Kleine Größen

7 Viel Lärm um Nichts
Wie viele Teilchen hat das Vakuum?

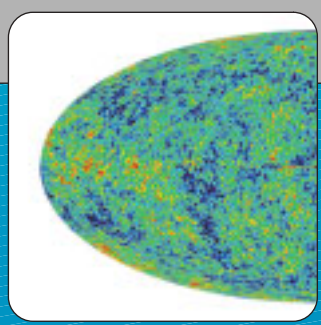
12 Ebenen mit Nanometerhügeln
Krumme Sachen fallen auf

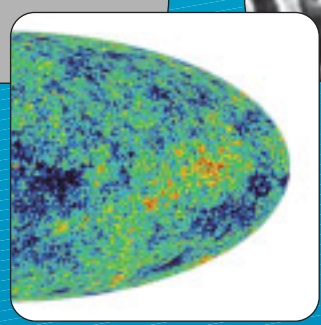
31 Eine Reise
in die Welt des Staubs

44 Atome in der Rasterfahndung
Auf die Spitze getrieben

58 Wie die „Schwere" in die Welt kam
Higgs, bitte melden!

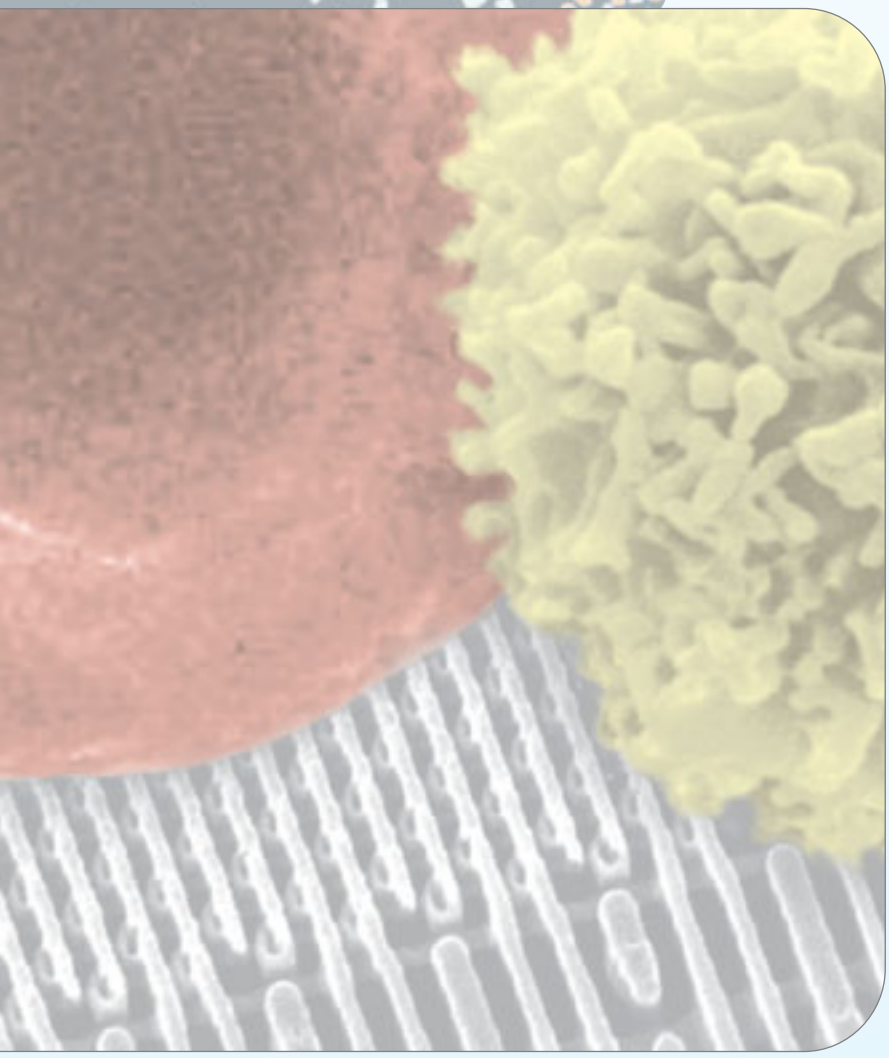
Heft 5: Dezember 2004





maßstäbe

Magazin der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt PTB



Die Jahresempfehlung 2005 von: bild der wissenschaft

Ein Teil dieser *maßstäbe*-Auflage wurde von bild der wissenschaft (bdw) speziell für bdw-Leser reserviert. Die *maßstäbe*-Redakteure freuen sich zusammen mit der PTB über diese Empfehlung und die „Kleinen Größen“ rufen bdw und seinen Lesern ein freundliches „Hallo!“ zu.

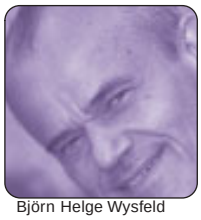
Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

Jens Simon

Erika Schow

Jörn-Uwe Barz


Björn Helge Wysfeld

können Sie ein bisschen näher kommen? Noch ein klein wenig? Ich möchte Sie nämlich eine Kleinigkeit fragen. Und dazu wäre es schon gut, wenn wir unter uns sind. Die Physiker in unserem Haus müssen ja nicht sofort mitbekommen, wenn ich gleich am Anfang schon so unwissenschaftlich rede. Also: Wann war eigentlich bei Ihnen zuletzt ein Zwerg zu Hause? Wie, Sie können sich nicht erinnern? Irgendwann, als Sie selbst ganz klein waren und sich noch vor der Grimmschen Hexe gefürchtet und mit dem Schneewittchen gezittert haben? So lange ist das schon her? Aber ich hoffe doch, dass Sie zumindest noch an Zwerge glauben. Bei uns sind jedenfalls gerade einige zu Gast. Die sind ohne langes Zögern unseren Einladungen gefolgt, die wir auf gut Glück an verschiedenen schwarzen Brettern, insgesamt sieben, ausgehängt haben. Eine Einladung – zugegeben: in sehr großer Schrift – haben wir an den Rand der Milchstraße gestellt; die nächste – da hatten wir es nicht ganz so weit – haben wir an die äußerste Kante der Erdscheibe geheftet; die dritte – das war einfach – haben wir auf unsere Schirmmützen geschrieben; die vierte haben wir einem Urlauber mitgegeben, mit der Bitte, sie irgendwo im Sand zu verbuddeln; die fünfte haben wir unter das Mikroskop eines Bekannten geschoben; die sechste – die Miniaturschrift brachte uns schier zur Verzweiflung – haben wir an Richard Feynman (posthum) geschickt; und schließlich die siebte – also die war nun wirklich ganz, ganz klein – haben wir leider irgendwo in Genf verloren.

Und das haben wir nun davon: 18 Zwerge tummeln sich jetzt in unseren Redaktionsbüros und wollen alle – ich kann Ihnen sagen: ganz schön schwatzhaft, die Kleinen – ihre Geschichte loswerden. Da ist einer, der nur von seinen weiten Reisen im interstellaren Raum erzählt, davon, wie dunkel, kalt und einsam es dort ist. Ein anderer schwärmt immerzu von den Kieseln an den Füßen norwegischer Gletscher und beklagt sich, dass er nun irgendwo in einer Dresdener Fabrik Fließbandarbeit leisten muss. Und hören Sie den einen? Den, der da hinten immer „Nano, Nano!“ schreit? Der behauptet übrigens von sich, dass er der einzig echte Zwerg unter all den anderen hier ist. Aber diese Einbildung entnimmt er wahrscheinlich lediglich seiner altsprachlichen Bildung*, auf die er uns ständig hinweist.

Was wir von all den Zwergen gelernt haben, will ich Ihnen schon einmal vorab verraten: Es ist nicht unbedingt die (Körper-)Länge, die einen Zwerg zum Zwerg macht. Denn neben den „klassischen Längen-Zwergen“ gibt es auch noch die Wärme-Zwerge, die Reibungs-Zwerge, die Massen-Zwerge, die Zeit-Zwerge und und und. Die ganze bunte Schar lassen wir nun auf ihren heimischen Bühnen auftreten und wir verraten dabei einige Insider-Informationen zu all den Zwergen-Maßen. Denn natürlich wollten sich unsere kleinen Gäste, schließlich sind sie ja in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, einmal rundum von Kopf bis Fuß ausmessen lassen.

Im Namen der *maßstäbe*-Redaktion wünsche ich Ihnen eine unterhaltsame Lesereise mit den „Kleinen Größen“ („Nano, Nano!“)

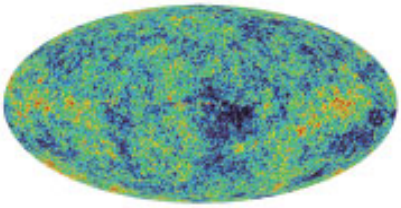
Ihr Jens Simon

* nanos (griech.) = der Zwerg; auch Vorsilbe im Internationalen Einheitensystem SI, um den milliardsten Bruchteil einer Größe anzugeben; etwa Nanometer, Nanosekunde, Nanokelvin. (nano = 10^{-9})

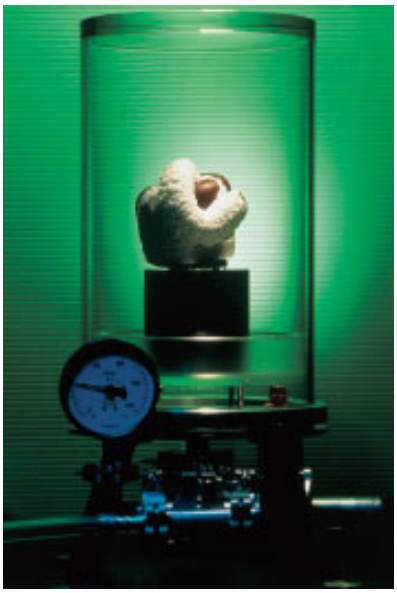
Raumverzeichnis

Vorwort

Weltall

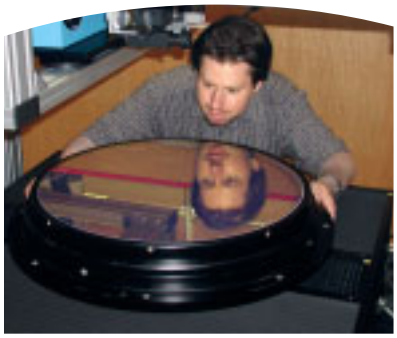


Nachricht aus der Vergangenheit
Letzte Wärmereste vom Urknall



Viel Lärm um Nichts
Wie viele Teilchen hat das Vakuum?

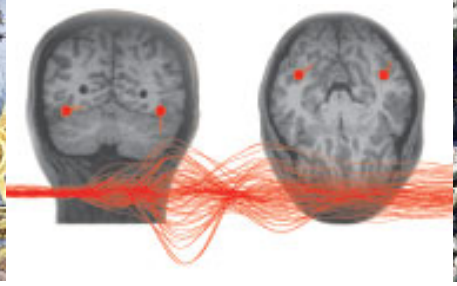
Erde



Ebenen mit Nanometerhügeln
Krumme Sachen fallen auf

Spuren von Hiroshima – Im Untertagelabor der PTB
Ungestörte Strahlungsmessungen tief unten in der Asse

Mensch



Wie man Menschen beim Denken zuschaut
Am magnetisch stillsten Ort der Erde

Der Lotus-Effekt im Badezimmer
Das Geheimnis der doppelten Noppen

Manchmal esse ich mein Würstchen ohne Senf
Die 21 Gramm der Seele

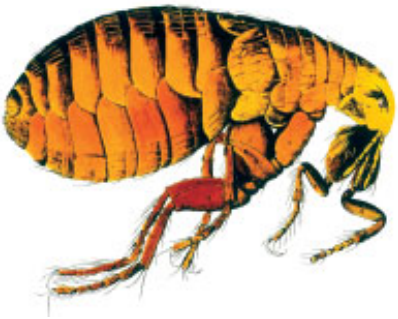
Sa

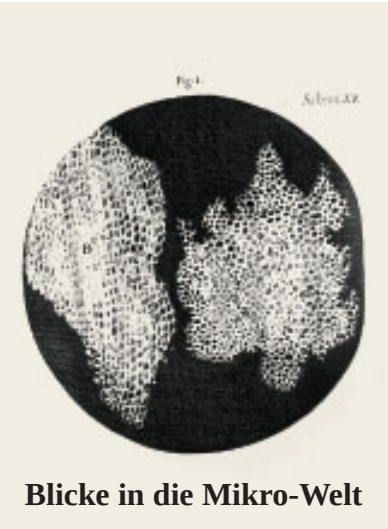
Eine Reise
in die Welt des Staubs

nd

Eine Metropole im Briefmarkenformat
Was man aus Kieseln alles machen kann

Zelle

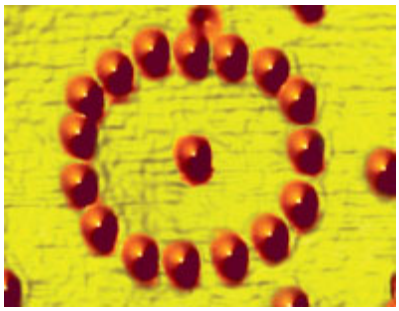




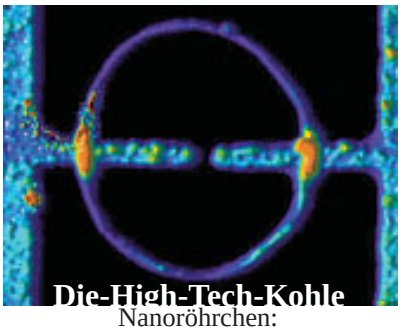
Blicke in die Mikro-Welt
Das Licht austricksen

Die Duft-Detektive
Wer hat die Nase vorn?

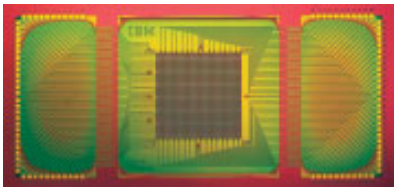
Atom



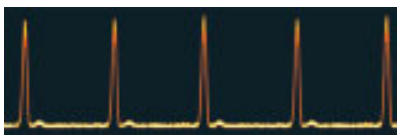
Rasterfahndung Atome in der
Auf die Spitze getrieben



Die-High-Tech-Kohle
Nanoröhrchen: schwarze Multitalente

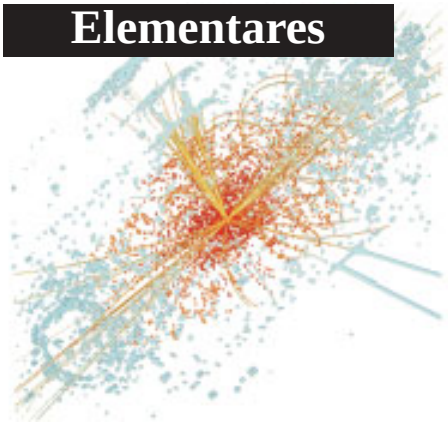


Magnetbits, Holowürfel, Tausendfüßler
Platz für Bits



Die Welt im Femtosekunden-Takt
Ultrakurze Blitze aus dem Laser

Elementares



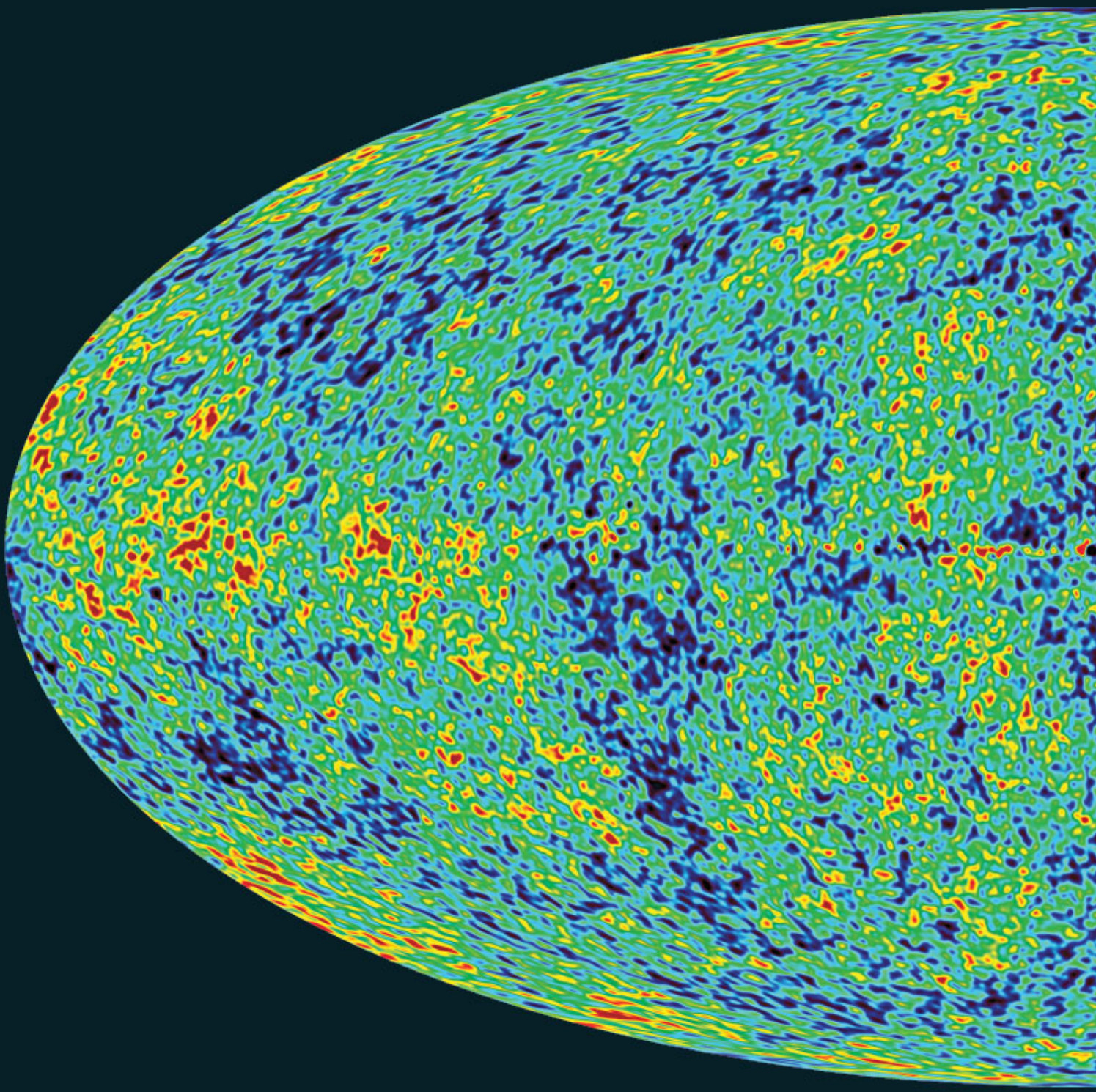
Wie die „Schwere“ in die Welt kam
Higgs, bitte melden!

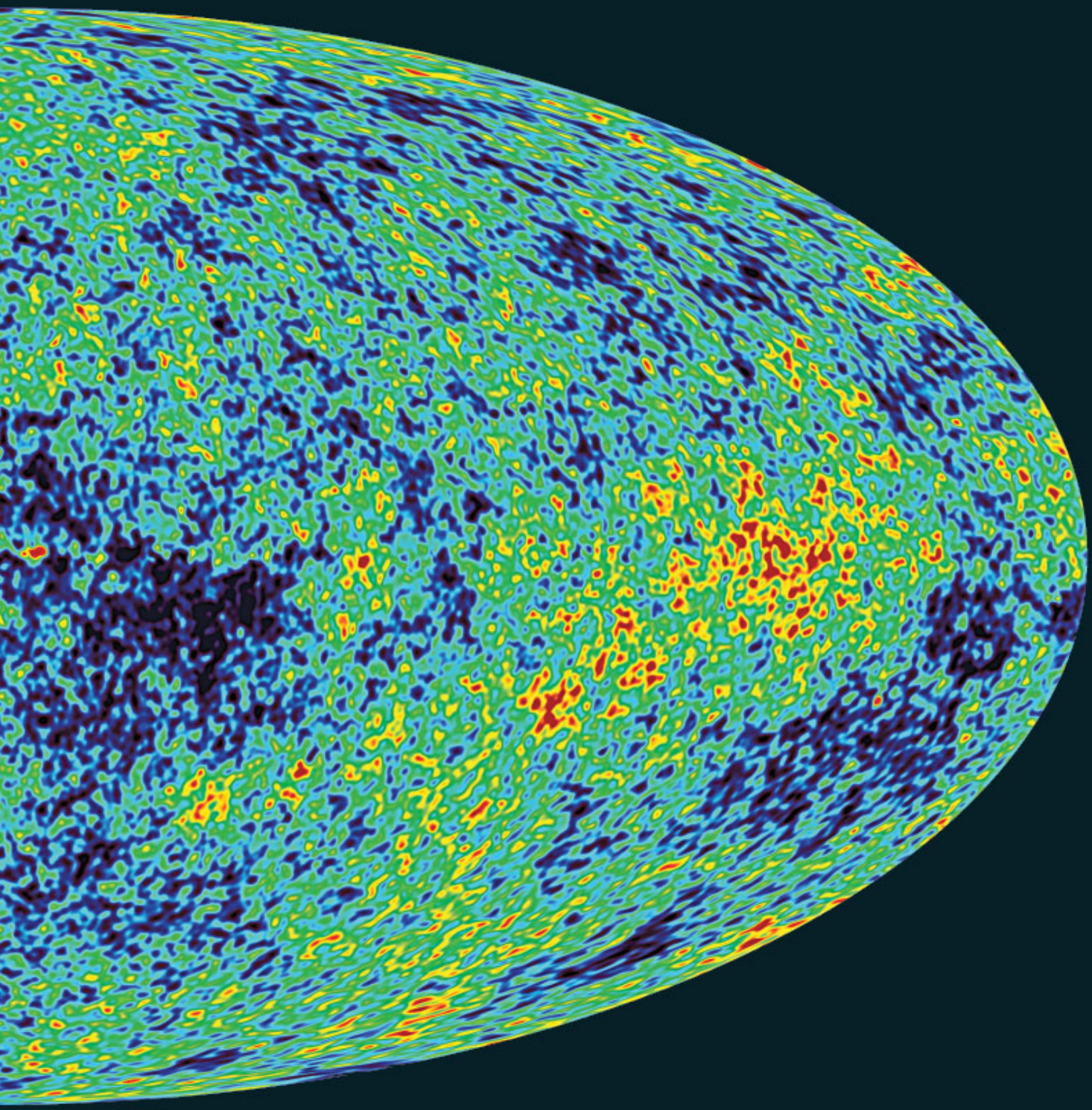
Die Elektronen-Dompteure
Tunneln und Surfen für kleine Tiger

Das Letzte

10^{-5}	10^{-10}	10^{-15}	Meter	
34	42	56	Seiten	64

Weltall





Ein Foto aus der Kinderstube des Universums: Über 13 Milliarden Jahre war das „Mikrowellen-Licht“ unterwegs, bevor die Nasa-Sonde WMAP es auffing und Wissenschaftler daraus diese Temperaturkarte des Weltalls errechneten. Die kurz nach dem Urknall freigesetzte kosmische Hintergrundstrahlung erreicht uns heute aus allen Himmelsrichtungen mit einer Temperatur von 2,73 Kelvin – mit winzigen Abweichungen von dieser Durchschnittstemperatur in der Größenordnung von einem tausendstel Prozent. Die Karte zeigt die Abweichungen als bunte Flecken: „wärmere“ Gebiete sind rot markiert, „kältere“ blau. Das ovale Bild ist eine Projektion der gesamten Himmelssphäre. Das gleiche Projektionsverfahren benutzt man, wenn man die Erdoberfläche auf einer flachen Karte darstellt.

Foto: NASA/WMAP Science Team

Nachricht aus der Vergangenheit

Von der Hitze des Anfangs bleibt manchmal nicht viel übrig. Das gilt auch für unser Universum, in dessen Weiten es kalt und leer ist. Doch nicht ganz! Vom Urknall zeugt noch ein schwaches Glimmen, das heute als kosmische Hintergrundstrahlung das ganze All erfüllt. In dieser Strahlung suchen Wissenschaftler nach den Geheimnissen der Schöpfung.

„Sie haben Post." Leider fehlte dieser Hinweis, als die späteren Nobelpreisträger Arno Penzias und Robert Wilson von den Bell-Laboratorien im Jahr 1963 mit ihrer Mikrowellenantenne ein Rauschen empfingen. So suchten sie zunächst nach der Ursache des vermeintlichen Störsignals – unter anderem vertrieben sie die Tauben, die in der Antenne brüteten. Erst als die beiden Forscher Kontakt zu dem Astronomen Robert Dicke von der Universität Princeton aufnahmen, stellte sich heraus, dass sie die kosmische Hintergrundstrahlung entdeckt hatten. Damit war ihnen nicht weniger gelungen als die Bestätigung der Urknalltheorie.

Aber erst heute wird Kosmologen allmählich klar, welche Brisanz noch in dieser etwa minus 270 Grad Celsius kalten Mikrowellenstrahlung steckt, die das gesamte All erfüllt. Obwohl sie erst 380 000 Jahre nach dem Urknall freigesetzt wurde, trägt sie Spuren der gesamten Entstehungsgeschichte des Universums in sich. Offenbar hat Gott den Ablauf der Schöpfung minutiös aufgezeichnet – nicht etwa für die Ablage, sondern für uns. Wir müssen seine Nachricht jetzt nur noch entziffern.

Im jungen Universum gab es noch keine Atome – denn dazu war es viel zu heiß. Das Universum musste sich erst ausdehnen und abkühlen, bevor Bindungen zwischen den Elementarteilchen möglich wurden. Bis dahin tummelten sich die Bestandteile der Atome – Protonen, Neutronen und Elektronen – in einer heißen „Plasmasuppe". Heiße und energiereiche Photonen inmitten dieser Suppe vereitelten jeden Versuch der Teilchen, sich zu Atomen zu kombinieren. Elektronen, die sich an ein Proton banden, wurden von den Photonen sofort wieder „abgeschossen".

Gleichzeitig wurden die Photonen an den vielen freien Elektronen gestreut. Es gelang ihnen also kaum, eine größere Strecke geradeaus zu fliegen, ohne von einem Elektron zu einer Richtungsänderung gezwungen zu werden. Die Folge: Das Universum war undurchsichtig.

Das änderte sich schlagartig, als 380 000 Jahre nach dem Urknall die kritische Temperatur unterschritten wurde. Die Elektronen bildeten jetzt mit den Protonen und Neutronen Wasserstoff- und Heliumatome. Die Temperatur und damit die Energie der Photonen reichte nicht mehr aus, um die Bindungen der Elektronen aufzubrechen. Weil die Photonen darüber hinaus kaum mit den elektrisch neutralen Atomen wechselwirkten, waren sie nun plötzlich „frei". Sie konnten sich jetzt ungehindert geradeaus bewegen. Die kosmische Hintergrundstrahlung war geboren.

Wenn wir heute in das Weltall sehen – egal, ob mit bloßem Auge oder mit Messinstrumenten, die andere Frequenzen der elektromagnetischen Strahlung als das sichtbare Licht beobachten – sehen wir in der Regel in die Vergangenheit. Die Photonen, die damals nach der Atombildung freigesetzt wurden, waren mehr als 13 Milliarden Jahre zu uns unterwegs. Sie sind das älteste „Licht", das wir beobachten können. Näher können wir dem Urknall nicht kommen – eben, weil das Universum die ersten 380 000 Jahre undurchsichtig war.

Umso erstaunlicher ist es, welche Fülle von Informationen Wissenschaftler der Hintergrundstrahlung über die Eigenschaften des Universums, aber auch über seine Entstehungsgeschichte vor Freisetzung der Hintergrundstrahlung entlocken. Aber welche Art von Information kann denn in dieser Strahlung überhaupt drin stecken?

Zunächst etwas Paradoxes: Gerade die gemessene Gleichförmigkeit der Hintergrundstrahlung gilt als Bestätigung der Urknalltheorie. Die Strahlung erreicht uns aus allen Raumrichtungen mit (beinahe) exakt der gleichen Temperatur, nämlich 2,73 Kelvin, also 2,73 Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt. Deshalb kann der Ursprung der Strahlung nur ein Ereignis sein, das gleichzeitig im gesamten Universum stattfand. Die Gleichzeitigkeit impliziert, dass die Strahlung nur vom Urknall selbst stammen kann.

Etwas vollkommen Gleichförmiges wie beispielsweise ein weißes Blatt Papier enthält aber keine Information! Dazu bräuchte man Schrift auf dem Papier.

Dass die kosmische Hintergrundstrahlung tatsächlich kein unbeschriebenes Blatt ist, entdeckte im Jahr 1992 der Nasa-Satellit COBE (Cosmic Background Explorer). Er fand in der Strahlung winzige Abweichungen von der Durchschnittstemperatur – etwa in der Größenordnung von einem tausendstel Prozent. Die aufgrund der Daten von COBE erstellten Temperaturkarten weisen auf der Projektion der Himmelssphäre „heiße" und „kalte" Flecken auf. Da die Photonen der Hintergrundstrahlung seit ihrer Freisetzung nie mehr an Materie gestreut wurden, zeigt diese Temperaturkarte exakt den Zustand des Universums 380 000 Jahre nach dem Urknall – nur etwa 3000 Grad kälter.

Die Karte zeigt uns freilich nur eine Momentaufnahme, gleichsam ein Foto, das bei der Freisetzung der Photonen in die Hintergrundstrahlung eingebrannt wurde. Denn die Strahlung erhielt jeweils die Temperatur der Materie, an der sie zuletzt gestreut worden war.

Den Temperaturschwankungen entsprechen Dichteschwankungen, die das frühe Universum wellenartig durchliefen. Dichteschwankungen sind aber nichts anderes als Schallwellen. Wer einen Musiker in seinem Bekanntenkreis hat, sollte ihn einmal fragen, was er aus dem Klang eines Musikinstrumentes über dessen physikalischen Zustand erfahren kann: so gut wie alles! Jeder kleine Kratzer an einer Violine spiegelt sich im Klangspektrum von Grund- und Obertönen wider.

Bezogen auf die physikalischen Parameter des Universums gilt für Kosmologen das Gleiche. Das Frequenzspektrum der Dichteschwankungen im frühen Universum, das sie aus dem Fleckenmuster der Temperaturkarten „herausdestillieren“, ist für sie eine reichhaltige Informationsquelle.

Die derzeit aktuellsten und präzisesten Daten der Hintergrundstrahlung stammen von der Mitte 2001 gestarteten Nasa-Sonde WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe). Unter anderem ergibt sich daraus ein Alter des Universums von 13,7 Milliarden Jahren. Außerdem besteht unser Universum den WMAP-Daten zufolge nur zu vier Prozent aus gewöhnlicher Materie. Weitere 23 Prozent seines Materie-Energiegehalts sind demnach „Dunkle Materie“ – eine bisher unbekannte Materieart, die offenbar kaum mit den sichtbaren Sternen und Galaxien wechselwirkt, deren gravitative Auswirkungen sich aber in der Bewegung der Galaxien niederschlagen. Und der Löwenanteil von 73 Prozent entfällt auf die „Dunkle Energie“, eine geheimnisvolle Kraft, die dafür sorgt, dass sich das Universum immer schneller ausdehnt.

Einen weiteren Präzisionssprung der Daten erwartet man von der europäischen Raumsonde Planck, die im Jahr 2007 starten soll. Planck wird die Himmelssphäre mit einer Auflösung von einem zwölftel Winkelgrad kartographieren – der dreifachen Auflösung von WMAP – und Störstrahlung wesentlich besser ausblenden können.

Wenn Gabriele Veneziano vom Europäischen Laboratorium für Teilchenphysik CERN mit seiner Prä-Urknall-Theorie Recht hat, dann wird Planck in der kosmischen Hintergrundstrahlung möglicherweise sogar Spuren aus der Zeit vor dem Urknall entdecken und uns vielleicht die ersten Einträge offenbaren, die Gott in das Protokoll der Schöpfung schrieb.

AXEL TILLEMANS

Viel Lärm um Nichts

Zwischen der Milchstraße und dem Andromeda-Nebel ist nicht wirklich viel los. Es ist dunkel, es ist kalt und eine freundliche Seele kommt auch selten des Wegs. Hier ist der Ort, wo das Nichts wohl zu Hause sein muss. Das Nichts? Nicht ganz. Schließlich verirren sich ein paar Lichtstrahlen entfernter Galaxien auch in diesen Raum und der verhallende Urknall ließe ein Thermometer – so eines da wäre – auf satte drei Kelvin, also –270 °C, schnellen. Wenn also das Nichts hier doch nicht zu finden ist, dann aber doch bestimmt der leere Raum, der einfach nur er selbst sein darf, völlig befreit von jeder Materie. Aber halt: Zieht da hinten nicht ein Wasserstoffatom vorbei? Und dort ist ja noch eines. Selbst hier ist es also nicht ganz leer, auch wenn dies den Atomen, die sich hierher verirrt haben, kaum helfen wird, müssen sie doch um die hunderttausend Lichtjahre zurücklegen, bis sie, vielleicht, vielleicht, auf einen Artgenossen stoßen. So groß kann Einsamkeit sein. Da dies so ist, ist auch niemand da, den man fragen könnte: Was ist denn nun das Vakuum, die absolute Leere? Und so müssen wir doch wieder zurück an den heimischen Herd, um Antworten zu finden. Die Adresse klingt einigermaßen verheißungsvoll: Labor für Vakuummetrologie, Berlin.

Präzise Druckverhältnisse herrschen im Labor für Vakuummetrologie der PTB in Berlin-Charlottenburg.

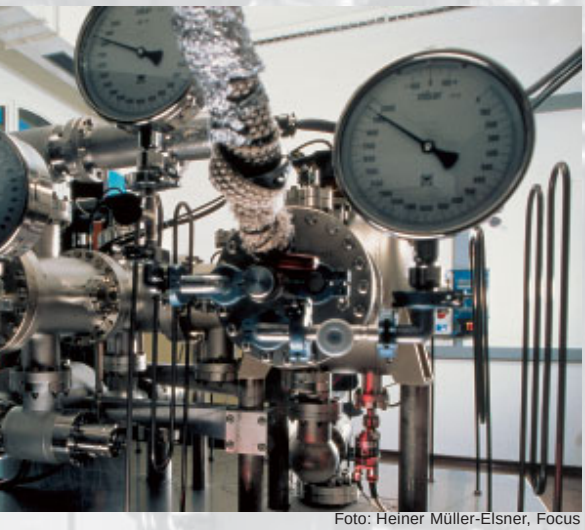


Foto: Heiner Müller-Elsner, Focus

Je näher man dem Nichts kommt, umso lauter wird es. Karl Jousten legt darum etwas mehr Kraft in seine Stimme, als er dem Besucher seine Laboratorien im Förster-Bau der PTB in Berlin-Charlottenburg zeigt. „Jetzt ist es ja eher leise“, sagt Jousten, „da hätten Sie mal vor ein paar Jahren herkommen müssen – die Vorpumpen, mit denen wir damals gearbeitet haben, machten einen Höllenlärm.“ Zum Glück sind die nicht mehr da, denkt der angestrengt zuhörende Gast, und staunt über die große Menge an Gerät, die hier um das Nichts herum aufgebaut ist. Das Nichts, oder besser: ein Etwas, das dem Nichts sehr nahe kommt, steckt in mehreren kupferfarbenen, regentonnengroßen Kesseln und ist umgeben von Elektronik, Messgeräten und, dies ganz ohrenkundig, von Pumpen aller Art, deren Aufgabe es ist, möglichst viel Atome aus den Kesseln herauszuholen, damit in diesen möglichst wenig zurückbleibt. „Das absolute Vakuum mit völliger Materie-

freiheit gibt es auch bei uns natürlich nicht“, gesteht Jousten ein, „aber das braucht ja ohnehin keiner“. Gebraucht wird stattdessen das technische Vakuum, das nicht aller Atome ledig sein muss – es muss nur materiearm sein.

„In normaler Atmosphäre kann man heute nicht mehr viel machen“, sagt Jousten, womit er allerdings die Arbeit der Physiker und Techniker in ihren Laboren meint, die, sobald sie sich mit den Oberflächen von Dingen beschäftigen, dies nur unter klinischen Bedingungen sinnvoll können – jedes Luftmolekül stört die Arbeit. „Selbst wenn der Druck auf ein Milliardstel des irdischen Luftdrucks abgefallen ist, sehen Sie auf einer zuvor sauberen Oberfläche nach einer einzigen Sekunde nur noch Wasser und Kohlenmonoxid.“ Kein Wunder also, dass gerade die Halbleiterindustrie, die ihre Siliziumwafer in zahlreichen Produktionsschritten mit immer neuen Materialschichten belegt und strukturiert, dies nur im Ultrahochvakuum zu Wege bringt. Diese Industriesparte ist es daher auch, in der knapp die Hälfte aller weltweit vorhandenen Vakuummessgeräte, so genannte Vakuummeter, im Einsatz sind. Wer ein bestimmtes Vakuum braucht, muss schließlich wissen, ob er es auch wirklich hat.

„Unsere Hauptaufgabe“, so Jousten, „ist es, solche Vakuummeter zu kalibrieren.“ Eine Aufgabe, die rund 100-mal pro Jahr anfällt, und die Pumpen in den Laboren immer in Bewegung hält: Zuerst wird ein bestimmtes Vakuum möglichst genau erzeugt und dieser bekannte Wert dann mit der Anzeige des Vakuummeters verglichen. Damit das Vakuummeter aber nicht nur für einen einzigen Druckwert, sondern über einen ganzen Messbereich von mehreren Dekaden kalibriert ist, wird die Prozedur für verschiedene Vakuumdrücke wiederholt – insgesamt ein Tag Kalibrierarbeit für ein Vakuummeter. Die Kunst besteht nun vor allen Dingen darin, ein gewolltes Vakuum von soundsoviel Millibar auch wirklich herzustellen. Dies gelingt mit einem Verfahren, dessen Grundprinzipien schon vor mehr als dreihundert Jahren entdeckt wurden.

In den gelehrten Kreisen des 17. Jahrhunderts war Luft in komprimiertem oder verdünntem Zustand ein gewichtiges Thema. Während Otto von Guericke in Magdeburg Pferde anspannen ließ, um seine luftleergepumpten Halbkugeln auseinanderreißen zu lassen, untersuchten der Brite Robert Boyle sowie der Franzose Edme Mariotte die Beschaffenheit der Luft und fanden, der eine experimentell, der andere theoretisch, ein Gesetz, das die Expansion und Kompression von Gasen beschreibt: Wenn eine bestimmte und sich nicht verändernde Gasmenge in immer neue Gefäße geleitet wird, so bleibt doch eine Eigenschaft dieses Gases immer gleich, das Produkt aus dem Volumen, in dem sich das Gas ausbreitet, und dem Druck, der sich in dem Gefäß einstellt. Geboren war das Boyle-Mariottesche-Gesetz, das so up-to-date ist, dass der Physiker Karl Jousten ohne dieses Gesetz seine Arbeit einstellen müsste.

„Ohne Boyle und Mariotte hätten wir ein Problem“, sagt Jousten und zeigt auf ein kleines Gefäß, das an die große Vakuumtonne angeflanscht und über Ventile mit ihr verbunden ist. Das kleine Gefäß wird zuerst mit einem reinen Gas wie Helium gefüllt, bis sich ein Druck von etwa einer Atmosphäre, also 1000 Millibar, einstellt – der Druck, der sich am genauesten von allen Drücken messen lässt. Warum die Messgeräte gerade bei diesem sehr irdischen Druck so präzise arbeiten? Das weiß auch Jousten nicht: „Ein religiöser Mensch würde vielleicht sagen: Das hat Gott so gemacht.“ Nachdem also mit etwas überirdischer Hilfe das Produkt von Druck (eine Atmosphäre) und Volumen (das kleine Gefäß wurde geometrisch genau ausgemessen) festgelegt ist, kann die Reise nach Boyle-Mariotte losgehen. Die Ventile werden geöffnet und das Gas erobert den Raum, der ihm angeboten wird – die Leere der Vakuumtonne, die ein hundertfach größeres Volumen hat. Und schon ist aus dem Anfangsdruck ein Hundertstel geworden. Doch damit nicht genug, das Verfahren lässt sich ja wiederholen, so dass aus dem

Alltägliche Leere

In unseren Alltag und unseren Sprachschatz ist das Vakuum längst eingezogen. Der Kaffee im Supermarktregal ist „vakuumverpackt“, wenn ein Engländer einen Staubsauger kauft, fragt er nach einem „vacuum cleaner“, Thermoskannen halten dank eines Vakuummantels den Kaffee warm und die Bildröhren in unseren Fernsehern funktionieren nur, weil sie luftleer gepumpt sind. Auch die Kunststoff-(PET)-Flaschen, in denen wir unser Mineralwasser nach Hause tragen, halten die Kohlensäure nur darum monatelang gefangen, weil die Flaschen zuvor unter Vakuumbedingungen beschichtet wurden. Das Vakuum, von dem hier jeweils die Rede ist, hat mit dem philosophischen Begriff freilich nichts zu tun; es ist mit der technischen Brille betrachtet nichts anderes als ein Gebiet kleinen Drucks. Eine DIN-Norm hat sogar festgeschrieben, wie klein ein Druck werden muss, damit er sich Vakuum nennen darf: Er muss kleiner sein als 300 Millibar, also ungefähr ein Drittel unseres normalen irdischen Luftdrucks auf Meeresniveau. Daraus folgt, dass sich Reinhold Messner auf dem Mount Everest mit seinen rund 320 Millibar Luftdruck schon fast im Vakuum befunden hat.

Druckeinheit

Druck ist nichts anderes als eine Kraft, die auf eine Fläche wirkt. Bei einem festen Gegenstand kann man sich das gut vorstellen – also etwa bei einer Tafel Schokolade, die auf einem Tisch liegt. Aber auch ein Gas erzeugt einen Druck, beispielsweise die uns umgebende Luft, wobei uns dieser Luftdruck meist gar nicht bewusst wird. Der Druck in einem Gas resultiert aus dem unregelmäßigen Bombardement der Gasteilchen auf jede Fläche, die sich dem Gas in den Weg stellt – also etwa auf die Wände der Gasflasche, die Hülle des aufgeblasenen Luftballons oder den Mantel der Vakuumkammer, in der sich auch bei kleinsten Drücken immer noch eine ganze Menge an Gasmolekülen befinden. Gemessen wird der Druck, egal wie groß oder klein er ist, innerhalb des Internationalen Einheitensystems in der Einheit Pascal (1 Pascal = 1 Newton durch 1 Quadratmeter). Aber auch in der PTB trifft man im Laboralltag das Millibar (1 Millibar = 100 Pascal) an, denn die meisten Messgeräte zeigen Werte auf dieser Skala an. Für wissenschaftliche Veröffentlichungen wird dann natürlich umgerechnet.

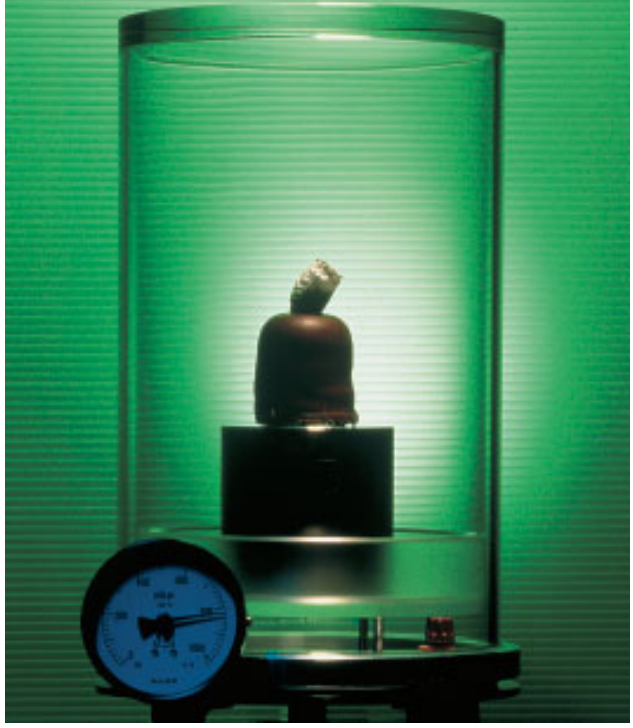
Hundertstel schnell ein Zehntausendstel und im nächsten Schritt ein Millionstel wird. Die Annäherung an das absolute Vakuum ist hier keine Hexerei, sondern klassische Physik idealer Gase.

„Dass wir es in Wirklichkeit nicht mit idealen, sondern mit realen Gasen zu tun haben, berücksichtigen wir natürlich bei unseren Rechnungen“, sagt Jousten. „Aber im Rahmen der Messunsicherheit spielt dies eher eine untergeordnete Rolle.“ Für die Vakuummessung liegen die Messunsicherheiten nämlich im Promillebereich, steigen bei kleinen Drücken immer mehr an und überschreiten im Ultrahochvakuum schon die Prozentmarke. „Was die Unsicherheiten betrifft, müssen wir bescheiden sein“, meint Jousten, hält aber sofort dagegen: „Aber wir realisieren die Druckskala über 15 Größenordnungen.“ Woraus ein kleinster realisierter und gemessener Druck von einem billionstel Millibar folgt. „So tief runter gehen wir aber nicht oft. Allein das Ausheizen der Vakuumkammer bei einigen hundert Grad Celsius dauert dabei eine knappe Woche.“ Erst dann sind die meisten der an den Innenwänden der Kammer klebenden Atome abgelöst und von den Pumpen aufgesaugt.

„Die Industrie hat kaum Interesse an diesen kleinen Drücken“, meint Jousten. Da wird, etwa bei den Beschichtungsverfahren, eher der Prozessdruck erhöht, mit dem die Atome aufgedampft werden, was für das Produkt denselben Effekt hat. Aber so gehört es sich auch für ein Metrologielabor, in dem die Kunst des Messens ausgereizt wird: Es muss immer etwas mehr können, als die Außenwelt momentan braucht. Die Messkunst hört am Fabriktor nicht auf. Und außerdem: Wer das absolute Vakuum verstehen will, muss ihm mit einem technischen Vakuum möglichst nahe kommen.

Hier oben ist es nach wie vor dunkel, kalt und (fast) leer. Während unten in den Laboren auf der Erde das Vakuum mühsam erpumpt werden muss, bekommt man es im intergalaktischen Raum geschenkt. Nur ist niemand da, der es nutzen könnte. Die Wasserstoffatome ziehen weiter ihre einsamen Bahnen, nur selten treffen sie ein Lichtteilchen oder einen anderen ihresgleichen. Doch was ist das? Waren da nicht gerade ein Elektron und sein Anti-Teilchen, das Positron, zu sehen? Wo kommen die denn plötzlich her? Aber kaum waren sie da, sind sie schon wieder weg. Und da dasselbe noch einmal. Vielleicht ist hier ja nicht wirklich etwas los. Aber virtuell scheint es unter der Vakuumdecke zu brodeln. Hat jemand was von Quantenfluktuationen gesagt? Verstehe einer dieses Vakuum. Aber das ist eine andere Geschichte.

JENS SIMON



Ein Klassiker der Vakuumversuche oder: Was man mit einem Schokokuss nicht alles machen kann: Eine Pumpe saugt die Luft aus dem Glaszylinder. Während der Druck abfällt, poppt der Schokokuss auf und verwandelt sich in einen wachsenden Schaumbrei.

Fotos: Heiner Müller-Elsner, Focus

Erde

Foto: Corbis

Ende des 19. Jahrhunderts gab der französische Astronom Camille Flammarion einen Holzschnitt in Auftrag, der die Sehnsucht des Menschen, unbekannte Welten zu erforschen, symbolisieren sollte. Dieser Holzschnitt, ausgeführt im Stil des 15. Jahrhunderts, wurde später vielfach koloriert.

Ebenen mit Nanometerhügeln

**Um zu erkennen,
dass die Erde keine Scheibe ist, können wir die Erde auf den Ozeanen einmal umsegeln; oder wir fliegen in Richtung Mond und sehen uns die Erde von außen an; oder – und das ist der kürzeste Weg – wir besuchen die PTB in Braunschweig und staunen darüber, dass sich die Erdkrümmung auch auf spiegelglatten, ebenen Flächen zeigt und dass sich auch Nanometerhügel messen lassen.**

Die runde, mit Aluminium beschichtete Glasplatte, etwa 15 Zentimeter im Durchmesser, ist ein perfekter Spiegel. Makellos glänzt die silberne Oberfläche, ohne jede Verzerrung ist die Decke der Versuchshalle im Von-Laue-Bau der PTB in Braunschweig auf der Scheibe zu sehen. Perfekt ist der Prüfling allerdings nur für menschliche Augen: „Das ist nur eine Allerwelts-Planfläche“, sagt Ralf Geckeler von der Arbeitsgruppe „Bildoptik“. Denn in Wirklichkeit türmen sich 30 Nanometer hohe Berge auf der Scheibe, viele Atomdurchmesser tiefe Gräben durchziehen das Werkstück. Kurz: Die Topographie ist so rau wie eine Hochgebirgslandschaft. „Gute“ Flächen sind wesentlich ebener. „Die haben Höhenunterschiede von wenigen Nanometern“, berichtet Geckeler.

Benötigt werden solche nahezu perfekt glatten Flächen vor allem in der Optik: Die Form von Linsen und Spiegeln, die zum Beispiel in Photolithographie-Objektiven zur Chipherstellung, in Synchrotrons oder in Teleskopen verwendet werden, muss bis auf den Nanometer genau sein, damit die Geräte das Licht scharf genug bündeln. „Herstellen kann man solche glatten Oberflächen mittlerweile recht gut“, berichtet Geckelers Kollege Michael Schulz, „das Problem besteht darin, das auch zu messen.“

Bis vor einigen Jahren reichte Schulz und seinen Kollegen ein so genannter Quecksilberspiegel als Maß aller Flächen. Wenn es „nur“ um eine Genauigkeit von einigen Nanometern geht, bildet das flüssige Metall eine vollkommene Ebene. Höhen und Tiefen anderer Oberflächen lassen sich mit diesem Quecksilberspiegel vergleichen: Eine Probe, die durchsichtig sein muss, wird in geringem Abstand über dem Quecksilber angebracht und mit kohärentem Licht bestrahlt, bei dem alle Lichtteilchen im gleichen Takt schwingen. Das Licht durchdringt die Probe, dann ein Stückchen Luft und wird schließlich vom Quecksilber reflektiert. Der Weg der Lichtwellen verläuft unterschiedlich, je nachdem, wie groß der Abstand zwischen der Probe und dem Quecksilberspiegel ist. Dadurch löscht das zurückgeworfene Licht das einfallende an manchen Stellen aus, an anderen verstärkt sich das Licht: Ein Interferenzmuster aus hellen und dunklen Streifen entsteht, in dem die Information über die Topographie der gesamten Proben-Oberfläche steckt.

Der Quecksilberspiegel hat als Standard für die Ebenheit allerdings Nachteile: So ist der Arbeitsaufwand für eine Messung extrem hoch, da alles von Hand eingestellt werden muss. Außerdem ist die Größe der zu messenden Proben durch die Größe des Interferometer-Objektivs beschränkt. In der PTB können maximal 30 Zentimeter große Proben gemessen werden. Falls die Oberfläche eine andere Form hat als Kugel oder Ebene, was in der Optik immer wichtiger wird, ist die Methode ebenfalls nicht optimal.

Und für hochpräzise Messungen taugt selbst der Quecksilberspiegel nicht. Denn wer ganz genau hinschaut, sieht, wie sich die Oberfläche des flüssigen Metalls wölbt – sie passt sich der Schwerkraft an: Der Quecksilberspiegel repräsentiert sozusagen einen kleinen Ausschnitt aus der Erdoberfläche. Und die ist bekanntlich in etwa eine Kugel mit einem Radius von 6371 Kilometern. Anhand der 30 Zentimeter großen Kreisfläche des Quecksilberspiegels lässt sich eindeutig beweisen: die Erde ist keine Scheibe. Die Erdkrümmung macht hier immerhin einen Höhenunterschied von zwei Nanometern aus. Zusätzliche Fehlerquellen führen dazu, dass der Quecksilberspiegel stets Messunsicherheiten von etlichen Nanometern produziert. „Und das“, so Geckeler, „reicht heute als Standard für die Ebenheit nicht mehr aus“.

Der Forscher hat deshalb zusammen mit Kollegen ein neues Verfahren entwickelt, das ohne ein Muster der perfekten ebenen Fläche – „die es ohnehin nicht geben kann“ – auskommt. „In den Größenordnungen, in denen wir uns da bewegen, werden Glas und Metall zu Gummi und Luft zu Sirup“, sagt Geckelers Kollege Michael Schulz. Schon das Zerren der Schwerkraft lässt Führungsschienen aus Stahl um einige Nanometer durchhängen. Kleinste Temperaturschwankungen bringen Lichtstrahlen vom geraden Weg ab, weil sie die optische Dichte der Luft verändern.

Der Weg um all diese Fehlerquellen herum ist, wie alle guten Wege, im Nachhinein einfach: Ein Lichtstrahl rastert Punkt für Punkt die zu untersuchende Proben-Oberfläche ab, wobei ein fünfeckiges Prisma im Strahlengang dafür sorgt, dass alle einfallenden Lichtstrahlen immer parallel verlaufen. Ist die Fläche am Messpunkt nicht ganz eben, dann wirft sie – gemäß dem Reflexions-

gesetz „Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel“ – den Strahl nicht senkrecht, sondern schräg zurück. Dieser Reflexionswinkel wird gemessen. Krümmt sich die Fläche zwischen zwei benachbarten Punkten, dann ändert sich die Reflexion der Lichtstrahlen und aus der Winkeldifferenz kann auf die Form der Oberfläche geschlossen werden.

Das Prinzip ist einfach, die Kunst liegt in der Präzision der Messung: Differenzen von zwei tausendstel Winkelsekunden können die PTB-Wissenschaftler noch sicher nachweisen und Höhenunterschiede von 0,2 Nanometern auf einer „Ebene“ entdecken. „Das entspricht etwa dem Durchmesser eines Gold-Atoms“, berichtet Geckeler. Die Grenze zwischen einer Fläche, die man von einer Scheibe nicht mehr unterscheiden kann, und einer, die in Wirklichkeit Teil einer Kugel ist, rückt schon in die Sphäre der Riesenplaneten vor. Ein Krümmungsradius von 15 000 Kilometern – also mehr als doppelte Erdgröße – ist mit dem Verfahren gerade noch zu erkennen.

Ein großer Vorteil des neuen Verfahrens gegenüber der Interferometrie: Es gibt keine Beschränkung bei der Größe der Messstücke. Aber das Verfahren hat auch seine Grenzen: Das Winkelmessgerät stört sich an allzu starken Krümmungen der Messstücke – die Grenze liegt etwa bei einem Krümmungsradius von hundert Metern. „Mit dem Auge“, so Schulz, „kann man das noch gar nicht wahrnehmen“.

Ute Kehse

„Sage mir, wie eben du bist!“ Diese Frage kann Ralf Geckeler auch für große Spiegel sehr präzise beantworten. Selbst Höhenunterschiede von 0,2 Nanometern bleiben nicht unbemerkt.

Foto: PTB

Spuren von Hiroshima –

Foto: US Air Force, Science Photo Library

Foto: Keystone

Hiroshima: die Welt zerfällt in ein Davor und ein Danach. Colonel Paul Tibbet vor seinem B-59-Bomber – die Explosion der Bombe – das zerstörte Hiroshima. Auch über ein halbes Jahrhundert später denken die Menschen an die Opfer; am Jahrestag des Atombombenabwurfs lassen Kinder bunte Papierlaternen auf dem Motoyasu-Fluss in Hiroshima schwimmen.

Foto: Corbis

Im Untertagelabor der PTB

Westpazifik, 6. August 1945, in den frühen Morgenstunden: Der US-Bomber Enola Gay bricht vom amerikanischen Luftwaffenstützpunkt der westpazifischen Insel Tinian in Richtung Japan auf. Sein Ziel: Hiroshima. Seine Ladung: die 4,5 Tonnen schwere Uranbombe Little Boy.

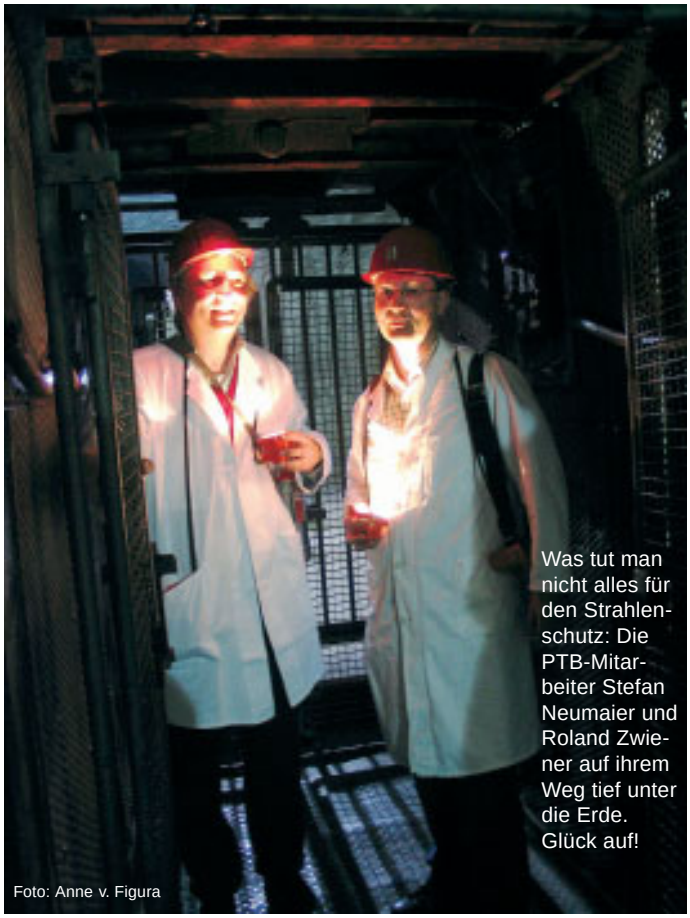
Hiroshima, 6. August 1945, 8:16 Uhr: In 9000 Metern Höhe wirft die Enola Gay ihre atomare Fracht über Hiroshima ab. Einige hundert Meter über dem Boden wird die Bombe gezündet. Binnen weniger Sekunden verwandelt eine riesige Explosions- und Hitzewelle die Hafenstadt in eine lodernde Hölle. 80 Prozent der Stadt sind zerstört, mehr als 100 000 Menschen sterben in dem Inferno. Hiroshima wird zur Geisterstadt.

Braunschweig im Jahr 2002: Das Forscherteam um Stefan Neumaier und Dirk Arnold in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt bekommt 57 Jahre nach dem Atombombenabwurf Proben aus dem japanischen Hiroshima – kleine Bruchstücke von 10 bis 100 Gramm aus Metallplatten, metallischen Treppengeländern oder Stahlleitern, mit jeweils einer exakten Beschreibung des Fundorts und damit auch einer Entfernungsangabe zum Explosionsort der Bombe. Diese Proben tragen bis heute Reste ihrer Vergangenheit in sich, denn die bei der Explosion freigesetzten Neutronen haben das Material aktiviert und in dem Stahl das Element Kobalt-60 erzeugt – einen radioaktiven Strahler mit einer Halbwertszeit von etwa fünf Jahren. Obwohl mittlerweile über elf Halbwertszeiten vergangen sind, kann die verbliebene, schwache Radioaktivität dennoch gemessen werden – wenn die Messung von keiner anderen Strahlung gestört wird, was in dem Untertagelabor UDO der PTB durchaus gelingt. Mit ihren Messungen tragen die PTB-Wissenschaftler zu einer umfangreichen Hiroshima-Studie bei, welche die Lebens- und Krankheitswege aller Überlebenden des Bombenabwurfs untersucht – mit Auswirkungen auf die Gegenwart: Die heute festgelegten Strahlenschutzgrenzwerte beziehen sich wesentlich auf die Daten dieser über Jahrzehnte laufenden Hiroshima-Studie.

Foto: Corbis

Asse-Bergwerk im Mai 2004: Ein schrilles Klingeln. Das Stahlseil ächzt und quietscht. Langsam läuft es über die Winde, es wird schneller und stoppt schließlich. Der Aufzug ist da. Stefan Neumaier tritt durch die Gittertür und verriegelt sie. Nun geht es schnell: 925 Meter in 90 Sekunden. Nicht rauf, sondern runter. Hier unten ist es heiß. 30 Grad. Hier unten ist das Zuhause von UDO. Umgeben von Tonnen von 200 Millionen Jahre altem Steinsalz liegt das Labor in einem Stollen des Asse-Bergwerks.

Ein paar hundert Meter weiter oben lagern Fässer mit schwach- und mittelradioaktiven Abfällen. Die Strahlenbelastung ist in 925 Metern Tiefe dennoch deutlich geringer als über Tage. Erde, Gestein und Salz sind ein Schutzschild gegen die Höhenstrahlung. Nur ein Hunderttausendstel davon kommt unten an. Dank des Salzes, das sehr aktivitätsarm ist, ist zudem die terrestrische Strahlung, die beim Zerfall radioaktiver Substanzen in der Erdkruste entsteht, gering. Zum Vergleich: Im menschlichen Körper zerfallen etwa 5000 Atomkerne Kalium-40 pro Sekunde und setzen dabei Strahlung frei, im Salz sind es pro Kilogramm nur zwei. Rund um UDO herrschen deshalb optimale Bedingungen für die Forscher der PTB und ihre Messungen. In einer Atmosphäre, in der die natürliche Strahlung praktisch vernachlässigbar ist, bekommen Neumaier und sein Team die zuverlässigsten Ergebnisse in ganz Deutschland. Die Messung der Radioaktivität aber ist nur ein Teil der Arbeit der Wissenschaftler. Im Bauch der Asse kalibrieren sie auch Instrumente, die für genaue Messungen niedriger Dosen ionisierender Strahlung notwendig sind. Die Explosion des Atomreaktors in Tschernobyl 1986 hat Europa gezeigt, wie wichtig ein vernünftiges Frühwarnsystem ist, das Alarm schlägt, sobald sich die Strahlungswerte verändern. Allein in Deutschland stehen seither 2000 Messstationen, deren Detektoren rund um die Uhr Werte an das Bundesamt für Strahlenschutz senden. Prototypen dieser Messgeräte wurden im Asse-Labor kalibriert. Außerdem wurden Dosimeter aus Frankreich, Dänemark, Portugal, der Schweiz oder den Niederlanden – aus zwölf Ländern insgesamt – zu Messvergleichen nach Braunschweig geschickt.



Was tut man nicht alles für den Strahlenschutz: Die PTB-Mitarbeiter Stefan Neumaier und Roland Zwiener auf ihrem Weg tief unter die Erde. Glück auf!

Foto: Anne v. Figura

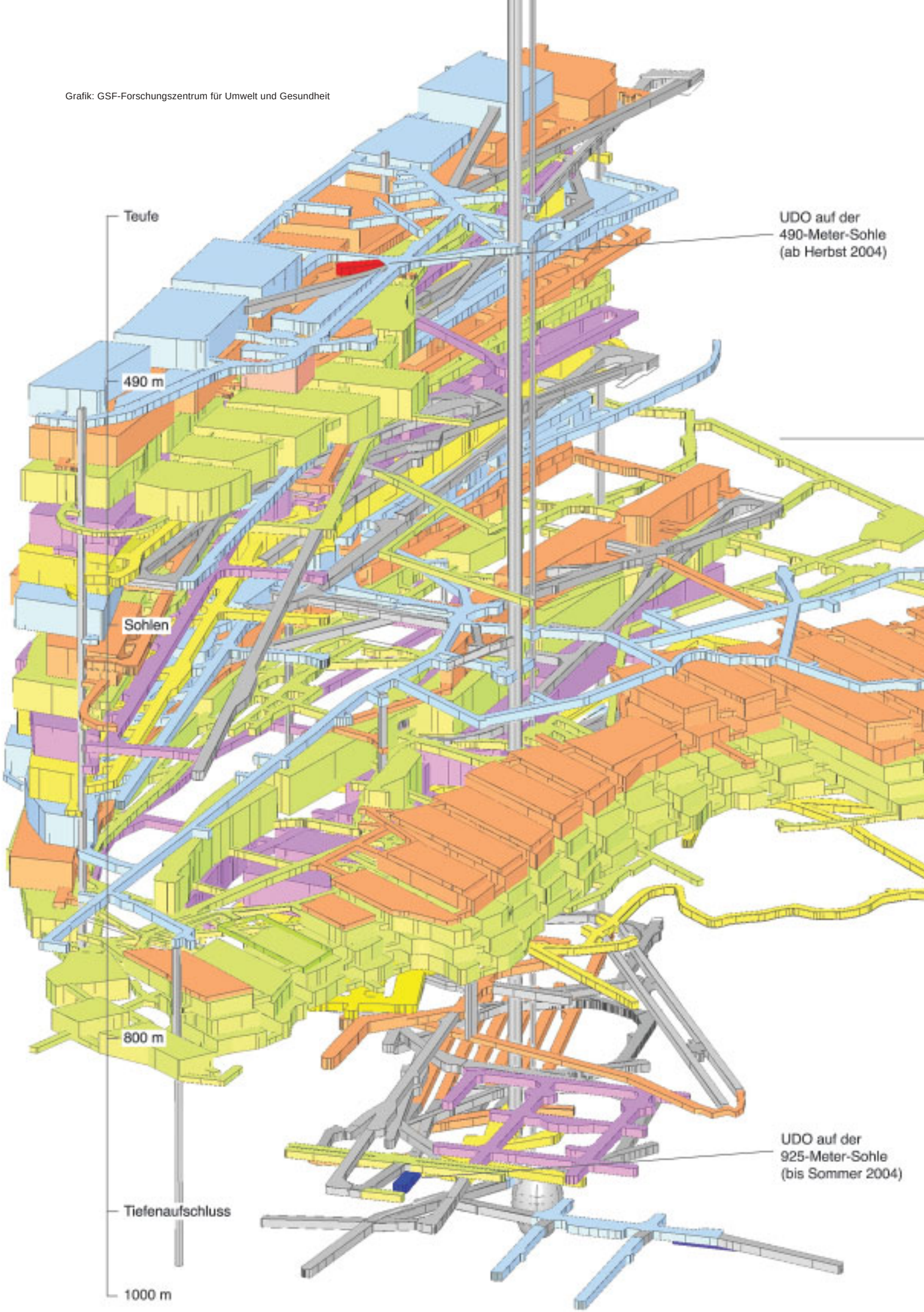
Die Wirtschaft hat allerdings nur geringes Interesse, in neue Strahlenschutz-Technologien zu investieren. „Man ist der Auffassung, dass der Strahlenschutz schon sehr weit gediehen ist“, sagt Neumaier, „obgleich wir von den Wirkungen und Risiken niedriger Strahlendosen, denen wir aufgrund natürlicher Strahlenquellen sowie durch Technik und Medizin täglich ausgesetzt sind, noch sehr wenig verstehen.“

Der Gesetzgeber hat geringe Grenzwerte für die Dosis festgelegt, der ein Mensch pro Jahr zusätzlich zur natürlichen Strahlung durch technische Einflüsse ausgesetzt sein darf. Ein Millisievert darf nicht überschritten werden, das ist ein Tausendstel dessen, was akut schädigend wirkt. „Sie müssen 8000 Stunden am Zaun eines Atomkraftwerkes stehen können und dürfen nicht mehr als ein Millisievert abbekommen“, so Neumaier.

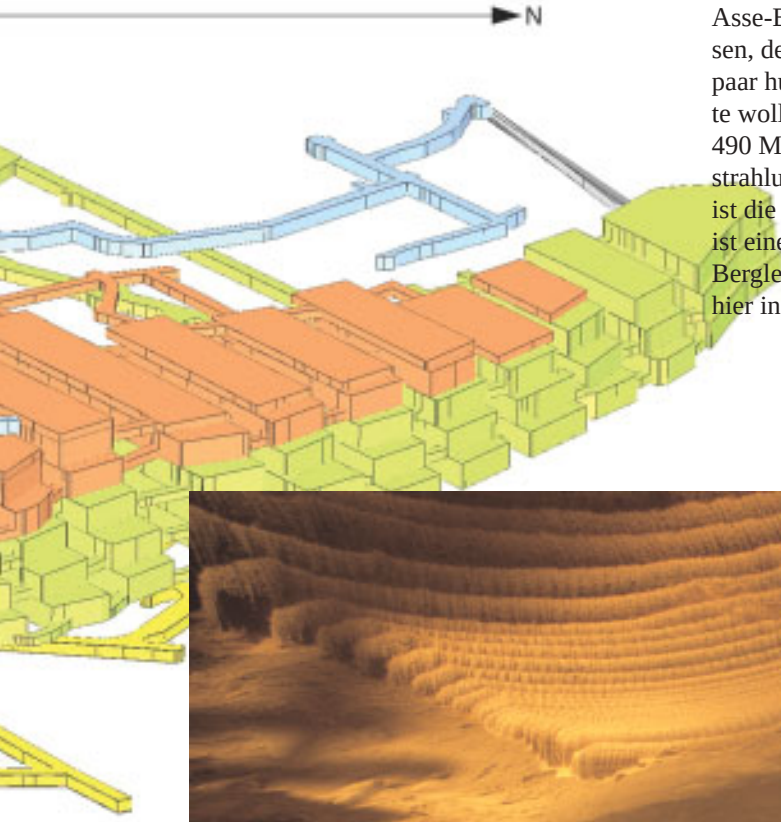
Anderes Beispiel: die Castortransporte nach Gorleben, bei denen die Behörden die Einhaltung der Grenzwerte sicherstellen müssen. „Der Polizist, der den Zug schützt, will zu Recht genau wissen, was er abbekommt und mit welchen Folgen“, erläutert Stefan Neumaier. Der Beitrag der UDO-Techniker: Sie kalibrierten Geräte, mit denen andere PTB-Forscher die Strahlungsfelder rund um den Castor maßen. Aus diesen Messungen ergaben sich die maximal zulässigen Aufenthaltszeiten der Polizisten, bei denen die Grenzwerte sicher eingehalten werden.

Fast von überall auf der Welt bedienen sich Hersteller und Behörden des Know-hows der Braunschweiger – etwa nach radioaktiven Katastrophen, wie dem Unfall in Tokaimura. Dort waren 1999 zwei Japaner ums Leben gekommen, als sie für einen Atomreaktor Uran anreicherten. „Die Leute haben, ohne es zu wissen, eine Bombe gebaut“, erzählt Stefan Neumaier. Die Bombe explodierte zwar nicht, aber sendete über viele Stunden Unmengen von Neutronen aus. Welche Dosis Bewohner in der Umgebung der Fabrik dabei abbekommen haben, untersuchte Neumaiers Team im Anschluss mit Hilfe von Besteckproben. Kopien mit Diagrammen und Erläuterungen an den kahlen Wänden von UDO zeugen davon heute noch.

Der 14 Meter lange und 3,80 Meter breite Container aus Hartpapier, Kunststoff und ein wenig Holz – Kriterium: so strahlungsarm wie möglich – lädt nicht gerade zum Verweilen ein. Einen halben Tag pro Woche verbringen die Wissenschaftler und Techniker im Asse-Bauch, bei Messkampagnen auch einmal eine gute Woche.


Grafik: GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit
Teufe
490 m
Sohlen
800 m
Tiefenaufschluss
1000 m
UDO auf der
490-Meter-Sohle
(ab Herbst 2004)
UDO auf der
925-Meter-Sohle
(bis Sommer 2004)

Ein Labyrinth von Kammern und Gängen, gestapelt auf einem guten Dutzend Sohlen, verbirgt sich tief im Salz der Asse. Das ehemalige Bergwerk, in dem bis Mitte der 1960er Jahre Salz abgebaut wurde, diente danach Forschungszwecken. Das GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit untersuchte hier die Bedingungen zur Lagerung radioaktiver Abfälle. Heute noch findet die PTB hier optimale Bedingungen für Strahlenschutzuntersuchungen in ihrem Untertagelabor UDO: Die Salz- und Gesteinschichten schirmen die kosmische Strahlung nahezu vollständig ab. Das Bergwerk, das bis 2013 geschlossen werden soll, wird nach und nach verfüllt. Für UDO bedeutet dies einen Umzug unter Tage: Von der 925-Meter Sohle (Labor blau markiert) hinauf zur 490-Meter Sohle (rot markiert).



Zwei einfache Holzstühle, ein Tisch aus Press-Span, eine mit Edding beschriebene Tafel, ein Computer. Der Detektor für die Messung der Radioaktivität rundet die karge Ausstattung ab. Darin untersuchten Neumaier, Arnold und Co. auch die verstrahlten Proben aus Hiroshima und Tokaimura.

Der unscheinbaren Plexiglas-Box ist der Aufwand, der in ihr steckt, nicht anzusehen. Frisches Kupfer, feinste Bleiblöcke und eine Schraube aus Stahl von einem alten Schiffswrack zu organisieren hat die Forscher besondere Fantasie gekostet. Das alles nur, um die terrestrische Strahlung auf fast Null abzusenken.

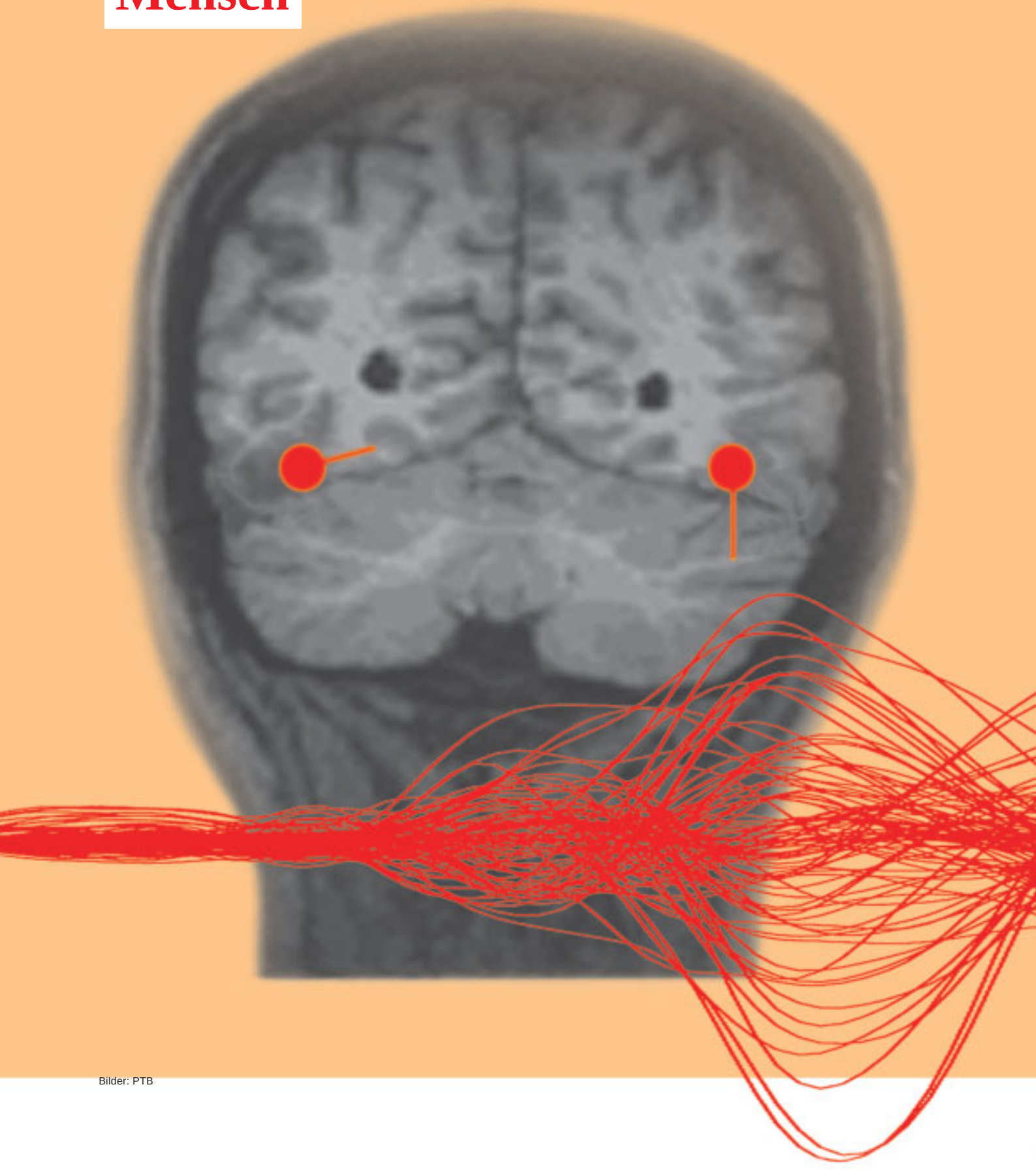
Perfektion ist das Stichwort. Neumaier weiß: „Es gibt fast nichts, was nicht radioaktiv ist – wenn man nur empfindlich genug messen kann.“ Und er sagt: „Aktivitätsmessungen macht fast jeder, jedes Umweltinstitut, jede Uni. Aber so wie wir machen es nur wenige. ‚Unter Tage‘ eben.“

Asse-Bergwerk im Juli 2004: Die Türen von UDO sind geschlossen, der Container ist ausgeräumt. Das Labor muss umziehen, ein paar hundert Meter höher wird es wieder aufgebaut. Die Bergleute wollen den unteren Stollen verfüllen. Die Bedingungen sind 490 Meter unter der Erde zwar nicht mehr so optimal – die Höhenstrahlung nimmt mit jedem Schritt aufwärts zu – doch immer noch ist die Radioaktivität deutlich geringer als über Tage. Der Umzug ist eine Lösung auf Zeit. Sieben Jahre Gnadenfrist räumen die Bergleute den Wissenschaftlern ein. Dann wird UDO, zumindest hier in der Asse, endgültig Geschichte sein.

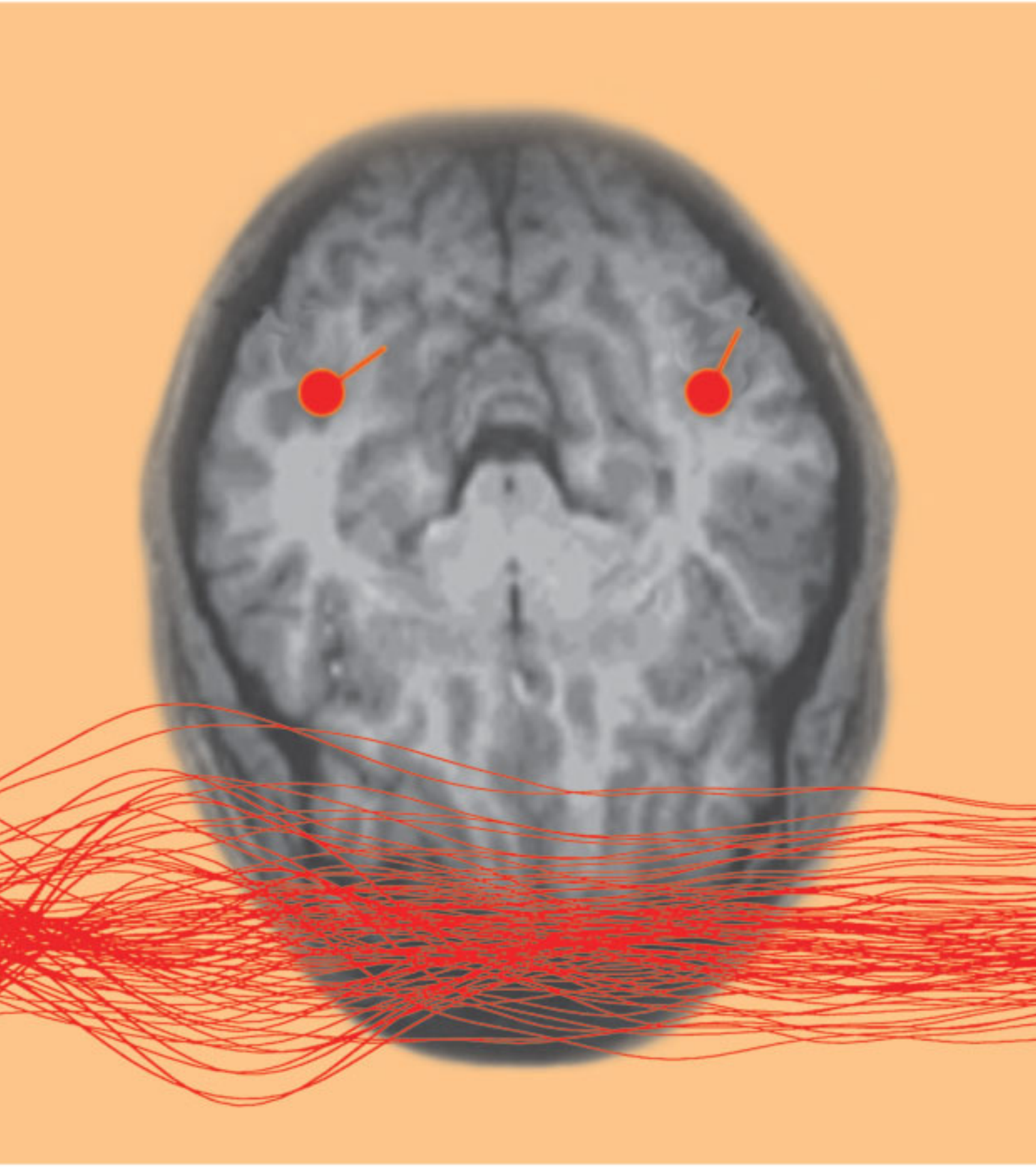
Anne von Figura / Monika Herbst

Foto: Marc Steinmetz, Visum

Mensch



Bilder: PTB



Die roten Messkurven sind das Ergebnis von Hirnstrom-Messungen mit Hilfe von SQUIDs. Aus ihnen lässt sich errechnen, an welchen Orten das Gehirn bei der Gesichtererkennung aktiv ist (rote Punkte).

Wie man Menschen beim Denken zuschaut

Oliver Sacks kannte einen Mann, der seine Frau mit einem Hut verwechselte. Sacks ist Neurologe und hat darüber ein Buch geschrieben. Seitdem weiß man: Merkwürdige Dinge können in unserem Hirn passieren.

Das wissen auch einige Physiker und Ingenieure der PTB, spätestens seitdem sie gelernt haben, wie man „Prosopagnosie“ ausspricht und was es damit auf sich hat: Prosop-Agnosie heißt soviel wie „Gesichter nicht erkennen“ (griech. prosopon = Gesicht und agnosia = das Nichterkennen). Menschen, die unter Prosopagnosie leiden, erkennen manchmal selbst gute Freunde nicht. So wie die Frau, deren Mann auf einem Volksfest schnell etwas kaufen wollte. Als er wieder auf sie zutrat und fragte, wo die Geisterbahn sei, antwortete sie irritiert: „Ihre Stimme klingt wie die meines Mannes.“ Ansonsten fehlt ihr nichts. Sie ist völlig normal „im Kopf“ und ihre Augen funktionieren hundertprozentig. „Gesichtsblindheit“, die deutsche Übersetzung der Krankheit, ist deshalb nicht ganz richtig.

Foto: Ina Jänicke, Burg Giebichenstein

Die Geschichte, wie PTB-Forscher an Prosopagnosie-Patienten gekommen sind, hängt mit einer anderen Geschichte zusammen. In dieser anderen Geschichte spielen nicht Menschen, sondern Magnete die Hauptrolle. Genau genommen: größte und kleinste Magnetfelder. Um vom stärksten zum schwächsten Feld zu kommen, braucht man nur eine Runde auf dem Berliner PTB-Gelände in Charlottenburg zu drehen.

Auf dem Weg dahin – und eigentlich immer – bewegen wir uns im magnetischen „Normalmaß“, im Erdmagnetfeld, das uns umgibt. Gemessen in der Einheit Tesla hat es eine Stärke von ungefähr 50 Mikro-Tesla, also 0,00005 Tesla. Und es ist natürlich nicht zu spüren, zumindest für Menschen nicht, denn wir haben keinen Sinn für Magnetfelder. Bei einigen Tieren, vor allem Zugvögeln, ist das anders. Sie können sich, so vermutet man, nach einem eingebauten Kompass richten.

Auf dem PTB-Gelände hat man – auch als Mensch – trotzdem die Chance, ein Magnetfeld zu spüren, wenn auch indirekt. Im so genannten Observatorium, dem ehemaligen Laborgebäude von Hermann von Helmholtz, steht ein Magnetresonanz-Tomograph, oft als Kernspin-Tomograph bezeichnet. Dieser MRT erzeugt drei Tesla. Auch ohne sich zur Untersuchung in die Röhre zu legen, für die die supraleitenden Magnete das starke Feld erzeugen, kann man sich von dessen Existenz leicht überzeugen. Man braucht nur einen Schraubendreher in der Hand zu halten. Je näher man dem Magneten kommt, desto heftiger wird an der Hand gezerrt. Der Magnet kann Kulis aus der Tasche ziehen und Geschosse aus ihnen machen. Sollte so etwas passieren, hat man kaum eine Chance, die Gegenstände allein mit Muskelkraft vom Magneten loszubekommen. Da hilft dann nur: Strom abstellen. (Aber es wird natürlich nicht passieren: Man betritt den Raum durch eine Schleuse, die jeden magnetischen Gegenstand in der Hosentasche, ums Handgelenk oder anderswo anmahnt.)

Dieses medizinisch genutzte 3-Tesla-Feld ist fünf Größenordnungen größer als das normale Erdmagnetfeld. Im Alltagsvergleich: Die Strecke eines Doppelmarathons zum Beispiel ist fünf Größenordnungen länger als der erste Schritt, den die Läufer machen.

Mit wenigen Schritten geht's dann an den „magnetisch stillsten Ort auf der Erdoberfläche", wie PTB-Arbeitsgruppenleiter Lutz Trahms erklärt. Und das gerade mal 100 Meter vom „lauten" 3-Tesla-Feld entfernt. Die PTB braucht super-abgeschirmte Räume, denn sie entwickelt seit 20 Jahren so genannte SQUIDs, die genauesten Magnetfeldsensoren der Welt. Diese Sensoren registrieren Magnetfelder bis zu einer Größenordnung von Femto-Tesla, das sind 0,000000000000001 Tesla. Die Sensoren können also Magnetfeld-Differenzen messen, die zehn Größenordnungen kleiner sind als das Erdmagnetfeld, das ständig um uns herum ist, und 15 Größenordnungen kleiner als das Feld im MRT.

Da wird der anschauliche „Marathon"-Vergleich schon schwierig, denn was ist zehn Größenordnungen kleiner als der erste Schritt eines Doppelmarathons? Ein winzig kleines, sehr sehr unanschauliches Atom!

Zumindest kommen an dieser Stelle wieder anschauliche Menschen ins Spiel, die Gesichter erkennen sollen. Ein Gesicht zu erkennen heißt nämlich: Ein optischer Reiz gelangt von den Augen über Nervenbahnen in ein bestimmtes Hirnareal am Hinterkopf. Dort passiert beim Erkennen etwas; ein winziger Strom fließt und verursacht ein winziges Magnetfeld. Dieses Magnetfeld inmitten des normalen Erdmagnetfelds messen zu wollen wäre aber ungefähr so erfolgreich, als würde man am Straßenrand stehen, den Start eines Marathons beobachten und glauben, dabei das Verhalten einzelner Atome in den Schuhen des Läufers studieren zu können. Fazit: Das Erdmagnetfeld stört gewaltig.

Foto: Adolfo Siurana, Burg Giebichenstein

Die beiden Bilder zeigen Kunstwerke, die in einem gemeinsamen Projekt zwischen der PTB und der Burg Giebichenstein, Hochschule für Kunst und Design Halle, entstanden und noch bis Ende März 2005 im Hermann-von-Helmholtz-Bau der PTB Berlin ausgestellt sind. Der Titel der Ausstellung lautet „Art meets Science – Ungehinderte Überlagerung". Die beiden Kunstwerke: „Ohne Titel", ein Entwurf für das Exponat „Burn Out" von Ina Jänicke (oben links) und „TIRIEL" von Adolfo Siurana (oben).

So sind die benachbarten Neurologen vom Klinikum Benjamin Franklin der Charité und die Physiker und Ingenieure von der PTB vor einigen Jahren ein Team geworden. Die einen, die zusehen möchten, wie Menschen denken und Gesichter erkennen, und die anderen, die die besten Magnetsensoren bauen und wissen, wie man das Erdmagnetfeld „raushält". Der futuristische silberne Würfel auf dem PTB-Gelände zeigt, wie das demnächst, wenn der Innenausbau abgeschlossen ist, noch besser funktioniert: Außen sorgen zuerst stromdurchflossene Spulen für eine Art „Killermagnetfeld", das dem Erdmagnetfeld entgegenwirkt, dann kommen sieben Schichten einer

besonderen Metall-Legierung und eine Alu-Schicht, die die verbleibenden Magnetfeldlinien vom Innenraum wegbiegen. Die magnetische Umgebung wird mehr als zehnmillionenfach – das sind immerhin schon sieben Größenordnungen – abgeschwächt! Wer hier sein Handy mit hinein nimmt, kann mit Ärger rechnen: Die erfolglosen Versuche des Handys, in der abgeschirmten Kammer ein Netz zu finden, würden es zu immer stärkeren elektromagnetischen „Hallo-hier-bin-ich"-Signalen veranlassen; die Sensoren würden verrückt spielen.

Für eine Testreihe zur Gesichtererkennung haben sich auch Schüler aus zwei Berliner Schulklassen in eine solche Kammer bei der PTB gelegt: ganz still auf eine schmale Pritsche, den Kopf in einer Haube, in der sich die SQUIDs befinden. Außerdem kleben am Kopf die Elektroden für das EEG, das parallel das elektrische Potenzial auf der Kopfhaut misst. Es ist nicht nur fast völlig entmagnetisiert in der Kammer, sondern auch absolut still – Geräusche würden Reaktionen im Hirn erzeugen, und solche Reaktionen sind gerade nicht erwünscht. Es geht ja um Gesichter. Sie erscheinen als Bilder auf einer Projektionsfläche überm Kopf: Zuerst das Gesicht, das wiedererkannt werden soll, dann andere Gesichter und Motive, zwischendurch das „richtige" Gesicht.

Die PTB-Leute konnten dabei schon etwas sehr Erstaunliches messen: „Oh, ein Gesicht – kein Auto!", ist eine besondere Reaktion. „Bei Gesichtern wird automatisch ein Extra-Prozess in Gang gesetzt", erklärt Lutz Trahms. Über den Grund dafür können er und seine Kollegen aus der Arbeitsgruppe „Biomagnetismus" nur spekulieren. Evolutionäre Entwicklung? Kriegsvorteile, wenn man die eigene Sippe sofort erkannte? Auch Neurowissenschaftler wissen noch nicht, ob es einen genetischen Code gibt, der die gute Gesichtererkennung quasi frei Haus liefert, oder ob es die vielen Gesichter sind, die wir täglich sehen, die uns für eine schnelle Erkennung schulen.

Das herauszufinden sei ein Ziel der Forscher, erklärt Joachim E. Weber, der zwar auch Physiker ist, aber als Medizindoktorand der Charité an dem Projekt arbeitet. Dazu müssen die Wissenschaftler unter anderem wissen, welche „Module" bei der Gesichtserkennung beteiligt sind. Ihr zweites Interesse gehört den Patienten und ihrem Handicap. Um Kriterien zu finden, ab wann eine schlechte Gesichtserkennung als Krankheit gilt, haben sie erstmals eine ganze Gruppe von Prosopagnosie-Patienten untersucht. Es gibt, das wissen sie inzwischen, klare Unterschiede zur Vergleichsgruppe. Allerdings gibt es vermutlich auch einen Übergangsbereich, in dem die Diagnose nicht eindeutig sein wird.

Wenn man inzwischen schon „sehen" kann, wie jemand ein Gesicht erkennt oder Musik hört – auch das schaffen die PTB-Leute –, kann man dann möglicherweise auch erkennen, ob man das Gesicht mag oder die Musik schrecklich findet? Noch nicht, aber Weber ist überzeugt: „Wir sind messtechnisch so weit, dass es künftig auch in Richtung Emotionen gehen könnte".

So merkwürdig es klingt: Auch das 15 Größenordnungen größere Magnetfeld des MRT hilft dabei. Hier wird das Magnetfeld nicht direkt gemessen, eher ist es eine Art elektromagnetische Antwort der Körpermoleküle auf das Magnetfeld, die in ein Bild übersetzt wird. In diesem MRT-Bild sieht man ganz genau, wo etwas passiert. Die Daten, die mit Hilfe der SQUIDs in der entmagnetisierten Kammer aufgenommen werden, verraten dagegen extrem genau, wann eine Reaktion passiert. Beide Methoden ergänzen sich ideal.

Aufpassen sollte man nur, dass man nicht erst in den MRT geht und dann direkt danach zwölf magnetische Größenordnungen tief in die „magnetisch stille" Kammer taucht. Vor allem dann nicht, wenn man, wie Weber es ausdrückt, „viel Draht im Kiefer" hat. Es will ja niemand die Felder magnetisierter Zahnspangen messen ...

Julia Förster

Der Lotus-Effekt im Badezimmer

In der Werbung sieht das immer proper aus: Erst Reiniger aufsprühen, dann mit Wasser abbrausen und – schwuppdiwupp – macht die trübe Kachel jedem Spiegel Konkurrenz. Seifenreste, Kalk und Flecken – wie von Zauberhand entfernt. Mein Bad widersetzt sich derartiger Magie. Erst die handfeste Zuwendung von Schwamm und Tuch sorgt hier für Glanzeffekte, die leider nur von kurzer Dauer sind.

Die Natur ist uns zivilisierten Sauberkeitsfanatikern dagegen weit voraus: Sie hat Oberflächen, die sich selbst reinigen, hervorgebracht und im Laufe der Evolution perfektioniert. Das Phänomen heißt Lotus-Effekt* und wurde Mitte der 1970er Jahre am Botanischen Institut der Universität Bonn von Wilhelm Barthlott und seinem Team entdeckt und zwanzig Jahre später ausführlich beschrieben. Die Bezeichnung Lotus-Effekt geht auf eine Pflanze zurück, die in der hinduistischen Religion von jeher als Symbol der Reinheit gilt: die heilige Lotusblume. Ihre Blätter entfalten sich trocken und makellos sauber aus dem Schlamm der Gewässer. Im Gegensatz zu meinen Fliesen und Kacheln perlen Wassertropfen von den Blättern der Lotusblume einfach ab und entfernen dabei alle Schmutzpartikel. Wie schafft sie das so mühelos?

Fotos (4): W. Barthlott

Die heilige Lotusblume: Symbol der Reinheit in asiatischen Religionen. Sie wurde schon vor Jahrhunderten in Sanskrittexten erwähnt.

Doppelt genoppt

„Das Geheimnis der Selbstreinigung liegt in der Mikrostrukturierung der Blattoberfläche und in aufgelagerten, wasserabstoßenden Wachskristallen in Nanometer-Größe“, erklärt Diplom-Biologe Manuel Spaeth vom Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen an der Uni Bonn. Ein Blick durchs Raster-Elektronenmikroskop zeigt: Die Grenzschicht des Lotusblattes gleicht einer genoppten Fläche. Sie ist also keinesfalls glatt wie die meisten unserer technischen Oberflächen, sondern extrem aufgeraut. Die Wachse bilden dreidimensionale, bizarr aussehende Strukturen in der Größenordnung von millionstel Millimetern (Nanometern). Sie sorgen unter anderem für Wärmeregulierung, Reflexion von Strahlung und Einschränkung der Benetzbarkeit.

Die Wissenschaftler konnten die Selbstreinigung auch an vielen anderen Pflanzen wie Kohl, Schilf und Kapuzinerkresse sowie an Tieren nachweisen. So haben die Flügel von Libellen oder Schmetterlingen selbstreinigende Oberflächen, die ein Höchstmaß an Sauberkeit auch dort sicherstellen, wo die Insekten Verunreinigungen nicht mit Hilfe ihrer Beine entfernen können.

Die Voraussetzung für eine saubere Oberfläche ist also eine raue Oberfläche. Auf solch mikro- und nanorauen Grenzflächen finden Wassertropfen keinen Halt. Sie ziehen sich wegen ihrer eigenen Oberflächenspannung zu einer Kugel zusammen und liegen wie ein Fakir auf dem Nagelbett nur auf den äußersten Spitzen der ultrafeinen Struktur auf. Durch die extrem verminderte Kontaktfläche werden die Haftungskräfte (Adhäsion) zwischen Wassertropfen und Oberfläche auf ein Minimum reduziert. Schon bei geringster Neigung des Blattes beginnen die Tropfen zu rollen. Erfassen sie dabei Schmutzkörnchen, bleiben diese an den Tropfen haften, da die Adhäsionskräfte zwischen Wasser und Partikel größer sind als die zwischen Oberfläche und Partikel. Die Schmutzkörnchen werden mit den abrollenden Tropfen weggespült.

Hier bleibt kaum etwas haften: biologische Oberfläche mit Mikronoppen(Zellen) und Nanonoppen (Wachskristalle)

* Der Begriff Lotus-Effekt® ist markenrechtlich geschützt. Er wird, der Kürze wegen, in diesem Artikel zur Beschreibung selbstreinigender, superhydrophober Oberflächen verwendet.

Fazit: Meine Kacheln im Bad benötigen zur Selbstreinigung eine raue, wasserabweisende Schicht! Da der Lotus-Effekt ein physikalisch-chemisches Phänomen ist, lässt er sich in technische Anwendungen umsetzen, ist also ein klassischer Fall für die Bionik. Ein Beispiel: In den Forschungslabors der Degussa Goldschmidt AG in Essen wurde in Kooperation mit der Degussa-Tochter Creavis ein Wirkstoff namens Tegotop 105 entwickelt, der aufgesprüht wird und mit dem sich ein flüssiger Wachsfilm auf Oberflächen auftragen lässt. „Das Spray erzeugt eine dem Lotusblatt ähnliche Struktur, die behandelten Oberflächen zeigen die gleichen selbstreinigenden Eigenschaften“, erläutert Volker Schlicht, Chemiker in der Anwendungstechnik bei Goldschmidt Home Care, die Neuentwicklung, die allerdings noch nicht auf dem Markt erhältlich ist.

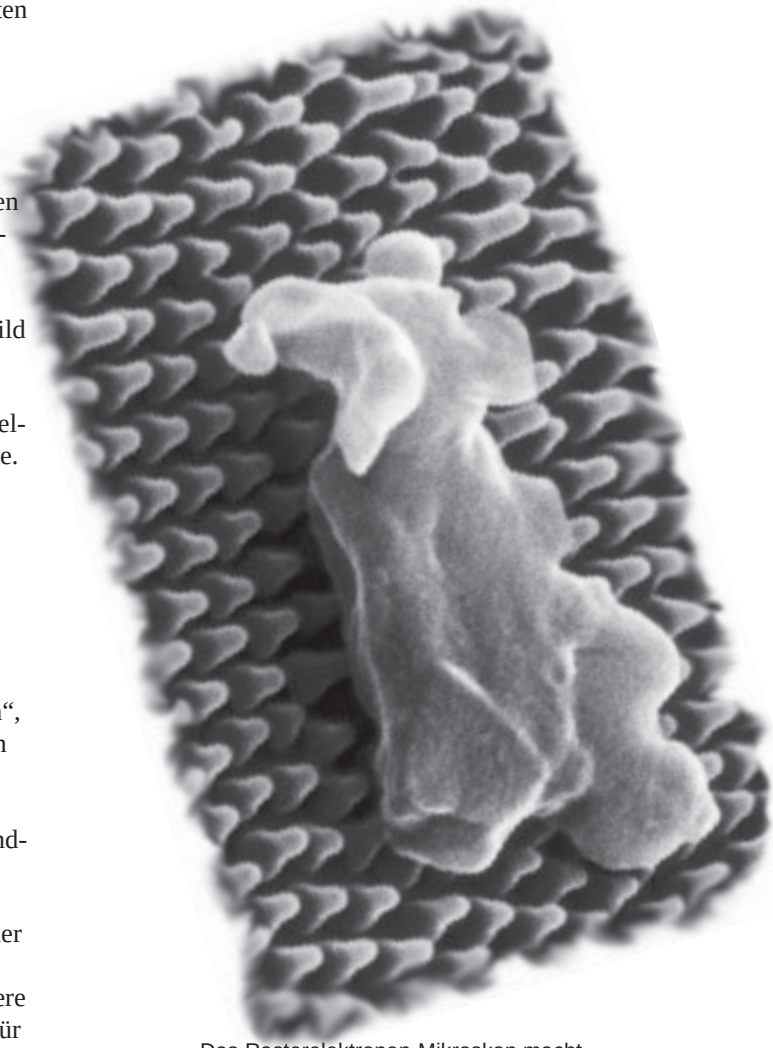
Nie wieder Auto waschen

Ich bin begeistert und sehe mich schon mit der Spraydose in der Hand durch die Wohnung eilen, um mein Mobiliar mit selbstreinigenden Oberflächen zu überziehen. Zu früh gefreut. Denn der Lotus-Effekt wirkt ja nur, wo verschmutzte Flächen Regen ausgesetzt sind oder mit Wasser abgespült werden können. Schreibtisch, Schrank und Bücherregal scheiden damit aus. Leider auch die Fußböden. „Mikrostrukturierte Oberflächen sind sehr anfällig gegenüber mechanischen Belastungen – wie bei den Pflanzen auch“, begründet Schlicht. Schon leichtes Reiben kann die sensible Wachsschicht und damit die selbstreinigende Wirkung zerstören. Auch Tenside, die in den meisten Reinigungsmitteln enthalten sind, machen den Lotus-Effekt zunichte. Erfolgreicher sähe mein Spray-Einsatz draußen aus, zum Beispiel bei den Gartenmöbeln. Sorgfältig eingesprüht, wird mit dem nächsten Regenguss jeglicher Schmutz von Liege, Stuhl und Tisch entfernt. Der Blick wandert weiter zur Garage: Man stelle sich das eigene Auto mit den Eigenschaften eines Lotusblattes vor! Jeder kurze Schauer würde die Waschstraße überflüssig machen. Und das ganz ohne Einsatz von chemischen Reinigern. Die Umwelt könnte aufatmen. Die Lackindustrie tüftelt hier bereits an Lösungen nach dem Vorbild der Natur.

Die Herausforderung für die Forscher liegt dabei in der Herstellung einer dauerhaft mikro- und nanostrukturierten Oberfläche. Die Pflanze ist hier klar im Vorteil: Bei beschädigter Grenzschicht hilft sie sich selbst und erneuert innerhalb weniger Stunden die defekte Oberfläche, bis die Selbstreinigung wieder funktioniert. Dabei geht es ihr weniger um ein makelloses Aussehen. Der Lotus-Effekt ist vielmehr eine raffinierte Methode, sich gegen den Befall von Mikroorganismen zu wehren. „Unbenetzbarkeit bedeutet für die Pflanze immer auch einen Schutz vor der Besiedlung mit Krankheitserregern“, sagt der Biologe Spaeth. „Pilzsporen werden bei jedem Regen abgewaschen, und falls es eine Zeitlang nicht regnet, fehlt ihnen das nötige Wasser für die Keimung.“ Damit wäre auch mein Holzzaun ein Kandidat für eine ausgiebige Spray-Behandlung.

Wissenschaft und Industrie sind zuversichtlich, dass es in naher Zukunft eine ganze Reihe weiterer Produkte mit Lotus-Effekt geben wird. Also nur Geduld. Schließlich hat die Natur mehrere Millionen Jahre gebraucht, um ihre Systeme zu optimieren. Für die Reinigung meines Bades bedeutet das allerdings: Der Griff zu Schwamm und Scheuermittel bleibt mir vorerst nicht erspart.

NICOLE GEFFERT



Das Rasterelektronen-Mikroskop macht sichtbar, warum Insektenflügel sauber bleiben: Die nanostrukturierte Oberfläche bietet dem Schmutzpartikel keinen Halt.

Manchmal esse ich mein Würstchen ohne Senf

Oder Pommes. Dann sage ich: „Einmal Pommes ohne alles“. Dann gibt’s Pommes ohne Mayo und ohne Ketchup. Vielleicht ginge es auch noch ohne Salz. Das müsste man extra sagen: „Pommes – ohne alles, und bitte ohne Salz.“ Dann gibt’s die reinen Pommes, die Pommes an sich sozusagen. (Der Kommentar vom Pommesverkäufer geht allerdings extra ...)

Wieviel Gramm mehr wiege ich nach der Portion Pommes ohne alles? Direkt nach dem Essen, zehn Minuten nach dem Essen, dreißig Minuten nach dem Essen, vier Stunden nach dem Essen, acht Stunden nach dem Essen (inzwischen schwer feststellbar, aß eine Erbsensuppe, vor dreißig Minuten).

Was die Sache verkompliziert, ist der Gewichtsverlust durch Bewegung – bin nach Hause gegangen, cirka zwanzig Minuten – und Aufregung – habe mit xy telefoniert, musste mich verteidigen und notlügen – dann etwas nachgedacht ...

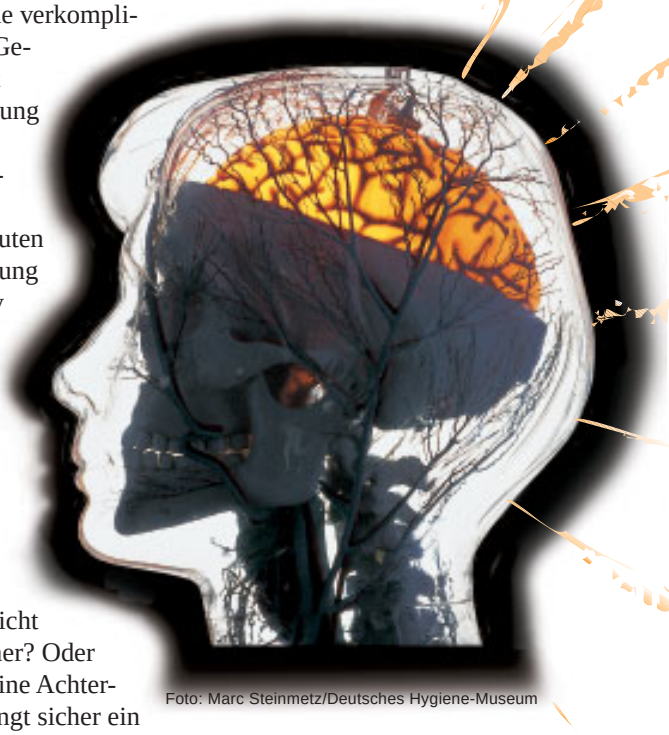


Foto: Marc Steinmetz/Deutsches Hygiene-Museum

Kummer! Wieviel Gewicht kostet Kummer? Oder auch Spaß. Eine Achterbahnfahrt bringt sicher ein paar Gramm weniger ...

Jetzt muss ich doch lachen, weil ich denke, könnte auch eine Diätempfehlung sein, was ich hier zusammenstelle: Bitte achten Sie auf die nötigen Kohlenhydrate. Lebenswichtig sind Vitamine. Aber die kann man nicht sehen, soweit ich weiß. Wussten Sie, dass ihr Körper Vitamin D bildet, wenn Sie Sonne an ihre Haut lassen? Macht alles die UV-Strahlung. Also: Nach dem Sonnenbad ist ein Vitamin da, wo vorher keines war. Was mag ein Vitamin wiegen? Merkt das meine Waage? Oder versuche ich jetzt gerade Licht zu wiegen?

Wo ich schon bei so schwierigen Fragen bin: Was wiegt eigentlich meine Seele? Wahrscheinlich kann ich diese Frage erst beantworten, wenn es mich das Letzte gekostet hat, mein Leben. Denn dann gibt es kein Ich mehr, das ein Etwas wiegt. Nur noch der Körper ohne mich, der dann ja etwas leichter sein müsste. Wie viel leichter?

Es war der amerikanische Arzt Duncan MacDougall, der 1907 Sterbende vor und nach Eintritt des Todes wog. MacDougall war auf der Suche nach dem Gewicht der menlichen Seele. Der Arzt war davon überzeugt, dass die Seele des Menschen eine materielle Substanz hat. Im Augenblick des Todes verlässt sie den Körper gen Himmel, Hölle oder Fegefeuer; das schien ihm nur folgerichtig. Um den plötzlichen Verlust zu ermitteln, stellte er ein Bett auf vier Waagen, suchte sich sechs Patienten, die an einer schweren Krankheit im Endstadium litten, und maß dann das Gewicht vor und nach dem Ableben der Probanden. Bei einem der Sterbenden stellte er tatsächlich einen Gewichtsverlust von einer Dreiviertelunze im Moment des Todes fest – das sind ziemlich genau 21 Gramm.

21 Gramm weniger wiegt der unbeseelte Körper nach dem Tod. Das einmalige Messergebnis wurde zum Mythos von Sektierern. Später versuchte MacDougall, die Seele zu fotografieren.

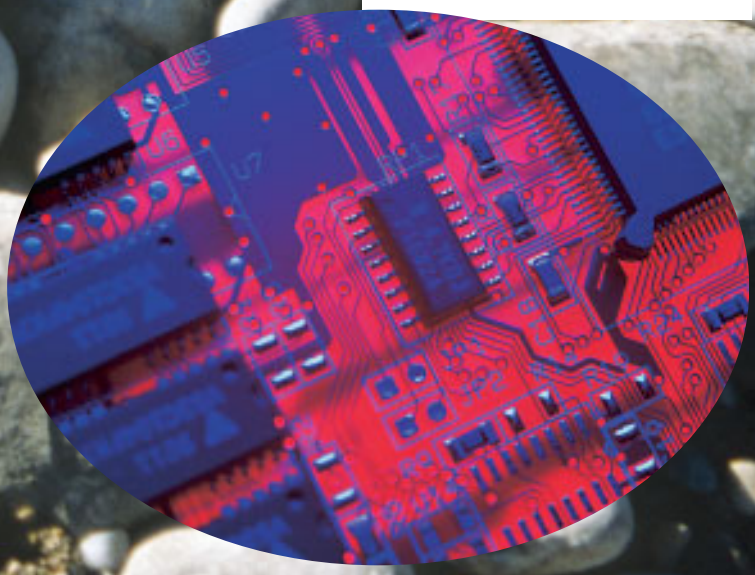
Was bei diesem Versuch überrascht, ist das Jahr, in dem er unternommen wird. Wirklich 1907, während Einstein an der Relativitätstheorie arbeitet? Verrückt, was alles so gleichzeitig passiert. Halt, jetzt sehe ich es vor mir: Es ist ein Gemälde aus dem 16. Jahrhundert. Eine melancholische Parabel auf die Vergänglichkeit, gemalt von einem italienischen Meister. Der Forscher sitzt in einem dunklen Raum an einem schweren Tisch, liest sein Messgerät ab und will das Ergebnis notieren. Durch ein seitliches Fenster fällt ein diffuser Lichtstrahl. Der Forscher setzt den Stift an, während ihm ein Engel über die Schulter sieht. Sein Gewand schimmert im Lichtstrahl und in der leicht geöffneten Hand hält er sanft umschlossen einen toten Fink.

Birgit Ehlbeck

Sand

Fotos: Ansichtssachen (großes Foto), f1 online (kleines Foto)

Die Architektur unserer Zeit versteckt sich gern in mausgrauen Kästen. Die Mikrochips in unseren Computern werden daher selten mit Architekturpreisen geehrt. Aber die Baukunst auf ihnen ist beachtlich – Millionen von Gebäuden sind dort durch ein kompliziertes Straßennetz miteinander verbunden. So groß ist die Anzahl der Transistoren, die bei den heutigen Prozessoren auf jeden Quadratzentimeter gepackt sind. Um solch ein briefmarkengroßes technisches Wunderwerk herzustellen, braucht man Kies, Strom und jede Menge Hightech. Wer die Herstellung eines Chips von Anfang an verfolgen will, reist zuerst am besten nach Norwegen. Im Kiesbett an einer Gletscherzunge wird er ihn finden – den Stoff, aus dem die Chip-Träume sind: Silizium.



Eine Metropole im Briefmarkenformat

Foto: f1 online

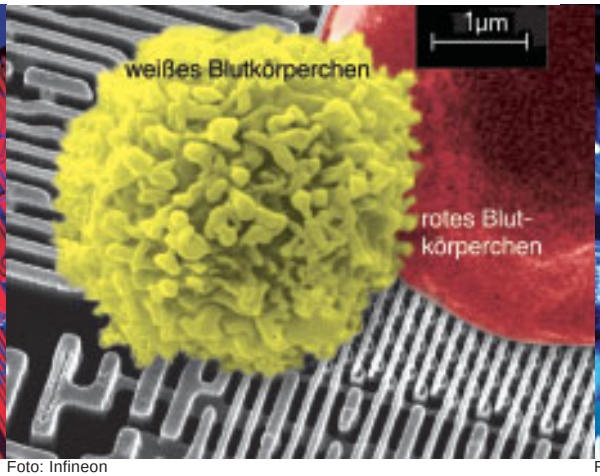


Foto: Infineon

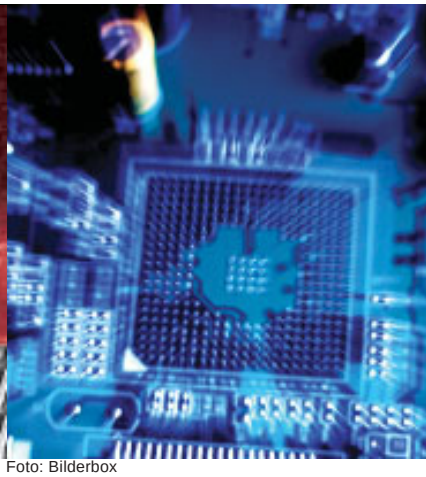


Foto: Bilderbox

Erster Tatort: eine Kiesgrube in Norwegen. Aus Quarzbrocken und Kieseln produziert die norwegische Firma Elkem jährlich etwa 200 000 Tonnen Silizium, rund 18 % der Weltjahresproduktion. Den größten Teil davon brauchen die Aluminium- und die Chemieindustrie, 4 bis 5 Prozent sind für die Elektronikindustrie bestimmt. Silizium ist nach dem Sauerstoff das zweithäufigste Element der Erdkruste. Es kommt nicht in reiner Form, sondern nur in Verbindungen wie zum Beispiel Siliziumdioxid – schlichter Quarz – vor.

In speziellen Öfen werden die Quarzbrocken und Kiesel mit kohlenstoffhaltigem Material wie Kohle, Koks oder Holz gemischt und den gleißend hellen elektrischen Lichtbögen von 1,20 Meter dicken Kohleelektroden ausgesetzt. Dafür sind enorme Mengen an elektrischer Energie nötig – etwa 11 000 Kilowattstunden pro Tonne Silizium –, die von norwegischen Wasserkraftwerken geliefert werden. Wo die Lichtbögen in das Quarz-Kohle-Gemisch einschlagen, bricht eine bis zu 2400 Grad heiße Hölle los. Dabei trennt sich das Silizium vom Sauerstoff, der anschließend den Kohlenstoff bindet. Übrig bleibt flüssiges Silizium, das man reinigt und erkalten lässt. Am Ende hat das Silizium einen Reinheitsgrad von 97 bis 99 Prozent.

Das gewonnene Silizium muss allerdings noch wesentlich reiner werden, damit es sich für die Chipfertigung eignet. Dazu lässt man es mit Salzsäure reagieren. Es entsteht Trichlorsilan, eine leichtflüchtige, siliziumhaltige Substanz, die abdampft und dabei fast alle Verunreinigungen zurücklässt. Anschließend lässt man das Trichlorsilan mit Wasserstoff in einer elektrischen Entladung reagieren. Dabei entsteht reines Silizium, das sich auf dünnen vorgefertigten Siliziumstäben in Form von kleinen Kristallen abscheidet. Dieses polykristalline Silizium hat eine Reinheit von 99,999 99 % und mehr! Doch es eignet sich noch immer nicht für die Chipherstellung. Seine Kristallstruktur ist viel zu ungeordnet

Für die Chips benötigt man perfekt kristallisiertes Silizium, bei dem jedes Atom im Kristallgitter auf dem richtigen Platz sitzt, in Form von dünnen Scheiben (Wafern). Je größer der Durchmesser eines Wafers, umso mehr Chips kann man später auf ihm anlegen. Darum hat sich die Fläche von Wafern etwa alle zehn Jahre verdoppelt. Seit den 1990er Jahren sind 200-mm-Scheiben Standard, von denen jährlich weltweit so viele Exemplare produziert werden, dass sie eine Fläche von etwa 2,6 Quadratkilometern bedecken. Im Jahr 2002 hat man begonnen, zu 300-mm-Wafern überzugehen, auf die gut doppelt so viele Chips passen. Das senkt die Herstellungskosten pro Chip um etwa 30 Prozent, trotz enormer Investitionskosten für die neue Technologie.

Zweiter Tatort: ein Werk der Siltronic AG, die als einzige europäische Firma schon 300-mm-Wafer produziert. Im ostbayrischen Burghausen und im sächsischen Freiberg werden in elektrisch beheizten Quarztiegeln die Stücke des polykristallinen Siliziums geschmolzen. In die rotierende Schmelze wird ein Siliziumstift mit perfekter Kristallstruktur als „Impfkristall“ getaucht. An ihn lagern sich die Siliziumatome aus der Schmelze an. Zieht man den Impfkristall sehr langsam aus der Schmelze heraus, so kommt ein perfekter Einkristallzylinder zum Vorschein. Es dauert ein bis drei Tage, bis man einen zwei Meter langen und rund 250 Kilogramm schweren Einkristall erhält. Der Einkristall wird in 0,9 Millimeter dicke Scheiben zerschnitten, die anschließend geschliffen, geglättet, gereinigt, mit Säure behandelt und getrocknet werden. Die Oberfläche wird dann mit unterschiedlichen Materialien beschichtet, versiegelt und poliert. Jetzt ist der Wafer bereit für die Chipfabrik.

Dritter Tatort: Dresden, wo Infineon in der modernsten Chipfabrik Europas Siliziumscheiben im 300-mm-Format verarbeitet. Die Fabrik, so groß wie ein Fußballstadion, hat 1,1 Milliarden Euro gekostet. Hier werden Speicherchips hergestellt, so genannte 256-Mbit-DRAMs, deren kleinste Strukturen 110 Nanometer groß sind. Der Produktionsprozess erfordert extreme Reinheit. Schon ein einzelnes Staubkörnchen kann viele Chips unbrauchbar machen. Deshalb muss die Luft in den Produktionshallen gründlich gereinigt werden. Die Mitarbeiter in der Produktion tragen eine besondere Schutzkleidung, die nur die Augen unverhüllt lässt. Sie dürfen schon zwei Stunden vor Arbeitsbeginn nicht mehr rauchen.

Die Wafer werden zu je 25 Stück in hermetisch verschlossenen Transportbehältern durch die Fabrik geschleust. Die Behälter docken an die ebenfalls hermetisch verschlossenen Maschinen an, in denen die Wafer bearbeitet werden. So muss man nur die Luft in den Transportbehältern und Maschinen und nicht die gesamte Hallenluft auf die nötige extreme Reinheit bringen. Die Maschinen haben die Größe von Autogaragen und sind entlang von Gassen angeordnet, die sich quer durch die Fabrikhallen ziehen. In einigen Maschinen bleiben die Wafer nur wenige Minuten, in anderen werden sie stundenlang bearbeitet. Ein vollautomatisches Transportsystem bringt die Waferbehälter von einer Maschine zur nächsten, dockt sie an oder legt sie in Vorratslagern ab. Roboter nehmen die Wafer aus den angedockten Behältern und führen sie in die Maschine ein, die jeweils einen bestimmten Bearbeitungsschritt ausführt.

Menschen sieht man nur wenige in den heiligen Hallen, und die meisten von ihnen überwachen die Produktion am Computer. Ralf Zedlitz, der für den reibungslosen Ablauf der Produktion verantwortlich ist, erklärt: „Während die Wafer in vorprogrammierter Reihenfolge die verschiedenen Maschinen durchlaufen, werden Oberflächenschichten hinzugefügt, verändert und hier und da wieder weggenommen.“ Um eine neue Schicht auf den Wafer aufzutragen, wird die Oberfläche mit dem gewünschten Material bedampft. Außerdem wird das Silizium mit Bor- oder Phosphoratomen beschossen. „Das ist eine gezielte Verunreinigung, um die elektrischen Eigenschaften zu verändern“, fährt Ralf Zedlitz fort. In die gerade aufgetragenen Schichten ätzt man mit Hilfe von Säuren oder elektrisch geladenen Gasen nach vorgegebenen Mustern wieder Löcher hinein. Auf diese Weise entsteht eine komplizierte Schichtstruktur aus verschiedenen Halbleitermaterialien, metallischen Leitungsbahnen und elektrisch isolierenden Zwischenschichten.

Fotos: Siltronic

„Dann belichten wir den Wafer wie einen Film“, erklärt Ralf Zedlitz. Er wird mit einem lichtempfindlichen Fotolack überzogen, eine „Maske“ davorgehalten und das Ganze mit UV-Licht belichtet. Solch eine Maske ist eine dünne Glas- oder Quarzscheibe, die teilweise mit einer lichtundurchlässigen Chromschicht bedeckt ist. Nach der Belichtung wird der Wafer in ein chemisches Bad getaucht, das den Lack an den belichteten Stellen ablöst. Die freigelegten Flächen können weggeätzt werden, während die vom unbelichteten Lack bedeckten Flächen geschützt sind. Schließlich wird der restliche Lack durch ein Lösungsmittel entfernt und der Wafer ist bereit für den nächsten Bearbeitungsschritt.

Insgesamt durchlaufen die Wafer 300 bis 600 Bearbeitungsschritte. Dabei können sie mehrere Wochen in der Chipfabrik unterwegs sein. Am Ende werden sie in einzelne Chips zersägt, jeder Chip wird in ein Gehäuse gesteckt und durch dünne Golddrähte mit den elektrischen Kontakten des Gehäuses verbunden. Fertig! Allerdings muss noch die Funktionsfähigkeit des Chips geprüft werden. Rund 95 % der Chips bestehen den Test und können in elektronische Geräte eingebaut werden. Viele der in Dresden produzierten Chips findet man in Mobiltelefonen wieder, die unter anderem in Skandinavien gefertigt werden. So schließt sich der Kreis, der mit unscheinbaren norwegischen Kieseln begonnen hatte.

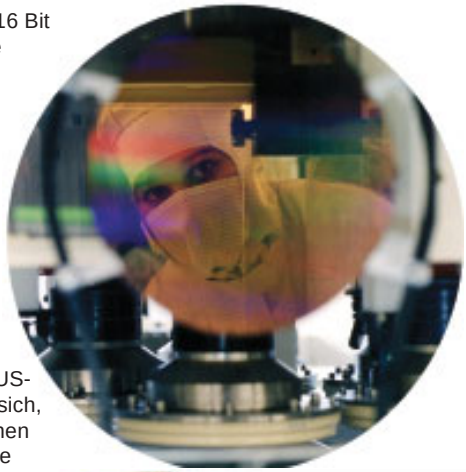
Rainer Scharf

Später wird er in Scheiben zersägt. Und diese, nochmals später, in ganz viele Chips. Doch am Anfang ist er ganz er selbst: Ein Einkristall von stattlicher Größe, die einem Baumstamm Konkurrenz machen könnte. Der Geburtsort dieses Siliziumriesen: Freiberg bei Dresden. Die Siltronic AG züchtet hier Kristalle mit einem Durchmesser von bis zu 300 Millimetern.

Enzyklopädie auf einem Stecknadelkopf

Ohne Mikrochips geht heute nichts mehr. Die elektronischen Winzlinge begleiten uns durchs Leben, ob wir mit dem Handy telefonieren, im Internet surfen, mit dem Auto fahren, bargeldlos bezahlen oder uns vom Computertomographen durchleuchten lassen. Unermüdlich sammeln, speichern und verarbeiten die Chips riesige Datenmengen. Sie steuern hochkomplexe Prozesse in Fabriken und Kraftwerken, in Verkehrs- und Datennetzen. Unsere moderne Industriegesellschaft wäre ohne Mikrochips nicht lebensfähig. Elektrizität, Gas, Wasser und Telefon fielen aus, Personen- und Güterverkehr, Informations- und Geldströme kämen zum Stillstand.

Dabei ist der Mikrochip eigentlich noch recht jung. Anfang der 1960er Jahre brachten mehrere Firmen in den USA die ersten integrierten Schaltungen auf den Markt. Diese Integrated Circuits oder ICs enthielten nur eine Handvoll Transistoren und andere elektronische Bauelemente, die in ein Kristallplättchen aus Germanium oder Silizium eingebettet waren.



Die ersten Speicher-ICs von 1966 konnten gerade einmal eine Datenmenge von 16 Bit fassen und damit eine Zahl zwischen 0 und 65 535 speichern. Ende 1970 brachte die Firma Intel den „1103“ heraus, der 1024 Bit speichern konnte. Schon 1964 hatte der Intel-Mitbegründer Gordon Moore vorausgesagt, dass sich die Zahl der elektronischen Bauelemente auf einem IC etwa alle 18 Monate verdoppeln werde. Er sollte recht behalten, es ging tatsächlich in diesem Tempo voran – eine Tatsache, die heute als Moore'sches Gesetz bekannt ist. Heutige Speicherchips haben mehr als eine Milliarde Bauelemente und können 1 Gigabit (1 Milliarde Bit) an Daten fassen. Auch die Mikroprozessoren, die die Daten verarbeiten, haben eine ähnlich rasante Entwicklung durchgemacht. Der erste, 1971 von Intel entwickelte Mikroprozessor enthielt 2250 Transistoren. Bei heutigen Prozessoren kommen auf jeden Quadratzentimeter viele Millionen Transistoren.

So viele Bauelemente lassen sich nur dank extremer Miniaturisierung auf einem Chip unterbringen. Über die Grenzen dieser Verkleinerung hatte schon 1960 der US-Physiker und spätere Nobelpreisträger Richard Feynman nachgedacht. Er fragte sich, ob es physikalisch möglich sei, den Inhalt einer vielbändigen Enzyklopädie auf einen Stecknadelkopf zu schreiben. Dazu müsste man Strukturen in die Metalloberfläche graben, die einige Nanometer (millionstel Millimeter) messen und damit nur etwa zehnmal so groß sind wie ein Eisenatom. Inzwischen ist man der Verwirklichung von Feynmans Vision schon sehr nahe. Mit der extrem feinen Spitze eines Rastertunnelmikroskops hat man einzelne Atome oder Moleküle auf Metalloberflächen verschoben und zu Bildern und Schriftzügen angeordnet.

Auf diese Weise einen Mikrochip herzustellen würde jedoch viel zu lange dauern. Die Halbleiterindustrie hat andere Wege gefunden, Hunderte von Chips gleichzeitig auf eine tellergroße Siliziumscheibe, einen so genannten Wafer, zu „schreiben“. Dabei sind die kleinsten Details auf den Chips inzwischen weniger als 100 Nanometer groß. Und die Miniaturisierung wird noch weiter fortschreiten. In zehn Jahren sollen mit extrem kurzwelligem UV-Licht Strukturen von weniger als 30 Nanometern Größe auf die Wafer geschrieben werden. Bis die atomaren Grenzen der Miniaturisierung erreicht sind, wird es noch ein Weilchen dauern.

rs

Bilder: Ist das Silizium erst einmal in tellergroße Scheiben zersägt, ist es reif für die Reinraumzentren in den Chipfabriken, wie hier bei Infineon, Dresden. Hunderte von Fertigungsschritten sind jetzt nötig, um alle gewünschten Mikrostrukturen auf das Material zu „schreiben“ – für Speicherchips als Endprodukt.

Fotos (4): Infineon

Eine Reise

0:00 min: Eine Flasche wird entkorkt. Eingießen.

0:06 min: **(Stimme 1, ziemlich lallend)** So, noch ’ne Flasche. Irgendwann muss sie doch kommen, die verdammte Inspiration. Der Chef hat gut reden: „Mach ein Feature draus“. Eine bunte Geschichte über Staub, oh Mann. Wenn es wenigstens fürs Fernsehen wäre, da könnte man schön ranzoomen und jede Menge Mikroskopbilder bringen. Aber Radio! 10 Minuten lang. Klar bringt das Geld – aber wo soll ich bloß die O-Töne herholen? Aktuelle Aspekte reichen dem Herrn ja auch nicht. Das sagt sich so leicht: „Mach es schön historisch – das Allerkleinste, Unsichtbare, das hat doch schon die Römer fasziniert. Und bring die Ambivalenz rein, wie die Menschen einerseits fasziniert waren, aber andererseits furchtbare Angst hatten vor den Dingen, die sie nicht sehen konnten.“ Ja, ja, mit mir kann er’s ja machen, der Herr. Prost Mahlzeit.

0:53 min: Trinken. Lärm kommt näher, es wird sehr laut: Poltern, Wirbeln, Heulen, Rauschen.
1:06 min: Es wird langsam still. Schritte nähern sich. Eine paar Steine werden weggeschoben, Knirschen, leichtes Poltern.

0:58 min: **(Stimme 1, panisch)** Himmel, was soll das? Alles dreht sich. Und was sollen die riesigen schwarzen Felsbrocken. Hilfe!

1:13 min: **(Stimme 2, bedächtig)** Siehst du, mein lieber Lucius, die Vulkanasche auf meiner Hand? Vor sechs Jahren hat dieser feine Staub hier in Pompeji Tausende von Menschen erstickt. Er war viel gefährlicher als all das flüssige Gestein, das sich den Berg hinabgewälzt hat. Schau sie genau an, die feinen Staubkörnchen. Und glaube mir, sie scheinen nur so winzig. In Wahrheit sind sie gigantisch groß. Wirklich klein sind ihre einzelnen Bestandsteile, die Atome. So hat Lukrez sie genannt, der berühmte Philosoph aus Rom. Damals wie heute hat ihm niemand glauben wollen. Verspottet wurde er, weil er niemandem diese Atome zeigen konnte. Nur mein Urgroßvater, der damals noch ein Junge war wie du, war sein gelehriger Schüler. Unsere Familie führt diese Denktradition fort. Und du kannst gewiss sein: Eines Tages wird sie berühmt und geachtet sein, die Theorie der Atomisten. So, und jetzt zeige ich dir noch etwas ...

2:00 min: Poltern (Steine werden auf den Boden geworfen.)

2:03 min: Stimme wird leiser, Schritte entfernen sich. Aus der Stille heraus löst sich ein Brodeln und Zischen.

2:09 min: **(Stimme 1, stöhnend)** Ohje, was für ein Sturz. Mir tut alles weh. Und wo bin ich denn jetzt? Nichts mehr mit arkadischer Landschaft. Kann hier mal einer das Fenster öffnen, das stinkt ja nach Schwefel! Aber – das kann nicht wahr sein – nein, ich will nicht in diesen Topf, da drin kocht ja was, nein, bitte nicht ...

Foto: Phototake, Mauritius

2:23 min: Es brodelt weiter, Feuer knistert, Gerätschaften klappern.

2:27 min: **(Stimme 3, schreiend, sich überschlagend)** Bürger dieser Stadt, kommt herbei, tretet näher, schaut euch das an! Ich werde euch jetzt etwas Sensationelles präsentieren, etwas noch nie Dagewesenes. Seht diesen Tiegel. Dieses Häufchen Metallstaub darin. Seht ihr seine schmutzige Farbe? Unedles Metall. Doch schon bald wird es das Edelste sein, das es auf Erden gibt: Gold! Sein Glanz wird mich berühmt machen. Und ihr werdet später allen erzählen können, dass ihr dabei gewesen seid, als ich, der große Miracolo, der berühmte Zauberer, den Stein der Weisen fand. Schaut genau hin, verpasst nicht dieses große Ereignis! Ich beginne mit der ersten Stufe der Verwandlung, dem Verglühen der Substanz: Calcinatio!

3:08 min: Lauter Knall, Explosion, Gegenstände fliegen umher, zerschellen am Boden. Langsam wird es wieder still.

3:16 min: **(Stimme 1)** Selige Ruhe. – Aber ich hätte es mir ja denken können, dass die jetzt nicht lange anhält. Da schaut doch schon wieder so ein riesiger Menschenkopf auf mich herab. Immerhin, dieser Mann sieht vernünftiger aus. Mein Herr, bitte lassen Sie mich einfach in Ruhe hier liegen, ja?

3:34 min: **(Stimme 4)** Kommt dicht heran, meine Schüler. Was ihr hier seht – das ist fast nichts. Fast nichts, sage ich. Diese paar Staubkörnchen sind nur ein kleiner Teil des Mikrokosmos. Und dieser wiederum ist eine

Unzahl von Welten, von denen jede ihr Firmament, ihre Planeten, ihre Erde hat in gleichem Verhältnis wie die fühlbare Welt. – Nun mag sich ein jeder von euch denken: Welche seltsamen Dinge sind es wohl diesmal, die unseren Meister Blaise Pascal in ihren Bann ziehen? Erst das Gewicht und der Druck von Luft, dann die Natur der Leere – und nun also der Mikrokosmos. Nun, es spricht hier nicht nur der Mathematiker und Physiker zu euch, sondern ebenso der Philosoph. Begebt euch mit mir auf eine Reise. Ein jeder von euch verliere sich in den Wundern des Mikrokosmos, die ebenso erstaunenswert durch ihre Kleinheit als andere durch ihre Ausdehnung sind. – Eure Gesichter lassen nicht eben auf Überzeugung schließen. Nun gut, belassen wir es dabei. Wir schreiben das Jahr 1650, es ist vielleicht noch nicht an der Zeit. Lasst noch einige Jahre verstreichen. Vielleicht werden eure Nachfahren tiefer in jene Dinge eindringen, hinab in die Geheimnisse des scheinbar Gegenstandslosen.

4:48 min: Klirren, Laborgeräusche

4:54 min: **(Stimme 1)** Au – eine Glasplatte auf meine matschige Birne, das hat mir jetzt gerade noch gefehlt. Und so eine dicke ... Ist das Panzerglas? Ade, du gute Welt, da werde ich also jetzt zerquetscht ...

Foto: London School of Hygiene and Tropical Medicine/Sciene Photo Library

5:04 min: **(Stimme 5, gedankenverloren murmelnd)** Ach nein – das ist nur unbelebte Natur. Ein simples Staubkorn, nehme ich an. Na, man kann nicht auf jedem Objektträger so wunderbare Dinge finden wie jenes Bakterium, das so geformt ist wie ein Komma. So ebenmäßig und doch so gefährlich. Es ist der Erreger der Cholera, da bin ich ganz sicher. Morgen werde ich es den Kollegen zeigen. Inzwischen glaubt man mir. Hat schließlich so manche Anstrengung gekostet, bis der Name Robert Koch was galt. Wann war das noch, als ich den Milzbrand-Erreger entdeckt habe? Ach ja, vor acht Jahren, 1876. Jetzt hat meine Arbeit sogar einen Namen: Bakteriologie. Und man würdigt es, dass ich die Arbeit von Pasteur in seinem Sinne fortgeführt habe. Louis Pasteur, der zu Recht zum französischen Nationalhelden wurde. Wunderbar, wie er bewiesen hat, dass es im Reich des Kleinsten wahre Freunde, aber auch Feinde gibt: auf der einen Seite die Hefebakterien, die den Gerstensaft zum Bier werden lassen, auf der anderen die vielen Erreger von Krankheiten. Genial, wie er die Sicht auf die kleinen Dinge völlig verändert hat. Und meine Arbeit schloss perfekt an seine an. Ich habe es nachgewiesen, dass spezifische Krankheiten von spezifischen Bakterien hervorgerufen werden. Nun ja. Aber dies hier ist nur ein harmloses Staubkorn. Weg damit!

6:14 min: Etwas wird in den Mülleimer geworfen. Ticken einer Uhr.

6:18 min: **(Stimme 1, stöhnend)** Oh, mein Kopf. Wo bin ich ? Wieviel Zeit ist vergangen? Und hier piekst es ja! He, Leute, lasst mich in Ruhe, was seid ihr denn für Kollegen, mit diesen spitzen Nadeln? Nein, bitte nicht aufspießen!

6:28 min: Eine Tür wird aufgerissen. Klappern einer Schreibmaschine.

6:34 min: **(Stimme 6, aufgeregt)** Frau Böhme, Diktat, der Brief muss noch heute weg ins Umweltministerium. Schreiben Sie – ja, der übliche Kopf, Anrede undsoweiter, und dann: Unzweifelhaft befinden sich in der Raumluft Asbestfasern in einer Menge, die deutlich über dem Grenzwert liegt (Klammer auf, Messergebnis, Doppelpunkt, 2000 lungengängige Fasern pro Kubikmeter, Messmethode, Doppelpunkt, Rasterelektronenmikroskop und energiedispersive Röntgenmikroanalyse, Klammer zu). Sofortige Sanierung wird dringend empfohlen, Punkt. – Meinen Sie, das ist deutlich genug? Nicht dass diese Umwelt-Aktivisten nachher kommen und uns anklagen, wir hätten verharmlost, zig Krebstote auf dem Gewissen und so weiter. Gefährliche Leute, diese Birkenstock-Typen.

7:18 min: Rauschen, Heulen von Luft (in einem Lüftungs-Rohr)

7:21 min: **(Stimme 1)** Und wo bin ich jetzt gelandet? Also gut, mal wieder durch die Luft wirbeln, das hatten wir ja schon. (Wird wütend) Und hier sind schon wieder lauter Nadeln, überall. Also, das nervt langsam. He, Kollegen, ihr seht anders aus, aber ihr seid genauso beweglich wie die Dinger von vorhin. Wirklich, ich hab euch nichts getan – ist das klar? Gar

nichts habe ich euch getan. Wenn ihr soviel Energie habt, sucht euch bitte ein anderes Ziel, und nicht mich! Ich bin größer als ihr, merkt euch das, viel größer ...

7:47 min: Knistern und Knacken, ein Mikro wird an die Kleidung gesteckt.

7:50 min: **(Stimme 7, Frauenstimme)** So, jetzt geht das Mikro. Also, Herr Kollege, ich kann Ihren Einwand ja verstehen. Natürlich muss das noch mehrfach wiederholt werden, auch an anderen Tieren. Aber meine Ergebnisse sind solide, Sie können nicht behaupten, dass die Gruppe Eva Oberdörster unsauber arbeitet. Unsere Ergebnisse stellen nun einmal das neue Wunderpulver ein Stück weit in Frage. Sie werden es in den Proceedings dieser Tagung detailliert nachlesen können. Die Buckyballs wirkten zunächst einmal moderat giftig auf Wasserflöhe. Die Konzentration, von der ich hier rede, 0,8 Teilchen pro Million (ppm), reichte aus, in drei Wochen die Hälfte der Wasserflöhe zu vernichten. Die Konzentration in dem zweiten Test betrug 0,5 ppm, also ein Buckyball auf 2 Millionen Wassermoleküle, und hat zweifelsfrei die Zellmembranen in den Fisch-Gehirnen geschädigt.

So, das ist der Stand der Dinge, jetzt, im März 2004. Lassen Sie uns abwarten, liebe Kollegen, was folgt. Sie wissen alle, dass Nanoteilchen wunderbare Eigenschaften besitzen. Die Ergebnisse des Kollegen Jordan in Berlin machen zu Recht einigen Krebspatienten Hoffnung. Vielleicht wird man schon bald magnetische Nanoteilchen standardmäßig dazu verwenden, Krebszellen zu vernichten. Das wäre großartig. Und Sie wissen auch alle, dass bereits jetzt Nanoteilchen im Hygienebereich vielversprechend eingesetzt werden, dass Titandioxid auf Fliesen wirkungsvoll Bakterien und Pilze tötet, und Lack aus Silber-Nanoteilchen macht dasselbe. Aber Sie wissen auch, dass es schon Untersuchungen gibt, ob Nanoröhrchen das neue Asbest sind. Sie müssen zugeben, sie sind so klein und auch so nadelspitz wie Asbestfasern. Da wird man schon fragen dürfen, was passiert, wenn sie eingeatmet werden. Und man wird ja wohl – auch mit Blick auf ethische Gesichtspunkte – davor warnen dürfen, was da noch auf uns zukommt: Medikamententransport per Nanoteilchen, Mini-Roboter, die durch die Adern jagen und Ablagerungen erntfernen...

9:46 Lautes Knacken (Mikro fällt herunter) Stimme verliert sich

9:48 min: (**Stimme 1**) Wo bin ich denn jetzt gelandet. Schon in der Zukunft? Ach nein, wohl gerade rechtzeitig abgesprungen. Und gottlob – dies ist jetzt einfach mein Wohnzimmer. Und alles ist wieder so groß wie zuvor. Nur mein armer Kopf, der ist viel, viel größer...

10:00 min

Erika Schow

Foto: Photo Insolite Realite/Science Photo Library

Bilder:
Faszination oder Schrecken? Ein Staubkorn (S. 31), mehrere Cholera-Bakterien (S. 32) und eine Asbestfaser, die gerade zwei Abwehrzellen des Körpers aufgespießt und somit wehrlos gemacht hat (S. 33), jeweils mit dem Elektronenmikroskop aufgenommen.

Zelle

Ein Floh, gezeichnet von Robert Hooke, der das erste Buch mit Ergebnissen aus der Mikroskopie veröffentlichte. Es erschien 1665 unter dem Titel „Micrographia“ und enthielt Zeichnungen von verschiedensten Objekten – von der Spitze einer Nadel bis zum Facettenauge von Insekten.

Foto: Jeremy Burgess, Science Photo Library

Blicke in die Welt

oder: Das Licht austricksen

Das Monster war schon tot, als die Marquise es zu Gesicht bekam: ein ausgesprochen hässliches Viech im Schuppenpanzer, mit hinterlistigen Äuglein und absurd langen, garstig behaarten Beinen. Über den Floh ließ es sich prächtig amüsieren, jetzt, da er nicht mehr in den Gewändern zwickte – die Marquise genoss eine der beliebten „Insectenbelustigungen“ und „Augenergötzungen“ im Fürstensalon. Und durchs „Microscopium“ boten sich auch erfreulichere Anblicke, etwa wunderschöne Bilder aus künstlerisch arrangierten Kieselalgen.

Das Mikroskop, um 1600 von Holländern und Italienern fast zeitgleich entwickelt, diente fast zweihundert Jahre lang mehr als Spielzeug denn als ernsthaftes Werkzeug für die Wissenschaft. Und auch dort erwartete noch kaum jemand winzige Dinge, die das Auge nicht wenigstens erahnen ließ. So blieb die Mikrowelt lange das Privatinteresse weniger Neugieriger und die wahre Bedeutung der „vielen kleinen Thierchen“, auch für Leben und Gesundheit, erschloss sich der Menschheit erst Jahrhunderte später.

„Ich glaube, in meinem Mund gibt es mehr Lebewesen als Menschen in den Niederlanden“, berichtete Antoni van Leeuwenhoek im Jahre 1683 der ehrwürdigen Royal Society of London. Der Delfter Tuchhändler hatte damit als erster Mensch Bakterien gesehen und beschrieben. Als Autodidakt war er auf den Bau einlinsiger Mikroskope spezialisiert, mit denen er unglaubliche, bis zu 270fache Vergrößerungen und ein Auflösungsvermögen von rund 1,4 Mikrometern erreichte. Mit Ausnahme einer etwas späteren, exotischen Variante eines anderen Mikroskop-Entwicklers, in der die Augenlinse kleiner Fische als Kernstück sogar 536fache Vergrößerungen lieferte, war das einlinsige Mikroskop lange Zeit unschlagbar. Mit seiner Hilfe entdeckte und beschrieb van Leeuwenhoek rote Blutkörperchen, menschliche Spermien („animalcules“), die Photorezeptoren der Netzhaut und nicht zuletzt kleine Monster namens Bakterien. Allerdings waren Herstellung und Handhabung dieser Mikroskope sehr beschwerlich. Deshalb setzten sich mit der Zeit die komfortableren Mehrlinsen-Geräte durch, auch wenn sie bis ins 19. Jahrhundert hinein gerade mal 30fache Vergrößerungen und eine Auflösung von wenigen Mikrometern erreichten. Denn noch fehlten das optimale Glas und das Wissen um dessen Verarbeitung – und vor allem das physikalische Verständnis von Licht und Technik.

Der Griff zum anderen Licht

Heute kennen die Forscher die physikalischen Grenzen: Die Wellenlänge des Lichts begrenzt den Abstand, bei dem zwei getrennte Punkte noch erkennbar sind. Das ergibt Auflösungen von etwa 0,4 Mikrometern – der Standard modernster Lichtmikroskope. Will man kleinere Objekte scharf sehen, muss man sich Tricks einfallen lassen. Immerhin geht es darum, ein Naturgesetz zu überlisten. Genau dies versuchen Forscher weltweit, und zwar ungeachtet der Elektronenmikroskope, Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskope, die ohnehin wesentlich höhere Auflösungen erreichen. Denn Lichtmikroskope sind bei Biologen, Medizinern und Materialforschern nach wie vor beliebt: Sie liefern im täglichen Einsatz den unkomplizierten – und oft hinreichend genauen – Überblick. Und schließlich „machen sie am Objekt den geringsten Schaden, erfordern keine große Präparierung, und alles läuft relativ schnell“, erklärt Werner Mirandé, Chef der PTB-Arbeitsgruppe „Quantitative Mikroskopie“.

Der älteste Trick, das optische Limit zu unterschreiten, ist der Griff zum anderen Licht: Wenn die Wellenlänge die Auflösungsgrenze bestimmt, dann ist es klar, dass kürzerwelliges Licht eine bessere Auflösung bringt. So kam schon Ende des 19. Jahrhunderts ultraviolettes Licht zum Einsatz und konnte die Auflösungsgrenze noch einmal verkleinern. Heute liegt die Grenze hier unter 0,2 Mikrometern. Darüber hinaus leistet das UV-Licht, mit etwas mehr Präparieraufwand der Objekte, seine Dienste in der Fluoreszenzmikroskopie: Die Forscher bestrahlen das Objekt ihres Interesses mit kurzwelligem UV-Licht und regen damit dessen Moleküle an. Diese sind eigentlich viel zu klein, als dass man sie bei der optischen Auflösungsgrenze sehen könnte. Doch nach der Anregung strahlen sie Licht ab und leuchten im längerwelligen, sichtbaren Bereich als einzelne Punkte.

Das Interferenzmikroskop nutzt die Tatsache, dass Überlagerungsmuster entstehen, wenn das Licht an sehr eng aneinander liegenden Flächen gebrochen wird. Auch hier werden Höhenunterschiede sichtbar, die mehr als hundertmal kleiner sind, als sie normalerweise im Lichtmikroskop zu erkennen wären. Optische Nahfeldmikroskopie und nichtlineare Mikroskopie sind weitere Tricks, die aber noch deutlich mehr Aufwand bedeuten und auf Spezialfälle beschränkt bleiben. Für die praktische technische Anwendung hingegen wird derzeit die Immersionstechnik wieder populär, so Mirandé. Sie hat auch schon über hundert Jahre auf dem Buckel und wird jetzt in der Photolithographie zur Herstellung von Computerchips und auch zur Qualitätskontrolle der dabei verwendeten Photomasken benötigt, die mit ihren inzwischen extrem feinen Linien die Lichtoptik an ihre Grenzen bringen: „Die Chipstrukturen werden immer kleiner und kompakter; da wird man letztendlich nicht mehr an der Elektronenmikroskopie vorbeikommen“, erklärt Mirandés Kollege Bernd Bodermann. Vorerst klappt es noch mit der Immersion: Dünne, hochbrechende Flüssigkeiten zwischen Objekt und Objektiv können die Auflösung maximal verdoppeln. Dabei bringt Wasser eine Steigerung um „nur“ das 1,3fache, lässt sich aber prima in der Massenproduktion einsetzen. Spezielle Flüssigkeiten im Strahlengang könnten die Auflösung sogar aufs bis zu 1,8fache steigern – vorausgesetzt, sie sind noch transparent für UV-Licht.

Um feinste Linienmuster zu messen, hat Bodermann einen weiteren Trick entwickelt. Er beleuchtet die Strukturen abwechselnd von beiden Seiten und kann so die unterschiedlichen Kanten erkennen, die mit sichtbarem Licht eigentlich nicht mehr aufzulösen sind. „Wir arbeiten mit der Lichtmikroskopie an der Grenze des technisch Möglichen“, so Bodermann, „und da ist Faktor 2 eine enorme Verbesserung“.

Foto: Jeremy Burgess, Science Photo Library

Robert Hooke nannte die kleinen Gebilde, die er in einem Stück Kork fand, „Zellen“ – und gab damit einer grundlegenden Einheit des Lebens den Namen.

Die Grenze des Herrn Abbe

Von solchen Tricks hätte sich Ernst Abbe nicht einmal träumen lassen. Er war es gewesen, der 1875 postulierte: Die Wellenlänge des Lichts begrenzt das Auflösungsvermögen eines Lichtmikroskops (Abbe-Limit). Mit blauem Licht, dem sichtbaren Licht der kleinsten Wellenlänge, lässt sich die beste Auflösung erreichen: knapp 0,4 Mikrometer. Da die vorhandenen Mikroskope zu Abbes Zeit allerdings noch weit von dieser Grenze entfernt waren, machte sich der Professor an der Jenaer Sternwarte zunächst mal daran, mit Hilfe von technischen Verbesserungen näher an sie heranzurücken. Gemeinsam mit Carl Zeiss und Otto Schott entwickelte er ganz neue Glasarten, die höchst unterschiedlich in Brechungsindex und Dispersion waren, und konstruierte so genannte apochromatische Objektive aus zehn und mehr Elementen. Denn bislang hatten die Mikroskope mit ihren einfachen Linsen kleinste Objekte nur mit starken, verschwimmenden Farbsäumen zeigen können (chromatische Aberration). Der Grund: Kurzwelliges Licht wird auf dem Weg durch Glaslinsen stärker gebrochen als langwelliges, so dass die Bildkanten bei stärkeren Vergrößerungen immer mehr auseinanderlaufen.

Nicht zuletzt dank Abbe erwachte das Mikroskopieren im 19. Jahrhundert aus seinem wissenschaftlichen Dornröschenschlaf. Mathematische Berechnungen der Mikroskop-Optik machten der Versuch-und-Irrtum-Ära in ihrer Herstellung ein Ende. Und so brauchte man bald verlässliche Messgrößen, um die Abbildungsleistung der Objektive irgendwie vergleichen zu können. Zunächst verwendete man die feinen Schuppenlinien von Schmetterlingsflügeln, dann waren die ersten maschinell erzeugten Beugungsgitter zu haben: in Glasträger geritzte, parallele Linien mit definiertem Abstand. Der deutsche Instrumentenbauer Friedrich Adolph Nobert zog mit seiner „Kreisteilmaschine“ um 1850 sogar Gitterlinien mit einem Abstand von nur noch 0,11 Mikrometern. Damit war er seiner Zeit weit voraus; erst 1966 gelang es, diese Linien unter einem Elektronenmikroskop sichtbar zu machen.

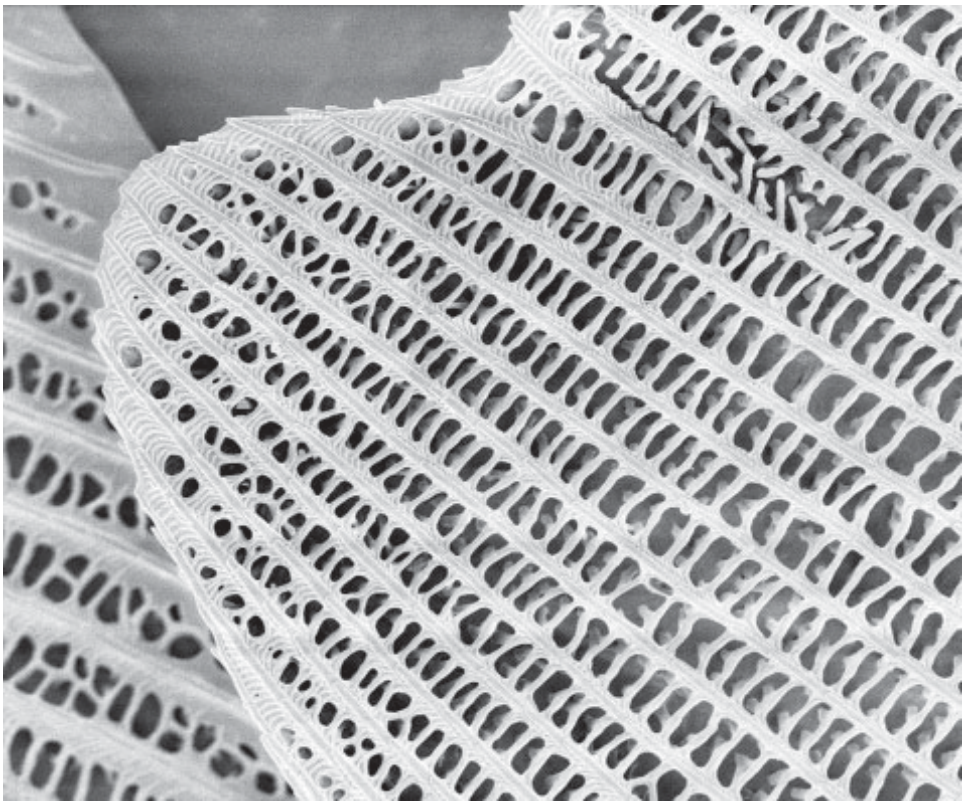
Mini-Zollstock

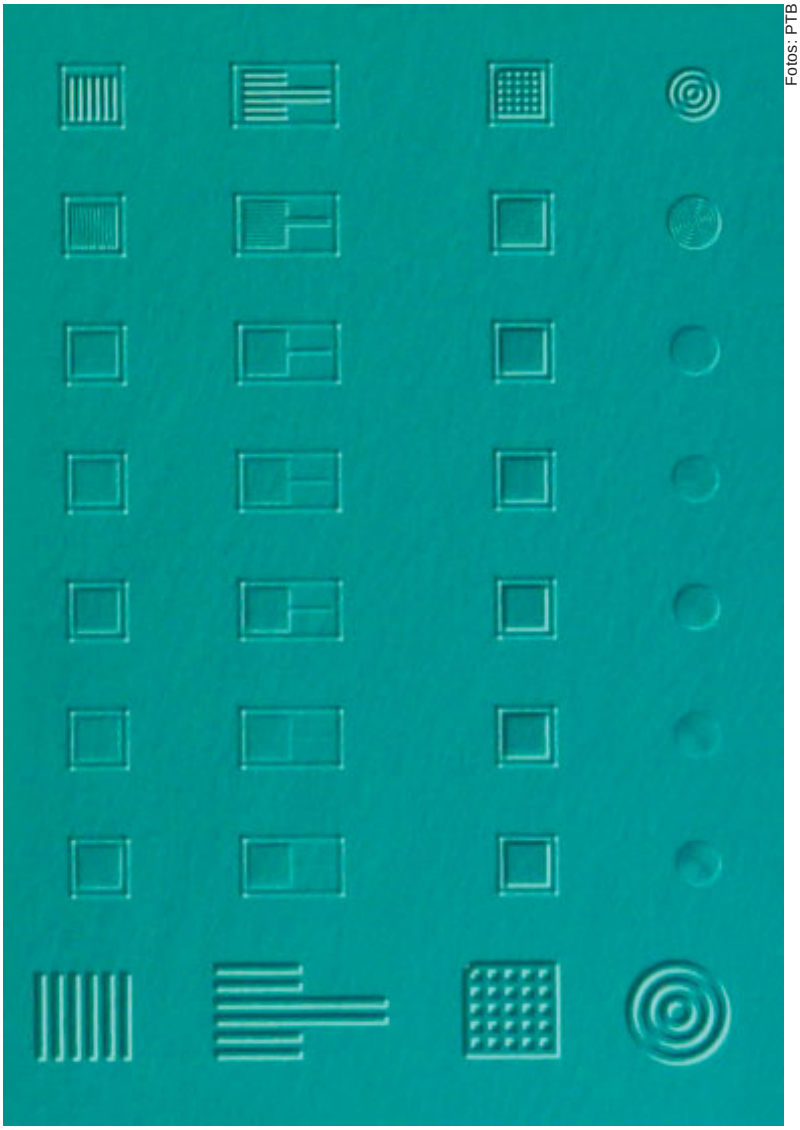
Heute liefert die PTB entsprechende Messnormale, die auf die Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems SI rückführbar sind. Mirandés Team etwa entwickelt für die verschiedensten Industriezweige solche Kalibriernormale und misst die Strukturbreiten von Photomasken. An die Lichtmikroskopie richtet sich denn auch der neue Messstandard, den das Team gemeinsam mit dem Institut für physikalische Hochtechnologien (IPHT) in Jena und mit Industriepartnern derzeit entwirft: ein winzig kleiner „Zollstock“ voll diverser Linien und Strukturen, mit denen die Welt ihre Messgeräte verlässlich kalibrieren und vergleichbare Abstände messen kann.

Für Mirandé und Bodermann bleibt die Lichtmikroskopie spannend, selbst bei scheinbar „trockenen“ Routinekalibrierungen. Das Faszinierende daran sei nicht nur, dass Dinge zu sehen sind, die dem bloßen Auge verborgen bleiben. Und nicht nur, dass sich jedes Objekt wieder anders verhält. Das Ganze gehe auch an die Grundlagen der Physik: „Man lernt, was Licht eigentlich ist, wenn es an einer solchen Ministruktur entlangschrappt“.

Und auch die Jagd nach kleinen Ungeheuern geht weiter. Künftig will die PTB helfen, Partikelmessgeräte vergleichbar zu machen. Ziel ist ein neutraler Kalibrierstandard für die Messung der Monster der Neuzeit: Asbestfasern, Rußpartikel und andere Mikro- oder Nanoteilchen in der Umwelt.

Dörte Sasse





Fotos: PTB

Kalibriernormal aus früheren Zeiten (oben): Die feinen Linien auf einem Schmetterlingsflügel (hier die eines Kleinen Fuchses, aufgenommen mit einem Rasterelektronenmikroskop) verlaufen im Abstand von 1,5 µm fast perfekt parallel zueinander (Abstand der „Sprossen“: 300 bis 500 nm).

PTB-Kalibriernormal (unten): Mit Hilfe der verschieden feinen Strukturen, die zwischen 2 µm und 160 nm voneinander entfernt in eine Niob-Oberfläche eingeritzt sind, können Messgeräte gewissermaßen auf Herz und Nieren getestet werden. (Diese Lichtmikroskop-Aufnahme kann zwar die feineren Strukturen nicht mehr auflösen, liefert aber einen guten Überblick.)

Die Duft-Detektive

Ursprünglich sollten Gassensoren explosive Gemische aus Erdgas und Luftsauerstoff aufspüren und damit Schlimmes verhindern. Inzwischen erkennen ausgeklügelte Sensor-Arrangements zuverlässig diverse Lösungsmittel, ranziges Öl und sogar Substanzen, die wir gar nicht riechen können. Doch wenn es um komplexe Düfte wie die von Kaffee oder Parfüm geht, ist unsere Nase unbestritten die Nummer Eins.

Foto: Cristina Pedrazzini, Science Photo Library

Im Besprechungsraum duftet es ganz eindeutig nach Kaffee. Dort erklärt Udo Weimar, der die Arbeitsgruppe für Sensorenforschung der Eberhard Karls Universität Tübingen leitet, warum das schwarze Gebräu aus beruflicher Sicht für ihn erledigt ist. Weimar entwickelt kleine Knöpfe und Plättchen mit sensorischen Fähigkeiten, die die verschiedensten flüchtigen Stoffe detektieren können. Doch „Kaffee ist ein echter ‚bad case'", sagt Weimar. Dem komplexen Kaffeearoma sei mit den kleinen Detektoren einfach nicht beizukommen. Das gleiche gelte für das einzigartige Aroma von Parmaschinken oder den klassischen Neuwagen-Geruch. So können weder Kaffeeröstereien noch Fleischindustrie oder Autohersteller auf geschulte Sensoriker verzichten, die sich durch viele Sorten Kaffee schlürfen, Schinkenscheiben verkosten und sich von der Rücksitzbank bis zum Armaturenbrett durchschnüffeln müssen.

Nie verschnupft

In anderen Fällen, den „good cases", haben die Sensoren die Nase vorn und die professionellen Geruchstester bereits abgelöst. Schließlich sind Sensoren nie verschnupft und bei Bedarf 24 Stunden am Tag im Einsatz. „Unsere Sensorsysteme werden seit einigen Jahren zur Qualitätskontrolle von Olivenölen eingesetzt", nennt Weimar ein Beispiel. „Sie detektieren Aldehyde, die entstehen, wenn ein Olivenöl ranzig ist." Gerade entwickelt er mit seinen Mitarbeitern ein System, das auf bis zu zehn flüchtige Substanzen aus Lebensmittelverpackungen reagiert. Bisher sind hier noch Testpersonen im Einsatz, die stichprobenweise kontrollieren, ob etwa ein Schokoriegel nach Verpackung riecht oder schmeckt.

Foto: Jürgen Klemme, Stockfood

Andere Sensoren sind seit einiger Zeit in Luxusautos im Einsatz und ermöglichen dort eine automatische Steuerung der Umluftklappe von Klimaanlagen. Wenn vor dem Wagen ein Zweitakter fährt und ungesundes Abgas rauspustet oder am benachbarten Feld frische Gülle dampft, reagiert das Sensorsystem – und die Verbindung nach draußen wird gekappt, bis die Luft wieder rein ist. Dabei detektiert das System nicht die Mischung von Geruchsstoffen, die wir Menschen als lästig empfinden, sondern Methan und weitere Kohlenwasserstoffe, die unsere Nase wiederum völlig kalt lassen.

Grundlage der Gasdetektoren sind häufig Halbleitermaterialien. „Sie werden auf 200 bis 400 Grad Celsius erhitzt“, erklärt Weimar, „und sobald sich ein Gasmolekül auf die Oberfläche heftet, gehen Elektronen auf den Halbleiter über oder umgekehrt vom Halbleiter auf das Molekül. Entsprechend ändert sich die Leitfähigkeit.“ Andere Sensoren bestehen aus Polymeren, langen Molekülketten, in denen sich flüchtige Stoffe verfangen können. Dabei wird das Polymer schwerer, quillt auf und erwärmt sich. Diese Veränderungen können die Forscher messen. Alle diese Messmethoden haben eines gemeinsam: Sie lassen sich miniaturisiert durchführen. Das Gewicht eines Polymers wird zum Beispiel über seinen Einfluss auf die Schwingung eines winzigen Kristalls, eines Schwingquarzes, bestimmt.

Foto: Bernd Rucke, Superbild

Foto: Alex Bartel, Science Photo Library

Die Entwicklung der Sensorsysteme ist eine kniffelige Angelegenheit, denn die Sensoren reagieren in der Regel auf mehrere Substanzen. „Wir erreichen keine Selektivität im Sinne eines Schlüssel-Schloss-Prinzips“, beschreibt Weimar die Herausforderung. „Aber wir können die Empfindlichkeit für die gewünschte Substanz erhöhen.“ Dafür spicken die Forscher die Halbleitermaterialien mit geeigneten Edelmetallen und die Polymere mit ausgewählten Molekülgruppen, an denen der gesuchte Stoff besser haftet. Daneben ist ein findiges Arrangement verschiedener Sensoren Voraussetzung, um einem Mix verschiedener Gase Herr zu werden. Mithilfe einer geschickten Auswertung aller Messwerte erhalten die Forscher dann ein charakteristisches Muster, das Rückschlüsse auf die vorhandenen Substanzen zulässt. Weil auch unsere Geruchswahrnehmung nach einem ähnlichen Schema funktioniert, werden die Sensorsysteme mitunter selbst in Fachkreisen als „elektronische Nasen“ bezeichnet.

Die „Nasen“ werden kleiner

Mit seiner Arbeitsgruppe und Partnern aus ganz Europa will Weimar die Sensor-Entwicklung vorantreiben, hin zu noch kleineren und vor allem stromsparenden Sensoren. Die Forscher wollen zudem Wege finden, die Funktionsweise der Detektoren dem biologischen Prinzip echter Nasen weiter anzunähern. Ein besonders spektakuläres Szenarium für künftige Anwendungen beschreiben Forscher um Anthony Turner und Naresh Magan von der Cranfield University in Bedford. Sie halten es durchaus für möglich, schon bald manche Krebserkrankungen oder diverse bakterielle Infektionen mithilfe von elektronischen Nasen kostengünstig und frühzeitig zu diagnostizieren. Denn schon seit Jahren ist bekannt, dass bei vielen Krankheiten charakteristische flüchtige Stoffe entstehen. Bisher können diese Duftmarken nur mithilfe von Gas-Chromatographen entschlüsselt werden – ein teures und zeitaufwendiges Verfahren. Es könnte bald der Vergangenheit angehören – wenn die Wissenschaftler mit ihrer Vision von elektronischen Nasen als Krankheitsdetektoren den richtigen Riecher gehabt haben.

ANDREA HOFERICHTER

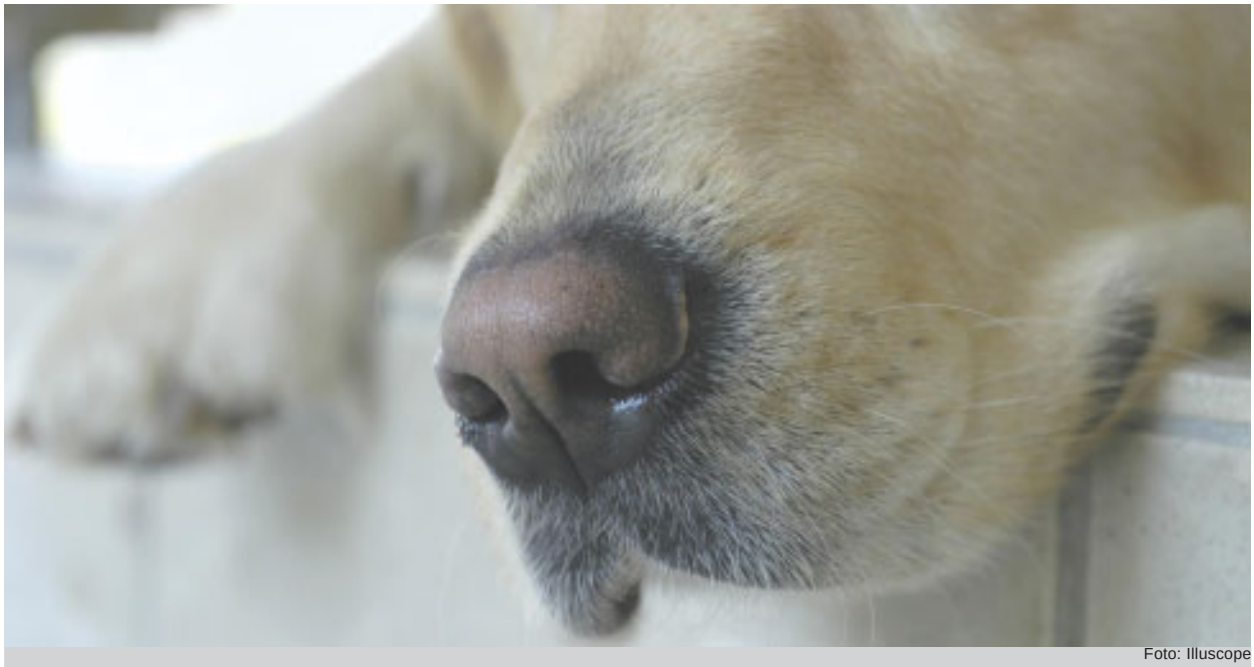


Foto: Illuscope

Diese beiden Nasen (Bild unten, Bild oben) haben zwei Dinge gemeinsam: Sie sind nicht scharf auf Kaffee (zugegeben: aus sehr unterschiedlichen Gründen), aber der menschlichen Nase ansonsten haushoch überlegen. Dabei ist der Chip (Bild unten) genau genommen nur ein Teil einer elektronischen Nase. Er enthält drei Sensoren, die für manche Riech-Aufgaben bereits ausreichen. Für kompliziertere Fälle werden in einer einzigen elektronischen Nase bis zu drei Dutzend Sensoren eingebaut.

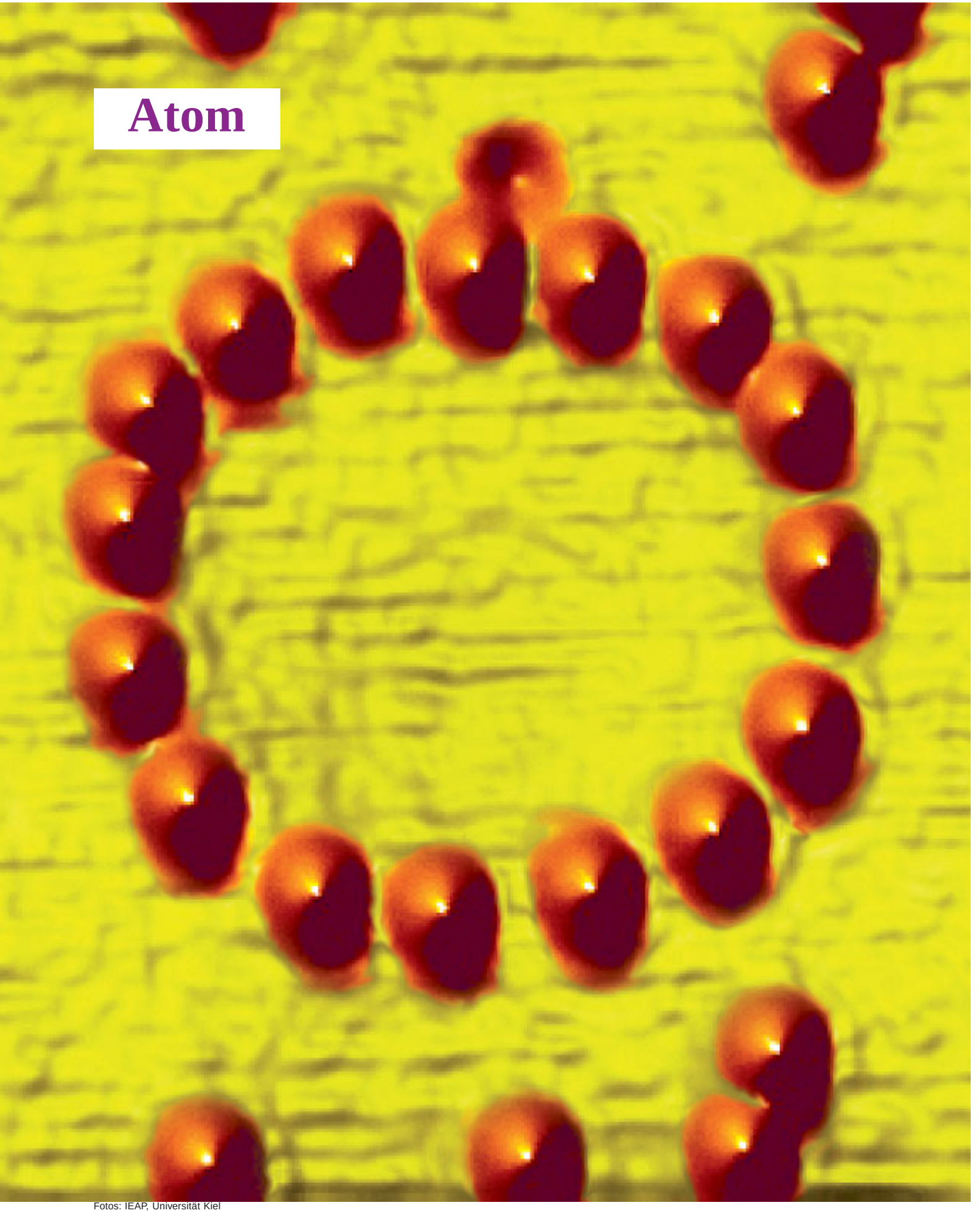
Das Geheimnis des Verwöhnaromas

Geruch (Olfactus): „ ... Was den Vorgang des Riechens anbelangt, so (...) ist es durchaus erforderlich, daß die betreffenden chem. Agentien eine gasf. Form besitzen, denn flüssige stark riechende Substanzen wie Kölnisches Wasser, in der Rückenlage bei herabhängendem Kopf in die Nase gebracht, bewirken durchaus keine Geruchsempfindung.“ Der Brockhaus, Ausgabe 1894, hat natürlich recht. Heute weiß man, dass es in der Tat winzige in der Luft wirbelnde Moleküle sind, die unsere Riechzellen zu kitzeln vermögen. Die exakte chemische Zusammensetzung mancher Gerüche indes ist noch immer Gegenstand der Forschung. Auch das Geheimnis um das berühmte „Verwöhnaroma“ ist längst nicht gelüftet. Immerhin sind inzwischen 800 flüchtige Substanzen gerösteter Kaffeebohnen identifiziert. Bekannt ist zudem, dass nur etwa 30 dieser Substanzen den typischen Kaffeeduft ausmachen. Was dagegen die feinen Unterschiede verschiedener Kaffeesorten bestimmt, ist noch nicht geklärt. Sicher ist nur, dass neben den Aromastoffen selbst auch deren Konzentrationen eine wichtige Rolle spielen. Nur so erklärt sich, dass das so genannte Röstaroma des Kaffees, eine schwefelhaltige Verbindung, auch gekochtem Rindfleisch die charakteristische Note verleiht. Dank der drei Millionen Riechzellen im oberen Teil unserer Nase und einer ausgeklügelten Signalverarbeitung im Gehirn sind wir dennoch in der Lage, Kaffee von Kochfleisch zu unterscheiden. Insgesamt können wir sogar 10 000 Gerüche auseinanderhalten.

ah

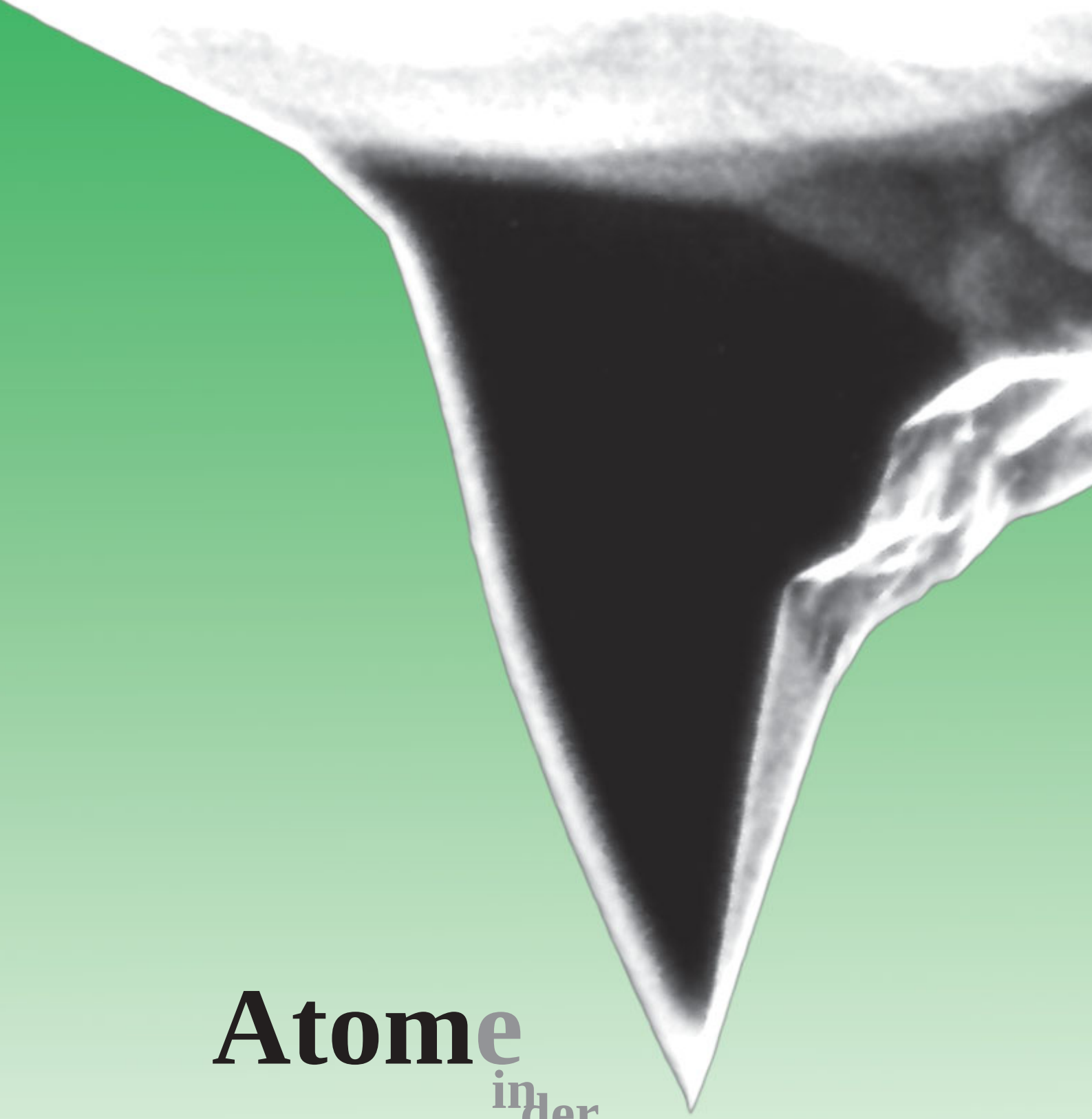
Foto: PEL, ETH Zürich

Atom



Fotos: IEAP, Universität Kiel

Atome kann man „sehen“ und „anfassen“ – wenn man ein Rastertunnelmikroskop zu Hilfe nimmt wie in diesem Fall: 16 Manganatome wurden auf einer Silberoberfläche zunächst zu einem Ring gruppiert (Bild links), anschließend wurde ein weiteres Manganatom in das Zentrum platziert (Bild rechts). Der Ring, der von Richard Berndt und seinen Mitarbeitern am Institut für Experimentelle und Angewandte Physik der Universität Kiel „gebaut“ wurde, hat einen Durchmesser von rund 100 Å. An solch atomaren Versuchsaufbauten studieren die Wissenschaftler, wie die elektronische Struktur eines einzelnen Manganatoms von den „Umgebungsverhältnissen“ beeinflusst wird.



Atome in der Raster-fahndung

Mit Atomen kann man nicht Lego spielen? Man kann – wenn man ein Rastertunnelmikroskop zu Hilfe nimmt, wie es als einer der Ersten Donald M. Eigler 1990 tat. Im kalifonischen Almaden Research Center nutzte der Physiker dieses damals gerade frisch erfundene Mikroskop als Nanopinzette. Stück für Stück baute er damit 35 einzelne Xenon-Atome auf einem Nickelkristall zum Logo seines Arbeitgebers IBM zusammen. Das Rezept zum Nachmachen, das den Werbetextern von IBM ungeheuren Spaß gemacht haben muss: „Sprühen Sie ein paar Xenon-Atome auf ein Nickel-Einkristall, das Sie mit flüssigem Helium auf –269 °C abgekühlt haben. Nachdem sie sich beruhigt haben, ziehen Sie Atom für Atom mit der Spitze eines Rastertunnelmikroskops vorsichtig an die gewünschte Stelle. Halten Sie zwischen den Atomen bitte den genauen Abstand von 13 Ångström (0,0000013 mm) ein. Viel Erfolg.“

Viel Erfolg hatte dieses „Rezept“ tatsächlich, inspirierte es doch zahlreiche Forschergruppen, selbst Hand an die Atome zu legen – und dies nicht nur zum atomaren Nachbau hauseigener Logos.

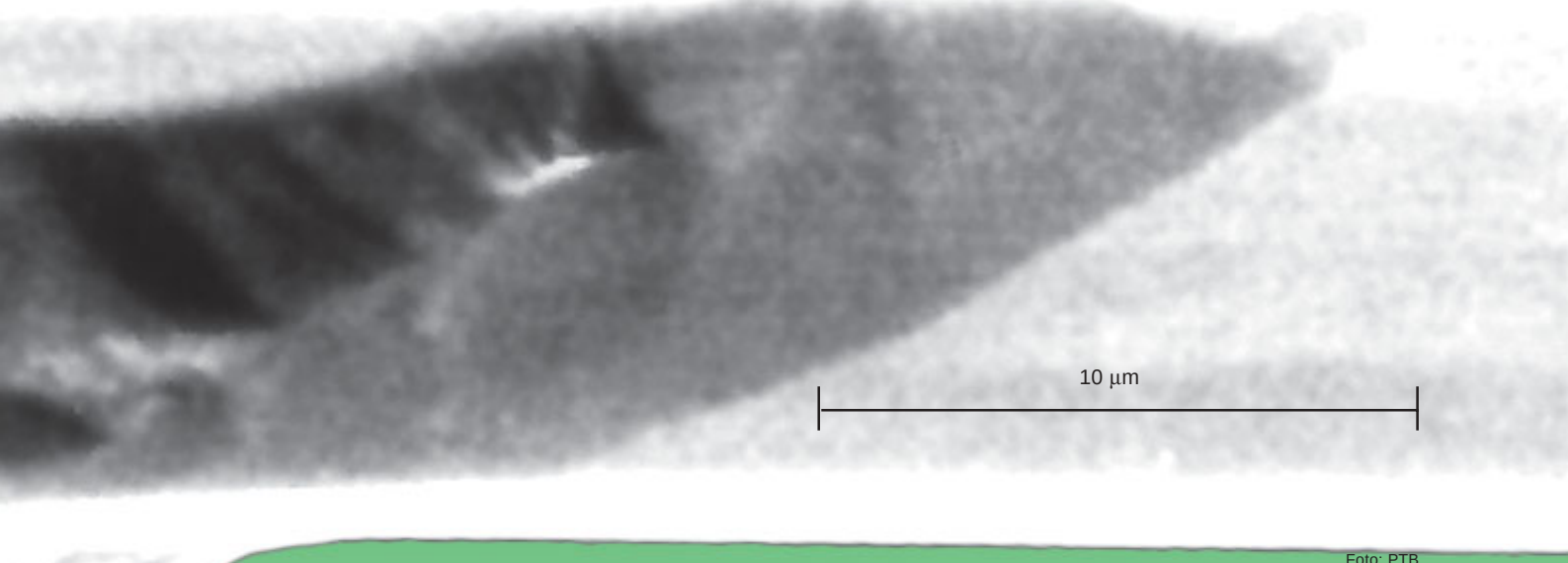


Foto: PTB

Alles begann mit dem Rastertunnelmikroskop, das die beiden Physiker Gerd Binnig und Heinrich Rohrer vom Züricher IBM-Forschungslabor in den 1980er Jahren konstruierten. 1986 erhielten sie dafür den Physik-Nobelpreis. Das neue Mikroskop machte es möglich, elektrisch leitende Materialien, wie Metalle oder Halbleiter, in nie gekannter Detailtreue darzustellen, Atom für Atom. Und das nicht nur im Vakuum, sondern auch an der Luft oder in Flüssigkeit.

Eine superfeine Metallspitze, die im Idealfall nur ein Atom groß ist, tastet dazu rasterförmig die Probenoberfläche ab, ohne sie zu berühren. Obwohl sich Sonde und Probenoberfläche nicht berühren, fließt nach dem Anlegen einer Spannung zwischen beiden ein schwacher Strom, da Elektronen den Raum dazwischen einfach überwinden, sie „tunneln“ hindurch. „Wie wenn ein oft genug gegen die Wand geworfener Tennisball schließlich doch durch die Wand dringt, ohne dass die Wand oder er selber dabei kaputt gehen“, erklärte Physik-Nobelpreisträger Ivar Giaever einmal das bizarre Phänomen, welches der klassischen Physik widerspricht. Je nach Abstand zwischen Mikroskopspitze und Probe ändert sich der Tunnelstrom und gibt so Informationen über die Art der Materialoberfläche preis – eine Art Berg- und Tallandschaft. Die gemessenen Werte verwandelt ein Computer anschließend in ein anschauliches topographisches Bild.

Heute sind Mikroskope für Nanoforscher das Multifunktionstool schlechthin. Gearbeitet wird meist mit einem Abkömmling des Rastertunnelmikroskops, dem Rasterkraftmikroskop, dessen Karriere 1986 begann und das seitdem eine ganze Familie hochspezialisierter Rastersondenmikroskope hervorgebracht hat. Auch nichtleitende Proben, wie keramische Materialien, können damit genauestens unter die „Nano-Lupe“ genommen werden. Rasterkraftmikroskope werden oft mit einem Plattenspieler verglichen: Ein extrem kleiner Federbalken oder Cantilever fährt mit einer atomar feinen Sonde systematisch die Oberfläche der Probe ab. Die Spitze des Rasterkraftmikroskops wird je nach Abstand von der Atomlandschaft der Probe angezogen oder abgestoßen. Die Kräfte, die zwischen ihr und der Materialoberfläche auftreten, werden gemessen und geben Aufschluss über das untersuchte Material.

„Auch wenn das Rastertunnelmikroskop die bessere Auflösung bietet, hat sich in der Praxis in vielen Bereichen das Rasterkraftmikroskop durchgesetzt, da man damit mehr Informationen gewinnen kann“, bestätigt Thomas Schimmel, vom Institut für Angewandte Physik der Universität Karlsruhe und Abteilungsleiter des Instituts für Nanotechnologie am Forschungszentrum Karlsruhe. Nicht nur die Topographie einer Probe, auch Eigenschaften wie Reibung, Adhäsion oder Magnetismus, die bei der Entwicklung von Hochleistungswerkstoffen eine große Rolle spielen, lassen sich je nach eingesetzter Abtastspitze oder Art des Rasterns erkunden. Der Wissenschaftler und sein Team haben Rasterkraftmikroskope so modifiziert, dass sich mit ihrer Tastspitze winzige Strukturen auf Oberflächen fräsen oder „schreiben“ lassen. Die Mikroskopspitze bricht chemische Bindungen dabei auf mechanischem Weg auf. Die Nanofräsmaschine ermöglicht in einem Arbeitsgang einen Materialabtrag von jeweils nur einem einzigen Atomdurchmesser – und das bis zu 60 000-mal in der Sekunde. Die Spitze hat eine Doppelfunktion, sie dient als „Schreib-Lese-Kopf“: Nach dem Fräsvorgang können die Forscher die hergestellte Nanostruktur mit derselben Sonde sofort optisch prüfen. Das Mikroskop-Auge ermöglicht auch den Blick auf live ablaufende chemische und elektrochemische Prozesse oder das Wachstum von Kristallen.

Auch feinste Kupferbahnen haben die Karlsruher Forscher mit der Rasterkraftsonde bereits elektrochemisch auf Oberflächen abgeschieden. „Würde man eine Million solcher Kupferdrähte zusammennehmen, so hätte das Bündel immer noch einen geringeren Querschnitt als ein menschliches Haar“, sagt Schimmel. Das Verfahren könnte den Weg zu nanoelektronischen Anwendungen wie etwa extrem leistungsfähigen Computerchips mit sehr hohen Speicherdichten ebnen.

Almut Bruschke-Reimer

Die High-Tech-Kohle

Pechschwarze, federleichte Flocken – so sehen die großen Hoffnungsträger der Nanotechnologie aus: Nanoröhrchen aus Kohlenstoff. Ein einziges Gramm von ihnen füllt ein ganzes Weinglas. Was dieses Häufchen Ruß zu bieten hat, erkennt man unter dem Mikroskop, bei einem Vergrößerungsfaktor von rund 100 Millionen: Die Milliarden von Röhrchen haben eine sehr elegante Struktur, sind Atom für Atom angeordnet in regelmäßigen, wabenförmigen Gerüsten.

Es begann 1991, als das Fußballmolekül C_{60} – auch Fulleren genannt – gerade groß in Mode war. Zwar wusste man noch gar nicht, was man damit tun konnte, aber immerhin hatte man damit eine dritte Form der Kohlenstoffs entdeckt (neben Diamant und Graphit), die sich in eindrucksvoller Schönheit präsentierte. In diese Stimmung platzte die Entwicklung der Nanoröhrchen im Labor von Sumio Iijima bei der japanischen Firma NEC in der Nähe von Tokio. Und seitdem geht es rund: Forscher überall auf der Welt präsentieren einen „Durchbruch“ nach dem anderen. Transistor, Wirkstoff-Sensor, Tumorkiller, High-Tech-Faser – das Nanoröhrchen kann alles. Darauf vertrauen zumindest Forscher und Investoren. So jagt derzeit eine Nano-Konferenz die andere und die Geldgeber aus Industrie und Politik stecken Milliardenbeträge in die Entwicklung.

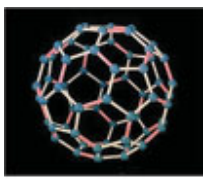
„Kein anderes Material ist so dünn im Vergleich zu seiner Länge. Wie ein Wasserschlauch, der sich über drei Fußballfelder zieht“, sagt Tobias Hertel, deutscher Röhrchenexperte an der Vanderbilt University in Nashville, Tennessee. „Nanoröhrchen haben tolle Eigenschaften als Stromleiter und Halbleiter. Zwar lassen sie sich verschmieren wie das Grafit aus einer weichen Bleistiftmine. Aber kaputt gehen die nicht.“ Damit bringt Hertel die zentralen Eigenschaften der Röhren auf den Punkt. Eine Variante der Röhrchen mit einer einlagigen Hülle aus Kohlenstoffatomen ist halbleitend und soll zukünftig in Nano-Chips schneller schalten als heutige Silizium-Prozessoren. Eine winzige Änderung in ihrem Aufbau, und die Röhren werden zu elektrischen Leitern, die sogar Kupfer um das 100fache überrunden. Mehrwandige Exemplare, die mit bis zu 50 millionstel Millimetern verhältnismäßig dick sind, begeistern dagegen die Werkstoffforscher. Diese Röhrchen können mit einer enormen Festigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht aufwarten. Vielleicht werden sie einmal die besten Spezialstähle oder Kevlarfasern in schusssicheren Westen mühelos übertrumpfen.

Alles nur Zukunftsmusik? Nicht ganz. Bereits heute gelingt es in gut ausgestatteten Laboratorien, die Röhrchen in nanoelektronische Schaltkreise einzubauen. Es gibt auch schon erste Transistoren und Nanodrähte, allerdings als bestaunte Einzelstücke, die zufällig oder in mühevoller „Handarbeit“ mit der Hilfe der Spitzen von Rasterelektronen- oder kraftmikroskopen entstehen. Was noch fehlt, sind Werkzeuge, mit denen die atomfeinen Röhren massenhaft und schnell zu den gewünschten Strukturen zusammengesetzt werden können. Die Materialentwickler sind da schon weiter. „Die Welt der Nanoröhrchen kommt jetzt wirklich in Bewegung“, sagt Olivier Decroly, Manager des belgisches Start-Ups Nanocyl, einer Ausgründung aus der Universität Namur. „Noch im Jahr 2004 wollen wir unsere Jahresproduktion auf einige hundert Kilogramm erhöhen.“ Abnehmer der Röhrchen, so glaubt Decroly, werden die Herstellern von leitfähigen Kunststoffen und in absehbarer Zeit auch Produzenten von Flachbildschirmen sein. In diesen Geräten haben aufgereihte Nanoröhrchen die Aufgabe, quasi als winzige Kanonen bildgebende Elektronen auszusenden. Auf diese „Feldemissionsdisplays“ setzt zum Beispiel der koreanische Elektronikkonzern Samsung. Erste Prototypen flimmern bereits auf Ausstellungen, in wenigen Jahren sind die Geräte vermutlich marktreif.

Noch in diesem Jahr wird die Produktion von Nanoröhrchen an der 250-Tonnen-Grenze kratzen, vermutet der aktuelle „Nanotube-Report 2004“. „Das ist etwas zu optimistisch“, meint dazu Nanocyl-Manager Decroly. Er geht eher von einigen zig Tonnen aus, hauptsächlich für den Markt der Verbundwerkstoffe. Automobilhersteller wie General Motors oder Toyota setzen, so lauten Gerüchte, bereits in ihren aktuellen Modellen auf solche Nanokomposite. Das Ziel: Gewicht und damit den Verbrauch ihrer Karossen spürbar zu senken. Denn schon wenige Prozent dieser Hohlkörper ermöglichen erstaunlich bruchfeste Kunststoffe, die zu schmucken Stoßfängern gepresst werden. Aus ähnlichen Gründen zeigen auch Flugzeugbauer starkes Interesse an den Nanowerkstoffen. Technisch ist die Produktion kein Problem. Denn zum Einrühren in eine Kunststoffmasse brauchen die Röhrchen nicht sortiert oder geordnet zu werden.

Entscheidend für den Durchbruch in den Markt werden neue Erkenntnisse und nicht zuletzt die Kosten sein. Mit wachsenden Produktionskapazitäten sieht Decroly gerade einen radikalen Absturz des Preises voraus. Sowohl technologisch als auch wirtschaftlich scheint das Nanoröhrchen – im Unterschied zu seinem glückloseren Fulleren-Vorgänger – auf dem besten Weg zum Alltagswerkstoff zu sein.

Jan Oliver Löfken



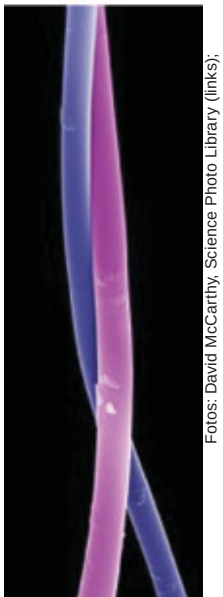


Bild oben: Modell eines C_{60}-Moleküls mit seinen 60 Kohlenstoffatomen. Es wird auch Fußballmolekül (wegen seiner Form), Buckminster-Fulleren (nach dem Architekten Buckminster Fuller, der ganz ähnlich geformte Bauten schuf) oder Buckyball genannt. Bild unten: Kohlenstoffnanoröhrchen (gefärbtes Elektronenmikroskop-Bild)

Fotos: David McCarthy, Science Photo Library (links); J. Bernholc et al., North Carolina State University/Science Photo Library (rechts)

Beispiele

Nanokämme als Laserquelle
Erst vor wenigen Jahren offenbarten Nanoröhrchen auch ihre Tauglichkeit für filigrane Laser. Mit Lichtteilchen oder einem Stromfluss können die Elektronen im Röhrchen so angeregt werden, dass sie sichtbares Licht aussenden. Mit kammartigen Strukturen wie diesen 10 bis 300 Nanometer dünnen Spitzen aus Zinkoxid, die Physiker vom Lawrence Berkeley National Laboratory in Kalifornien wachsen ließen, könnten auch die Kohlenstoff-Nanoröhrchen ihre Eigenschaft als Lichtquelle für kleinste Laser, beweisen.

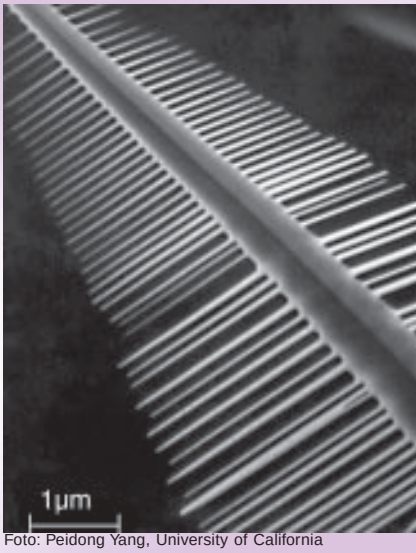


Foto: Peidong Yang, University of California

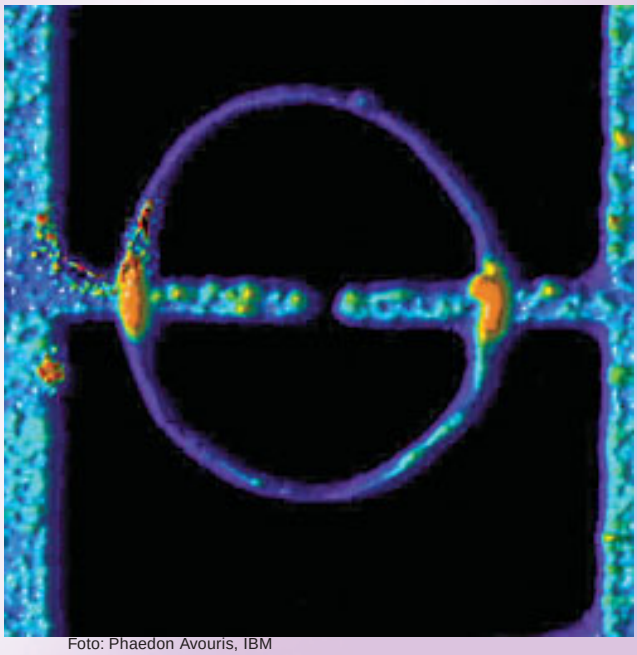


Foto: Phaedon Avouris, IBM

Bizarre Strukturen für die Chips der Zukunft
Zu einem Ring mit einem halben millionstel Meter Durchmesser konnten amerikanische Physiker aus den IBM-Laboratorien die Kohlenstoff-Nanoröhrchen anordnen. Auch wenn so etwas bisher nur in „Handarbeit“ mit den Spitzen von Rastertunnelmikroskopen möglich ist, weist es den Weg zu exakten Strukturen für zukünftige Nanochips. Da die Röhrchen je nach Struktur nicht nur Strom leiten, sondern auch herausragende Eigenschaften als Halbleiter zeigen, dienen sie als Grundbaustein für erste Transistoren. Erste Prototypen solcher Schaltkreise schalteten Strom schon in vielen europäischen und amerikanischen Nanolaboren.

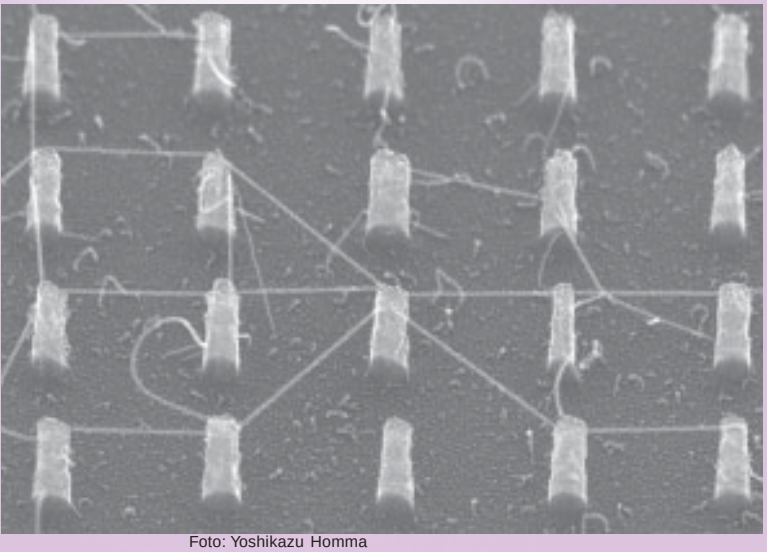


Foto: Yoshikazu Homma

Netzwerk aus Nanodrähten
Wie winzige Hochspannungsmasten halten diese Silizium-Pfosten einzelne Nanoröhrchen in die Höhe. Diese eindrucksvolle Demonstration für eine mögliche Verdrahtung zukünftiger Elektronik im Nanomaßstab gelang Forschern von der Nippon Telegraph and Telephone Corporation. Die winzigen Hohlkörper aus Kohlenstoff haben eine bis zu 100-mal bessere Leitfähigkeit als Kupfer. Auch halten sie im Vergleich zu leitenden Metallen einem Vielfachen an Strom stand, ohne Schaden zu nehmen.

Foto: Ray H. Baughman, University of Texas

Reißfeste Gewebe machen Kevlar Konkurrenz

Zu ganzen Bündeln verwoben, legen Nanoröhrchen die Grundlage für einen völlig neuen Faserwerkstoff. Denn die Festigkeit einzelner Hohlkörper übersteigt die bester Spezialstähle oder von Kevlar um ein Vielfaches. US-Forscher von der University of Texas in Dallas konstruierten hier bis zu 100 Meter lange und einen Zehntelmillimeter dicke Fäden aus Nanoröhrchen und Polyvinyl-Molekülen. An superfeste Röhrchen-Seile für gewagte Hängebrücken oder gar – auch bereits vorgeschlagen – kilometerhohe Weltraumfahrstühle ist aber noch nicht zu denken. Erste Anwendungen könnten eher in Faserstoffen für schusssichere Westen liegen, die dem bisher favorisierten Kevlar Konkurrenz machen könnten.

Hohlräume als Gasspeicher und Nanopipetten

Nanoperlen aus Silber tummeln sich hier in den filigranen Kohlenstoffröhrchen. Physiker vom Georgia Institute of Technology konnten sich nach diesem Experiment vorstellen, die regelmäßig geformten Hohlräume als Container für Chemikalien oder medizinische Wirkstoffe zu nutzen. Tausendfach kleiner als die mikroskopischen Düsen von Tintenstrahldruckern, können Nanoröhrchen quasi als Pipette einzelne Partikel auf eine Oberfläche „drucken“. Auch als Wasserstoffspeicher wurde dieses Material vor Jahren gehandelt. Doch ist bisher das Befüllen und Abzapfen des energiereichen Gases nicht im großen Maßstab möglich.

Foto: Walter A. de Heer, Georgia Institute of Technology

Erste Produkte als Zusatzstoff

Federleicht wirbeln ganze Wolken von rußschwarzen Nanoröhrchen durch ein Laborglas. Und trotz ihrer Eigenschaften auf der atomaren Ebene scheinen Anwendungen, bei denen Milliarden von Nanoröhrchen als Schüttgut eingesetzt werden, am nächsten zu liegen. Die Partikel werden heute schon in Kilogramm-Mengen in Kunststoffe und Keramiken gemischt. Diese ersten Kompositmaterialien mit Nano-Komponenten sind fester, leitfähiger und leichter als bisher verwendete Mischungen. Erste Produkte gibt es – teilweise nur laut Gerüchten – schon in Form von Tennisschläger-Bespannungen und Stoßfängern von Autos.

Foto: Peter M. Mayr für Technology Review

Elektronenkanone für brillante Flachdisplays

Wild und ungeordnet: Bei rund 800 °C können aus einer kohlenstoffhaltigen Atmosphäre ganze Wiesen aus Nanoröhrchen wachsen. Physiker vom Philips-Forschungslabor in Aachen erreichten dabei schon „Wimbledon-Qualität“, bei der die Röhrchen exakt wie die Zinnsoldaten nebeneinander stehen. Da die Röhren – durch Strom angeregt – wie eine Kanone Elektronen aussenden können, dachten die Forscher daran, damit hauchdünne Flachbildschirme zu bauen. Die Elektronen bringen dabei Farbstoffmoleküle – Pixel für Pixel – schnell zum Leuchten. Aktuell verfolgen noch Samsung und Motorola dieses Ziel und planen in wenigen Jahren ein erstes Produkt.

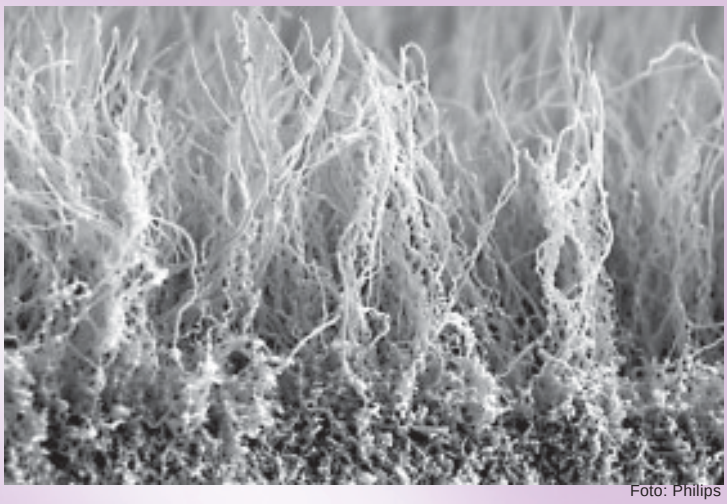
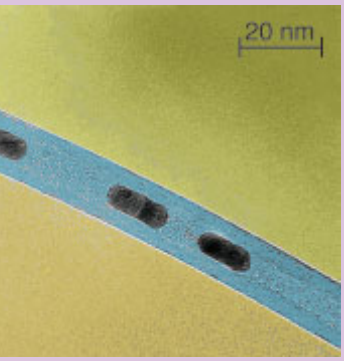
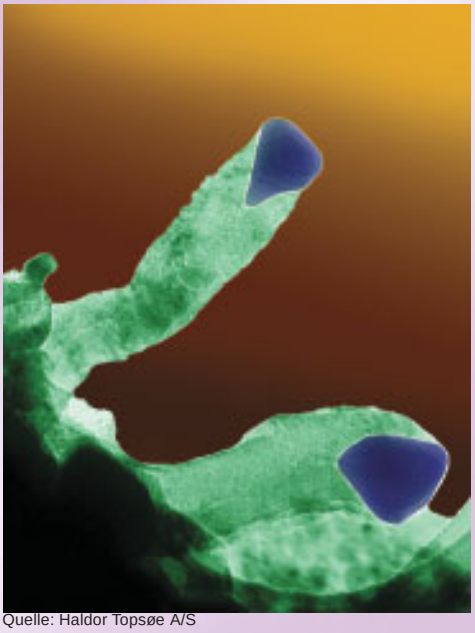


Foto: Philips





Quelle: Haldor Topsøe A/S

Nanosonden für einzelne Moleküle

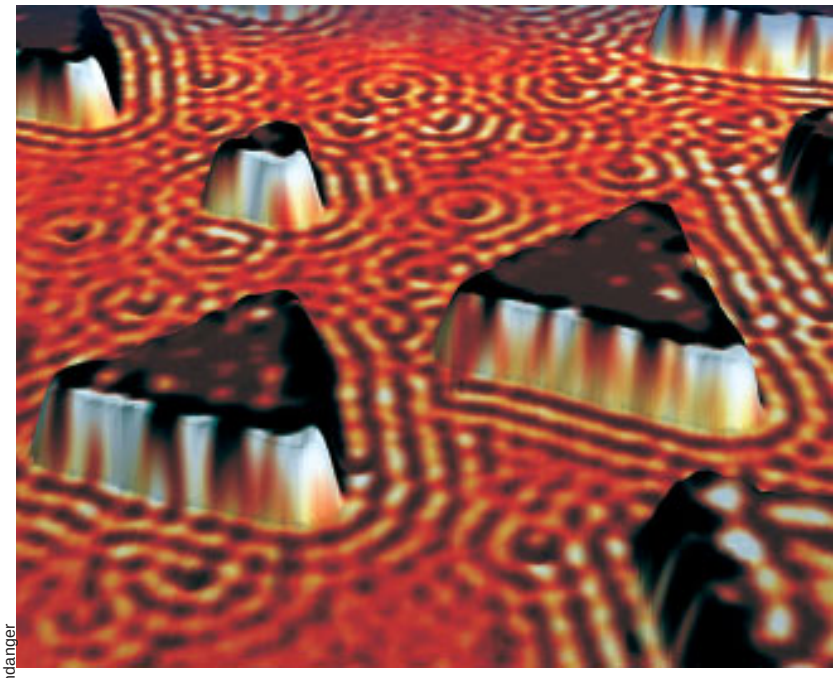
An nur 20 Nanometer kleinen Nickelbröckchen, die als Katalysator dienen, wachsen in der dänischen Firma Haldor Topsøe solche Nanofasern heran. Durch ihre hervorragende Widerstandskraft gegen Chemikalien, bei gleichzeitiger Bindungsfähigkeit, können Röhrchen und Fasern aus Kohlenstoff auch selbst als winzige Sensorspitzen dienen. Grundlage ist dabei die Änderung des elektrischen Widerstands, sobald sich Molekülgruppen oder gar Antikörper an die Röhrchen anlagern. Weltweit wird derzeit an der Entwicklung solcher Röhrchensensoren für handliche „Lab-on-Chip“-Systeme gearbeitet.

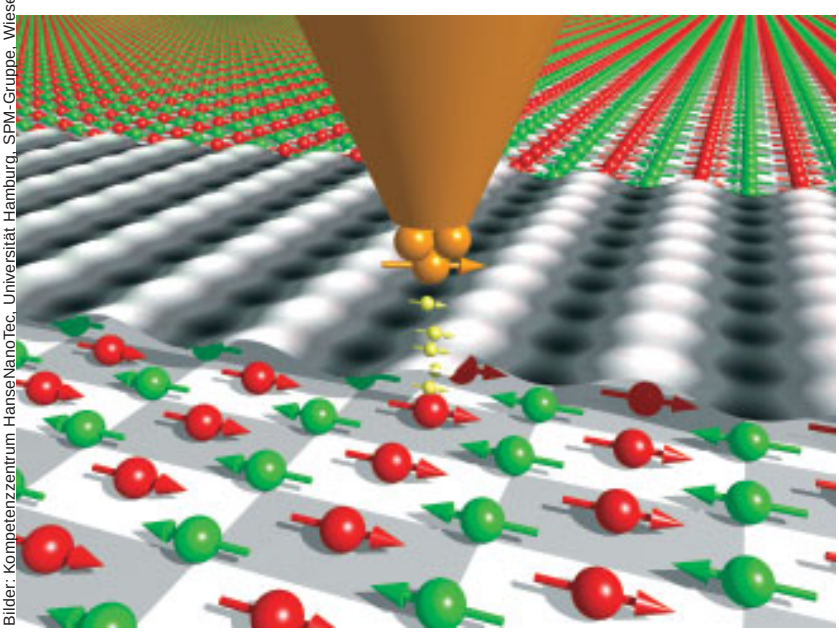
jol

Wie klein kann ein Bit sein?

Magnetbits, Holowürfel, Tausendfüßler

„Wenn ich die Probe fallen lasse, kostet mich das zwei Wochen. Dann muss ich die Vakuumkammer wieder aufmachen.“ Hoch konzentriert hantiert Matthias Bode mit dem Manipulator, einem mechanischen Greifarm. Mit ihm jongliert der Physiker winzige Materialproben durch eine Versuchsapparatur, die aussieht wie das Modell einer Raumstation: fünf Vakuumkammern aus Edelstahl, miteinander verbunden durch lauter Röhren und Flansche. Kleine Bullaugen erlauben den Blick ins Innere.





Bilder: Kompetenzzentrum HanseNanoTec, Universität Hamburg, SPM-Gruppe, Wiesendanger

Nun steht Bode vor dem größten Segment, einer zwei Meter hohen Säule, mit Flüssighelium auf minus 260 Grad Celsius gekühlt. Hier steckt das Herz des Experiments: das Rastertunnelmikroskop, ein Keramikzylinder, kaum größer als ein Filmdöschen. „Im Prinzip ist es eine extrem dünne Nadel, die wenige millionstel Millimeter über der Materialprobe schwebt“, erläutert Bode. „Zwischen Nadel und Probe fließt ein Strom, der Tunnelstrom.“ Er ist so eingestellt, dass die Nadel immer im selben Abstand über der Probe schwebt. Dann startet Bode den Rechner, und die Nadel fährt Zeile für Zeile über die Probe hinweg, folgt dabei den winzigsten Unebenheiten. Nach und nach entsteht auf einem Monitor ein Bild. Es zeigt feinste Details der Probe, mit Glück sogar einzelne Atome.

Mit ihrem Supermikroskop erforschen Bode und sein Chef Roland Wiesendanger an der Universität Hamburg die Grundlagen für künftige Speichersysteme. Das Gerät fungiert als extrem sensibler Magnetsensor mit einer Auflösung von weniger als einem Nanometer. Vor einiger Zeit konnten die Forscher das Magnetfeld einzelner Manganatome erkennen. Ließe sich das technisch nutzen, so käme eine fantastische Speicherkapazität heraus: Auf einer „atomaren Festplatte“ von Briefmarkengröße würde die gesamte Weltliteratur Platz finden.

Aber soweit ist es noch nicht. So weiß heute noch niemand, wie sich die Bits auch nur halbwegs effektiv in einzelnen Atomen abspeichern lassen könnten. Deshalb werden die Computerfestplatten auch in den kommenden Jahren nach dem

bewährten Konzept funktionieren: Ein Schreibkopf fährt über eine Magnetschicht und magnetisiert dort kleine Flecken, die zwar nur einen zehntel Mikrometer messen, aber immer noch Zehntausende von Atomen enthalten.

Jahr für Jahr gelingt es den Harddisk-Produzenten, diese „Magnetbits“ immer weiter zu verkleinern und somit die Speicherdichte zu steigern. Zurzeit erreichen die Speichermedien eine Dichte von etwa 80 Gigabit pro Quadratzoll – was PC-Festplatten mit einer Kapazität von mehr als 100 Gigabyte ermöglicht.

Manch schlauer Trick soll diese Werte noch steigern. So arbeiten die Ingenieure an „vorstrukturierten“ Festplattenmaterialien. Hier sind die Magnetbits bereits auf der Platte vorgezeichnet und voneinander abgegrenzt, sodass sie sich gegenseitig weniger beeinflussen und stören. Und: „Die Industrie ist dabei, die Magnetbits senkrecht zur Plattenoberfläche anzuordnen statt wie bisher horizontal“, sagt Martin Albrecht, Leiter der Arbeitsgruppe „Signalspeichertechnik“ in der PTB. „Damit kann der Schreibkopf mehr Informationen pro Fläche aufzeichnen und lesen.“ Mit dieser Vertikalaufzeichnung soll eine Speicherdichte von einem Terabit pro Quadratzoll möglich sein, das 12fache heutiger Festplatten. In einem PC ließen sich über 1000 Gigabyte unterbringen – der Inhalt von mehr als 250 DVD-Filmen.

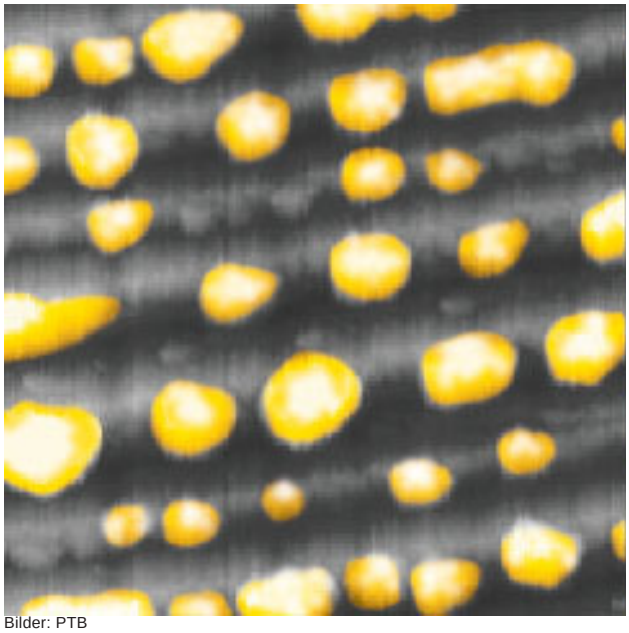
Doch dann dürfte die Technologie an ihre Grenze stoßen: Noch kleinere Magnetbits würden sich – getrieben von der natürlichen Wärmebewegung – von selbst ummagnetisieren und die ihnen anvertraute Information verlieren. Also fahnden die Forscher nach Alternativen. Eine davon sind die so genannten magnetischen Moleküle. Das Grundgerüst bildet ein Plastikmaterial, ein organisches Molekül aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff. In diesem Grundgerüst sind Metallionen, etwa aus Eisen, eingelagert. Jedes Eisenteilchen fungiert als winzige Magnetnadel. Der Vorteil: Die Moleküle sitzen sehr dicht beieinander, stören sich aber gegenseitig nicht. Damit wären theoretisch höhere Speicherdichten als bei den heutigen Festplatten machbar.

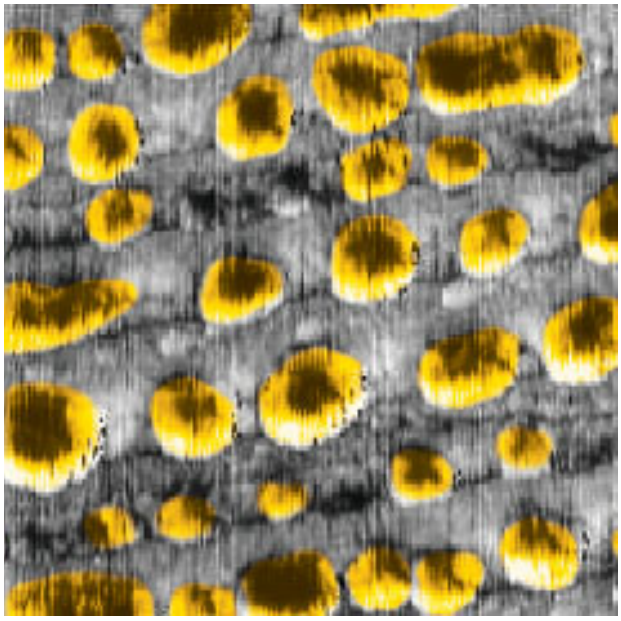
Ein weiteres Konzept ist der „Millipede“ (Tausendfüßler), erforscht vom Computergiganten IBM. Dabei stechen Tausende von winzigen, heißen Nadeln gleichzeitig in einen hauchdünnen Plastikfilm hinein und „stanzen“ dadurch Löcher, die gerade mal zehn Nanometer messen. Jedes Loch entspricht der digitalen „1“; Stellen ohne Loch sind eine „0“ – wenn man so will, eine Lochkarte im Nanoformat. „Das kann man sich als USB-Memorystick mit einer gigantischen Kapazität vorstellen“, sagt Albrecht. „Für

Bilder links:
Auch die Spins der Atome bleiben der Spitze eines Rastertunnelmikroskops nicht verborgen – wenn die Mikroskopspitze zuvor mit einigen Atomlagen aus einem magnetischen Material überzogen wurde. Das Beispiel aus der Gruppe um Roland Wiesendanger der Universität Hamburg zeigt dreieckige Inseln aus Kobalt (zwei Atome hoch) auf einer Kupferoberfläche. Die Kantenlänge dieser Inseln beträgt ca. 20 Nanometer.

Bilder unten:
Magnetische Bits: Die Natur lässt sie zuweilen selbstorganisiert wachsen – wie bei diesen „Perlenketten“ aus Kobalt-Nanopartikeln, die am Institut für Materialphysik in Göttingen hergestellt und in der Arbeitsgruppe „Signalspeichertechnik“ der PTB mikroskopisch untersucht wurden. Solche Strukturen könnten als vorstrukturiertes magnetisches Speichermedium verwendet werden. Dargestellt sind links die Topographie (helle Bereiche hoch, dunkle Bereiche tief) und rechts der magnetische Kontrast (helle Bereiche abstoßend, dunkle Bereiche anziehend). Die Teilchen sind senkrecht zur Ebene magnetisiert (Bildausschnitt jeweils 4 µm × 4 µm).

Bilder S. 52:
Nanomechanische Bits: Ein Lochkartenmuster der besonderen Art können Mikroskopspitzen in einer Polymeroberfläche hinterlassen. 1024 solcher Spitzen sind in den Millipede-Chip eingebaut. Über feine elektrische Kontakte lässt sich jede einzelne Spitze auf dem 3 mm × 3 mm großen Chip individuell ansprechen.





Bilder: PTB

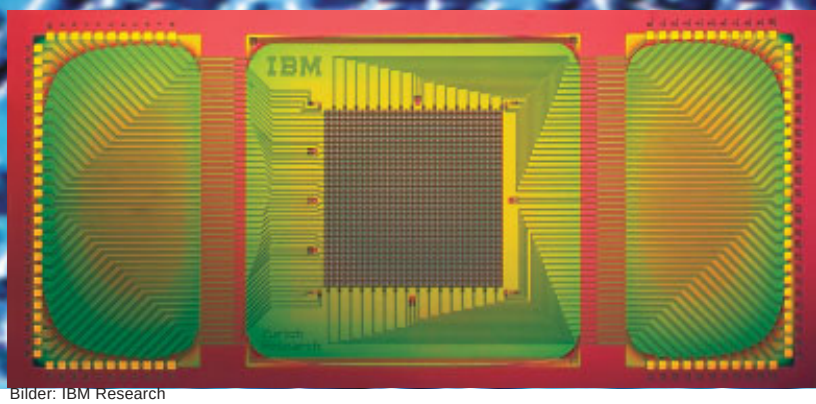
nächstes Jahr sind bereits vier Gigabyte angekündigt.“ Um die Technik weiter zu treiben, wollen die IBM-Physiker um Nobelpreisträger Gerd Binnig künftig nicht nur 1000 Nadeln simultan zustechen lassen, sondern 4000. „Allerdings hat diese Technologie absehbare Grenzen“, meint Albrecht. „Die einzelnen Bits können nicht kleiner gemacht werden als die Größe der Plastikmoleküle.“

Andere Experten basteln an einer optischen Technik, der holographischen Speicherung: Statt auf zweidimensionalen Platten werden die Bits in einem dreidimensionalen Kristall geparkt und dadurch auf engstem Raum untergebracht. Das Prinzip: Ein Laserstrahl tastet einen LCD-Bildschirm ab, der die zu speichernden Informationen als Schwarzweiß-Muster zeigt. Den reflektierten Strahl, dem nun das Datenmuster aufgeprägt ist, lenken die Physiker auf einen lichtempfindlichen, hochreinen Kristall. Aus einer anderen Richtung kommt der Referenzstrahl; beide Laserstrahlen belichten den Kristall wie einen Fotofilm und legen die Informationen ab.

Um die Daten abzurufen, beleuchten die Laser den Kristall erneut. Auf diese Weise könnte ein zuckerwürfelgroßer Kristall die respektable Datenmenge von einem Terabyte beherbergen. Der Vorteil: Anders als bei einer rotierenden Festplatte enthält der Holowürfel praktisch keine schnell bewegten und latent anfälligen Teile. Nur: „Das Problem ist zurzeit, dass man eine sehr präzise Optik und unheimlich stabile Umgebungsbedingungen benötigt“, sagt Albrecht. „Im Labor läuft das aber schon ganz gut.“

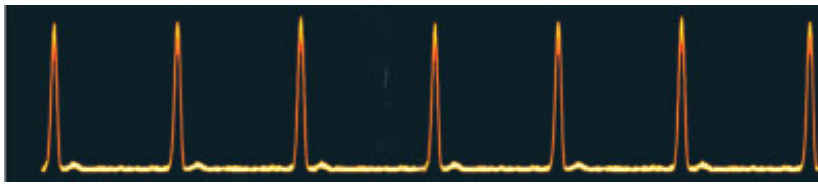
Doch das erreichbare Optimum scheint nach wie vor: Ein Atom speichert ein Bit. „Auch darunter scheint rein theoretisch noch einiges denkbar“, sagt Martin Albrecht. „Alles, was sich in verschiedenen, klar getrennten Zuständen befinden kann, taugt im Prinzip als Datenspeicher.“ So ist es vorstellbar, die einzelnen Bahnen in der Elektronenhülle zu nutzen oder gar die Protonen und Neutronen im Atomkern. Aber: Die technischen Schwierigkeiten sind derart enorm, dass es derzeit höchst unwahrscheinlich scheint, subatomare Strukturen zur Speicherung dienstbar zu machen: Allein die im Mikrokosmos stets präsente Wärmebewegung dürfte das auf absehbare Zeit unmöglich machen.

FRANK GROTELÜSCHEN



Bilder: IBM Research

Die Welt im • • •



In einer Sekunde reist ein Laserstrahl fast bis zum Mond. Wird er dagegen nach 50 Femtosekunden ausgeknipst, hat er eine Strecke zurückgelegt, die kaum den Durchmesser eines menschlichen Haares erreicht. Ein solcher Femtosekunden-Blitz ist in der Lage, chemische und physikalische Vorgänge zu erhellen, die sonst wohl immer vor uns verborgen wären.

Ahmed Zewail, Chemie-Nobelpreisträger des Jahres 1999, erklärt manchmal mit einer Anekdote, in welcher Tradition seine Arbeit steht: Der amerikanische Eisenbahnmagnat und Gouverneur Leland Stanford beauftragte in den siebziger Jahren des 19. Jahrhunderts den Fotografen Eadweard Muybridge damit, zu beweisen, dass Pferde während des Galopps einen Moment lang alle vier Hufe vom Boden abheben. Nachdem Muybridge Kameraverschlüsse entwickelt hatte, die sich nur für etwa eine tausendstel Sekunde öffneten, nahm er Bildserien auf. Sie zeigten, dass Pferde während einer kurzen Phase tatsächlich fliegen.

Zewail wurde vor etwa zwanzig Jahren zum Vorreiter von Tausenden von Chemikern, als er mit einer neu entwickelten „Kamera“ chemische Reaktionen gleichsam zu fotografieren begann. Die Kamera verwendet zwei Laserblitze, die jeweils nur Femtosekunden – der millionste Teil einer milliardstel Sekunde – dauern. Der erste liefert die Energie, um die Reaktion auszulösen. Dann folgt der zweite Blitz, dessen Energie von den reagierenden Stoffen aufgenommen und anschließend wieder abgestrahlt wird. Das so entstehende Spektrum ist zwar kein echtes Foto, liefert aber gewissermaßen einen Fingerabdruck der Moleküle.

Indem Wissenschaftler die Zeitspanne zwischen erstem und zweitem Blitz von Femtosekunden bis hin zu wenigen Pikosekunden verändern, können sie verfolgen, wie Moleküle schwingen, Bindungen aufbrechen oder sich schließen und wie sich die Reaktionspartner anordnen. Solche unvorstellbar schnellen Vorgänge lassen sich nur mit Femtosekunden-Blitzen gleichsam einfrieren und sichtbar machen. Mehrere Laserpulse hintereinander können die Bewegungen der Reaktionspartner heruntertakten, ähnlich dem stroboskopischen Diskotheken-Licht, in dem sich Tänzer scheinbar wie in Zeitlupe bewegen. Beispielsweise berichteten letztes Jahr Forscher des Berliner Max-Born-Instituts für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie im renommierten Wissenschaftsmagazin Science, dass sie auf diese Weise den Übergang eines Protons von einer Säure zu einer Base sichtbar gemacht hatten.

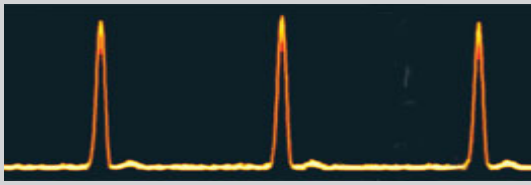
Längst jedoch beschränken sich Chemiker nicht mehr auf einen Beobachterstatus in der Femtowelt. Sie arbeiten daran, mit Ultrakurzzeit-Lasern aktiv den Ablauf von Reaktionen zu steuern. Zu diesen Wissenschaftlern zählt Gustav Gerber von der Universität Würzburg. Ihm und seinem Team gelang es, den Zerfall bestimmter Moleküle so zu beeinflussen, dass sich das Mengenverhältnis von erwünschten zu unerwünschten Reaktionsprodukten verbesserte. Der Clou seiner Methode: Ein selbstlernendes Computerprogramm passt die Form der Laserpulse stets dem Reaktionsverlauf an. Nach jedem Blitz erhält der Rechner eine Rückmeldung über das Ergebnis und verfolgt nur die positiven Entwicklungen weiter. „Das gezielte Zerlegen und Neuformen von Molekülen mit Femtosekunden-Lasern kann in Zukunft beispielsweise helfen, neuere, reinere Medikamente herzustellen“, ist Thomas Baumert von der Universität Kassel überzeugt, der eng mit Gerber kooperiert.

Die Reaktionen von Molekülen zu beobachten und zu steuern hat Harald Telle nicht im Sinn. Doch auch der Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Mikrooptische Messtechnik“ verwendet Femtosekunden-Laser und könnte sich dabei wie Zewail auf die legendäre Bildserie von Muybridge berufen. Die Rolle der Pferde nehmen dabei die Datenströme ein, die in Form von Laserblitzen durch Glasfasern jagen. Texte, Töne und Bilder werden auf diese Weise rund um die Welt übermittelt – im Routinebetrieb derzeit mit einer maximalen Geschwindigkeit von 40 Milliarden Bits oder 40 Milliarden Pulsen pro Sekunde. Bleiben dabei Bits sprichwörtlich auf der Strecke, untersuchen Experten die Fehlerursache mit Abtast-Oszilloskopen – Geräten, gleichsam Kameras, mit denen der zeitliche Verlauf der Pulsfolgen und damit auch die Form der Pulse sichtbar gemacht werden kann.

Um den Datenhunger der Informationsgesellschaft auch künftig stillen zu können, werden bereits Glasfasersysteme geplant, über die jede Sekunde 320 Milliarden Bit (320 Gigabit) übertragen werden können. Doch mit den herkömmlichen elektronischen Oszilloskopen lässt sich ein solch schneller Datenstrom nicht erfassen. Eine Lösung dieses Problems bieten optische Abtastverfahren. „Dabei wird einem Puls des Datenstroms

Foto: Eadweard Muybridge Collection/Kingston Museum/Science Photo Library

Femtosekunden- • • •



ein Femtosekunden-Puls überlagert. Mit Hilfe eines optisch-nichtlinearen Kristalls kann dann die momentane Helligkeit des Datenstroms während des Femtosekunden-Pulses gemessen werden“, erläutert Telle.

Ein einzelnes Bit vollständig abzutasten gelingt wegen dessen Schnelligkeit allerdings selbst mit einer Serie von Femtoblitzen nicht. Deshalb nutzen die Wissenschaftler um Telle aus, dass sich im Datenstrom Bits wiederholen. Diese identischen Bits werden stroboskopartig jeweils während unterschiedlicher Phasen angeblitzt. Zusammengesetzt lassen die Momentaufnahmen die Form der Bits erkennen. Möglich ist das nur, weil die PTB-Wissenschaftler eine neuartige Methode entwickelt haben, um gezielt Abtastpulse und Datenstrom relativ zueinander zu verschieben und präzise miteinander zu synchronisieren. Die Forscher konnten bereits demonstrieren, dass mit ihrem Verfahren selbst solche Bits gemessen werden können, die für die besten derzeitigen Abtast-Oszilloskope zehnmal zu schnell sind.

Übrigens verdankte auch Muybridge seinen Erfolg nicht alleine der Konstruktion eines extrem schnellen Kameraverschlusses, sondern außerdem seiner Methode, den Klick mit den Bewegungen der Pferde zu synchronisieren. Er stellte nicht nur eine, sondern eine ganze Reihe von Kameras am Rande einer Rennbahn auf. Ausgelöst wurden die Apparate durch dünne Fäden, die quer zur Bahn gespannt waren und die von den Pferden im Laufen zerrissen wurden.

Frank Frick

Bild: Auch ein ultrakurzer Laserblitz lässt sich noch gezielt verformen und in Farbe und Polarisation strukturieren, so dass sich mit seiner Hilfe chemische Reaktionen aktiv steuern lassen. Möglich wird dies durch „selbstlernende Laseranlagen“: In einem Lernprozess wird das Licht umgeformt oder zerlegt, so als würde ein Musiker alle Töne, die in einem Knall vereinigt sind, einzeln ausfiltern, um aus ihnen eine Symphonie zu komponieren. Das Bild zeigt einen solchen polarisationsgeformten Laserpuls, der sich über eine Zeitspanne von drei Pikosekunden erstreckt.(Quelle: Interdisziplinäres Zentrum für Nanostrukturforschung CINSaT, Universität Kassel)

Bild: PTB

Takt

Tausendsassa Femtosekunden-Laser

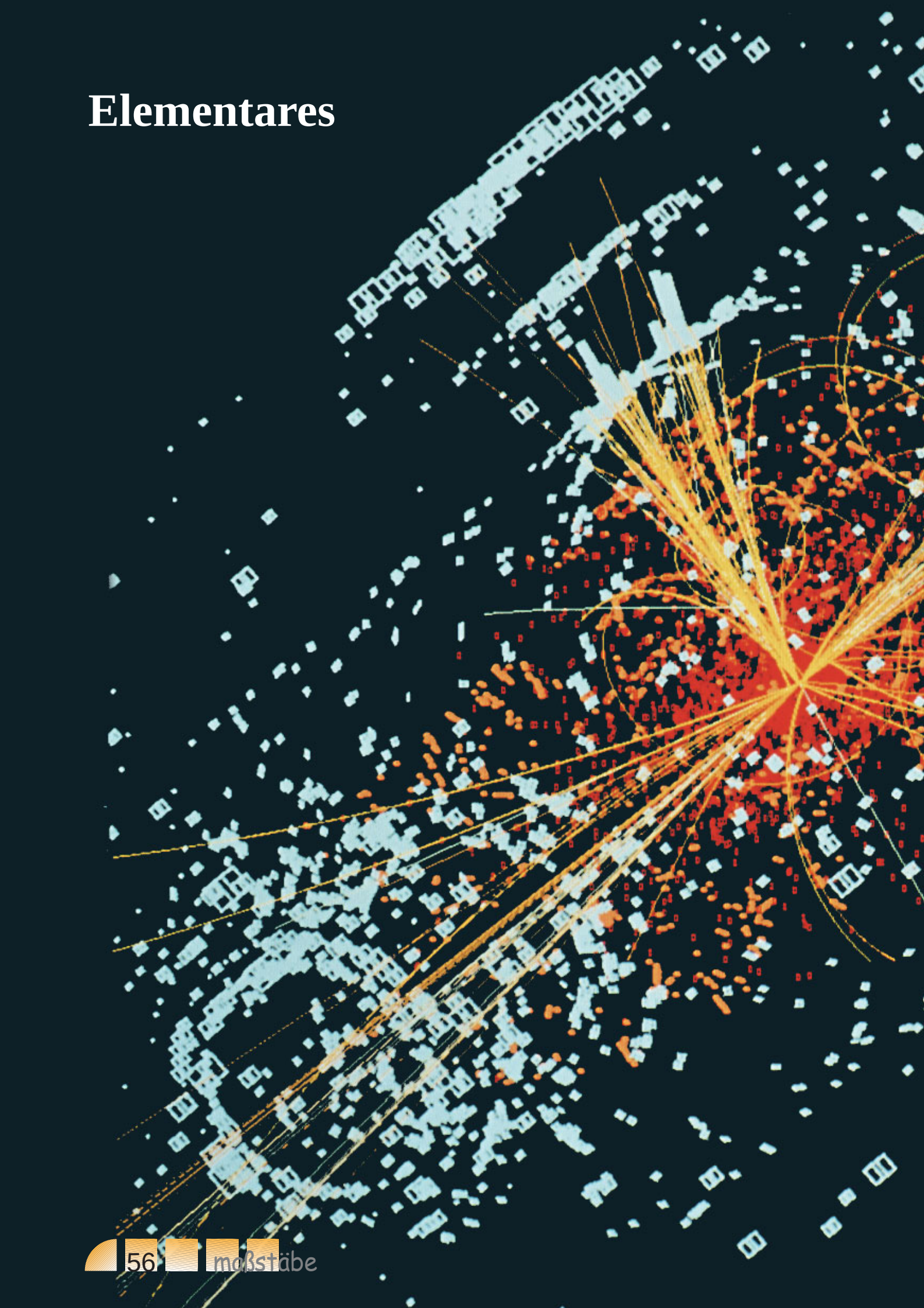
Aus Mikro wird Nano und aus Nano Femto – mit diesen Schlagworten lässt sich eine aktuelle technologische Entwicklung beschreiben. In Langform: Elektronische und optische Bauelemente sind inzwischen so winzig geworden, dass ihre Größe immer häufiger in Nanometern statt in Mikrometern angegeben wird. Als Werkzeug zu ihrer Bearbeitung und Strukturierung bieten sich zunehmend nicht mehr Nanosekunden- sondern Femtosekunden-Laser an. Diese können mit ihren ultrakurzen, aber hochintensiven Lichtpulsen kleinste Materialmengen besonders exakt und rückstandsfrei abtragen. Zu ihrer Verbreitung trägt bei, dass sie weit kompakter, billiger, zuverlässiger und einfacher zu bedienen sind als noch vor wenigen Jahren. Dadurch werden sie auch für andere Einsatzgebiete attraktiv, in denen sie ihre prinzipiellen Vorteile ausspielen können: beispielsweise in der Medizin als Präzisionsskalpelle oder Mikrobohrer von Augenärzten, Zahnärzten und Chirurgen sowie als Werkzeug zur Bearbeitung von Implantaten. Oder in der Informationstechnik zur Messung von ultraschnellen Vorgängen in Halbleitern.

In der Grundlagenforschung wird derweil aus Femto schon Atto: Anfang 2004 gelang es Bielefelder und Wiener Experimentalphysikern, Röntgenstrahlungs- und Elektronenpulse zu erzeugen und nachzuweisen, die nur 250 Attosekunden (10^{-18} Sekunden) lang waren.

ff

Obere Bildleiste:
Oszillogramm eines Zuges ultrakurzer Lichtimpulse. Ihr zeitlicher Abstand beträgt 100 Pikosekunden (billionstel Sekunden), was einem Lichtweg von 3 cm entspricht.

Elementares



Lichtteilchen wiegen gar nichts, Neutrinos wahrscheinlich ein wenig. Und Top-Quarks sind 300 000-mal schwerer als Elektronen. Für diese seltsamen Massenverhältnisse unter den physikalischen Elementarteilchen haben Physiker einen Schuldigen ausgemacht: das Higgs-Teilchen. Sie sind ihm dicht auf den Fersen.
In der Simulation haben die Physiker das Higgs-Teilchen schon gefunden – für den Eingeweihten herauszulesen aus den Teilchenspuren nach einem gewaltigen Crashtest, wie hier nach der Kollision zweier hochenergetischer Protonen.
Solche und ähnliche Ereignisse hoffen die Physiker am zukünftigen Beschleunigerring LHC des Europäischen Laboratoriums für Teilchenphysik CERN in Genf zu finden.

Bild: CERN

Wie die „Schwere“ in die Welt kam

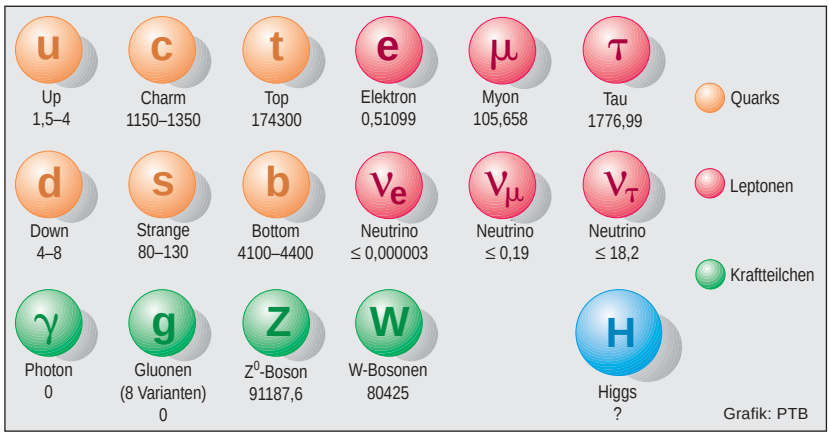
Nachdem Gott das Universum und die physikalischen Elementarteilchen erschaffen hatte, fiel ihm auf, dass alle Teilchen mit Lichtgeschwindigkeit durch das Weltall rasten. Er hatte nämlich vergessen, sie schwer zu machen. Und als brave Teilchen gehorchten sie der Relativitätstheorie, die masselosen Teilchen verbietet, sich langsamer als das Licht zu bewegen. Also übergab Gott seinem Lieblingsteilchen Masse und beauftragte es damit, sie gerecht unter den Teilchen zu verteilen. Den eigenwilligen Gerechtigkeitssinn dieses Higgs-Teilchens können die Physiker bis heute nicht nachvollziehen.

Denn beispielsweise bekamen die Photonen – das sind die Teilchen, aus denen das Licht besteht und die die elektromagnetische Kraft übertragen – überhaupt keine Masse ab. Dagegen sind die exotischen Top-Quarks mehr als 300 000-mal so schwer wie Elektronen, die selbst etwa ein Zweitausendstel der Masse eines Wasserstoffatoms besitzen. Und Neutrinos, die unter anderem beim radioaktiven Zerfall eine Rolle spielen, sind mindestens 150 000-mal leichter als Elektronen. Neue Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass das Higgs-Teilchen das Motto „An sich selbst denkt das kluge Teilchen zuerst“ sehr ernst nahm und für sich selbst mindestens die zweitgrößte Masse behielt.

Das Higgs-Teilchen ist das einzige noch unentdeckte Elementarteilchen der Standardtheorie der Teilchenphysik. Dieser Theorie ist es mit mathematischen Symmetrieüberlegungen gelungen, den unübersichtlichen Zoo physikalischer Teilchen aus einigen wenigen Elementarteilchen „zusammenzubauen“ (siehe Bild unten). Welcher Stein den Physikern damit vom Herzen gefallen sein muss, verdeutlicht eine ironische Aussage Robert Oppenheimers, des „Vaters“ der Atombombe, die er einige Jahre vor Entdeckung der Standardtheorie machte: „Den Nobelpreis in Physik sollte immer der Physiker bekommen, der im jeweiligen Jahr *kein* neues Teilchen entdeckt hat.“

Die Standardtheorie beschreibt viele Aspekte und experimentelle Ergebnisse der Teilchenphysik so treffend, dass man ungern auf sie verzichten möchte.

Die Massen der Elementarteilchen – so gut, wie man sie heute kennt. Die Massen sind, wie in der Elementarteilchenphysik üblich, in Energieeinheiten von Mega-Elektronenvolt (MeV) angegeben. (Die Werte für die Neutrinomassen sind lediglich Obergrenzen. Die Massen der Quarks liegen in den angegebenen Bereichen.) Über die Einsteinsche Äquivalenz von Masse und Energie erhält man folgende Umrechnung: 1 MeV = 1,783 10^{-27} g.
Quelle: S. Eidelman et al. (Particle Data Group), Phys. Lett. B 592, 1 (2004)



Aber sie hat einen schwerwiegenden Haken: Die mathematischen Symmetrien, auf denen sie aufbaut, funktionieren nur, wenn ausnahmslos alle Teilchen keine Masse haben. Pech, denn die meisten haben Masse!

Den Ausweg aus diesem Dilemma fand 1964 Peter Higgs von der Universität Edinburgh. Er „erfand“ einen Mechanismus, der die zunächst masselosen Teilchen erst später schwer machte. „Später“ bedeutet hier einen verschwindend kleinen Sekundenbruchteil nach dem Urknall.

Gemäß Higgs’ Theorie ist das Universum von einem physikalischen Feld erfüllt. Dieses Higgs-Feld hat die Eigenschaft, dass es bei sehr hohen Temperaturen den Wert Null annimmt und deshalb keine Auswirkungen hat. Erst als die Temperatur sank, nahm das Higgs-Feld einen von Null verschiedenen Wert an und entfaltete damit seine Wirkung: Es gab plötzlich eine Wechselwirkungsenergie zwischen dem Higgs-Feld und einigen Teilchen. Vereinfacht ausgedrückt: Das Feld „zerrt“ an den Teilchen und hindert sie dadurch daran, mit Lichtgeschwindigkeit zu rasen. Nach Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$ entspricht diese „Zerrenergie“ der Masse des jeweiligen Teilchens. Warum aber das Higgs-Feld an manchen Teilchen mehr zerrt und ihnen somit mehr Masse verleiht als anderen Teilchen, kann Higgs’ Theorie nicht erklären.

Gemäß der Quantentheorie gehört zu jedem physikalischen Feld ein Teilchen. Die Entdeckung des Higgs-Teilchens würde den Higgs-Mechanismus und die Standardtheorie der Teilchenphysik bestätigen und dem inzwischen 75-jährigen Professor Higgs wahrscheinlich einen Nobelpreis bescheren. Doch bisher hat man es nicht gefunden.

Und dabei waren Physiker ihm schon so dicht auf den Fersen. Im September 2000 fand man im Europäischen Laboratorium für Teilchenphysik CERN in Genf Hinweise auf seine Existenz. Im Großen Elektron-Positron-Beschleuniger LEP wurden Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, mit hoher Geschwindigkeit aufeinander geschossen. Dabei werden diese beiden Teilchen vernichtet und aus der frei werdenden

Energie entstehen neue Teilchen. Je mehr Energie zur Verfügung steht, desto größer kann die Masse der entstehenden Teilchen sein.

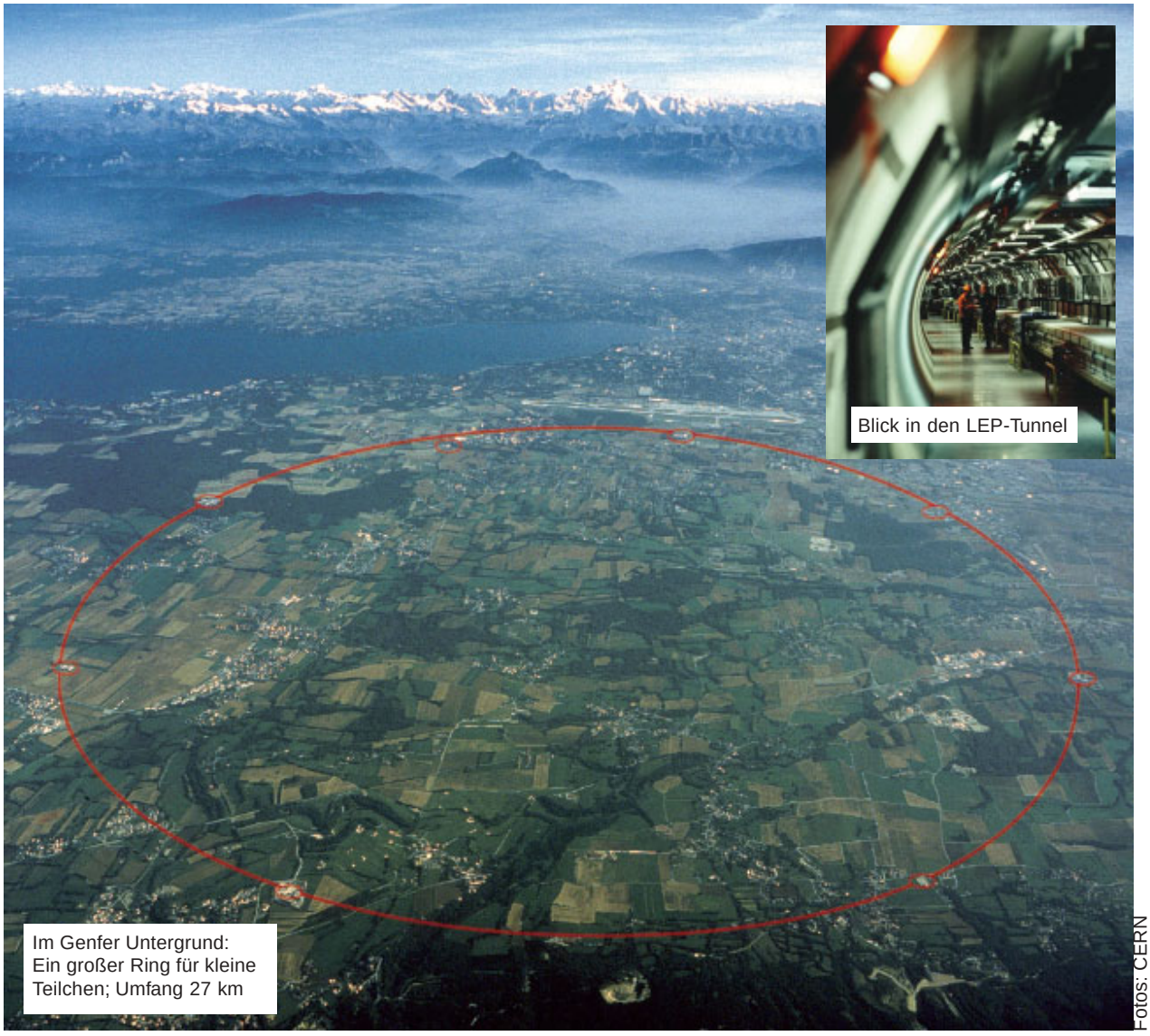
Doch die Daten konnten statistisch nicht genügend abgesichert werden. Zum einen schien die Masse des Higgs-Teilchens gerade an der Grenze der energetischen Möglichkeiten des LEP zu liegen, zum anderen drängte die Zeit. Denn der LEP sollte nach elf Betriebsjahren abgebaut werden und im 27 Kilometer langen ringförmigen Tunnel unter der französisch-schweizerischen Grenze Platz machen für den Bau des hundertmal energiestärkeren Großen Hadronenbeschleunigers LHC, der im Jahr 2007 seinen Betrieb aufnehmen und die Fahndung nach dem Higgs-Teilchen fortsetzen soll.

Vorläufig bleibt aufgrund der LEP-Daten nur die vage Vermutung, dass das „Teilchen Gottes“ eine Masse von etwa 115 Gigaelektronenvolt (GeV) haben könnte. GeV (genauer: GeV/c^2) ist die von Teilchenphysikern bevorzugte Maßeinheit für Massen. Ein GeV ist 1,783 tausendstel trilliardstel (10^{-24}) Gramm und entspricht in etwa der Masse eines Protons.

Wenn das Higgs-Teilchen existiert, dann – da sind sich die meisten Physiker sicher – wird es im LHC entdeckt werden. Zwar wird die Größe seiner Masse genauso wenig von der Standardtheorie der Teilchenphysik vorhergesagt wie die der anderen Teilchen, aber die Theorie liefert eine Abhängigkeit der Massen voneinander. Deshalb konnte man vor kurzem am Fermilab in der Nähe Chicagos durch eine genauere Bestimmung der Top-Quark-Masse für die Masse des Higgs-Teilchens eine Obergrenze von 251 GeV festsetzen. Der wahrscheinlichste Wert ist 117 GeV. Werte unterhalb von 114 GeV sind bereits früher experimentell ausgeschlossen worden.

Vielleicht war das Higgs-Teilchen, als es die von Gott erhaltene Masse verteilte, doch nicht so egoistisch, wie es scheint. Denn die Supersymmetrie, eine Weiterentwicklung der Standardtheorie der Teilchenphysik, geht davon aus, dass es zu jedem Teilchen der Standardtheorie einen „Superpartner“ gibt. Da man bisher keinen diesen Superpartner gefunden hat, müssten sie deutlich schwerer sein als die anderen Teilchen. Demnach hätte das „Teilchen Gottes“ sich bei der Wahl seiner Masse doch eher für die goldene Mitte entschieden.

Axel Tillemans



Blick in den LEP-Tunnel

Im Genfer Untergrund: Ein großer Ring für kleine Teilchen; Umfang 27 km

Fotos: CERN

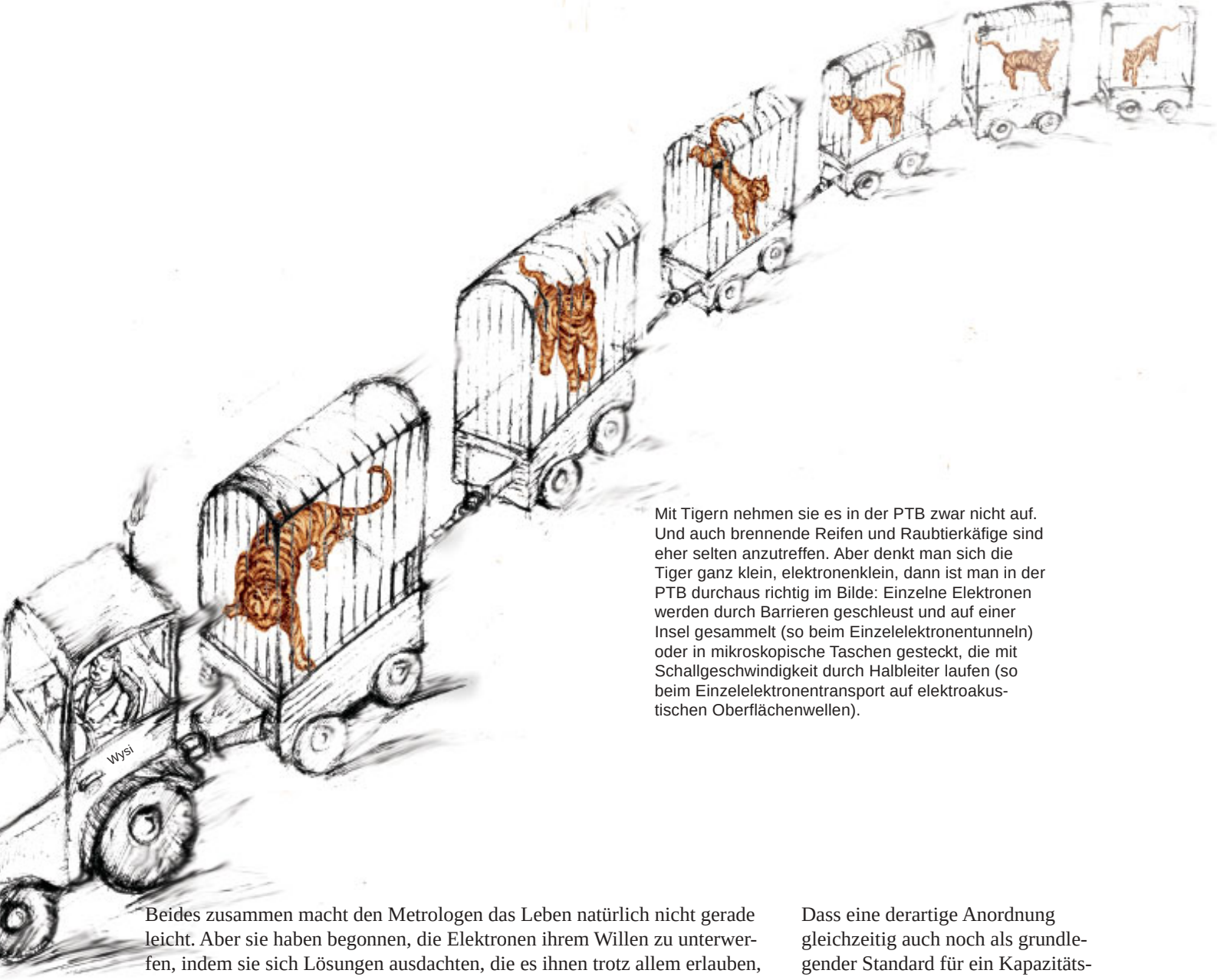
Die Elektronen-Dompteure

Entweder umhüllen sie wie eine Wolke die Atomkerne oder sie sind rasend schnell auf dem Weg und machen Strom – in beiden Fällen sind Elektronen schwer zu fassen. Mit raffinierten Methoden gelingt es Wissenschaftlern jedoch, die winzigen Ladungsträger einzeln zu manipulieren, zu beobachten und zu registrieren. Und wer das kleine Elektron bändigt, hat einen großen wissenschaftlichen Schritt getan.

Wie misst man elektrischen Strom? Normalerweise durch die Kraft, die er auf andere Stromleiter ausübt. So ist auch die Grundeinheit der Stromstärke auf diese Weise festgelegt, das Ampere. Die Definition stammt noch aus den vierziger Jahren des letzten Jahrhunderts, und sie funktioniert seither, aber elegant ist sie nicht. „Eine Rückführung der wichtigen Maßeinheiten Ampere und Kilogramm auf Naturkonstanten ist bisher nicht gelungen, obwohl dadurch eine enorme Steigerung der Präzision und Stabilität von Messungen möglich würde“, erklärt Franz Josef Ahlers, Leiter der Arbeitsgruppe „Niedrigdimensionale Elektronensysteme“ in der PTB.

Ideal wäre es, wenn man die Stromstärke direkt durch die Ursache des Stroms definieren könnte, also durch die Elektronen. Bedeutet doch das Fließen eines Stroms nichts anderes, als dass eine hohe Anzahl der winzigen, negativ geladenen Teilchen sich durch ein Material bewegen, und zwar im Großen und Ganzen in eine Richtung. Da läge es eigentlich nahe, zur Definition von 1 Ampere einfach die Zahl der Elektronen abzuzählen, die nötig ist, um diesen Wert zu erreichen.

Klingt gut, ist gut, aber in der Praxis lässt sich das nicht ohne weiteres machen. Denn dort treten Elektronen praktisch immer in großen Schwärmen auf; einzelne zu identifizieren, zu messen oder gar zu manipulieren ist äußerst schwer. Das hat zwei Gründe: Erstens sind Elektronen extrem klein, und die negative Ladung, die sie tragen, ist ebenfalls minimal: Sie beträgt ganze 1,602 mal 10^{-19} Coulomb. Kein Messgerät der Erde kann das registrieren. Und zweitens gehorchen die Elektronen den Gesetzen der Quantenmechanik: Sie befinden sich nicht an einem festen Ort, sondern „verschmieren“ sich als Welle über das Material, lassen sich nicht exakt fassen, sondern nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit an einem bestimmten Ort detektieren.



Mit Tigern nehmen sie es in der PTB zwar nicht auf. Und auch brennende Reifen und Raubtierkäfige sind eher selten anzutreffen. Aber denkt man sich die Tiger ganz klein, elektronenklein, dann ist man in der PTB durchaus richtig im Bilde: Einzelne Elektronen werden durch Barrieren geschleust und auf einer Insel gesammelt (so beim Einzelelektronentunneln) oder in mikroskopische Taschen gesteckt, die mit Schallgeschwindigkeit durch Halbleiter laufen (so beim Einzelelektronentransport auf elektroakustischen Oberflächenwellen).

Beides zusammen macht den Metrologen das Leben natürlich nicht gerade leicht. Aber sie haben begonnen, die Elektronen ihrem Willen zu unterwerfen, indem sie sich Lösungen ausdachten, die es ihnen trotz allem erlauben, einzelne Elektronen zu manipulieren und zu messen. Etwa mit Hilfe einer „Einzelelektronenpumpe“. Sie nutzt einen Effekt aus, den der Japaner Leo Esaki 1957 an Germanium entdeckte. 1973 erhielt er dafür den Nobelpreis. Es handelt sich um das verblüffende Phänomen, dass Elektronen bei tiefen Temperaturen durch sehr dünne Isolatorschichten hindurchdriften können. Man spricht dann vom Tunneleffekt. Diese Fähigkeit, Barrieren zu überwinden, die nach den Gesetzen der klassischen Physik undurchdringbar sein müssten, lässt sich nur durch die Quantenphysik erklären.

Single Electron Tunnelling (SET) heißt der Fachausdruck dafür, und die Physiker im Fachbereich „Quantenelektronik“ der PTB setzen das Phänomen ein, um einzelne Elektronen zu zählen. Wie ein Dompteur im Raubtierkäfig bauen sie eine Umgebung auf, in der die Tiger – hier die Elektronen – keine Möglichkeit mehr haben, sich frei zu bewegen. Sie stellen dem Strom in einem elektronischen Schaltkreis aus extrem dünnen Aluminiumbahnen zwei Barrieren in den Weg. Beide bestehen aus Aluminiumoxid, das als Isolator wirkt. Zwischen den beiden Barrieren entsteht dann sozusagen eine kleine „Insel“, die für die Elektronen normalerweise nicht erreichbar ist. Regt man sie aber mit elektromagnetischen Wellen an – allez hopp –, gelingt es aufgrund des Tunneleffekts einzelnen Elektronen, die erste Barriere zu überwinden und auf die Insel zu springen. Wegen der zweiten Barriere können sie aber nicht mehr ohne weiteres wieder entkommen. Eine raffinierte Messanordnung, die einem Transistor nachgebildet ist, erfasst die Anzahl der Elektronen auf der Insel.

Dass eine derartige Anordnung gleichzeitig auch noch als grundlegender Standard für ein Kapazitätsnormal herhalten kann, ist ein schöner Nebeneffekt. Forscher der PTB sind ebenso wie ihre Kollegen am NIST, dem amerikanischen National Institute of Standards and Technology in Gaithersburg, zurzeit dabei, einen solchen Standard zu entwickeln. Bisher wurde die Kapazitäts-Einheit Farad durch Kondensatoren auf Quarzbasis definiert. Diese Vergleichsnormale sind von hoher Qualität, trotzdem können sie sich mit der Zeit verändern, außerdem sind sie abhängig von Temperatur oder Druck. Deshalb versuchen die Metrologen, einzelne Elektronen so zu manipulieren, dass man mit ihrer Hilfe ein Kapazitätsnormal definieren kann. Rund 6 Millionen Elektronen muss man auf der Platte eines winzigen Kondensators von einem Pikofarad sammeln, um die Spannung von einem Volt zu erreichen.

Die Bedingungen für die Präzisionsmessungen mit einzelnen Elektronen sind technisch extrem anspruchsvoll: Die Strukturen müssen ultraklein sein, kleiner als ein Mikrometer, und die Temperaturen ultrakalt, in der Nähe des absoluten Nullpunkts.

Tief im Keller, hinter doppelten Stahltüren mit Superdichtung ist der Arbeitsplatz von Hansjörg Scherer. Hier führt er die Messungen in einem extrem gut gegen äußere elektromagnetische Störungen abgeschirmten Labor durch. „Vier bis fünf Stunden muss unsere Spielwiese für elektronische Tunnelsysteme gekühlt werden, bis sie die nötige tiefe Temperatur erreicht hat“, erklärt er. Auf dieser „Spielwiese“ befindet sich beispielsweise die bereits angesprochene Einzelelektronenpumpe. Sie besteht aus zwei Inseln, zwischen denen Elektronen wandern können. Angeregt wird diese Wanderung durch ein von außen kommendes Hochfrequenzsignal. „Stellt man alle Parameter passend ein, kann man pro Zyklus genau ein Elektron zwischen den beiden Inseln verschieben“, so Scherer.

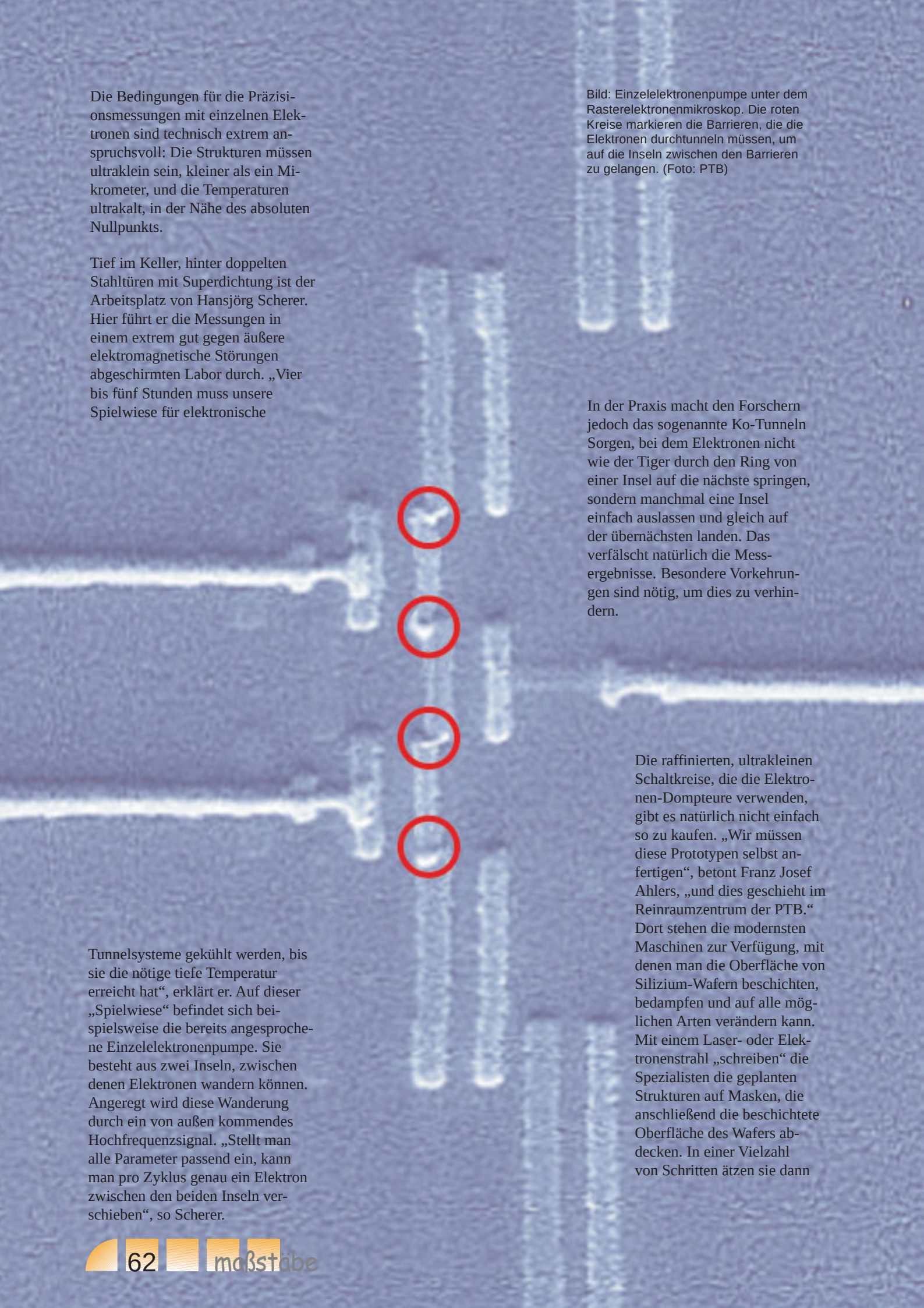
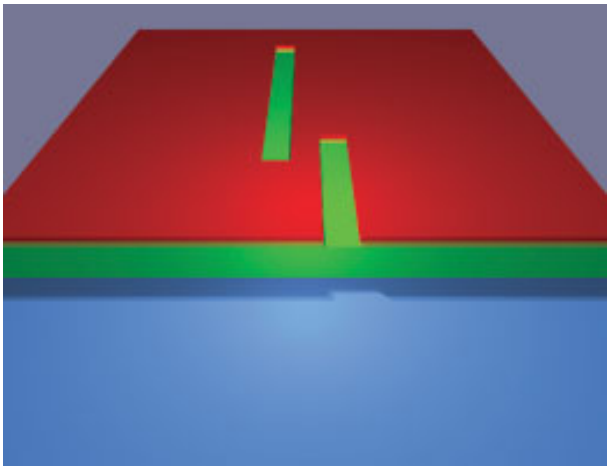
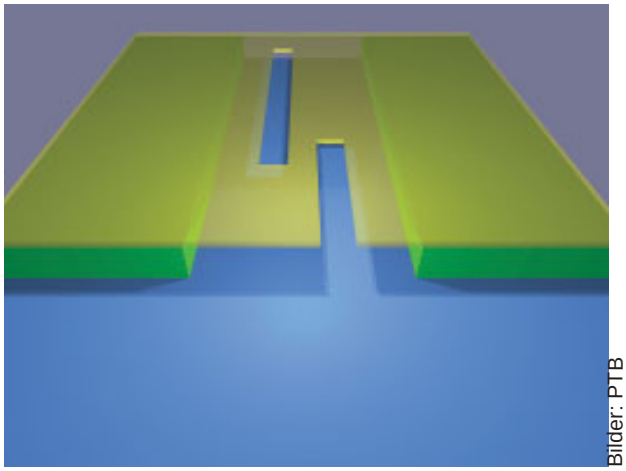


Bild: Einzelelektronenpumpe unter dem Rasterelektronenmikroskop. Die roten Kreise markieren die Barrieren, die die Elektronen durchtunneln müssen, um auf die Inseln zwischen den Barrieren zu gelangen. (Foto: PTB)

In der Praxis macht den Forschern jedoch das sogenannte Ko-Tunneln Sorgen, bei dem Elektronen nicht wie der Tiger durch den Ring von einer Insel auf die nächste springen, sondern manchmal eine Insel einfach auslassen und gleich auf der übernächsten landen. Das verfälscht natürlich die Messergebnisse. Besondere Vorkehrungen sind nötig, um dies zu verhindern.

Die raffinierten, ultrakleinen Schaltkreise, die die Elektronen-Dompteure verwenden, gibt es natürlich nicht einfach so zu kaufen. „Wir müssen diese Prototypen selbst anfertigen“, betont Franz Josef Ahlers, „und dies geschieht im Reinraumzentrum der PTB.“ Dort stehen die modernsten Maschinen zur Verfügung, mit denen man die Oberfläche von Silizium-Wafern beschichten, bedampfen und auf alle möglichen Arten verändern kann. Mit einem Laser- oder Elektronenstrahl „schreiben“ die Spezialisten die geplanten Strukturen auf Masken, die anschließend die beschichtete Oberfläche des Wafers abdecken. In einer Vielzahl von Schritten ätzen sie dann





Bilder: PTB

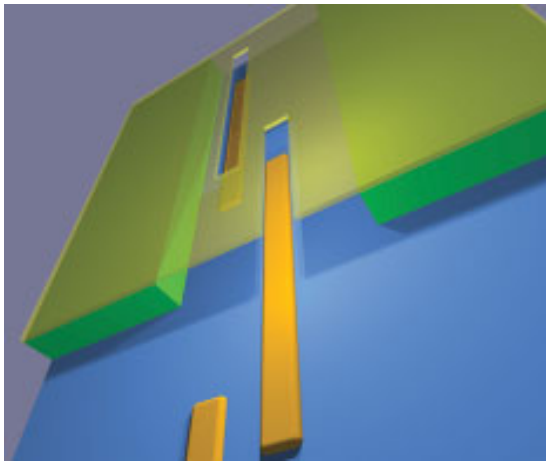
winzige Kanäle in die Beschichtungen. Um die Barrieren und Inseln zu erzeugen, benutzen die PTB-Forscher ein besonders raffiniertes Verfahren, die so genannte Schrägbedampfungstechnik. Bei ihr wird der Schatten ausgenutzt, den die winzigen Strukturen auf ihre Unterlage werfen. In den Schattenzonen erreichen beim Bedampfen keine Atome den Wafer, und so lassen sich winzige, genau definierte Überlappungen zwischen den einzelnen Leiterbahnen herstellen.

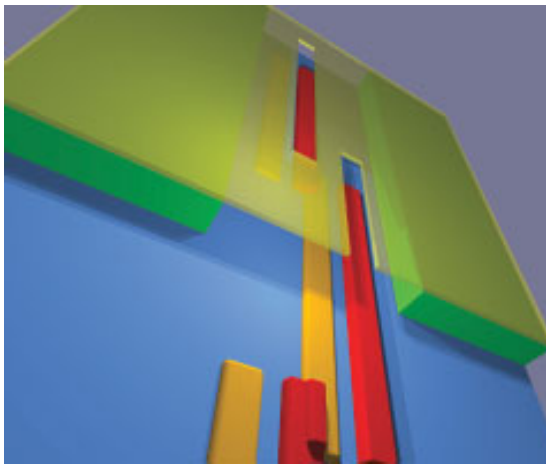
Im Labor von Franz Josef Ahlers hat die Einzelelektronenpumpe durch ein ganz anderes Verfahren Konkurrenz bekommen: Er zwingt seine Elektronen-Tiger nicht zum Sprung durch den Reifen, sondern lässt sie auf einer Art Förderband an der Oberfläche eines Halbleiterchips entlang surfen. Dies gelingt ihm mit elektrischen Feldern, die durch Schallwellen im piezoelektrischen Kristall entstehen. Ahlers spricht gern von „Nanobeben“, weil sie sich typischerweise wie ein Erdbeben an der Festkörper-Oberfläche ausbreiten. Und obwohl ihre Abmessungen extrem klein sind – die Länge der Wellen liegt im Maßstab von tausendstel Millimetern, ihre Höhe ist noch tausendmal kleiner – erzeugen sie große Spannungen im Inneren des Materials: bis zu 100 000 Volt pro Zentimeter.

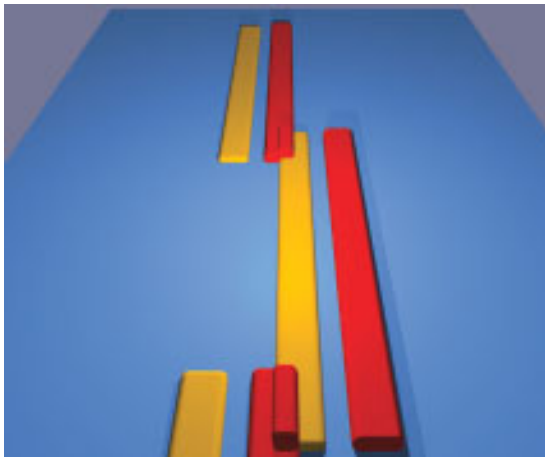
Einzelne Elektronen reiten nun auf dieser elektroakustischen Welle an der Kristalloberfläche entlang, und zwar mit Schallgeschwindigkeit. Unregelmäßigkeiten im Material können den Ritt stören, aber „was man nicht vermeiden kann, sollte man für seine Zwecke nutzen“, so Ahlers. Bestimmte Konstellationen an der Oberfläche wirken wie so genannte Quantenpunkte. Sie bilden einen Potentialtopf, in dem einzelne Elektronen gefangen und aufbewahrt werden können.

Der Effekt bietet neben der Anwendung als Standard für die Stromstärke eine weitere Riesen-Chance: Er könnte eines Tages dabei helfen, einen Quantencomputer zu konstruieren. Denn dieser beruht darauf, einzelne Quanten oder Teilchen zu manipulieren, zu transportieren und zu speichern. Und er könnte das neue Superwerkzeug werden für viele Probleme, an denen heutige Großrechner noch scheitern.

Brigitte Röthlein







Bilder:
Im Reinraumzentrum wird sie in mehreren Prozessschritten strukturiert: eine Einzelelektronenpumpe. Nachdem ein Siliziumsubstrat (in der Bildfolge: blauer Untergrund) mit einer 3-stufigen Lackmaske (grün: Co-Polymer, gelb: Germanium, rot: PMMA) überzogen wurde, schreibt zunächst ein Elektronenstrahl Streifen in die beiden oberen Lagen der Lackmaske. Nach dieser Vorbereitung wird in die Lackmaske eine Höhle geätzt (Bild oben rechts). Jetzt kommen die eigentlichen Leiterbahnen: Zunächst wird die Probe nach links gekippt, eine Aluminiumschicht schräg aufgedampft und anschließend oxidiert (gelbe Streifen). Diese Oxidschicht wird die spätere Tunnelbarriere. Die nächste Aluminiumschicht wird, nachdem die Probe zur anderen Seite gekippt wurde, überlappend aufgedampft (rote Streifen). Wird jetzt noch die Lackmaske abgelöst, ist die Metallstruktur für die Einzelelektronenpumpe fertig.

Das Letzte

Rätselhafte Wesen sind sie, die Katzen: wie sie da auf ihren Samtpfoten daherschleichen, unversehens aus dem Nichts auftauchen und schnurrend die Beine umstreichen, plötzlich und unerwartet mit scharfen Krallen zuschlagend. Versuche nur einer, sie zu zähmen oder gar sie dazu zu bewegen, nicht gerade das frischeste Bett als Schlaf- und das neueste Sofa als Krallenwetzplatz auszuwählen – er wird kläglich scheitern. Allein zu verstehen, welch hinterhältiger Plan jetzt in diesem Moment hinter den beiden schmalgeschlitzten Pupillen heranreift, hat wohl noch kein Mensch je vermocht.

Vermutlich wieder einmal in solchen Gedanken versunken, während seine silbergraue Schönheit durch das Labor streifte, blieb Erwin Schrödinger gar keine andere Wahl, als genau diese sphinxhafte, unergründliche Kreatur als Modell zu wählen. Als Modell in einem Gedankenexperiment, das bis heute zu den rätselhaftesten Dingen gehört, die die Wissenschaft zu bieten hat. Tot oder nicht tot – das ist hier die Frage. Rein mathematisch betrachtet, ist Schrödingers Katze gar beides zugleich – zumindest bevor man nachsieht, somit eine Messung vollzieht und das System auf einen der beiden Zustände gewissermaßen fixiert.

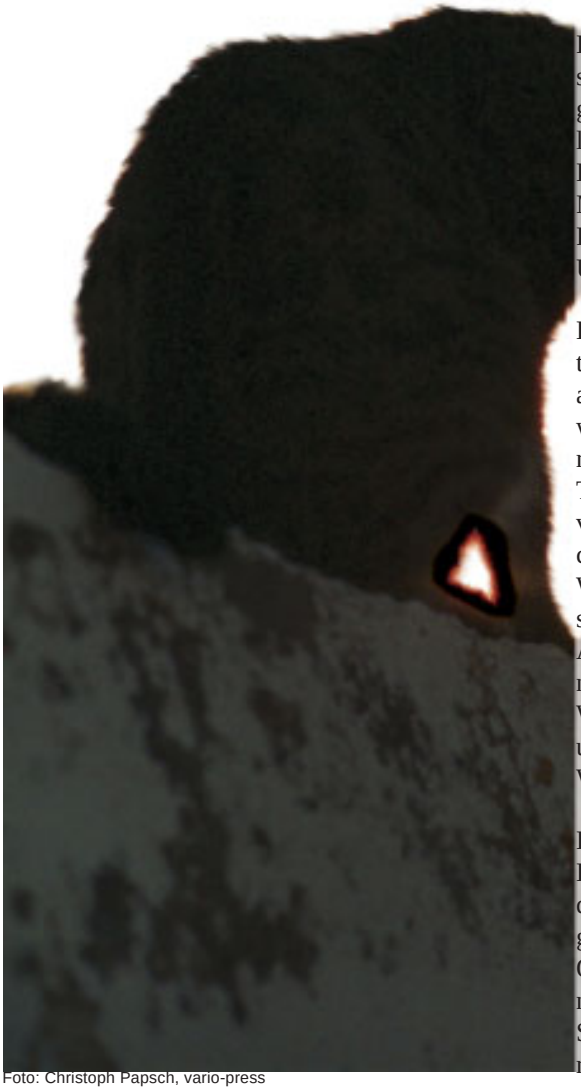


Foto: Christoph Papsch, vario-press

Es steht also fest: Schrödinger besaß eine Katze. Weiterhin steht fest: Es gibt viele Katzen auf der Welt: graue, schwarze, getigerte, grün- oder blauäugige, Whiskas- und Lasagneliebende – und es gibt wirkliche, waschechte Schrödinger-Katzen. Die sind allerdings ziemlich klein, genauer gesagt Molekül-klein. Zu finden sind sie nicht in den Laboren von Physikern, jedenfalls nicht nur dort. Nein: in Arztpraxen. Und in Apotheken.

Lassen Sie sich doch mal einen Termin bei Ihrem Homöopathen geben. (Ist doch ohnehin überfällig, jetzt im Winter, wo all die Zipperlein wieder auftauchen, die der milde Sommerwind sachte weggeweht hatte). Und fragen Sie ihn nach diesen rätselhaftesten aller Medikamente: jenen homöopathischen Tropfen, die so oft verdünnt worden sind, dass irgendwann vor den Herstellern, jenen Alchemisten der Neuzeit, ein Becherglas mit Wasser steht, das nur ein einziges Molekül der Wirksubstanz enthält. Und nach dem nächsten Verdünnungsschritt? Rechts Wasser mit Wirkstoff-Molekül, links ohne? Also rechts ein wirksames Medikament, links keines? Oh nein, wird ihr Homöopath sagen, beide wirken gleich gut. Wasser hat so etwas wie ein Gedächtnis, könnte er erklären, und beide Teilmengen enthalten noch die Information aus dem Wirkstoff.

Dann kommt die Stunde ihres Lebens: Aha, eine Schrödinger-Katze, werden Sie ausrufen. Das Wirkstoff-Molekül ist ein quantenmechanisches Objekt; es befindet sich mit gleich großer Wahrscheinlichkeit in jedem der beiden Bechergläser. Oder in beiden gleichzeitig – auch wenn ein Mensch so etwas nicht denken, sondern nur rechnen kann. Und dann nehmen Sie beide Hälften triumphierend mit nach Hause und probieren aus, ob sie wirken – am besten an Ihrer Katze.

Erika Schow

Ich möchte die *maßstäbe* kostenlos abonnieren. Bitte schicken Sie sie mir ab

- ☐ dieser Ausgabe (Heft 5)
- ☐ kommender Ausgabe (Heft 6)

an die umseitig angegebene Adresse.

☐ Bitte schicken Sie mir zusätzlich das vierte Heft der *maßstäbe* „Im Labyrinth des Zufalls“.

Die Hefte 1 „Dimensionen der Einheiten“, 2 „Größen des Sports“ und 3 „Zum Licht“ sind vergriffen. Sie finden die *maßstäbe* aber im Internet (www.ptb.de) unter „Publikationen“ wo Sie sie sich auch als PDF herunterladen können.

Wenn Sie hier keine Karte mehr vorfinden, können Sie die *maßstäbe* als kostenloses Abonnement bei der Redaktion direkt bestellen. (Adresse: siehe Impressum)

Ich möchte die *maßstäbe* kostenlos abonnieren. Bitte schicken Sie sie mir ab

- ☐ dieser Ausgabe (Heft 5)
- ☐ kommender Ausgabe (Heft 6)

an die umseitig angegebene Adresse.

☐ Bitte schicken Sie mir zusätzlich das vierte Heft der *maßstäbe* „Im Labyrinth des Zufalls“.

Die Hefte 1 „Dimensionen der Einheiten“, 2 „Größen des Sports“ und 3 „Zum Licht“ sind vergriffen. Sie finden die *maßstäbe* aber im Internet (www.ptb.de) unter „Publikationen“ wo Sie sie sich auch als PDF herunterladen können.

Ich möchte die *maßstäbe* kostenlos abonnieren. Bitte schicken Sie sie mir ab

- ☐ dieser Ausgabe (Heft 5)
- ☐ kommender Ausgabe (Heft 6)

an die umseitig angegebene Adresse.

☐ Bitte schicken Sie mir zusätzlich das vierte Heft der *maßstäbe* „Im Labyrinth des Zufalls“.

Die Hefte 1 „Dimensionen der Einheiten“, 2 „Größen des Sports“ und 3 „Zum Licht“ sind vergriffen. Sie finden die *maßstäbe* aber im Internet (www.ptb.de) unter „Publikationen“ wo Sie sie sich auch als PDF herunterladen können.

bitte frankieren

Absender

Name/Vorname

Straße/Hausnummer/Postfach

PLZ/Ort

Land

Telefon

E-Mail

Antwort

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Postfach 3345
38023 Braunschweig

bitte frankieren

Absender

Name/Vorname

Straße/Hausnummer/Postfach

PLZ/Ort

Land

Telefon

E-Mail

Antwort

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Postfach 3345
38023 Braunschweig

bitte frankieren

Absender

Name/Vorname

Straße/Hausnummer/Postfach

PLZ/Ort

Land

Telefon

E-Mail

Antwort

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Postfach 3345
38023 Braunschweig

Wenn Sie hier keine Karte mehr vorfinden, können Sie die *maßstäbe* als kostenloses Abonnement bei der Redaktion direkt bestellen. (Adresse: siehe Impressum)

Ansprechpartner in der PTB

Folgende Mitarbeiter der PTB sind in den Beiträgen dieses Heftes namentlich erwähnt:

S. 7–9: Viel Lärm um Nichts
Dr. Karl Jousten (karl.jousten@ptb.de)
Arbeitsgruppe „Vakuummetrologie"

S. 13–14: Ebenen mit Nanometerhügeln
Dr. Ralf Geckeler (ralf.geckeler@ptb.de)
Dr. Michael Schulz (michael.schulz@ptb.de)
Arbeitsgruppe „Bildoptik"

S. 14–17: Spuren von Hiroshima –
Im Untertagelabor der PTB
Dr. Dirk Arnold (dirk.arnold@ptb.de)
Arbeitsgruppe „Umweltradioaktivität"
Dr. Stefan Neumaier (stefan.neumaier@ptb.de)
Arbeitsgruppe „Strahlenschutz"

S. 20–22: Wie man Menschen
beim Denken zuschaut
Dr. Lutz Trahms (lutz.trahms@ptb.de)
Arbeitsgruppe „Biomagnetismus"

S. 36–38: Blicke in die Mikro-Welt
Werner Mirandé (werner.mirande@ptb.de)
Dr. Bernd Bodermann (bernd.bodermann@ptb.de)
Arbeitsgruppe „Quantitative Mikroskopie"

S. 50–52: Magnetbits, Holowürfel,
Tausendfüßler
Dr. Martin Albrecht (martin.albrecht@ptb.de)
Arbeitsgruppe „Signalspeichertechnik"

S. 53–55: Die Welt im Femtosekundentakt
Dr. Harald Telle (harald.telle@ptb.de)
Arbeitsgruppe „Mikrooptische Messtechnik"

S. 60–6: Die Elektronen-Dompteure
Dr. Franz Josef Ahlers (franz-josef.ahlers@ptb.de)
Arbeitsgruppe „Niedrigdimensionale
Elektronensysteme"
Dr. Hansjörg Scherer (hansjoerg.scherer@ptb.de)
Arbeitsgruppe „Einzelelektronentunneln,
Quantum Computing"

Impressum

Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin

Redaktion

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB
Postfach 3345, 38023 Braunschweig
Telefon: (05 31) 592-30 06
E-Mail: presse@ptb.de
Redakteure: Jens Simon (verantwortlich), Erika Schow
Autoren: Almut Bruschke-Reimer, Birgit Ehlbeck,
Anne von Figura, Julia Förster, Frank Frick (ff),
Nicole Geffert, Frank Grotelüschen, Monika Herbst,
Andrea Hoferichter (ah), Ute Kehse,
Jan Oliver Löfken, Brigitte Röthlein, Dörte Saße,
Rainer Scharf (rs), Axel Tillemans
Layout: Jörn-Uwe Barz
Grafik: Björn Helge Wysfeld
Fact checker: Bernd Warnke
Redaktionsassistenz: Cornelia Land
Titelassistenz: Helge Lemmel

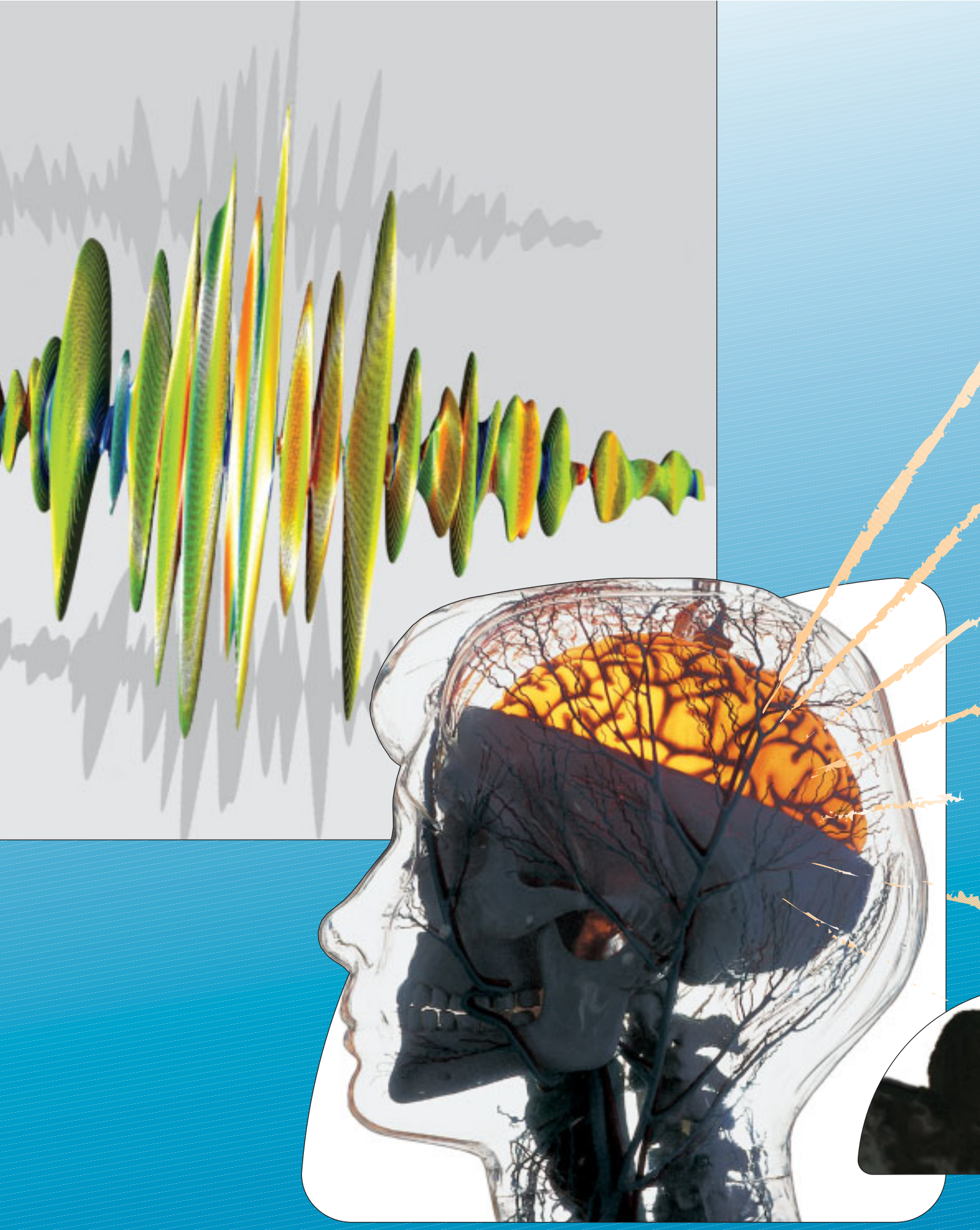
Druck

FischerDruck, Peine

Auszüge der „maßstäbe" im Internet unter www.ptb.de

© PTB. Alle Rechte vorbehalten.
Bitte geben Sie bei einem auszugsweisen Nachdruck
Quelle und Autor an und benachrichtigen Sie die Redaktion.

Braunschweig, Dezember 2004



ISSN 1618-1999