz erworbenen Enterprise steuerte er Terra an.

Immanuel Kant, der große Königsberger Philosoph, hatte es 1755 klar erkannt: Das Sonnensystem musste aus einer Materiescheibe entstanden sein. Heute macht das Hubble-Teleskop zahlreiche solcher „protoplanetaren“ **Scheiben** im Orion-Nebel sichtbar. Trotzdem müssen bewohnbare Planeten nicht häufig sein, denn es gibt viele Prozesse, die die Scheiben zerstören. Unser eigenes Sonnensystem ist offenbar auch von Störkräften attackiert worden, die Drehachse der Sonne jedenfalls ist um sieben Grad gegen die Planetenbahnebene geneigt.



▲ *Wolken aus interstellarem Staub in der Region Centaurus, in Astronomenkreisen „Thackerays Globulen“ genannt – nach dem Südafrikaner A. D. Thackeray, der sie 1950 als erster entdeckt hat. (Foto: NASA)*



▲ *Mögliche „protoplanetare“ Scheiben im Orion-Nebel. Es handelt sich um junge Sterne, die von Wolken aus Gas und Staub umgeben sind. Aus ihnen könnten einmal Planeten entstehen. (Foto: NASA)*



Einstein im Kornfeld

Erdbbeobachtungssatelliten wie Envisat können vom Weltraum aus den Zustand von Nutzpflanzenfeldern präzise ermitteln. Globale Positionierungssysteme gestatten die metergenaue Steuerung von Landwirtschaftsmaschinen. In der Kombination wird „Precision Farming“ möglich, eine hochtechnologische Form von Landwirtschaft, die die Umwelt schont: Dünge- und Spritzmittel werden punktgenau nur noch dort ausgebracht, wo der Satellit Bedarf ermittelt hat. Die Technik wird sich in naher Zukunft nur für große Anbauflächen lohnen, die im Osten Europas aber vorhanden sind.

Damit wäre auch Albert Einstein endgültig am Boden angekommen. Denn nach der Relativitätstheorie beeinflussen sowohl das Gravitationsfeld der Erde als auch ihre Rotation die Uhren der GPS-Satelliten. Auch ihre Signale werden im Schwerfeld der Erde durch relativistische Effekte abgelenkt – all dies muss berücksichtigt werden. Ohne die Allgemeine und die Spezielle Relativitätstheorie gäbe es kein GPS! Theorien über die Welt im Ganzen für das Streuen von Dünger...

▲ Das europäische zivile Navigationssystem Galileo wird am Ende aus 30 Satelliten bestehen. Es soll ab 2008 die Europäer unabhängig machen von den amerikanischen bzw. russischen Systemen GPS und Glonass. (Grafik: ESA)

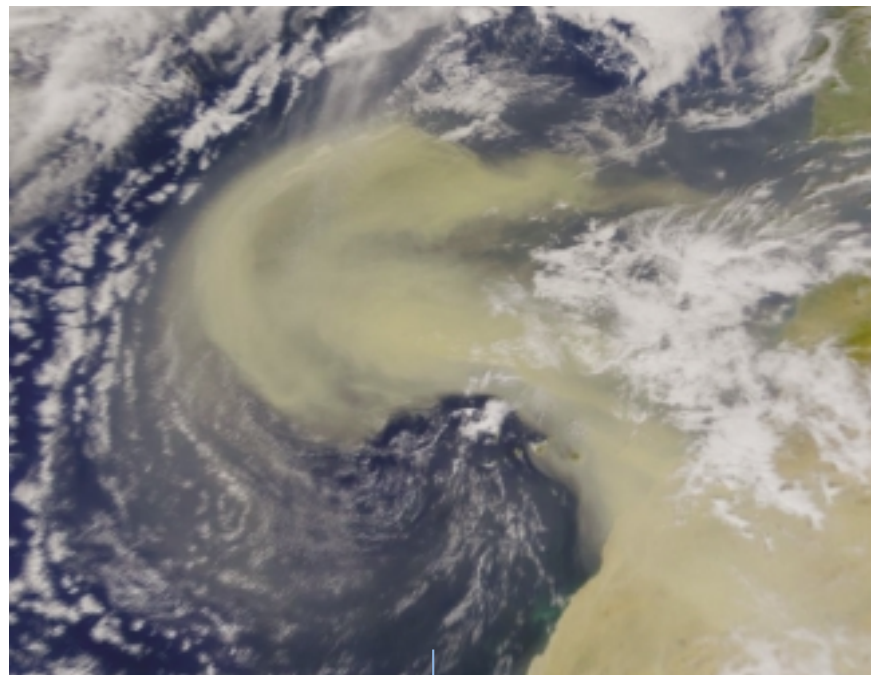
Der Alarm riss Spock aus seinem Korbessel (er hatte die Enterprise gemütlich mit Rattan-Möbeln ausgestattet): der Rand der einstigen protoplanetaren Scheibe, der Vorort des Sonnensystems war erreicht. Er enthält unter anderem kilometerdicke Materiebrocken, mögliche Kometen – die Enterprise aber konnte mühelos ausweichen, der Alarm war mehr eine Formsache.

Uranus, Saturn, Jupiter, Mars – Spock stieg in die Bremsen, Terra fegte heran. In 36.000 Kilometern Höhe über dem Äquator hielt die Enterprise an. Sie befand sich nun im „geostationären Orbit“.

Der geostationäre Orbit der Erde ist mittlerweile ziemlich bevölkert, zu einem guten Teil mit TV-Satelliten. Ein paar Stockwerke darunter, in 20.000 Kilometern Höhe, schwebt die Satellitenkette des amerikanischen „Global Positioning System“, GPS. Dessen Er-

folg hat die Europäer jetzt zum Aufbau einer eigenen Satellitenkette inspiriert, Projektname **Galileo**. Der dazu gehörende Satellitengürtel wird, wie sein amerikanisches Pendant, hochgenaue Zeitsignale aussenden, die auf der Erde zur exakten Bestimmung der Position dienen. Neben Lastwagen und Pkw nutzen mittlerweile auch viele „sensible“ Anlagen die Satellitensignale – zum Beispiel automatische Landehilfen für Flugzeuge. Unabhängigkeit und eigene europäische Kontrolle über ein solches System sind deshalb wichtig.

Die Fliehkraft nach außen und die ihr entgegen gesetzte Erdanziehung sorgen dafür, dass ein Körper je nach Höhe seiner Umlaufbahn nur mit einer bestimmten Geschwindigkeit um die Erde kreisen kann. Im „geostationären“ Orbit ist man gerade so schnell wie die Erddrehung – Spock sah unter sich also immer das gleiche Areal. Ein gewalti-



▲ Eine Staubwolke löst sich von der Westküste Nordafrikas. Sie ist ungefähr so groß wie Spanien und macht sich nun auf den Weg um den Globus. (Foto: NASA)

ger Staubeppich breitete sich aus Afrika kommend über dem Atlantik aus. Spock stieg in das kleine Beiboot um und ab.

Die Geophysik hat, zusammen mit anderen Naturwissenschaften, in der letzten Zeit ein Netzwerk von komplexen Zusammenhängen dingfest machen können, das Klima, Flora und Fauna stärker als vermutet bestimmt. Die wachsende Wüste in Afrika entlässt immer größere Mengen **Staub**, hunderte Millionen Tonnen, die sich unter an-



▲ Algenblüten im Golf von Mexiko. Die grünen Schlieren im Wasser vor der Westküste Floridas stammen von Algen, die sich auf Grund von Überdüngung rapide vermehrt haben. Ursache sind unter anderem Staubwolken aus der Sahara. (Foto: NASA)

derem in der Karibik niederschlagen. Zusammen mit dem Staub kommen auch Mikroben und Pestizide (etwa aus der Heuschreckenkämpfung im Sahel) und düngend wirkende Substanzen wie Eisen. Während die karibischen Korallen unter der Wirkung des Staubes schwinden, ganze Lurchpopulationen dahin gerafft werden und die Kinder der Region mehr und mehr an Asthma erkranken, wächst auf den Bahamas die fruchtbare Bodenschicht, blühen Regenwälder auf. Im Golf von Mexiko führt die düngende Wirkung

des Staubes vermehrt zu **Algenblüten** und damit zu Sauerstoffmangel in den Küstengewässern.

Globale Zusammenhänge wie diese sind teils nur mit Umweltsatelliten erfassbar; der acht Tonnen schwere europäische „Envisat“ glänzt mit raffinierten Geräten, die Spurengase, Ozon, Wasserdampf, Stickoxide und FCKWs messen können und über die Wärmebilanz des Planeten wachen.

Spock bewunderte die **Nordlichter** – das Glühen von Luft-Molekülen, ausgelöst durch elektrisch geladene Teilchen von der Sonne, die vom Erdmagnetfeld zu den Polen hin gezogen wurden. Ob die Terraner mittlerweile den Mechanismus ihres Magnetfeldes kannten?

Wirbel im glutheißen Kern der Erde werden von den Wissenschaftlern heute als Ursache des irdischen Magnetfeldes ausgemacht. Sie entstehen,

◀ **Polarlichter**. Die Magnetfeldlinien der Erde ziehen elektrisch geladene Teilchen von der Sonne zu den Polen hin, wo sie die Moleküle der Luft zum Leuchten bringen. (Foto: Okapia)





Zeit zum Mitnehmen

Alle 15°, die ein Reisender nach Osten zieht, bringt die lokale Zeit um eine Stunde voran, 15° nach Westen setzt sie eine Stunde zurück. Wer seinen Längengrad bestimmen will, muss also anhand des Sonnenstandes die lokale Zeit ermitteln und die Zeit an einem Referenzpunkt, etwa Greenwich, kennen. Im Jahre 1714 setzte die britische Regierung 20.000 Pfund Belohnung für einen Chronographen aus, der die erforderliche Genauigkeit besaß, die „Greenwich-Zeit“ gleichsam mitzunehmen. Der Londoner Uhrmacher John Harrison brachte die damals sensationelle Leistung fertig, seine „H4“ ging während einer Reise nach Jamaica ganze fünf Sekunden falsch. Das Preisgeld erhielt er erst auf Intervention Georgs III., nach einem jahrzehntelangen Kampf mit der schurkischen Längengrad-Kommission.

wenn im flüssigen Eisen des äußeren Erdkerns Wärme- oder Dichteunterschiede auftreten und sich diese dann über spiralförmige Wirbelströmungen ausgleichen. Die „Initialzündung“ für die Entwicklung eines Magnetfelds bilden kleinste elektrische Ströme, die durch die große Hitze im Erdinneren entstehen. Sie erzeugen kleine Magnetfelder, die dann durch die großen Wirbel im äußeren Erdkern zunächst „verbeult“ und dadurch auch verstärkt werden. Die so etwas größer gewordenen Magnetfelder geraten dann in neue



◀ *Klein, aber genau: Die legendäre „H4“ von John Harrison (1693 – 1776). Die Vorläufermodelle, wuchtige Chronometer mit großen Federn, kamen an die Präzision dieser Taschenuhr nicht heran. (Foto: National Maritime Museum, London)*

Wirbel usw. – das Ganze verstärkt sich gegenseitig. Am Ende ist das resultierende Feld so groß, dass es Tausende Kilometer weiter oben an der Erdoberfläche kleine Kompassnadeln ausschlagen lässt, die den Menschen zeigen, wo es lang geht.

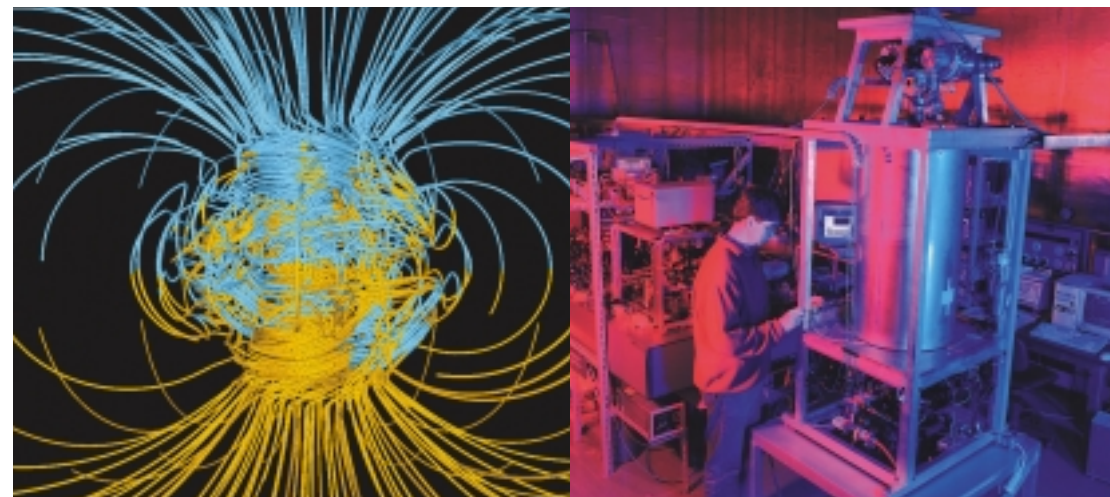
Spock sank mit dem Beiboot tiefer und tiefer. Ein merkwürdiges Flugobjekt kreuzte seinen Kurs. Tief unter sich sah er ein Gewirr von Küstenlinien und Inseln. Wie schwierig die Navigation früher gewesen sein musste.

Die Erde ist eine Kugel, eine Karte ist platt. Wie kann man einen Teil der Erdkugel so auf etwas Platten abbilden, dass eine taugliche Seekarte daraus wird? Ein bis heute nützliches Verfahren fand Gerhardius Mercator (1512-1594). Er stellte sich die Längengrade wie Längsschnitte in einer Orangenschale vor, zog dann die entstandenen Schalensegmente ab und legte sie in einer Reihe nebeneinander. Dann dach-

▶ *Computer-Simulation des Erdmagnetfeldes. Blaue Feldlinien führen in Richtung Erdkern, gelbe aus dem Kern heraus. (Grafik: G. A. Glatzmaier, University of California, Santa Cruz)*

▶ *Der Sonne entgegen: Nur von Sonnenlicht gespeist kann „Helios“ 40 Kilometer Höhe erreichen. Das Propellerflugzeug der NASA mit Solarzellen auf dem Rücken wird nachts von Brennstoffzellen gespeist. Für bestimmte Anwendungen, zum Beispiel Mobilfunk, könnte es Satelliten ersetzen. (Foto: NASA)*

te er sich die Segmente elastisch wie Gummi, zog die schmalen Spitzen auseinander und machte sie so breit, dass jedes Segment zu einem Rechteck wurde, das von oben bis unten lückenlos das nächste berührte. Bis auf die unmittelbaren Polumgebungen ließ sich so die ganze Kugelschale des Globus auf einem Rechteck abbilden, bei dem die Längengrade parallel zueinander vom Nordpol zum Südpol verliefen. Durch die gleichmäßige „Dehnung“ blieben die Konturen der Kontinente erhalten, obwohl sich ihre Größe veränderte. Auf dieser „Mercator-Projektion“ konnte ein Navigator eine kon-



▶ *Mercator-Projektion einer Orange. Zieht man die Spitzen der abgelösten Schalensegmente auseinander, erhält man eine zusammenhängende Karte der Oberfläche. (Foto: Bergerhof Studios, Suzy Coppens)*

stante Kompassweisung einfach als geraden Strich einzeichnen, der alle Längengrade im selben Winkel schnitt. **Das Verfahren** ist bis heute in Gebrauch.

Die Bestimmung des Längengrades war lange Zeit mit größten Schwierigkeiten behaftet. Heute kann man mit Satelliten metergenau einen Traktor steuern. Zusammen mit neuen, hochgenauen Atomuhren werden selbst kleinste Bewegungen der Erdkruste messbar werden, lassen sich womöglich sogar Erdbeben und Vulkanausbrüche vorhersagen.

▶ *Die Nautilus-Muschel. Ihre Kammern und deren Wachstumslinien werden im Monats- bzw. Tagesrhythmus angelegt. (Foto: Bergerhof Studios, Suzy Coppens)*

Die heute eingesetzten Atomuhren verwenden einen Taktgeber, der Radiowellen abgibt, die sich mit elektronischen Mitteln zählen lassen. Eine Uhr, die hunderttausendfach schnellere Lichtschwingungen als Frequenzstandard bemüht, wäre um ein Vielfaches genauer, nur ließen sich die Schwingungen bislang nicht abzählen. Mit einer Erfindung Münchner Quantenoptiker, dem „Frequenzkamm“, ist dies nun in greifbare Nähe gerückt.

Das Meer! Die Lande-Generatoren heulten auf und das Beiboot kam knapp über der Wasseroberfläche zum Stillstand. Sollte er schon umkehren? Mit wenigen Tastendrücken prüfte Spock die Wasserdichtigkeit seines Gefährts. Also los. Nautilus wollte er noch sehen. Nautilus, das Mondboot, das Perlboot... Spocks kleines Schiff tauchte ein und begann, in die Tiefe zu gleiten.

◀ *Atomuhren der heutigen Generation gehen in zehn Millionen Jahren weniger als eine Sekunde falsch. Diese Genauigkeit wird sich mit neuen Techniken noch steigern lassen. (Foto: PTB)*

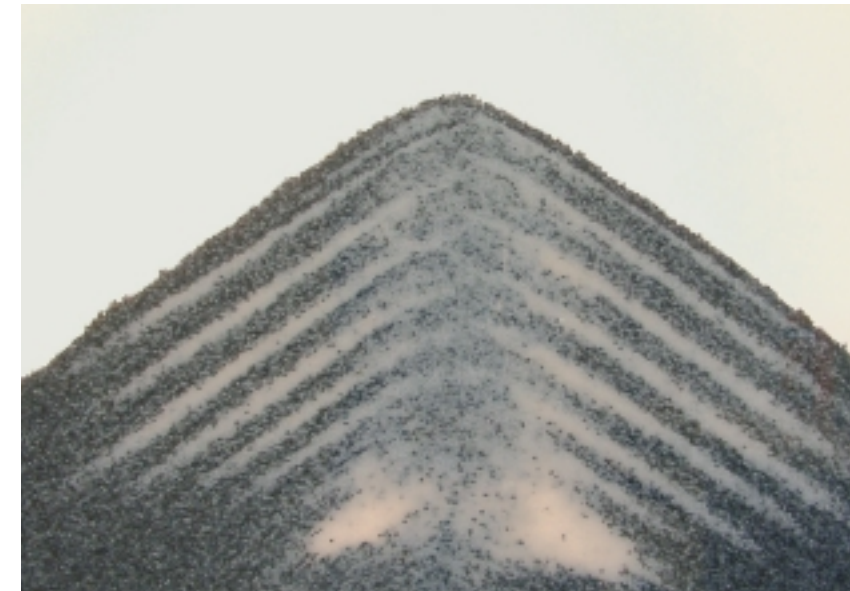


Das Mondboot

Die Anziehungskraft des Mondes erzeugt in den Ozeanen der Erde auf der Höhe des Äquators zwei Wasserbeulen. Eigentlich würde man nur eine Beule erwarten, da nämlich, wo der Mond der Erde am nächsten ist. Erde und Mond drehen sich aber zusammen um einen gedachten Punkt, rund 1.000 Kilometer tief im Erdinneren. Durch diese Asymmetrie entsteht eine zweite Beule auf der mondabgewandten Seite. Die Erde dreht sich nun unter diesen beiden Beulen weg und wird durch die dabei entstehende Reibung ganz allmählich abgebremst. Dadurch wird das System Erde-Mond so verändert, dass sich der Mond beschleunigt und langsam von der Erde entfernt („Drehimpulserhaltung“). Folgerichtig muss der Erdtag früher kürzer, der Mond früher näher und auch der Monat kürzer gewesen sein, weil erdnähere Umlaufbahnen kürzere Umlaufzeiten haben.

Nautilus, das Mondboot, kann das bestätigen. Seiner Nahrung, dem Plankton, folgend, taucht es jeden Tag einmal auf und ab, was sich in Wachstumslinien seines gekammerten Perlmuttergehäuses widerspiegelt. Die Kammern wiederum werden im Monatsrhythmus angelegt. Folglich haben die Kammern der Tiere heute je ungefähr 30 Wachstumslinien. Die Kammern sehr alter fossiler Nautilus-Gehäuse dagegen viel weniger. Vor vierhundert Millionen Jahren, so der Schluss, war der Mond doppelt so dicht an der Erde, waren die Gezeiten riesenhaft.

Natur mit Ordnungssinn



▲ Körnige Mengen zeigen viele unerwartete Eigenschaften: Hier rieselte eine Mischung aus Salz und Mohn zwischen zwei parallele Glasplatten. Die beiden Zutaten entmischten sich dabei ganz von alleine in abwechselnde Lagen. (Foto: D. Wolf, Uni Duisburg)

Wenn einer wie Spock, der in Mathematik selten gefehlt hat, über die Erde geht, kann er allenthalben Regelmäßigkeiten entdecken, die sich für eine mathematische Beschreibung anbieten: Schäfchenwolken, Wellen, Sandrippel etc. Phänomene in sanft dahin fließenden Medien, wie zum Beispiel Wirbel oder Walzen in Flüssen, können die Wissenschaftler mittlerweile ziemlich gut berechnen – schwierig wird es bei Turbulenzen mit chaotischem Verhalten. Auch die Physik zur

Beschreibung körniger Mengen, die – anders als Luft und Wasser – aus unterscheidbaren, „greifbaren“ Teilchen bestehen, ist noch nicht weit fortgeschritten. Zwei vermischte Sandsorten in einer Trommel entmischen sich in streifenartige Zonen, wenn sich die Trommel dreht – die Theorie dazu fehlt einstweilen. Dabei wäre eine Theorie sandartiger Schüttgüter auch von großem wirtschaftlichem Interesse, denn diese entfalten häufig ein Eigenleben, das sie schwer beherrschbar macht. So können große Sandkornmengen spontan Hohlräume bilden, deren „Decken“ ähnlich wie die Steine in der Decke eines alten Gewölbekellers zusammengehalten werden. Dadurch entstehen große Kräfte, die auf die Wände des Sandsilos drücken und sie zum Bersten bringen können.

Mathe für den Blütenkorb

Auch die belebte Natur ist für Spock voller Mathematik. Sein Lieblingslebewesen, der Nautilus, glänzt mit einem Gehäuse, das einer so genannten lo-

◀ Virtuelle Sonnenblume. Der Blütenkorb dieser im Computer erzeugten Sonnenblume gleicht exakt seinem natürlichen Vorbild. Bei der Berechnung wurden die „Fibonacci-Zahlen“ verwendet. (©1989: D. Fowler/P. Prusinkiewicz, University of Calgary)



Fotos: Photodisc

▼ Basalt findet sich in der Natur häufig in Form von Säulen. Wie sie zustande kamen, war für die Wissenschaft lange Zeit ein Rätsel. (Foto: J. Keller, Uni Freiburg)



Das Geheimnis der Säulen

Die Regelmäßigkeit der Basaltsäulen nimmt neuesten Theorien zufolge ihren Anfang, wenn ein großes Volumen von Basaltlava an der Oberfläche zu erstarren beginnt. Die erstarrende Basalthaut nämlich zieht sich zusammen und ein Rissmuster mit meist sechs-, fünf- oder siebenzähliger Symmetrie entsteht, wie man es ähnlich an der Oberhaut trocknenden Schlammes beobachtet. Diese Muster wandern mit der Erstarrungsfront der Lava nach unten, symmetrische Säulen entstehen. Die Formbildung hat also nichts mit der Neigung der Materie zum Kristallinen zu tun, tatsächlich besteht die Basaltsäule aus zahllosen willkürlich verteilten Kleinkristallen.

garithmischen Spirale folgt, einer Wachstumsfigur. Der Aufbau der Blütenkörbe von Sonnenblumen orientiert sich an den „Fibonacci-Zahlen“. Das ist eine Zahlenreihe, in der jede weitere Zahl die Summe der beiden vorhergehenden ist: 0; 1; 1; 2; 3; 5; 8; 13 etc. Bildet man die Quotienten zweier aufeinander folgender Fibonacci-Zahlen, so steht am Ende, bei sehr großen Zahlen, die „Goldene Zahl“ 0,61803..., deren Kehrwert 1,61803... als „Golde-

Von Staren und Staus

Für Kollektive – gleich, ob Atome, Vögel oder Autofahrer – lassen sich häufig Regeln entdecken, bei denen die Mitglieder des Kollektivs nur mit den jeweils nächst befindlichen kommunizieren. Dennoch lässt das Verhalten des Kollektivs an einen Überorganismus denken, wie bei einem Starenschwarm. Dabei werden die einzelnen Stare nur von drei Regeln geleitet: **1.** Bleibe dicht bei Deinem Nachbarn, aber **2.** berühre ihn nicht und **3.** versuche, ins Zentrum des Schwarms zu kommen. In einem mit diesen Regeln programmierten Computer schwankt eine virtuelle Starenmasse genau wie ein echter Schwarm über den Bildschirm.

Auf der Autobahn sind es ähnliche Mechanismen, die in einer dichten Kette von Fahrzeugen für Schwankungen bis zum Stillstand sorgen, selbst dann, wenn kein Hindernis da ist. Der im Rechner sehr gut simulierbare Vorgang hat Erscheinungsformen („Phasenübergänge“), die denen von Wasser sehr ähnlich sind: Dampf entspricht dem frei fließendem Verkehr, flüssiges Wasser dem zäh fließenden Verkehr, Eis bedeutet Stillstand, Stau. Welchen Aggregatzustand das Blech einnimmt, hängt unter anderem von der Fahrzeugdichte ab. Das Optimum ist kurioserweise nicht „kein Auto“, sondern eine Dichte von 20 bis 25 Autos pro Kilometer. Dann finden selbst sportliche Fahrer zu einem vernünftigen Rhythmus und reihen sich ein.



▲ Das Muster der Muschel *Conus marmoreus* kann von Wissenschaftlern am Computer exakt nachgebildet werden (im Hintergrund). (Foto: H. Meinhardt, www.eb.tuebingen.mpg.de)

ner Schnitt“ bekannt ist. Diese Relationen sind in vielen Pflanzen zu finden, weil sie für die dichte Packung wachsender Gebilde wie Sonnenblumenkörbe ein geometrisches Optimum darstellen.

Die Musterbildung bei **Muscheln** ist ein weiteres Beispiel für die geheimnisvollen Regeln hinter der Schönheit der Natur. Die Muster entstehen während des Wachstums der Muschel durch das Wechselspiel einander widerstrebender Kräfte, die die Verbreitung („Diffusion“) eines Farbstoffes einerseits fördern, andererseits behindern. Der Clou: Nicht die Farbmuster sind genetisch festgelegt, sondern nur die Regeln, nach denen sie entstehen. Die von den Physikern gefundenen Regeln erzeugen am Computer Muster, die bis ins Detail mit den natürlichen Vorbildern übereinstimmen.

◀ Ein Vogelschwarm scheint sich wie ein großer „Superorganismus“ zu verhalten. (Foto: R. Nagel, Wilhelmshaven)

Rhythmische Reaktion

In Teilchenkollektiven entstehen viele großflächige Muster spontan durch sehr kurzreichweitige Wechselwirkungen der Teilchen mit ihren Nachbarn. Eine besonders spektakuläre **Musterbildung** gelang dem Moskauer Chemiker Boris Belusov 1950, als er versuchte, eine vereinfachte Laborversion

▼ Die Belusov-Zhabotinsky-Reaktion in der Petrischale. (Foto: N. Manz, Uni Magdeburg)



▲ In den Computern der Wissenschaftler entstehen mittlerweile ganze Landschaften nach den Wachstumsalgorithmen der Natur. („lakescene“, ©2002: M. Fuhrer / P. Prusinkiewicz, University of Calgary)

des „Zitronensäure-Zyklus“ herzustellen. Der Zitronensäure-Zyklus ist ein komplizierter Schlüsselprozess beim Stoffwechsel der Lebewesen. Was Belusov suchte, fand er nicht, dafür freilich etwas derart Phantastisches, dass die Kollegen Unseriosität vermuteten und eine Veröffentlichung der Belusov-

▼ Belusov-Zhabotinsky in 3D. Die experimentell ermittelte Konzentration eines der Reaktionsprodukte wurde hier über der Ebene (der Petrischale) aufgetragen. (Grafik: W. Jantoß, Uni Magdeburg)

schen Entdeckung zunächst verhindern. Belusov hatte ein Substanzgemisch entdeckt, das nicht sofort zu einer Endsubstanz durchreagierte, sondern oszillierte: mal hatte dieses Reaktionsprodukt die Oberhand, mal jenes. Es war, als wechselte ein Softdrink seinen Geschmack rhythmisch zwischen Himbeer- und Orangenaroma, ganz von allein, um schließlich bei Kirschsäure stehen zu bleiben. Der Wechsel des Belusov-Gebräus vollzog sich mit fast vollkommener Gleichmäßigkeit, bis nach einigen Dutzend Zyklen schließlich ein Gleichgewicht erreicht war. Als so genannter Belusov-Zhabotinsky-Versuch gehört die Reaktion heute zu den Standard-Demonstrationen an den Universitäten.

Die **Belusov-Zhabotinsky-Reaktion** lässt man bevorzugt in einem kleinen Glasschälchen ablaufen; das Chemikaliengemisch bedeckt vielleicht einen Millimeter des Bodens. Dem staunenden Auge bieten sich – in einem blauen Farbenspiel – langsam kriechen-

Ruck und Zuck

In der berühmten Newtonschen Bewegungsgleichung „Kraft gleich Masse mal Beschleunigung“ ($F = m \cdot a$) ist die Beschleunigung als Änderung der Geschwindigkeit definiert. Gibt es ähnlich berühmte Gesetze, bei denen die Änderung der Beschleunigung eine Rolle spielt? Nein, wohl aber Regeln für Ingenieure, bei der Konstruktion von Schienenfahrzeugen auf eine Minimierung des „Jerk“ zu achten. „Jerk“ steht im Englischen für Ruck und Zuck und hat sich als Begriff für eine Änderung der Beschleunigung auch hier eingebürgert, und Jerks werden von den Benutzern der Bahn als besonders unangenehm empfunden. Auch die Geschmeidigkeit tierischer Bewegungen geht auf eine Minimierung des Jerk zurück, die computergenerierten Saurierschwärme in „Jurassic Park“ wurden rechnerisch entsprechend instruiert.

de und windende, symmetrische Spiralen dar: Aus dem hirnlosen molekularen Gewimmel entsteht ganz von selbst ein makroskopisches Muster.

Das Kochbuch der Natur

Immer mehr Musterbildungsprozesse wie diese werden entdeckt. In der Gemeinde der Wissenschaftler wächst derzeit denn auch quer durch die Disziplinen der Verdacht, dass die Natur über eine weithin unerforschte Rezeptesammlung, ein Kochbuch mit teils hoch komplizierten Mustern verfügt, die mit vergleichsweise einfachen Regeln erzeugt werden. Dieses Buch ist auch für die Wissenschaften der unbelebten Natur hoch interessant: Regelmäßige Reihen von kleinen Atomhäufchen etwa, von Clustern, entstehen auf einer Kristalloberfläche spontan aus chemischen Lösungen, wenn die Bedingungen nur richtig sind. Denkbare, dass auf diese Weise einmal elektronische Speicherelemente „wachsen“.

Was steckt dahinter?



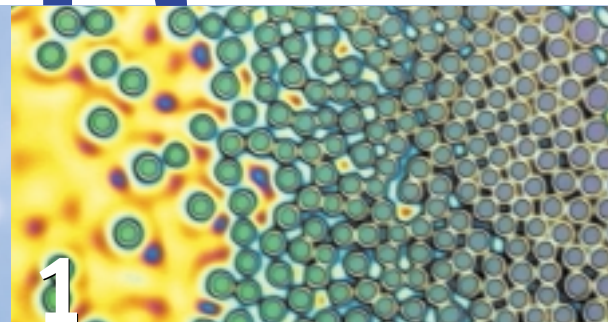
Präsentiert in Zusammenarbeit mit www.wissenschaft-online.de

Ein Bild sagt mehr als 1000 Worte. Sagt man. Gerade in der Wissenschaft aber sagen einem Fotos oft gar nichts: bunte Kügelchen, Streifen und Striche lassen meist sehr abstrakte Bilder entstehen. Erst die Bildunterschrift bringt Licht ins Dunkel.

Hier spielen wir mit der Uneindeutigkeit wissenschaftlicher Fotos – spielen Sie mit! Nur eine von drei Bildunterschriften ist richtig, die anderen beiden sind frei erfunden. Eine Auflösung findet sich im Impressum auf Seite 2.

Wer die Lösungen nicht einfach glauben will, kann im Internet mehr erfahren unter www.physik-highlights.de/bilderraetsel

Viel Spaß beim Rätseln!

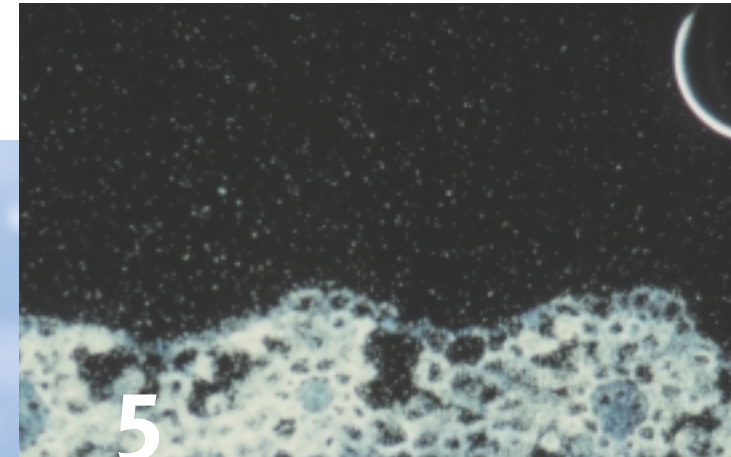


1

a Futter fassen: Bakterien wandern in Richtung der höheren Zuckerkonzentration (rechts).

h Und tschüss: Ein Verbund aus Styrolkügelchen (Durchmesser 20 nm) löst sich durch Erschütterungen im Ultraschallbereich plötzlich auf.

r Ordnung vs. Chaos: Ein dünner Polymer-Film bildet in einem elektrischen Feld je nach Spannung mehr oder minder regelmäßige Muster aus.



5

a Romantisch: Kohlendioxidhaltiges Eis („foam ice“), das durch das Restlicht während einer Sonnenfinsternis von selbst zu leuchten scheint. Aufgenommen am Südpol.

h Komisch: Ein Blattquerschnitt, der mit Hilfe von Dunkelfeldmikroskopie aufgenommen wurde. Was oben rechts zu sehen ist, weiß nicht einmal der Fotograf.

r Galaktisch: Ein Nebel mit Schaumstruktur im Sternzeichen Krebs – Kinderstube für Millionen neue Sterne. Rechts oben der Mond.

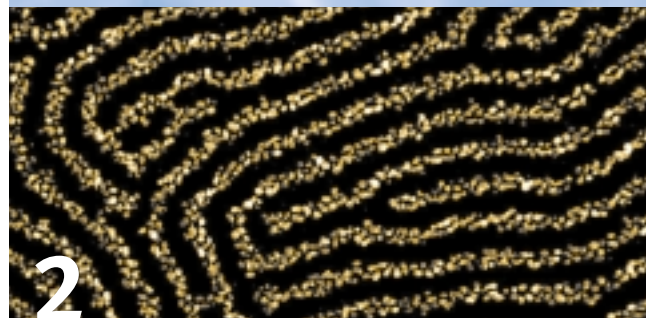


6

a Herbst: Wissenschaftler simulieren im Computer, wie sich die Farbe der Baumblätter im Laufe des Jahres verändert (hier die gemeine Hirtenfeige im September).

h Flower-Power: Wissenschaftler simulieren die Arbeit der pflanzlichen Sonnenkraftwerke im Computer. Rote Blätter leisten ganze Arbeit.

r Kreislaufschwäche: Eine junge japanische Scheinkuize zeigt „Durchblutungsstörungen“. In roten Blättern fließt zu wenig, in blauen zuviel Zellsaft (Falschfarbenbild).

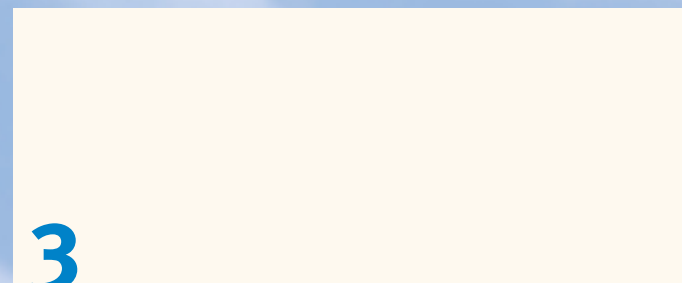


2

a Abwarten: Wissenschaftler dampfen Gold oder Silber auf bestimmte Kunststoffe und gehen Kaffee trinken. Unterdessen bilden sich winzige Metall-Ketten.

h In sich gehen: Nano-Technologen schaffen es, Zengärten anzulegen, in denen man nur unter dem Mikroskop meditieren kann.

r Erkennungsdienstlich behandeln: Bei dünnen Silberschichten kann man unter dem Mikroskop nach Elektronenbeschuss den atomaren Fingerabdruck des Metalls bestaunen.

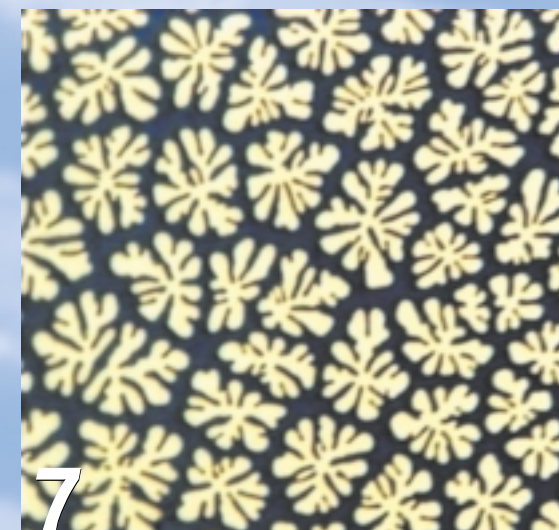


3

a Farbe des Universums: eindeutig ein helles Beige. Noch Anfang 2002 waren Astronomen von einem Türkis mit Grünstich ausgegangen.

h „LatteCool“: für die meisten Menschen die beruhigendste Farbe. Sagen amerikanische Psychologen. Und empfehlen, Gebäude flächendeckend so zu streichen.

r Hollywood: Bei professionellen DigiCams dient diese Farbe zum „Weißabgleich“. Das eicht die Kamera und ermöglicht die digitale Herstellung von Kinofilmen.



7

a Runde Kristalle: Beim Schockfrostern unter -250 °C bildet Wasser keine spitzen Kristalle, weil das System der Atome dafür gar keine Zeit mehr hat.

h Billiger Lack: Ein Küchenstuhl wurde 12 Stunden dem UV-Licht ausgesetzt. Der Blick durch das Mikroskop zeigt schöne Schäden.

r Aufgeblasen: Wissenschaftler haben in einen hauchdünnen Polymerfilm Luft gepresst.

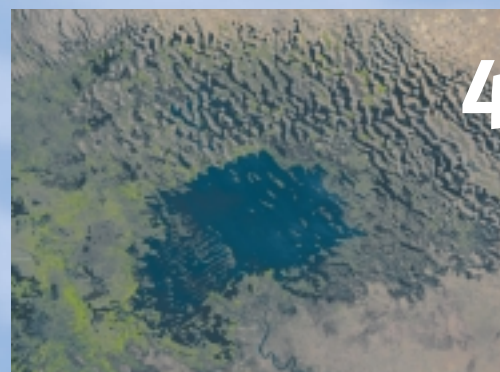


8

a Liebestoll: Diese Langzeitbelichtung zeigt eine Gruppe Glühwürmchen bei der Balz. Rechts unten fand eine Paarung statt.

h Klebrig: High-Tech-Klebstoffe aus der Tube suchen sich auf einer Glasoberfläche von selbst die Stellen, an denen sie am besten haften – Geckos standen Pate.

r Organisiert: Das Leuchten von Gasentladungen in einer Helium-Luft-Atmosphäre erzeugt diese Videokunst – ein Beispiel für Selbstorganisation in der Natur.



4

a Ungefährlich: Ein gutartiger Haut-Tumor leuchtet bei UV-Beleuchtung grün und blau, wenn er zuvor mit geeigneten Markern „geimpft“ wurde.

h Schlimm: Dieses Satellitenbild zeigt, wie der Tschad-See in den vergangenen vierzig Jahren auf ein Zwanzigstel seiner Größe geschrumpft ist.

r Teuer: Schimmelpilze fressen Gemälde alter Meister (hier Dürers „Badende Venus“). Es kommt zur Mikroperforation der Leinwand – der blaue Fleck ist morgen ein Loch.

Intelligente Materialien

Es muss für Charles Edouard Guillaume, den Erfinder, ein Augenblick des Triumphes gewesen sein: Über hundert Meter seiner „Invar“ getauften Legierung hingen als Draht von der zweiten Plattform des Eiffelturms herunter. Das untere Ende des Drahtes war am Erdboden fixiert, das andere Ende auf der Plattform mit einem beweglichen Hebel verbunden, der wiederum einen Schreibstift bewegte, der auf eine Registriertrommel drückte. „Invar“, das Invariable, Unveränderliche, eine Eisenlegierung mit 36% Nickel, sollte seine Besonderheit zeigen: Es verändert seine Länge nicht oder doch kaum, wenn die Temperatur schwankt. Aber der Eiffelturm selber streckte sich am Vormittag des 8. Juni 1912 in der wärmer werdenden Luft, millimeterweise schob sich die zweite Plattform nach oben. Mit dem Invardraht als unveränderlicher Referenz ließ sich das Ganze genau registrieren. Am späten Nachmittag sackt der gesamte Turm, von einem Regenschauer abgekühlt, um fast vier Zentimeter zusammen.

Invar machte als Ersatz für das teure Platin-Iridium bei „Ur-Metern“ Karriere, als Material für Unruhefedern in Chronometern – überall da, wo eine geringe thermische Ausdehnung gefragt war. Invar ist in der Technik von heute weit verbreitet, zum Beispiel auch in „Schattenmasken“ von TV-Bildröhren. Guillaume erhielt 1920 für seine Entdeckung den Nobelpreis.

Temperamentvolles Nickel-Titan

Zwanzig Jahre später gelang dem Schweden Arne Olander eine metallurgisch gleichermaßen gewichtige Ent-

deckung: Eine Legierung aus Gold und Cadmium zeigte so etwas wie ein Gedächtnis. Wenn man sie verformte und anschließend erwärmte, sprang sie in die alte Form zurück. Cadmium ist giftig, Gold teuer – die Legierung hatte keine Zukunft.

Wohl aber der Effekt. 1962 suchte das US Naval Ordnance Laboratory nach einer Legierung, die korrosivem Meerwasser trotzen konnte und magnetisch schwer zu orten war, fand eine Mischung aus Nickel und Titan und nannte sie Nitinol. Das „-ni“ stand für das Naval Ordnance Laboratory, das „-ti“ für Nickel und Titan. Als man Platten dieses Materials an den Bug eines Unterseebootes nietete, soll es passiert sein: Ein Arbeiter machte, wie bei Stahl üblich, eine Platte heiß, um sie formbarer zu machen – das Teil sprang, die Niete lädierend, in eine andere Form um, die Form seiner Geburt: Nitinol war als Metall mit Gedächtnis entdeckt.



▲ Charles Edouard Guillaume beim Vermessen einer Kopie des „Ur-Meters“. Solche Eichstandards aus Invar-Stahl veränderten ihre Länge bei Temperaturänderungen kaum. (Foto: Transglobe Agency/Roger-Viollet)

▼ Das Innere eines Tankschiffes, das vollständig mit Invar-Stahl ausgekleidet wurde. (Foto: IMPHY UGINE Précision)

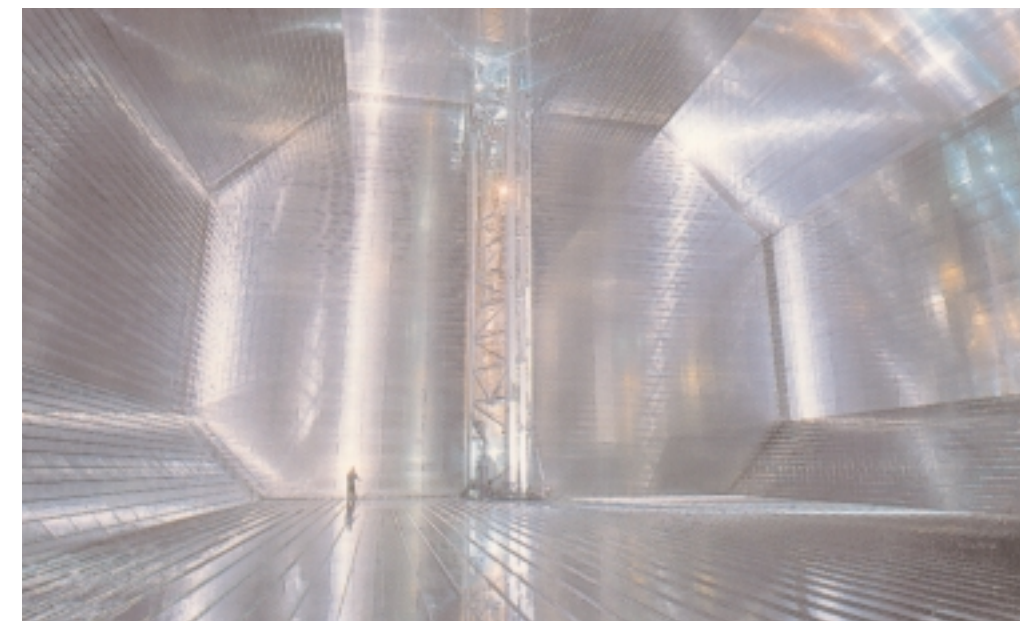


Foto: Photocase.de

Später wurden viele andere Metallkombinationen mit dem gleichen Effekt bekannt; Nickel-Titan aber ist, neben Kupfer-Zink-Aluminium, immer noch die wichtigste Legierung. Die NASA entwickelte aus solch einem „Memory-Metall“ ein Drahtgeflecht, das sich im Weltraum zu einer Satellitenschüssel entfaltete; an vielen Universitäten und Firmen wurden kleine Wärmekraftmaschinen entwickelt, in denen sich Nitinol rhythmisch streckt und staucht. Heute ist Nitinol ganz am Boden angekommen, etwa in der Gestalt von Sprinkler-Ventilen, die im Brandfall Wasser lassen. Womöglich werden Memory-Metalle aber auch richtig futuristisch abheben, als metallische Muskeln für Roboter zum Beispiel.

Materie mit zwei Gesichtern

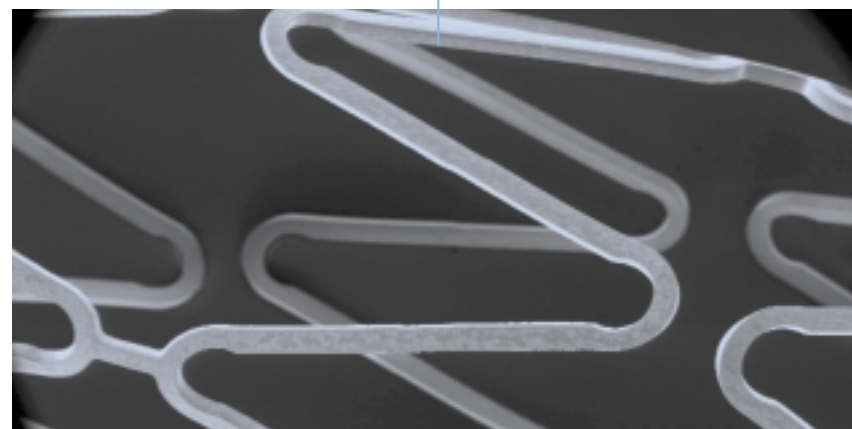
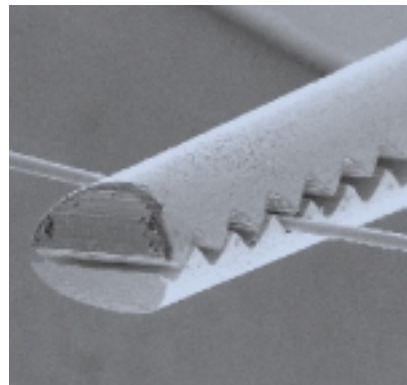
Das Wunderbare an den Nickel-Titan-Legierungen ist damit noch nicht ausgeschöpft, die richtige Mixtur ist auch

▼► Nitinol lässt sich vielfältig anwenden: Mikro-Pinzetten aus diesem Material (rechts) üben immer den gleichen Druck aus, egal, wie kräftig man auf die Enden drückt. So lassen sich biologische Objekte (hier ein menschliches Haar) „mit sanfter Hand“ untersuchen. Die gleiche Eigenschaft ist auch nützlich, um Gefäße im menschlichen Körper mit Hilfe kleinster Röhrchen zu erweitern (unten). (Foto: A. E. Guber et al., Zeitschrift F&M 1997)

► Hier ist die „martensitische“ Struktur (hellgrüne Nadeln) einer Verbindung aus Eisen, Nickel und Kupfer gleichzeitig mit der „austenitischen“ Form (dunkelgelbe Flächen) zu sehen. (Foto: E. Hornbogen, Uni Bochum)

noch phantastisch elastisch. Eine bleistiftdicke Stange lässt sich biegen wie Hartgummi und kehrt danach in die alte Form zurück. Der Effekt wird unter anderem für hoch strapazierfähige Brillengestelle genutzt, aber auch für Zahnklammern und hochelastische Röhrchen zur Aufweitung verengter Gefäße.

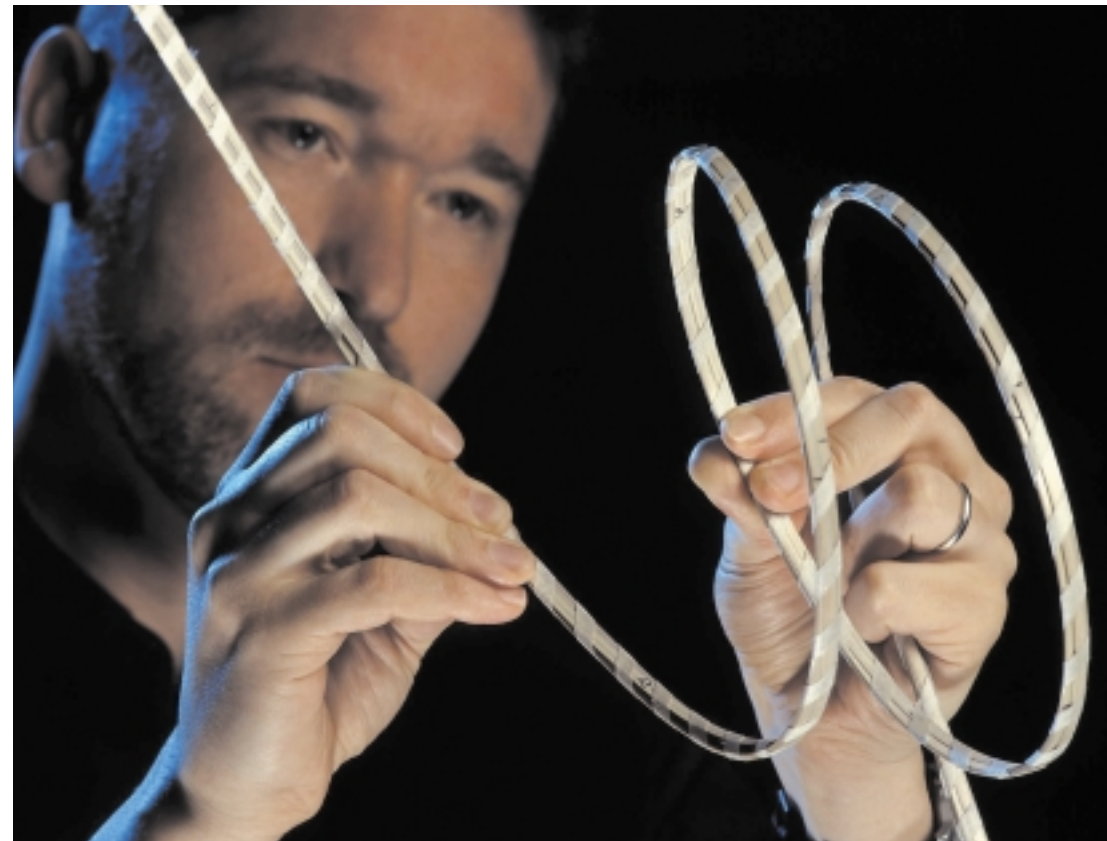
Der Grund für die wunderbare Wandelbarkeit solcher Legierungen: Ihre Atomgitter können zwei verschiedene Formen annehmen. Bei niedrigen Temperaturen eine so genannte martensitische Struktur, die sich durch ein Zickzack-Muster auszeichnet. Bei Erwärmung geht dieses Gitter in eine andere,



„austenitische“ Form über. Je nach Temperatur kann das Metall zwischen den beiden Zuständen hin und her springen – Knick, Knack, ähnlich wie ein eingedrückter Schuhcremedosendeckel.

Widerstand ist zwecklos

So beeindruckend die Eigenschaften rein metallischer Verbindungen auch



sind, erst zusammen mit Nichtmetallen erschließt sich die Belegung des Werkstoff-Universums. Wenn sich gewöhnliches Aluminium mit Sauerstoff verbindet, entsteht die nach Diamant härteste bekannte Substanz, Aluminiumoxid, das – von Spuren anderer Metalle gefärbt – auch als Rubin oder Saphir geschätzt wird.

Eine komplexe Verbindung der Metalle Yttrium, Barium und Kupfer mit Sauerstoff, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, hat gar als erster „Hochtemperatur-Supraleiter“ Ruhm erwerben können. Dieses Material verliert schon bei der Temperatur von flüssigem Stickstoff seinen elektrischen Widerstand – bei minus 196 °C. Ein für uns eher frostiger Wert, aber gerade-

▼ Ein Kabel lässt sich biegen. Eigentlich selbstverständlich – allerdings nicht für die überwiegend spröden Hochtemperatur-Supraleiter. Erst Verbindungen aus Bismut, Strontium, Calcium und Kupfer mit Sauerstoff brachten die erhoffte Geschmeidigkeit. (Foto: Siemens)

zu tropisch gegenüber den Temperaturen, unterhalb denen normale Supraleiter den Strom erst verlustfrei leiten: wenige Grade über dem absoluten Temperaturnullpunkt von minus 273 °C.

Was ist bei den Hochtemperatur-Supraleitern anders? Die Regeln der Quantenmechanik gestatten den Elektronen die ungestörte Bewegung in einem Supraleiter nur, wenn sie jeweils zu zweit auftreten, in so genannten Cooper-Paaren. Da sich die gleichsinnig geladenen Elektronen gegenseitig abstoßen, muss eine Kraft zu Hilfe kommen, die das Paar zusammenhält. Bei konventionellen Supraleitern wird diese Kraft von gemeinsamen Schwingungen der Atomkerne bereit gestellt.

► Diese speziellen Brennstoffzellen brauchen eine besonders hohe Betriebstemperatur von ca. 800 °C, die von einem Heizofen bereitgestellt wird. (Foto: Forschungszentrum Jülich)

Deshalb klappt das Ganze auch nur bei extremen Minusgraden – wenn das temperaturbedingte Zittern des Atomgitters diesen Mechanismus nicht mehr stört. Die Hochtemperatur-Supraleiter aber funktionieren offenbar nach einem ganz anderen Mechanismus. Jüngste Experimente legen den Schluss nahe,



Sanfte Verbrennung

**Hast du Geld,
dann hast du nicht Käten;
hast du die Frau,
dann fehl'n dir Moneten –
hast du die Geisha,
dann stört dich der Fächer:
bald fehlt uns der Wein,
bald fehlt uns der Becher ...**

Dass einer alles habe, klagte Tucholsky noch, sei selten. Manchmal aber gibt es Entwicklungen, an denen alles stimmt, wie bei den Brennstoffzellen. In Brennstoffzellen vereinen sich Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser, wobei Elektronen vom Wasserstoff zum Sauerstoff übergehen. Aus der Schule ist diese Reaktion als „Knallgasexplosion“ bekannt, bei der sich die frei werdende Energie mit einem gewaltigen Rummus entlädt. In der Brennstoffzelle lässt eine spezielle Membran

Sauerstoff und Wasserstoff nur gemächlich miteinander reagieren. Zugleich werden die auszutauschenden Elektronen in einen äußeren Kreislauf gelenkt, wo sie als elektrischer Strom sinnvolle Arbeit verrichten. Und das ganz ohne die für Explosionsmotoren üblichen Begleiterscheinungen wie Lärm und Gestank oder, bei Batterien, schwache Kapazitäten und langwieriges Aufladen. Für den schnell wachsenden Markt der mobilen Kleinverbraucher wie Kameras, Laptops, aber auch Rasenmäher oder Elektrofahräder darf die Einführung der Brennstoffzelle als gewiss gelten, dann aber ist das Hochskalieren auf die automobilen Bedürfnisse auch nur eine Frage der Zeit. Der große Vorteil von Brennstoffzellen ist nämlich, dass sie im großen wie im kleinen Maßstab ähnlich effizient sind.



▲ „Hochtemperatur“-Supraleiter verlieren bereits bei der Temperatur von flüssigem Stickstoff (-196°C) ihren elektrischen Widerstand. (Foto: Forschungszentrum Jülich)

Dünne Schichten für dicke Festplatten

Während Computerchips alle 18 Monate ihre Rechenleistung verdoppeln, verdoppeln moderne Festplatten ihre Speicherkapazität alle 12 Monate. „Schuld“ ist ein Effekt, der am Forschungszentrum Jülich im Rahmen von Grundlagen-Forschungen entdeckt wurde – der „Riesen-Magnetowiderstandseffekt“. Dabei ändert sich der elektrische Widerstand eines Pakets von hauchdünnen Metallschichten bei der Anwesenheit schon sehr schwacher magnetischer Felder. Der Grund: die Elektronen tragen nicht nur die elektrische Ladung, sondern besitzen auch elementare magnetische Eigenschaften. Ein magnetisches Feld kann so die Beweglichkeit der Elektronen im Material beeinflussen und damit auch seinen elektrischen Widerstand. Weil die mögliche Dichte der magnetischen Informationen auf einer Festplatte (quasi die „Schriftgröße“) von der Empfindlichkeit abhängt, mit der der Lesekopf Änderungen der magnetischen Feldstärke wahrnehmen kann, sollten die mit dem „Riesen-Magnetowiderstandseffekt“ ausgestatteten Köpfe bald schon Speicherdichten von 16 Gigabit pro Quadratzentimeter und darüber möglich machen. Das ist ungefähr die hundertfache Speicherdichte einer CD.



▲ Supraleitende Schwebbahn. Die Lok wird auf einer bestimmten Höhe gehalten und der darin befindliche Supraleiter mit flüssigem Stickstoff heruntergekühlt. Er „krallt“ sich dann am Magnetfeld der magnetischen Schienen fest und die Lok schwebt. (Foto: E. F. Wassermann, Uni Duisburg)

dass die Cooperpaare hier von einem beweglichen Muster kleiner Magnetfelder gestützt werden, die im Inneren des Materials entstehen. Wenn das stimmt, sollte die zugrunde liegende Theorie zu Materialien führen können, die bei noch höheren Temperaturen supraleitend werden.

Ein weiterer Effekt der Hochtemperatur-Supraleiter: sie lassen im supraleitenden Zustand ein Magnetfeld gerne in sich eindringen. Dabei wird das magnetische Feld zu kleinen Bündeln geschnürt, so genannten Flussschläuchen, die das Material durchdringen. Da sich der Supraleiter an diesen Schläuchen „festkrallen“ kann, lassen sich auf diese Weise reibungsfreie [magnetische Lager](#) herstellen. Derzeit

wird hierfür wieder der Hochtemperatur-Supraleiter Yttrium-Barium-Kupferoxid ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) favorisiert.

Die eiskalten Torhüter

Schließlich sind mit den neuen Supraleitern auch hochempfindliche „SQUIDS“ möglich geworden, mit denen man noch Magnetfelder messen kann, die nur ein Milliardstel der Stärke des Erdmagnetfeldes betragen. Die Abkürzung steht für „Superconducting Quantum Interference Device“. Die Geräte enthalten einen supraleitenden Ring mit einer dünnen Stelle, einem „Tor“, durch das das äußere magnetische Feld in kleinen Portionen („Flussquanten“) eingelassen werden kann. Zu Beginn der

▼ Ein SQUID im Geländeeinsatz. Geoforscher untersuchen mit diesen empfindlichen Geräten feinste Variationen des Erdmagnetfelds. (Foto: Forschungszentrum Jülich)



► Eingefrorenes Spiegelbild: Mit ungefählichen Laserstrahlen ist das Gesicht der jungen Frau abgetastet worden. Ein Computer hat mit diesen Daten dann den Laserstrahl gesteuert, der ihr Konterfei schließlich ins Glas brannte. (Foto: Vitro Laser)



Kunst im Glas

Wenn Materialien nicht nur intelligent, sondern auch noch schön sein sollen, kann Laserlicht helfen, Verzierungen wie Gravuren einzubrennen. Eine besonders raffinierte Form der Verzierung ist die Innengravur, bei der optisch klare Medien wie Kunststoffe oder Glas mit Laserlicht innen strukturiert werden, ohne dass äußerliche Spuren erkennbar wären. Das gelingt mit einem an der Außenseite des zu verzierenden Körpers nur schwach fokussierten Laserstrahl, der sich im Inneren des Glas- oder Kunststoffkörpers so weit verdichtet, dass Licht absorbiert wird und das Material verändert. Bei Glas sind es Mikrorisse, die das Licht streuen. Für ein Ensemble von mehreren 10.000 Punkten, die schon eine ordentliche Form ausmachen, brauchen Gravurgeräte eine 3D-CAD-Datei und wenige Minuten.

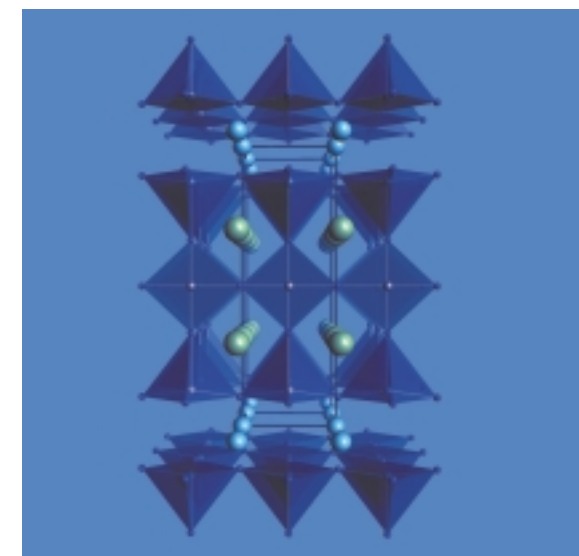
◀ Ein SQUID prüft den Zustand einer Flugzeugfelge. Kleinste Risse verraten sich hier durch Mini-Magnetfelder, die an solchen Stellen im Material entstehen. (Foto: Forschungszentrum Jülich)



durch elektronische Schaltkreise, die an den Ring gekoppelt werden, feststellen. Dann wiederholt sich der Effekt: Tor auf – Tor zu, bis die Zahl der Quanten draußen und drinnen gleich ist. Durch Zählen der „Türöffnungen“ kann so die Stärke des Magnetfeldes bestimmt werden. Eingesetzt werden SQUIDS unter anderem in der [Geophysik](#), in der Materialprüfung und in der Medizin. Dort untersuchen die Ärzte die Magnetfelder, die in Hirn und Herz des Patienten entstehen.

Messung drängeln sich viele Quanten vor dem Tor. Ist der „Druck“ groß genug, öffnet sich das Tor – aber nur, um genau ein Quant hinein zu lassen. Für kurze Zeit bricht dabei der Suprastrom im Ring zusammen. Das kann man

► Struktur des Hochtemperatur-Supraleiters Yttrium-Barium-Kupferoxid. In den Ebenen, in denen die Kupfer-Atome liegen (blaue Kugeln oben und unten), gleiten die Elektronenpaare bei eisiger Kälte reibungsfrei dahin. (Foto: G. Roth, RWTH Aachen)





◀ *Natur und Technik: Während sich oben ein Kartoffelkäfer-Fühler in die Luft reckt, überwacht unten ein elektronischer Wärmesensor die Gartemperatur einer Artischocke. (Fotos: S. Schütz, Uni Gießen [oben], Siemens [unten])*

Für die Erkundung des Unbekannten standen den Gelehrten lange Zeit nur die natürlichen Sinne zur Verfügung, von denen Aristoteles meinte, es seien fünf: Tasten, Schmecken, Riechen, Hören, Sehen – fünf „Fenster der Seele“. Heute zählt man auch die Fähigkeit dazu, feine Temperaturunterschiede erfühlen zu können, außerdem den Gleichgewichtssinn, die kinetischen Sinne, die den Schlagarm eines Tennisspielers feinsteuern und anderes mehr.

Manche Tiere sind darüber hinaus mit elektrischen Sinnen gesegnet, so der Elefantenrüsselfisch, der an seinem

Der lange umstrittene magnetische Sinn etwa von Zugvögeln hat in letzter Zeit wieder die wohlwollende Aufmerksamkeit der Wissenschaftler gefunden: natürliche Ketten von Magnetitkriställchen, die als eine Art Kompassnadel dienen könnten, werden mit Hilfe von SQUIDS bei [Tauben](#), [aber auch Bienen](#) und [Forellen](#) sicher nachgewiesen.

Aufbruch zu neuen Sinnen

Galileo Galilei (1564-1642) war einer der ersten, der den natürlichen Sinnen des Menschen gezielt unter die Arme griff: er entwickelte Uhren, Mikros-



▲ *Galileo Galilei, einer der größten Forscher und Erfinder der Geschichte. (Foto: AKG, Berlin)*

▼ *Tauben, Bienen und Forellen haben eins gemeinsam: alle werden vermutlich durch einen eingebauten „Kompass“ zu ihren Jagdgründen geleitet. (Fotos: links & Mitte: The Interia Stock Exchange, rechts: Stenzel-Flyfishing)*

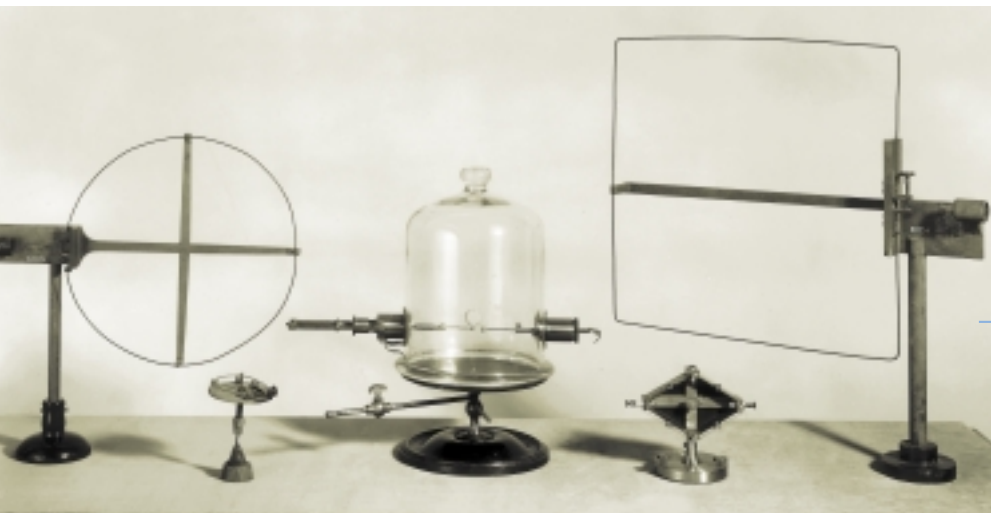


Schwanz einen niederfrequenten Sender trägt, dessen Pulsationen er mit dem Kopf empfängt. Der Fisch wertet feinste Störungen des Feldes aus und kann so in völliger Dunkelheit Mückenlarven und mehr aufspüren.

kope und Fernrohre. Durch letztere sah er die Krater des Mondes, die Phasen der Venus und die Monde des Jupiter. Die moderne Naturwissenschaft war geboren und fing an, die ganze Größe des sinnlich Erfassbaren auszuloten.

▼ *Der Elefantenrüsselfisch auf der Pirsch. Mit Hilfe eines schwanzseitig erzeugten elektrischen Feldes detektiert er zum Beispiel Mückenlarven. (Foto: G. von der Emde, Uni Bonn)*





▲ Antennen aus Draht, Strommesser und ein Funkenapparat (unter der Glasglocke) gehörten zur Ausstattung des Experimentiertisches von Heinrich Hertz. (Foto: Deutsches Museum)

Als Ampère (1775-1836), Faraday (1791-1867) und andere mit Spulen und Eisenspänen die Welt des Elektromagnetismus erkundet hatten, James Clark

Maxwell (1831-1879) ein geniales mathematisches Schema dazu ersonnen, Heinrich Hertz (1857-1894) die Gleichungen in eine einsichtige Form ge-

bracht und, darauf gründend, zwischen 1885 und 1889 die elektromagnetischen Wellen entdeckt hatte, kam die Moderne in Fahrt. Im Deutschen Museum in München sind die aus heutiger Sicht sehr **einfachen Sachen** zu sehen – Spulen, Gitter und Drahtrahmen – die Hertz zur Verfügung hatte. Wer mit einem Handy davor steht, ahnt, dass eine Million Menschenjahre Entwicklungsarbeit zwischen dem Funktelefon und den ausgestellten Gegenständen liegen mögen. Neben den neuen Kommunikationsmöglichkeiten via Radio brachte die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen den Wissenschaftlern auch viele neue Sinne.

Ein ganz besonders feiner elektromagnetischer Sinn steckte in dem großen hölzernen Staatswappen – Adler mit

Schnüffeln, riechen, wittern, schmecken

Bei dem Blick auf die „Welt hinter den Dingen“ darf einer nicht fehlen: Peter Lustig. Rund um seinen Bauwagen erforscht er die Phänomene aus Natur, Umwelt und Technik.

Hier ist der Löwenzahn-Moderator Gerüchen auf der Spur und fragt sich, wie unsere Nase funktioniert.

Schon **römische Naturforscher** haben sich Gedanken über die Nase gemacht. Sie glaubten, dass Gerüche so ähnlich wie Schlüssel funktionieren: Sobald ein Duft in die Nasenlöcher strömt, schließt er eine Art Schloss auf. Je nach Form des Schlüssels riechen wir den Geruch dann gern oder ungern.

Damit lagen die Römer gar nicht so falsch. Heute wissen wir, dass sich in

der Nase eine **Schleimhaut** befindet, in der winzige Härchen wachsen – 300 Mal so viele wie auf dem Kopf. Wenn Duftstoffe zu diesen Härchen gelangen, dann schicken die zugehörigen Zellen dem Gehirn ein Signal: Hallo! Hier riecht's nach Vanille. Oder nach Fisch.

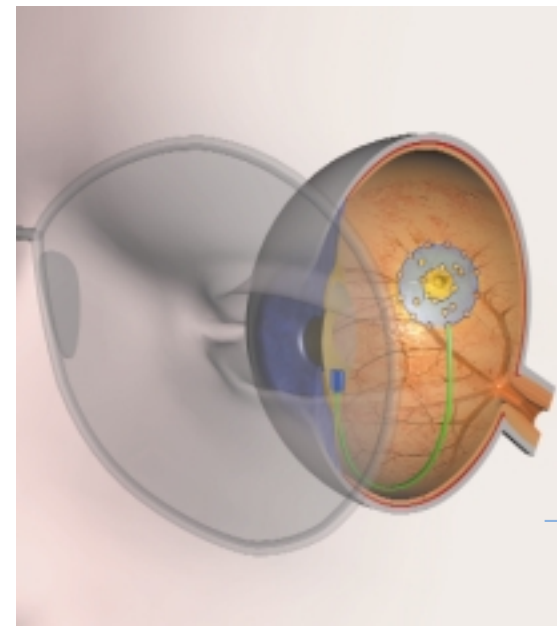
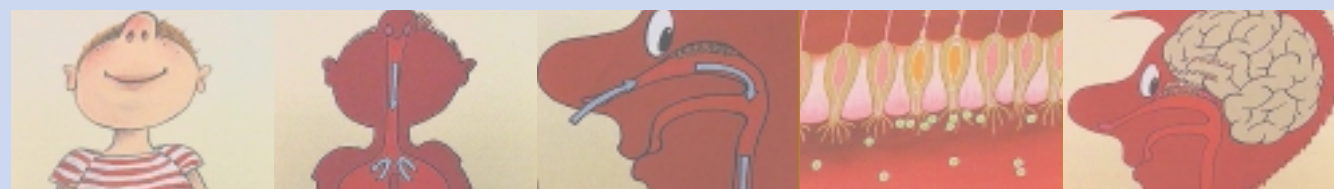
Luft und Duftstoffe gelangen dabei abwechselnd mal durch das linke, mal durch das rechte **Nasenloch** an die Riechhärchen. Biologen vermuten, dass sich das weniger benutzte Nasenloch gerade von Staub und ungesunden Stoffen reinigt.

Geruchs- und Geschmackssinn zählen zu den ältesten Erfindungen der Natur. Sie entstanden in der Urzeit lange vor dem Hören, Tasten oder Sehen. Schon Ur-Bakterien „erschnüffelten“ Futter in



ihrer Umgebung. Und wenn Menschen Parfums benutzen, dann versuchen Sie so, urtümliche Triebe und Gefühle zu beeinflussen.

Unter den Tieren sind **Schmetterlinge** ganz besondere „Riechprofis“: Die „Antennen-Nase“ eines männlichen Schmetterlings kann den Duft der Weibchen über Kilometer hinweg erkennen.



▲ Das Retina-Implantat. Eine Minikamera in der Brille (hier nicht eingezeichnet) sendet ihre Signale an Elektroden in der Netzhaut des Auges. Diese wird gereizt und leitet die Bildinformationen an das Gehirn weiter. (Foto: Intelligent Implants)

Pfeilen und Zweig – das die Sowjets in den 1940er Jahren dem damaligen amerikanischen Botschafter Averell Harriman in Moskau zum Geschenk machten. Harriman hängte das Wappen mal hierhin, mal dorthin, mal über seinen Schreibtisch, sehr zur Freude des KGB, denn das **Wappen** enthielt einen „Mikrowellen-Transponder“, der die Gespräche Harrimans nach außen trug. Das Ding war mit den üblichen Mitteln nicht zu entdecken und für die damalige Zeit eine technische Meisterleistung. Der Trick: die Wanze hatte keinen eingebauten Sender, sondern

▼ Die Empörung war groß: Im Mai 1960 demonstriert der amerikanische Botschafter in der UN-Vollversammlung die Mikrowellen-Wanze der Sowjets. Versteckt war sie in einer hölzernen Nachbildung des US-Staatswappens – überreicht als Geschenk von russischen Schulkindern. (Foto: NSA)



► Zwei Laserstrahlen laufen in diesen langen Röhren senkrecht aufeinander zu. In der Hütte werden beide miteinander verglichen. Läuft eine Gravitationswelle durch das Gebiet, verändert sie die Strahlen unterschiedlich – und das kann gemessen werden. (Foto: P. Aufmuth, Uni Hannover)

absorbierte von außen eingestrahlte Mikrowellen und setzte sie in eine von den Gesprächen des Botschafters modulierte Frequenz um, die außen dann wieder empfangen werden konnte.

Für Augen und Ohren

Heutige Transponder sind noch viel raffinierter. Ein auf Übertragungsdistanzen von nur wenigen Zentimetern ausgelegtes System steckt in einer der aufwendigsten Neuroprothesen der Gegenwart: Das „**Retina-Implantat**“ soll Menschen, die wegen einer Netzhautdegeneration erblindet sind, einen rudimentären Sehsinn wiedergeben.

Diese Sehhilfe besteht aus einem Brillengestell, das eine Miniaturkamera trägt. Deren elektrische Signale werden von einem lernfähigen Signalprozessor vorverarbeitet, was sonst von Zellschichten in der Netzhaut geleistet wird. Ein Sender im Brillengestell schickt die vorverarbeiteten Signale an einen im Auge befindlichen Empfänger, der den Platz der Linse eingenommen hat. Der Empfänger speist einen Transponder mit diesen Informationen, die von einem Elektroden-Netzwerk schließlich als Reiz an die hierfür empfänglichen Nervenzellen der Netzhaut weiter gegeben werden.



Neue Wellen für neue Sinne

Albert Einstein war sich nie sicher, ob Gravitationswellen existieren, aber seine Allgemeine Relativitätstheorie sagt sie voraus – lichtschnelle Wellen im Raum-Zeit-Geflecht, die von dramatischen Ereignissen zeugen: kollabierende Sterne; Neutronensterne, die eng umeinander kreisen; superschwere Schwarze Löcher. Neutronensternpaare waren es, die einen indirekten Existenzbeweis brachten: Die allmähliche Verlangsamung ihres Umeinanderkreisens ließ sich mit der Abstrahlung von Gravitationswellen erklären, wofür es 1993 den Nobelpreis gab. Die Wellen hinterlassen nicht eben deutliche Spuren. Selbst wenn ihre Quellen in der Milchstraße oder einer Nachbargalaxis liegen, verändern sie – der Theorie zufolge – einen drei Kilometer langen Maßstab um gerade ein Tausendstel des Durchmessers eines Wasserstoffatomkerns, eines Protons.



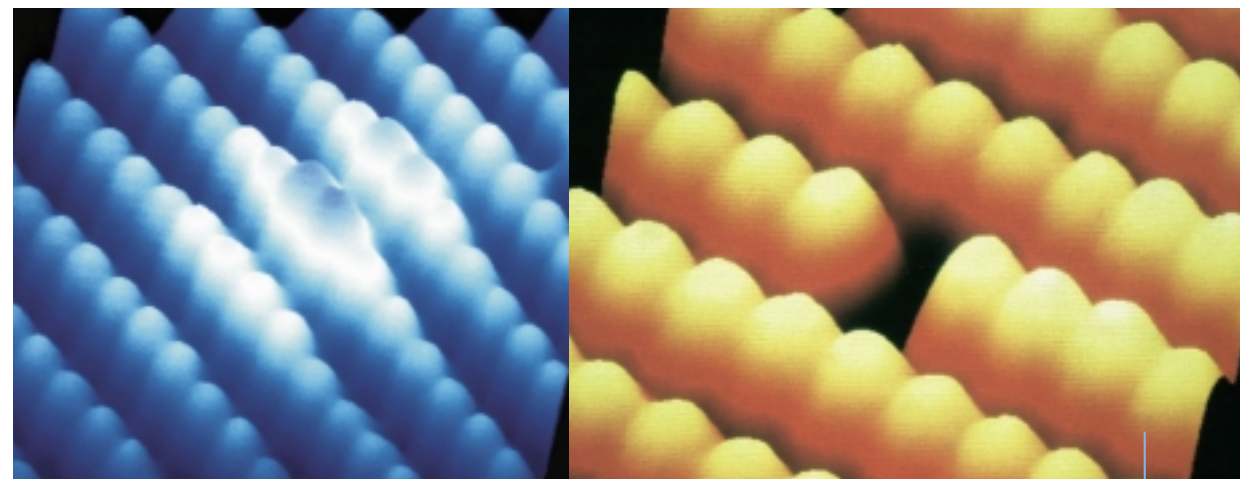
▼ *Flug in die Flammen. Der Kiefernprachtkäfer ortet Waldbrände und fliegt geradewegs auf sie zu. Darum ist er auch ganz schwarz: Auf verkohltem Holz ist der Käfer für Feinde kaum zu erkennen. (Foto: H. Schmitz, Uni Bonn [oben], J. G. Goldammer, GFMC/MPI für Chemie [unten])*



Der Feuerkäfer

Wenn Käfer einen Sinn für das Lächerliche hätten, würden sie den Schwarzen Kiefernprachtkäfer wegen seiner Flughaltung aufziehen: Er spreizt im Flug seine mittleren Beine ab. Die Käferkameraden täten ihm Unrecht, *Melanophila acuminata* nämlich gibt so die Sicht für phantastische Organe an seinen Körperseiten frei, mit denen er Waldbrände orten kann – die Infrarot-Detektoren. Der Käfer verfügt mit seinen Antennen außerdem über einen so empfindlichen Rauchdetektor, dass er sogar die Art der brennenden Bäume erkennen kann, und das über Kilometer hinweg. Diese Fähigkeiten sind für Kiefernprachtkäferwesen überlebenswichtig, denn die Tiere legen ihre Eier auf Hölzer, die durch Brände geschwächt und von Käferparasiten befreit worden sind.

► *In Reih’ und Glied lässt das Rastertunnelmikroskop (RTM) die Atome antreten. Dabei kann es auch Schwänzer und Fremdlinge ausmachen: Während rechts ein Siliziumatom fehlt, hat sich links ein solches unter die Oberfläche eines Galliumarsenid-Kristalls geschummelt. Beides – Fehlstellen und Verunreinigungen – kann zu Fehlern in elektronischen Bauteilen führen. (Fotos: Forschungszentrum Jülich)*



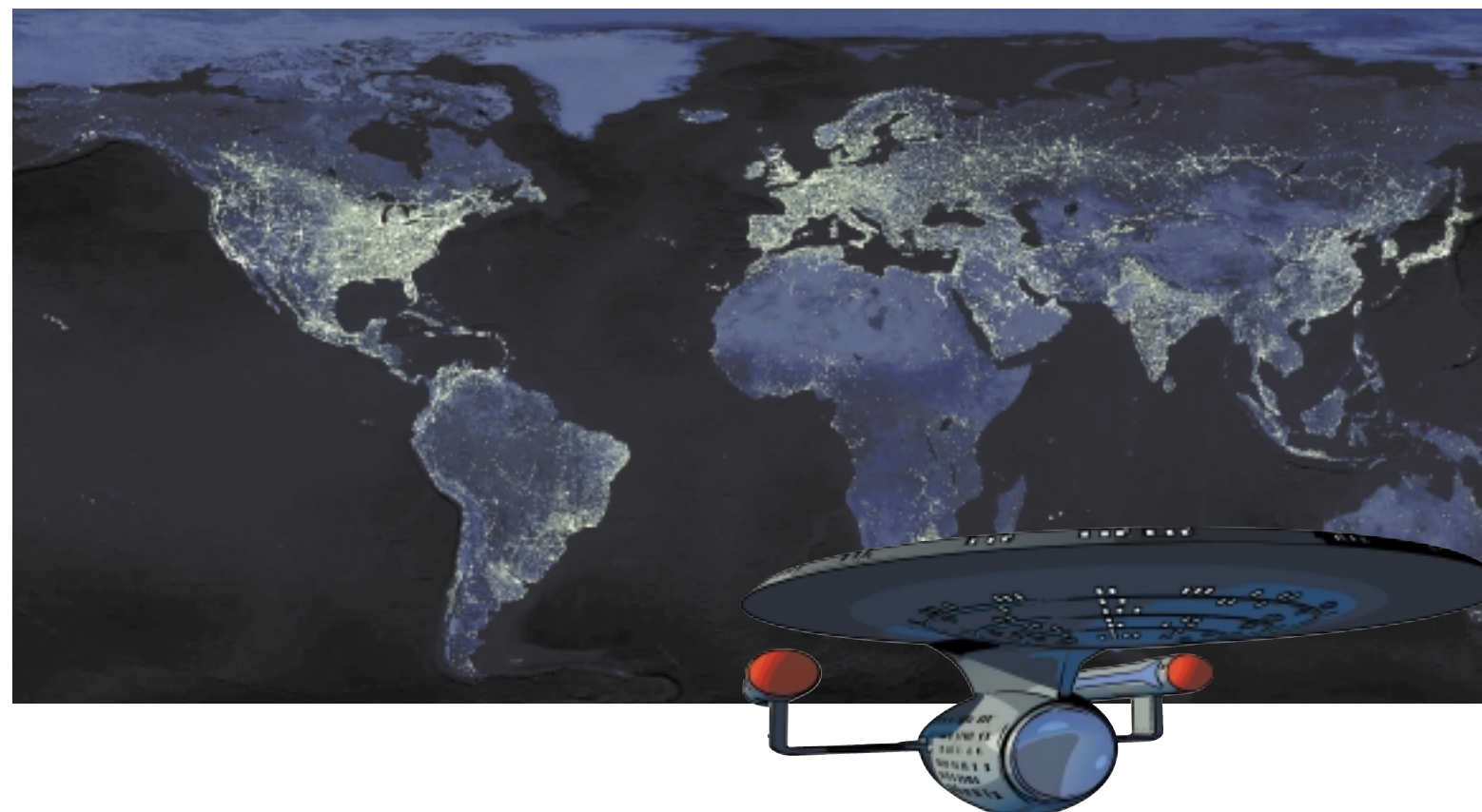
Wie gut das Retina-Implantat schließlich wird, muss derzeit offen bleiben, einfachere Neuroprothesen haben sich aber bewährt, etwa als Cochlea-Implantat, wo der Hörnerv mit vorverarbeiteten akustischen Signalen über Elektroden gereizt wird. Herzschrittmacher, die mit Sensoren die richtige Schrittfrequenz ermitteln, sind mittlerweile Standard.

Feine Antennen

Mitunter macht es Sinn, für die Entdeckung von Stoffen die in Jahrmillionen Jahren optimierten Chemorezeptoren der belebten Welt anzuzapfen. Hundenasen sind immer noch die besten Schnüffelinstrumente, wenn es um Sprengstoff oder Rauschgift geht, wenngleich technische Spürnasen allmählich aufholen. Ein besonders raffiniertes Gerät für die Entdeckung winziger Mengen von Geruchsstoffen ist der „BioFET“: An einen Feldeffekttransistor, ein besonders empfindliches Schaltelement, werden Sensoren aus der Natur gekoppelt. Kartoffelkäfer etwa geraten in Aufregung, wenn ihre Antennen Spuren von Z-3-hexen-1-ol empfangen, denn dieser von verletzten Pflanzen abgesonderte Stoff ist für Kartoffelkäfer ein Zeichen, dass etwas Fressbares in der Nähe ist. Die Antenne des Käfers lässt sich mit einem BioFET anzapfen; Forschern in Jülich und Gießen ist es so gelungen, Konzentrationen des „Grünblatt-Duftes“ bis in

Anteilen eines Milliardstels herunter nachzuweisen. Sensoren solcher Empfindlichkeit könnten aus allen Bewohnern Europas den einen interessierenden herauschnüffeln. Wären die Strukturen der Geruchsrezeptoren der Käfer bekannt, ließe sich wahrscheinlich eine vollsynthetische Nase für gefährdete Felder bauen, nach dem Vorbild des [Feuerkäfers](#) auch für Brandherde.

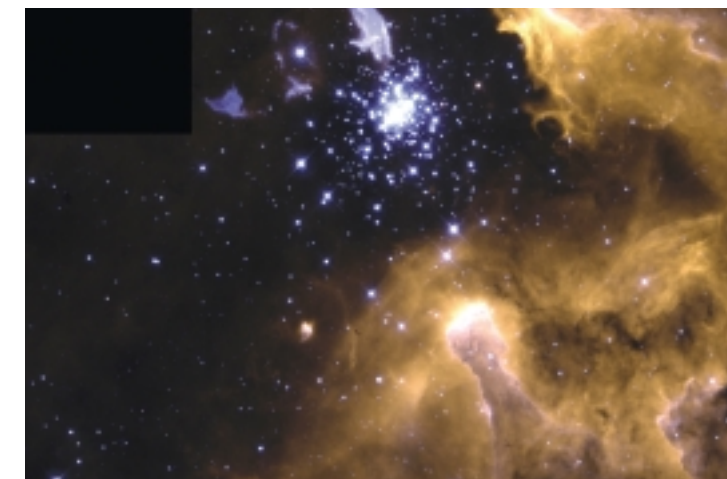
▼ *Die Erde bei Nacht, zusammengesetzt aus vielen verschiedenen Satellitenaufnahmen. (Foto: NASA, Illustration: M. Potocnik)*



Augen für Atome

1981 erschien das erste Mitglied einer heute weitläufigen Mikroskop-Familie, die sich das Prinzip des Abrasterns einer Oberfläche zunutze machen – und die dem Griechen Demokrit, einem der Väter der Lehre von den Atomen, mutmaßlich Tränen der Freude in die Augen getrieben hätten. Beim Rastertunnelmikroskop (RTM) wird eine sehr feine Metallspitze extrem dicht, mit nur einem Atomdurchmesser Abstand, über die Probenoberfläche hin und her geführt. Legt man an beide eine Span-

nung an, fließt ein kleiner Strom von der Probe zur Spitze, den es eigentlich gar nicht geben dürfte, da zwischen ihnen keine leitende Verbindung besteht. Bei so kleinen Dimensionen aber kommt die Quantenphysik ins Spiel, und die lässt die Elektronen diese Lücke quasi durchtunneln – ein „Tunnelstrom“ ist die Folge. Und der hängt extrem empfindlich vom Abstand der Spitze zur untersuchten Oberfläche ab. Durch Messen des Tunnelstroms und gegebenenfalls Nachführen der feinen Spitze kann man so sogar noch [einzelne Atome](#) auflösen.



▲ *Schöne Aussicht: Links oben Sher 25, ein sterbender Stern mit Ring, der zwei blaue „Materie-Jets“ ausstößt. Rechts daneben ein Haufen junger Sterne, ganz rechts Dunkelwolken mit möglichen protoplanetaren Scheiben. (Foto: NASA)*

Spock geht ab

Wenn Spock nicht gerade an den Thackeray-Globulen (s. S. 5) herum-macht, ist er gerne bei Sher. Nicht der Sängerin, die sich ja auch mit einem C schreibt, Sher 25 ist vielmehr ein sterbender Stern, in der Nähe des Milchstraßennebels NGC 3603, und Spock hält sichere Distanz in einem komfortablen Hotel, auf einem günstig gelegenen Wanderplaneten, mit Pool und so.

Was Spock reizt, ist die unglaubliche Aussicht, er sieht Sterne in allen Lebenslagen: Materie-Jets mit Baumaterial für neue Sonnensysteme, Dunkelwolken als Vorstadium der Sternentstehung, kaulquappenartige Gebilde mit Staubschweif, mutmaßlich protoplanetare Scheiben.

Ein ständiges Werden und Vergehen, dachte Spock, mit der Zeitperspektive des Vulcaniers. Aber ohne das ganze Spektakel wäre die Materie nicht zustande gekommen, aus der Terra und seine Bewohner bestehen. Doch das war lange her, die Erde freilich war jetzt noch sehr lebhaft – Vulkane, Erdbeben, Klimaschwankungen vor allem... Bei so vielen Ungewissheiten sollten die Teraner zusehen, dass sie ihr bisschen Intelligenz in trockene Tücher kriegen und heil über die nächsten hunderttausend Jahre bringen. Anstatt sich in fruchtlosen Streitereien zu zerreiben.

Spock ist arrogant. Aber Recht hat er.