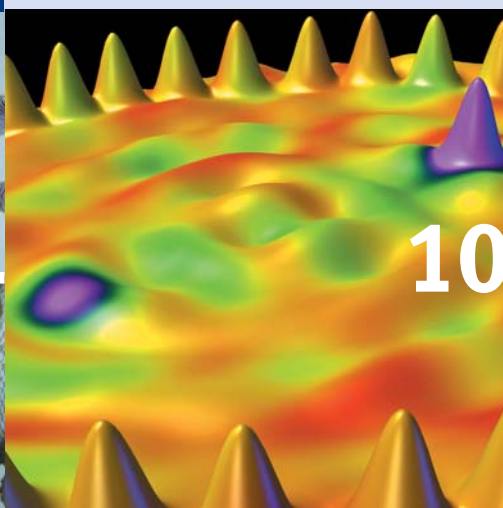


Spiel der Kräfte

INHALT



4



10



16



18

*„Trau lieber deiner Kraft
als deinem Glück.“*

PUBLILIUS SYRUS (1. JHD. V. CHR.),
RÖMISCHER DICHTER

4 Kräfte, die im Kleinen walten

10 Reise ins Quantenland

16 Kraftvolles Quartett

18 Zwischen Himmel und Erde

24 Über dem Horizont



24

IMPRESSUM

HERAUSGEBER

Deutsche Physikalische
Gesellschaft e.V. (DPG)

Bundesministerium für
Bildung und Forschung

AUTOR

Dr. Mathias Schulenburg

INFORMATIONEN ZUM INHALT

Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
Pressestelle

Rathausplatz 2-4

53604 Bad Honnef

Tel. (0 22 24) 95 195 - 18

Fax (0 22 24) 95 195 - 19

presse@dpg-physik.de

KONZEPT, REDAKTION UND GESTALTUNG

iserundschmidt

Kreativagentur für PublicRelations GmbH
Bad Honnef – Berlin

(Verantwortlich:

Dr. Marcus Neitzert, Claudia Oly)

COVER-MOTIV

Markus Dold, GD 90, Buchenbach

Juni 2004

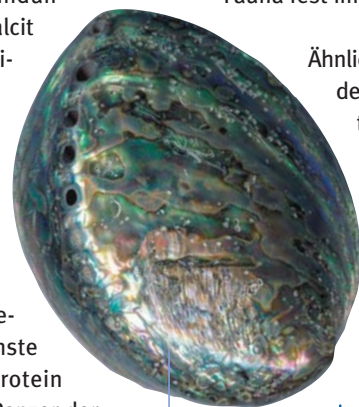
Kräfte, die im Kleinen walten

„Kraft macht keinen Lärm, sie ist da und wirkt.“

ALBERT SCHWEITZER (1875 · 1965),
FRANZ. ARZT UND FRIEDENSNOBELPREISTRÄGER
DT. HERKUNFT

An der Entstehung des Lebens auf der Erde war die Schwerkraft maßgeblich beteiligt. Nicht nur, weil sie die Atmosphäre inklusive Wasserdampf und damit das Wasser festhielt – Planeten mit geringerer Schwerkraft wie der Mars haben davon nur noch kümmerliche Reste, der Mond verfügt über kaum mehr als ein Vakuum. Die Schwerkraft hat auch die Form der Lebewesen mitbestimmt. Denn wer sich in einem Schwerfeld erheben will, braucht eine Stütze – ein Skelett oder eine feste Außenhaut. Um derlei an-

fertigen zu können, musste die Natur harte Materialien in ihren Dienst stellen: Minerale, die sie mit den feinen Kräften der Kristallisation in eine geeignete Form bringen konnte. Weithin verfügbares Baumaterial waren Verbindungen des Calciums wie Calcit und Aragonit, beides Calciumcarbonate (CaCO_3). Perlmutter zum Beispiel besteht aus winzigen Aragonitkriställchen, die allein sehr spröde daher kommen, in Muscheln aber mit schraubenartigen, hochelastischen Proteinen verkittet sind. Kleinste Beimischungen von Protein genügen bereits, um den Panzer der Abalone – ein Weichtier, das zum Beispiel vor der Küste Südafrikas lebt – tausend-



Abalonen sind die wichtigsten Perlmutter-Lieferanten. (Bild: Suzy Coppens, BergerhofStudios)

fach bruchzäher als reinen Calcit zu machen. Auch Seeigel verstärken so ihre langen Stachel und strotzen damit der heftigen Brandung. Deshalb hat auch die moderne Werkstoffforschung die marine Fauna fest im Auge.

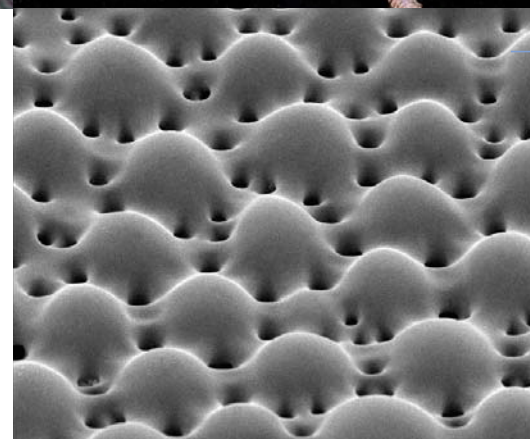
Ähnlich meisterlich gestaltet: der Schwimm-tank des Tintenfisches. Um ohne Kraftaufwand in der Schwebe bleiben zu können, verfügt das Tier über einen Schwimmkörper aus Calciumcar-

„Van-der-Waals-Kräfte“ halten Geckos an der Decke. Die flinken Kletterer kommen somit ohne Klebstoff oder Saugnäpfe aus. (Bild: S. Gorb, MPI für Metallforschung, Stuttgart)

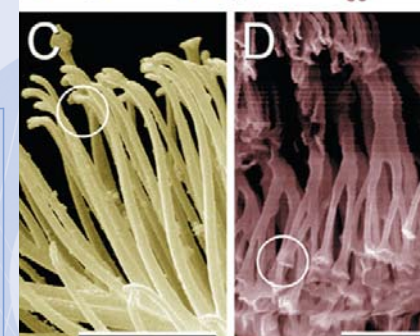
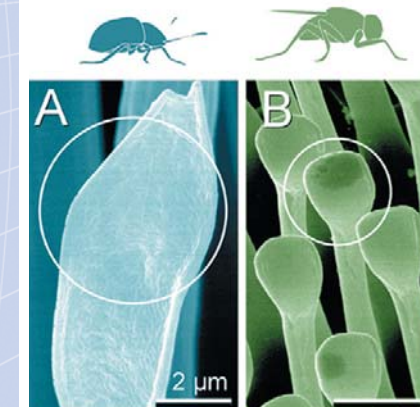
Der Seestern *Ophiocoma wendtii* gab lange Rätsel auf, denn er flüchtete zielgerichtet, ohne einen erkennbaren Sehsinn zu haben. Dann wurden gleich tausende Augen entdeckt: Perfekte Mikrolinsen aus Calciumcarbonat. Sie geben Rundumblick und obendrein Panzerung. (Bilder: Bell Labs, USA)



Die Schwimm-tanks von Tintenfischen sind typisches Strandgut. In Tierhandlungen werden sie als Schleifsteine für die Schnäbel von Kanarienvögeln angeboten. (Bild: ius)



bonat mit mikrometerfeinen Kammern. Dieser Tank ist nach Art der Honigwaben-Sandwichbleche strukturiert, wie sie im Flugzeugbau Verwendung finden. Infolgedessen hält der großenteils mit Stickstoff gefüllte Tank – seine Poren nehmen 90 Prozent des Volumens ein – noch dem Wasserdruck in 200 Metern Tiefe stand. Als „Schulp“ oder „Sepia-Schulp“ ist das biotechnologische Wunder im Tierhandel erhältlich – und zwar als Wetzstein, an dem sich Käfigvögel den Schnabel schärfen

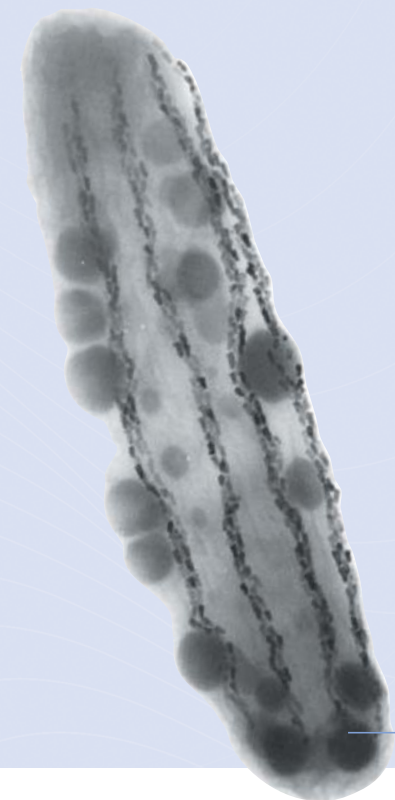


HAARIGE SACHE

Geckos können Wände hinaufklettern, kopfunter über die Decke flitzen und mit einem einzigen Fuß an ihr hängen bleiben. Das geht mit – natürlich – Nanotechnologie. Der Geckofuß nämlich hat haarige Strukturen an den Füßen. Die feinen Härchen sind so anschmiegsam, dass sie sich der Unterlage über weite Strecken auf wenige Nanometer nähern können. Dann beginnt die so genannte Van-der-Waals-Kraft zu wirken. Deren Ursache sind klitzekleine Ladungsschwankungen: in den Atomen von Gecko-Pfote und Unterlage schaukeln Ladungen derart hin- und her, dass sich eine Anziehung ausbildet. Die ist eigentlich sehr schwach, trägt aber die Gecko-Tatze dank Millionen von Haftpunkten. Die Bindungen lassen sich durch „Abschälen“ leicht lösen, so, wie man einen Tesafilm abzieht. Derart bestückt kann der Gecko die Decke entlang krabbeln. Spinnen und andere Krabbler scheinen sich eines ähnlichen Prinzips zu bedienen. Materialwissenschaftler freuen sich schon darauf, dieses klebstofffreie Verfahren technisch zu nutzen – etwa für Haftzettel. (Bilder: MPI für Metallforschung, Stuttgart)

INFO PER SEILAKT IN DEN ORBIT

Kohlenstoff ist der Natur ein wichtiges Baumaterial und etwa in der Hülle biologischer Zellen reichlich vertreten. In der Technik wiederum kommen Kohle-faser-Verbundstoffe immer mehr zum Einsatz. Sie sind leicht, enorm belastbar und werden im Flugzeugbau sehr geschätzt. Eine neue Kohlenstoff-Variante könnten diesen Materialien eines Tages den Rang ablaufen: „Nanotubes“. Diese winzigen Kohlenstoff-Schläuche, Millionstel Millimeter im Durchmesser, sollen sich zu einem hochfestem Garn verspinnen lassen: das Verhältnis von Zugfestigkeit zu Gewicht ist angeblich 500-mal besser als bei Stahl. Deshalb lässt die US-Raumfahrtbehörde NASA mit vollem Ernst ein Vorhaben prüfen, das – eine Art indischen Seiltrick nutzend – auf einen „Fahrstuhl zu den Sternen“ hinausläuft. Demnach wird ein Strang aus Nanotube-Verbundmaterial per Rakentechnik in den Orbit gehievt. Das eine Ende befände sich in zigtausend Kilometern Höhe, das andere wäre an einem äquatornahen Punkt im Pazifik verankert. Die von der Erde weg gerichtete Fliehkraft hielte das Band straff. An ihm entlang könnten Nutzlasten in den Orbit bewegt werden. Viele Wissenschaftler mögen daran nicht so recht glauben. Aber das Projekt könnte nützliche Nebenprodukte abwerfen, wie hochfeste Verspannungen für Hochhäuser, Brücken und – natürlich – für Fahrstühle. (Bild: NASA)



sächlich ein Komplexauge, dank dessen das stachelige Tierchen quasi Rundumsicht genießt.

Bakterien mit Kompass

Eine weitere Variante biomineralogischer Technologie entdeckte 1975 Richard Blakemore – damals Doktorand der Mikrobiologie an der University of New Hampshire in Durham, USA –, als er durch ein Mikroskop spähte, um hinter die Eigenheiten von Schlamm bewohnenden Bakterien zu kommen. Die untersuchten Wasserproben stammten aus einem marinen Küstensenf in der Nähe von Woods Hole, Massachusetts. Blakemore fiel auf, dass einige der Mikroorganismen stets in die gleiche Himmelsrichtung schwammen. An den Lichtverhältnissen konnte es nicht liegen, denn die Winzige behielten ihren Kurs, auch wenn man einen dunklen Karton über das Mikroskop stülpte. Ein Wechsel des Laboratoriumsraumes zeigte

↑ Weiße Blutkörperchen – hier ein Exemplar im Kreise roter Verwandter – hangeln sich per Klebtechnik Blutgefäße entlang. (Bild: eye of science)

← Ketten aus Magnetitkriställchen dienen Magnetbakterien als Kompass (Bild: Institut für Geophysik, LMU München)

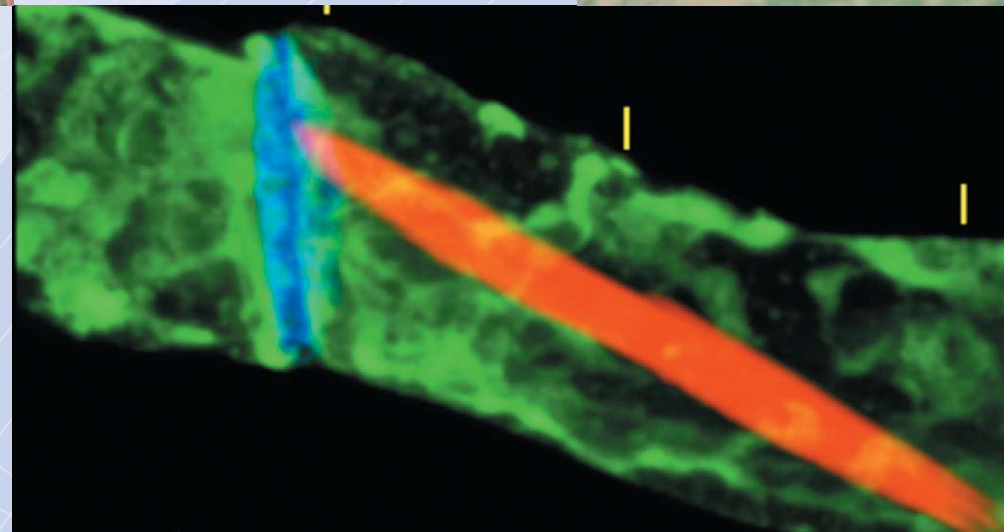
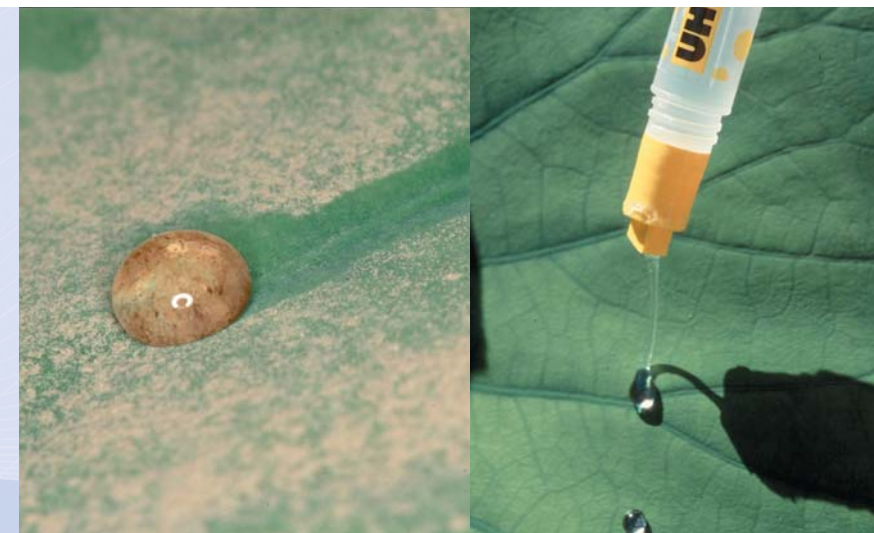
gleichfalls keinen Einfluss. Es schien schließlich, dass sich die Bakterien am Erdmagnetfeld orientierten.

Dass Magnetismus die treibende Kraft war, ließ sich leicht demonstrieren, mittels eines Permanentmagneten. Wenn man einen Magneten in Nähe der Bakterien brachte, bewegten sich diese auf jenen Teil des Magneten zu, der auch die nord-suchende Seite einer Kompassnadel anzog. Den anderen Pol des Magneten mieden sie nach Kräften.

Ein Elektronenmikroskop enthüllte letztlich das Geheimnis der Bakterien: Sie enthielten Ketten winziger Nano-Partikel, die offenbar als Kompassnadel dienten. Die genauere Analyse führte eine vertraute Verbindung zu Tage: Magnetit (Fe_3O_4). Das Mineral war frühen Seefahrern als „Leitstein“ bekannt, der wie eine Kompassnadel die Richtung wies, wenn man ihn

→ Mit selbstreinigenden Blättern schützt sich der Lotus vor Bakterien und Pilzsporen: genauso wie Schmutz und Staub werden Schädlinge vom Regen einfach weggespült. An Lotus-Blättern finden selbst Klebstoffe auf Wasserbasis keinen Halt. (Bilder: W. Barthlott, Nees-Inst. für Biodiversität der Pflanzen, Uni Bonn)

↓ Pflanzenkanäle unter dem Mikroskop: Das Forisom (rot), eine Art Minimuskel, bläht sich bei Bedarf auf wie ein Ballon und versperrt damit den Safttransport durch die so genannte Siebplatte (blau). So verhindert die Pflanze ein „Auslaufen“ bei Verletzung. (Bild: Fraunhofer Gesellschaft)



ANTI-HAFTUNG

Manchmal soll etwas eben nicht haften, z. B. Schmutz. Die Lotus-Pflanze hat sich, wie die Brunnenkresse und andere reinliche Kräuter, dazu den Lotus-Effekt einfallen lassen. Felder aus winzigen wachstigen Noppen – sichtbar nur unter dem Mikroskop – lassen Wassertropfen so rasch abperlen, dass schwach haftende Schmutzpartikel mitgerissen werden. Der Effekt wird bereits für Außenanstrichfarbe und keramische Kloschüsseln genutzt.

drehbar an einen Faden hängte. Heute weiß man: Magnetbakterien navigieren entlang des Erdmagnetfelds, das ja auch eine in den Boden führende Komponente besitzt, in für sie günstige Schlammschichten.

Magnetische Bakterien werden heute überall gefunden, sie sind keineswegs selten. Am Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik der Universität München gibt es ein „Magnetodrom“, ein Spulensystem um ein Mikroskop herum, das sich mit einem Joystick einstellen lässt. Damit können Wissenschaftler die Bakterien Walzer tanzen lassen, etwa wenn das Fernsehen kommt. Ansonsten betreiben sie ernsthafte Forschung. Magnetbakterien etwa fixieren das gerade vorhandene Magnetfeld der Erde, wenn sie am Ende ihres Lebens ermattet zu Boden sinken. Damit erweisen sie der Wissenschaft einen großen Dienst, weil

die an ihren Überresten die Geschichte des – für uns so lebenswichtigen – Erdmagnetfeldes studieren kann.

Die Biologie des Klebens

Leben existiert, weil seine Bestandteile von raffinierter Klebekunst zusammengehalten werden. Dabei klebt nur zusammen, was zusammen gehört, und manchmal klebt es nur ein bisschen, und manchmal geschieht das Kleben auf Befehl. Beispiel Mückenstich: Zunächst wird die Einstichstelle rot, weil sich feinste Blutgefäße erweitern. Außerdem sondern die Zellen am Einstichort einen Lockstoff ab. Abhängig von dessen Konzentration fahren die Zellauskleidungen der Blutgefäße und die Weißen Blutkörperchen, die im Blutstrom treiben, aufeinander abgestimmte Klebemoleküle aus. Infolgedessen heften sich die Weißen Blutkörperchen – sie zählen zu den Truppen des Immunsystems – an die Gefäßwand.

Zunächst haften sie so schwach, dass der Blutfluss sie langsam weiter rollt. Erst bei Lockstoff-Höchststand docken sie fest an die Gefäßwand. Andere Klebemoleküle ziehen die Blutkörperchen nun durch die Ader zur Einstichstelle, wo sie sich über etwaige Eindringlinge hermachen – Klebekunst in Vollendung. Nanotechnologische Imitate werden unter dem Stichwort „Kleben auf Kommando“ erforscht.

Nanotechnologie könnte nicht nur Kleistern zu neuem Haftvermögen verhelfen, ihrem namengebenden Maßstab gemäß – ein Nanometer ist der Millionste Teil eines Millimeters – sind auch winzige Motoren von Interesse, etwa jene, die Mikroben vorantreiben. Als ein besonders viel versprechender Nano-Motor bzw. Muskel gilt ein „Forisom“ genannter Komplex aus Pflanzenproteinen, der in Leguminosen wie Bohnen und Erbsen den Fluss von Nährlösung reguliert. Die wandert in

INFO
**SENSIBLER
KRAFTMESSER**

Nomen ist Omen: ein Kraftmikroskop ist nichts anderes als ein extrem empfindlicher Kraftfühler. Die Geräte sind aus den Labors der Nanowissenschaftler nicht mehr wegzudenken und dürften musikalische Nostalgiker an Plattenspieler erinnern: Herzstück jedes Kraftmikroskops ist eine winzige Blattfeder – gleichwohl um einiges kleiner als übliche Tonabnehmer – die an ihrem Ende mit einer feinen Tastspitze ausgestattet ist. Gewöhnliche Mikroskope nutzen das Licht, um filigrane Details eines Objektes sichtbar zu machen. Beim Kraftmikroskop sind es die Kräfte zwischen Messspitze und Objekt, die mitunter Atom für Atom auf den Bildschirm zaubern. Dazu streicht der Sensor wie ein Taststock über das Objekt der Begierde: etwa ein Salzkristall, vielleicht auch eine Biomembran – die Geräte sind vielseitig einsetzbar. Ihr Messsignal lässt sich in ein Abbild der Oberfläche umsetzen. Spezielle Varianten können noch mehr: etwa einzelne Biomoleküle auseinander zerren und so die Geheimnisse der molekularen Bindung enthüllen.

einem weit verzweigten Kanalsystem durch die Pflanze. Wird das Gewächs verletzt, tritt der „Pflanzenmuskel“ in Aktion, schwillt an und verschließt als Pfropfen die offenen Transport-Kanälchen: der nährhafte Saft bleibt der Pflanze erhalten. Einzelne Forisomen können Kräfte entfalten, die einem Gewicht von rund 10 Mikrogramm gleichkommen. Dies reicht zwar kaum um ein Sandkorn zu stemmen, könnte aber genügen, um bei einer „intelligenten“ Medikamentenkapsel auf Kommando die Schleusen zu öffnen.

Physik im nassen Sand

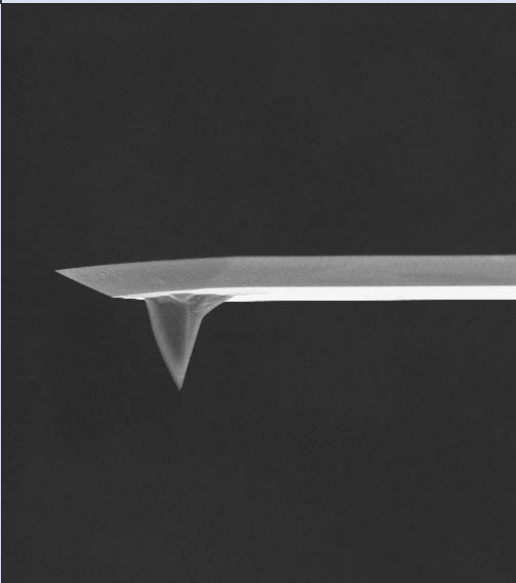
Wenn Nanotechnologen daran gehen, winzige Maschinen zu bauen, werden sie auch mit der „Casimir-Kraft“ – einem Cousin der Van-der-Waals-Kraft (s. Gecko) – rechnen müssen. Die wurde in den 1940er Jahren von dem Niederländer Hendrik Casimir (1909 - 2000) und Kolle-

gen an den Philips-Forschungslaboratorien entdeckt. Die Wissenschaftler wunderten sich über Aufschlammungen von Quarzsand, die für die Glühbirnenproduktion gebraucht wurden, und sich anders verhielten, als von der Theorie vorhergesagt. Als Ursache entpuppte sich eine bislang unbekannte Kraft, die auftritt, wenn Materie eng zusammenrückt. Eng heißt: auf ein paar Nanometer. Dann kommt nämlich ein Effekt ähnlich dem zum Tragen, der Schiffe in bewegter See zueinander treiben kann. Allerdings wirkt beim Casimir-Effekt nicht der Druck des Wassers, sondern der von elektromagnetischen Wellen, die ständig aus dem Nichts entstehen und sofort wieder verschwinden – noch bevor sich jemand über die Verletzung des Energieerhaltungssatzes beschweren könnte. Die Quantentheorie nennt so etwas „Vakuumfluktuationen“. Casimir-Kräfte können sowohl anziehend

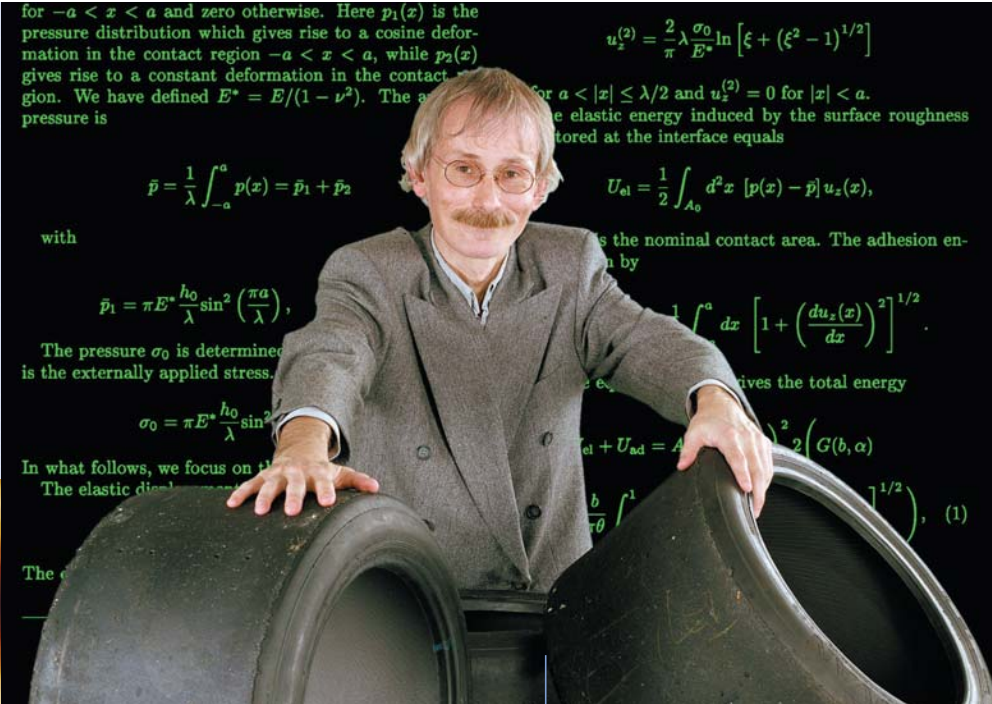
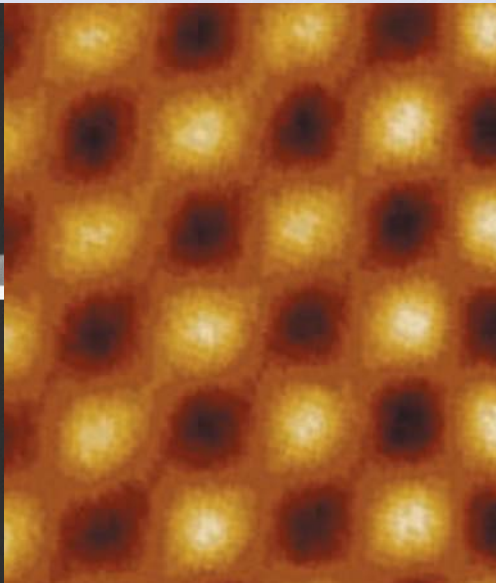


☞ Frühstücksei mit einer Prise Salz (Bild: Suzy Coppens, BergerhofStudios)

☞ Messfühler eines Kraftmikroskops: Die Tastspitze (nach unten zeigender Zacken) ist nur einige Tausendstel Millimeter lang. Forscher ertasten damit die Nanowelt. (Bild: NanoAnalytics, Münster)



☞ Salzkristall unter dem Kraftmikroskop: Die gelben Kreise sind einzelne Atome und nur Bruchteile eines Millionstel Millimeters groß. (Bild: Experimentalphysik VI, Uni Augsburg)



☞ Entscheidend für den Erfolg in der Formel-1 ist das „Paket“: Fahrer und Wagen müssen zusammenpassen. Während beim Piloten Nervenstärke und Fahrgefühl gefordert sind, kommt es in Sachen Material unter anderem auf die Reifen an. (Bild: BMW)

als auch abstoßend wirken. Und sie sind auf jeden Fall groß genug, um künstliche – wenngleich winzige – Objekte in Bewegung zu setzen. Experimente Ende der 1990er haben das bewiesen.

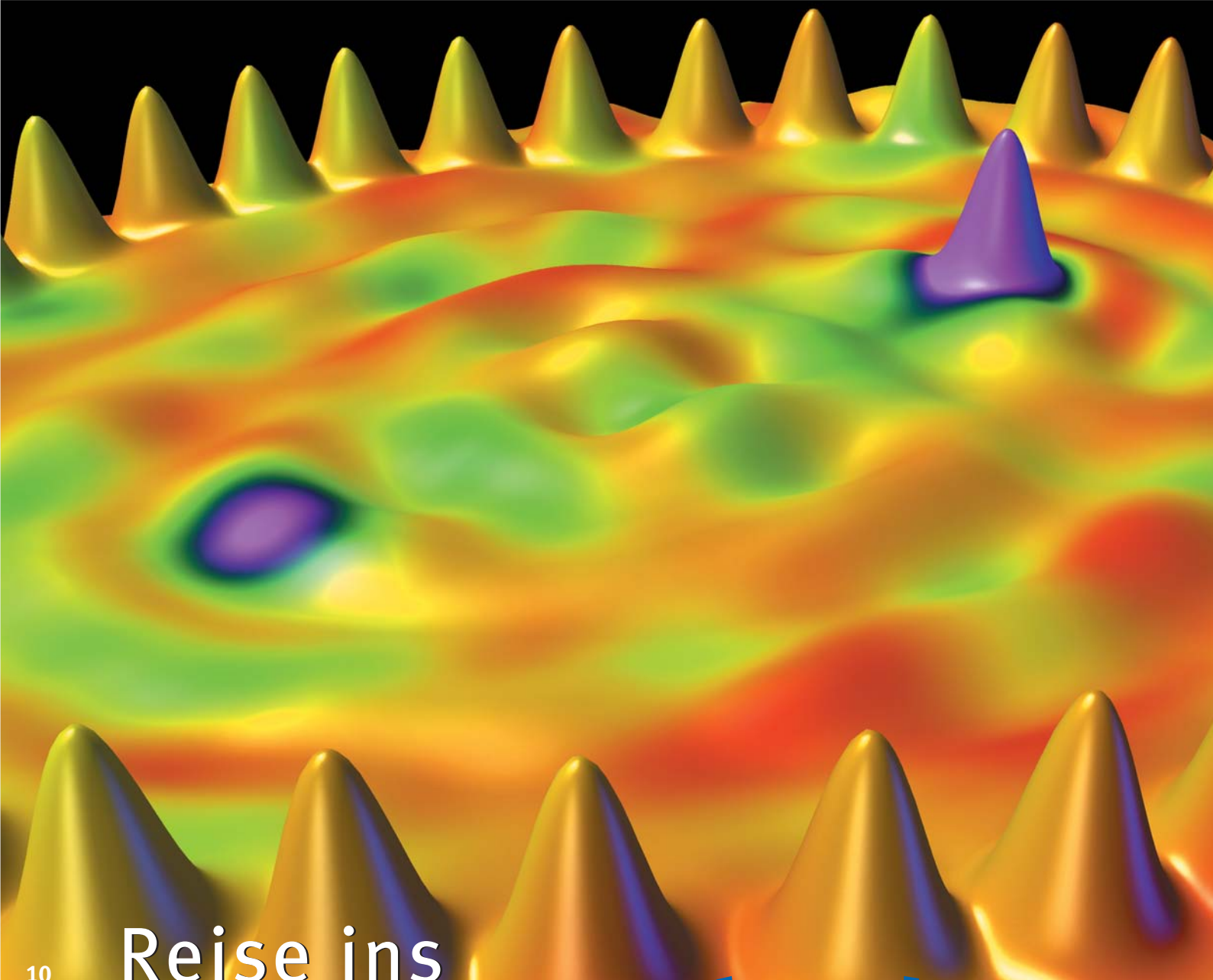
Warum Schumi nicht quietscht

Fluktuationen oder Schwingungen spielen auch beim Krach eine Rolle – im Übrigen ein wesentliches Element der Formel-1. In der motorgetriebenen Kakophonie aber fehlt etwas, womit sich sportliche Autofahrer sonst gerne Aufmerksamkeit verschaffen: Es quietscht nicht oder doch nur selten. Das liegt daran, dass Rennreifen ganz auf Haftung ausgelegt sind, und Quietschen ist mitunter eine Folge mangelnder Haftung: der Pneu schlittert über den Asphalt, was er mit heftigem Qualmen und lautem Kreischen quittiert. Wenn sich der Reifen jedoch optimal an der Fahrbahn festkrallt, dreht er nicht durch und

treibt den Boliden voran. Mithin kann, wer quietscht, nicht gewinnen. Inzwischen hat sich sogar die Wissenschaft der Kräfte zwischen Gummi und Fahrbahn angenommen. Und auch hier kommt es auf eine Abstimmung im Kleinen an. Bo Persson vom Forschungszentrum Jülich in der Nähe von Aachen hat ganze Seiten mit **Formeln** bedeckt, die die Rauigkeit der Oberflächen beschreiben, mit denen ein Reifen Kontakt bekommt – vom Zentimetermaßstab bis hinunter zu den Atomen. Dazu kommt jede Menge Mathematik, die die Kräfte im und am Reifen beschreibt, wie dieser die Hohlräume an der Oberfläche des Straßenbelags ausfüllt, wie Stöße das Material stauchen und dehnen und so fort. Am Ende, sagt Persson, müsse man nur noch ein paar Daten über die Struktur der Rennbahn und die an einem Stück Gummi gemessenen „viskoelastischen“ Eigenschaften eines Reifens

☞ Gummi, Reibung und Formelkolonnen: Bo Persson nimmt die Physik des Autoreifens unter die Lupe. Mit Perssons Theorie gerüstet, können Entwickler die Eigenschaften eines Reifens anhand einer kleinen Gummiprobe vorhersagen, nützlich nicht nur für den Motorsport. (Bild: FZ Jülich)





Reise ins Quantenland

„May the Force be with you.“

AUS STAR WARS, US-SPIELFILM (1977)

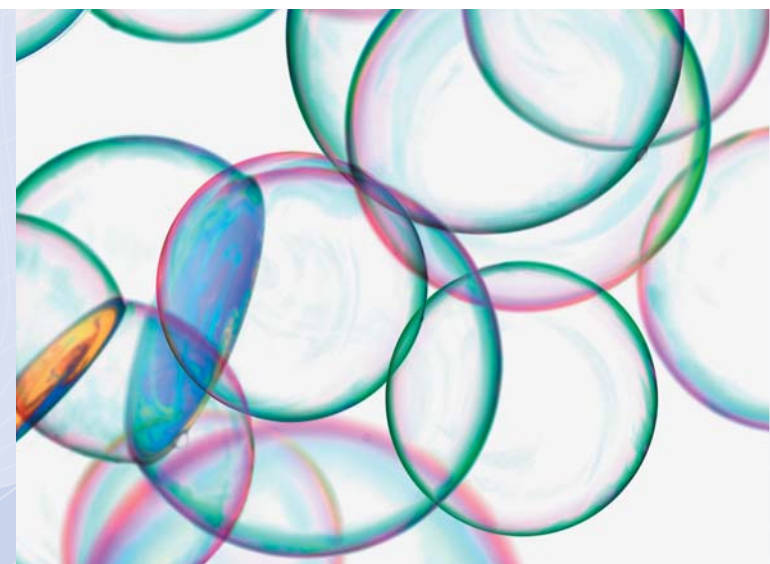
Nobelpreisträger Richard Feynman (1918 - 1988) sagte einst, er gehe davon aus, dass niemand die Quantentheorie versteht. Der US-Amerikaner Feynman, immerhin eine Größe des Quantengewerbes, lag damit nicht ganz verkehrt. Tatsächlich wartet die Quantenwelt mit Phänomen auf, die sich unserer Alltagserfahrung entziehen. Trotzdem zählt die Quantentheorie zu den genauesten Naturbeschreibungen, die die Physik zu bieten hat. Sie wurde über Jahrzehnte vielfach getestet und hat sich bestens bewährt. Nicht zuletzt verdanken wir ihr die moderne Computertechnik. Aber eins nach dem anderen.

Ihren Ursprung hat die Quantentheorie in der Beobachtung von etwas scheinbar Trivialem, einem Ofenloch. Ein Ofenloch mit dem dahinter liegenden Ofenraum ist ein ziemlich guter „Schwarzer Körper“. Physiker behelfen sich gerne idealisierter Modelle, wenn ihnen die Natur zu komplex erscheint. Ein solches Modell ist der Schwarze Körper: ein Etwas, das Licht perfekt absorbiert und emittiert. Ein kleines Ofenloch kommt dieser Vorstellung ziemlich nahe. Licht, das von außen kommend im Ofenloch verschwindet, hat wenig Chancen durch die Öffnung wieder hinaus zu gelangen – es wird also vom Ofen absorbiert (verschluckt). Andererseits, wenn der Ofen befeuert wird, tritt durch die Öffnung Wärmestrahlung ins Freie – bei passender Temperatur als sichtbares Licht. Diese Strahlung nun bereitete den

Wissenschaftlern Ende des 19. Jahrhunderts einiges Kopfzerbrechen, weil die damalige Theorie die Messungen der Forscher nur teilweise erklären konnte. Dann legte Max Planck im Jahre 1900 eine revolutionäre Formel vor, die den Experimenten voll genügt und auch eine Erklärung bot, warum das so sein sollte: Die Wände des Hohlraums können Strahlungsenergie nur häppchenweise aufnehmen und abgeben. Diese Portionen nennt man Quanten. Später erkannte man, dass auch Atome quantenhafter Natur sind und selbst das Licht aus kleinen Energiepaketen besteht. Kurzum: die Energie in mikroskopischen Systemen nimmt nur bestimmte Werte an und keine dazwischen – ähnlich wie ein Klavier nur mit den Tasten fest verbundene Töne von sich gibt. Die klassische Physik hingegen war eher von der Vor-

🔬 Kunstvoll arrangierte Atome auf einer Metalloberfläche: Die Atome erscheinen als Kegel, die ein ovales Areal eingrenzen. Die gesamte Konstruktion ist rund 5.000 kleiner als der Durchmesser eines menschlichen Haars. Die Wellen innerhalb des Geheges sind auf Quanteneffekte zurückzuführen: Sie rühren von Elektronen her, die innerhalb der atomaren Umzäunung hin- und herschaukeln. US-Forscher bedienten sich hier eines so genannten Tunnelmikroskops – zunächst, um die Atome in Stellung zu bringen und danach, um die fertige Anordnung abzubilden. Von solchen Studien versprechen sie sich langfristig neuartige elektronische Bauteile. (Bild: IBM Almaden Research Center, USA)

🔬 Die Erforschung glühender Objekte führte zur Geburt der Quantentheorie. In diesem Zusammenhang besonders wichtig: der „Schwarze Körper“ – einem Ofenloch ist er nicht unähnlich. (Bild: Bock Energietechnik, Floß)



NICHT „FISCH“, NICHT „FLEISCH“

Quantenobjekte sind von Natur aus schizopren und selbst derjenige, der eine Seifenblase fotografiert, steckt mitten in einem für das Quantengeschehen typischen Dilemma: Ein und Dasselbe muss, je nach Situation, einmal als Welle, einmal als Teilchen beschrieben werden. Beispiel Licht: Die Regenbogenfarben einer Seifenblase entstehen dadurch, dass sich Lichtwellen überlagern und an bestimmten Stellen verstärken, an anderen auslöschen. Bunte Muster sind die Folge. Auf dem fotografischen Film oder dem CCD-Chip einer Digitalkamera jedoch wird das Licht als Partikelstrom aufgezeichnet, in Gestalt so genannter Photonen. Diese verfärben die Kriställchen des Films bzw. bringen die Pixel zum Leuchten. Alle Photonen zusammen ergeben schließlich ein Kamerabild, das einst durch Welleneffekte zustande kam: eine schillernde Seifenblase. Aus Sicht der Quantenphysik fügen sich beide Aspekte – Welle und Teilchen – eben ganz natürlich zueinander, sie sind zwei Seiten einer Medaille. (Bild: Photodisc)

stellung eines gut geölten Posaunenzugs ausgegangen. Und der gleitet glatt über alle Klänge.

Die Quantentheorie feierte zahllose Triumphe und bildet heute die Grundlage unserer Informationsgesellschaft. Die Festkörperphysik, die auch die Funktionsweise von Transistoren beschreibt, macht von der Quantentheorie regen Gebrauch. Mittlerweile nähert sich die Größe von Transistoren auf einem Mikrochip dem Nanometer, dem Millionstel eines Millimeters. In diesen Dimensionen beginnt die Quantenphysik zu dominieren.

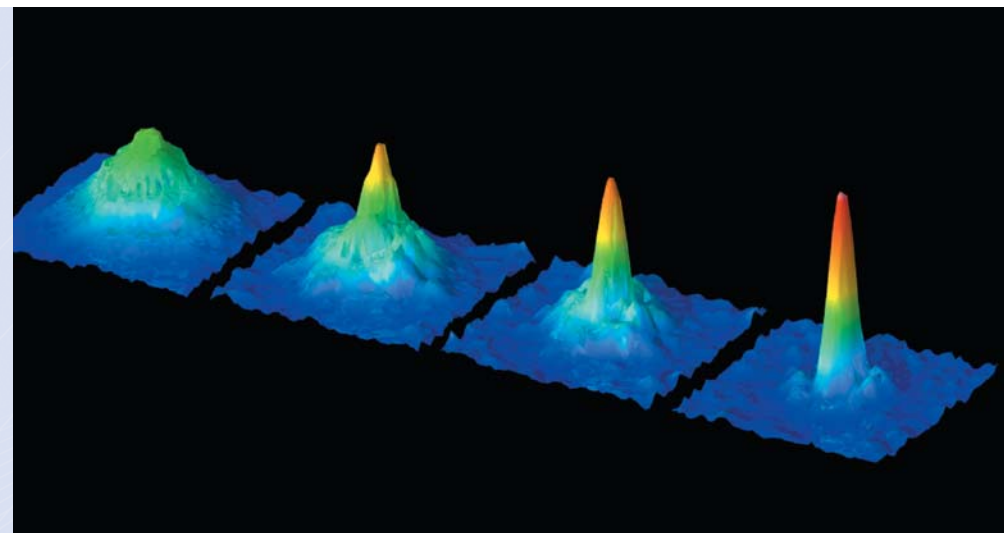
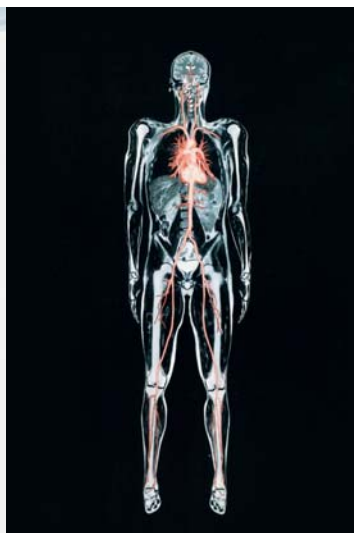
Megacoole Effekte

Die Beschränkung auf winzige Raumbe- reiche ist nicht der einzige Weg, Quanteneffekte anzutreffen, extreme Kälte tut

es mitunter auch. Die „Supraleitung“, der widerstandslose Stromfluss, ist das bekannteste Beispiel. Entdeckt wurde das Phänomen 1911 vom Niederländer Heike Kammerlingh Onnes am Beispiel des Quecksilbers. Heute wissen wir: Quecksilber ist kein Einzelfall, supraleitende Materialien gibt es verschiedensten Typs. Allen gemein ist, dass sie ihre besonderen Eigenschaften erst bei extremer Kälte zu Tage fördern. Bei „klassischen“ Supraleitern – wie dem Quecksilber – sind Betriebstemperaturen weit unter minus 200 Grad Celsius die Regel. Es sollte einige Jahrzehnte dauern, bis die Quantentheorie diesem Phänomen auf die Schliche kam. Hauptakteure sind die Elektronen, die in jedem gewöhnlichen Metalldraht für den Stromtransport sorgen. Dabei bewegen sie sich jedoch keineswegs

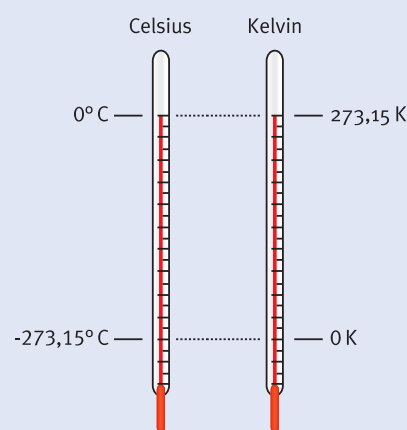
ungehindert, sondern stoßen immer wieder gegen die Atome des Materials und erleiden so einen elektrischen Widerstand. Bei der Supraleitung sind die Elektronen zwar ebenfalls beteiligt, allerdings schließen sie sich zu Duetten

➡ Magnetresonanztomographen blicken besonders schonend ins Innere des Körpers. Zum Einsatz kommen dabei supraleitende Spulen: mit ihrer Hilfe wird das namensgebende Magnetfeld erzeugt. (Bilder: Siemens)

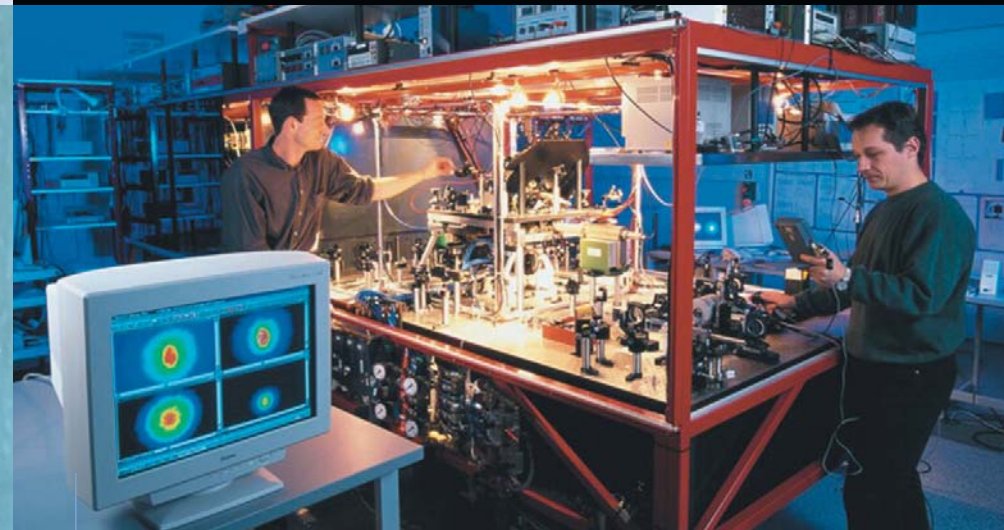


➡ Entstehung eines Bose-Einstein-Kondensats: Der „Berg“ in den Messdaten (dargestellt ist die Dichteverteilung der Atome) wird höher und schlanker. Beleg dafür, dass sich immer mehr Teilchen in einem Quantenzustand versammeln. Die zugehörige Apparatur ist unten abgebildet. (Bilder: G. Rempe, MPI für Quantenoptik, München)

➡ Timing ist Trumpf beim Formationstanz und erst recht in einem Bose-Einstein-Kondensat. Hier ist die Choreographie der Atome absolut perfekt. (Bild: Frankfurt Galaxy)



➡ Glasklare Quantenflüssigkeit: Suprafluides Helium – hier in einem durchsichtigen Messzylinder – wirkt ziemlich unscheinbar. (Bild: P. Thibault, Université Fourier, Grenoble)



KELVIN UND DAS THERMOMETER

Wir sind es gewohnt, in Grad Celsius zu rechnen. US-Amerikaner können da nur den Kopf schütteln. Für sie ist die Fahrenheit-Skala das Maß aller Dinge. Physiker hingegen – sowohl diesseits als auch jenseits des Atlantiks – bedienen sich häufig des Kelvin, einer Temperatureinheit ohne Minuswerte: Der „Absolute Nullpunkt“ – Null Kelvin – liegt bei minus 273,15 Grad Celsius, der Gefrierpunkt des Wassers – Null Grad Celsius – bei 273,15 Kelvin. Praktisch gesehen ist der Absolute Nullpunkt unerreichbar, auch wenn sich Forscher immer dichter an ihn heranspiren. Was macht ihn so besonders? Bei Null Kelvin wären Atome und Moleküle bewegungslos. (Bild: ius)

zusammen, Cooper-Paare genannt. Auf diese Weise können sie die Atome austricksen, die sich ihnen sonst in den Weg

stellen, und fließen absolut stoßfrei dahin. Im Detail ist das Geschehen äußerst komplex, Fachleute bringen noch „quantisierte Gitterschwingungen“ ins Spiel. Das Phänomen ist heutzutage jedoch verstanden. Zumindest gilt dies für „klassische“ Supraleiter wie Quecksilber, Blei und andere Metalle. Daneben gibt es aber weitere Spielarten der **Supraleitung**, an denen sich Wissenschaftler bislang die Zähne ausbeißen. Hier sind besonders die „Hochtemperatur-Supraleiter“ zu nennen. Wie ihr Name schon andeutet, kommen sie mit relativ mäßiger Kühlung aus – und das macht sie für technische Anwendungen interessant.

Aber die Quantenphysik treibt noch andere Blüten: Wer etwa **Helium-4** – bei Raumtemperatur ein Gas, das sich mit geeigneter Technik jedoch verflüssigen

lässt – unter 2,17 Kelvin (minus 270,98 Grad Celsius) kühlt, der kann „Suprafluidität“ beobachten. Suprafluides Helium passiert feinste Ritzen, die für jede andere Flüssigkeiten eine Sperre wären; es kriecht die Wand seines Behältnisses hoch und über dessen Rand hinaus; Wirbel darin können ewig kreisen. Die Erklärung: Die Atome des Heliums haben sich in einem „makroskopischen“ Quantenzustand versammelt. Dieses riesige Kollektiv ist recht behäbig – kleine Störungen oder Hindernisse können ihm nicht zusetzen. Also fließt es reibungslos dahin: Das Helium ist suprafluid.

Suprafluides Helium wurde erstmals in den 1930ern hergestellt. In jener Zeit begannen auch erste Experimente rund um die Wellennatur von Atomen. Deren Anwendungen reichen inzwischen von

der Analyse von Materialoberflächen bis hin zur Präzisionsvermessung des irdischen Schwerfeldes, das je nach Aufbau der Erdkruste von Ort zu Ort leicht variieren kann. In den letzten Jahren sind zudem neuartige Experimente möglich geworden, nachdem es gelungen war, bestimmte Gase extrem abzukühlen. Und zwar fast bis zum Absoluten Nullpunkt, der bei frostigen minus 273,15 Grad Celsius liegt. Bei diesen Bedingungen gelingt es, Atome zu einem „**Bose-Einstein-Kondensat**“ zusammen zu rotten.

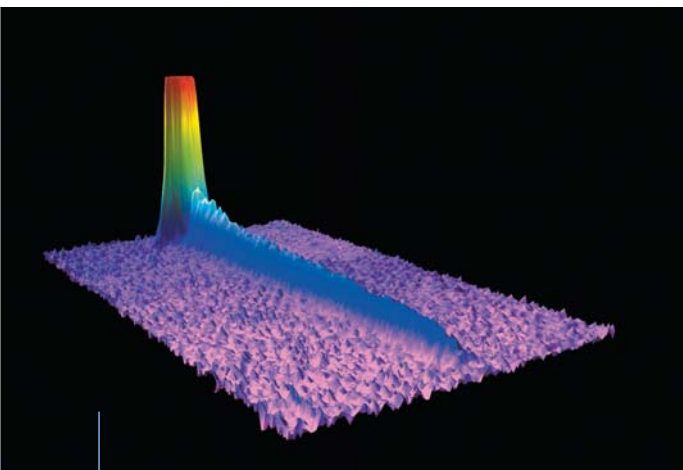
Dass es diesen exotischen Zustand der Materie geben müsse, zu diesem Schluss kam Albert Einstein bereits 1925 aufgrund theoretischer Überlegung, die sich auf Vorarbeiten des Inders Satyendra Nath Bose stützten. Erste Hinweise auf das Bose-Einstein-Kondensat wurden

später bei suprafluidem Helium entdeckt. Der Durchbruch folgte jedoch erst 1995, als es den US-Amerikanern Carl Wieman und Eric Cornell sowie dem Deutschen Wolfgang Ketterle gelang, ein Kondensat in „Reinkultur“ herzustellen. Die Forscher arbeiteten dabei mit Gasen, die sie fast bis zum Absoluten Nullpunkt herunterkühlten – „fast“ heißt: bis auf Millionstel Grad. Dafür gab es 2001 den Nobelpreis für Physik.

Was hat es mit dem Bose-Einstein-Kondensat auf sich? Für gewöhnlich bewegen sich Gasatome ziemlich ungeordnet, da geht es drunter und drüber. Damit ist es nun schlagartig vorbei. Wie auf Kommando tanzen sie beim Bose-Einstein-Kondensat alle in Reih und Glied. Von individuellen Atomen kann man jetzt nicht mehr sprechen. Vielmehr tritt nun ein Ensemble auf

COOLES TEILCHENBALLETT

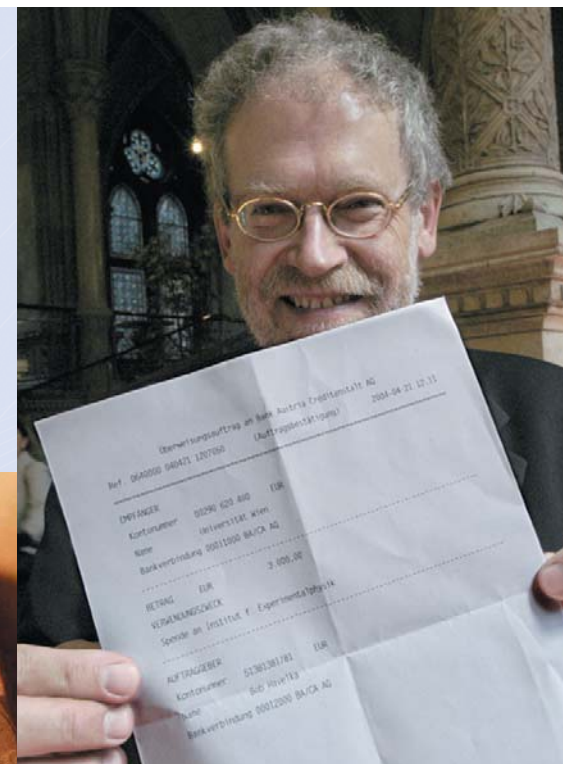
Quantengase gelten als die kältesten „Objekte“ des Universums. Es sind lichte Teilchenwolken, die im Labor weit unter minus 273 Grad Celsius gekühlt werden. Physiker sprechen hier von „Mikro-“ oder gar von „Nanokelvin“. Bei diesen Bedingungen regiert die Quantenphysik das Geschehen: statt wie üblich wild durcheinander zu schwirren, „tanzen“ alle Gasteilchen – je nach Typus – entweder im Gleichschritt, wie beim „Bose-Einstein-Kondensat“, oder sie gehen sich aus dem Weg wie beim „Fermigas“. Diese „ultracoolen“ Gase sind ideale Versuchsobjekte, um Quantenphänomene unter die Lupe zu nehmen. Wissenschaftler versprechen sich von ihnen neue Erkenntnisse über Suprafluidität und Supraleitung. Dabei geht es um Flüssigkeiten, die völlig reibungslos fließen, und um Materialien, die elektrischen Strom verlustfrei transportieren.



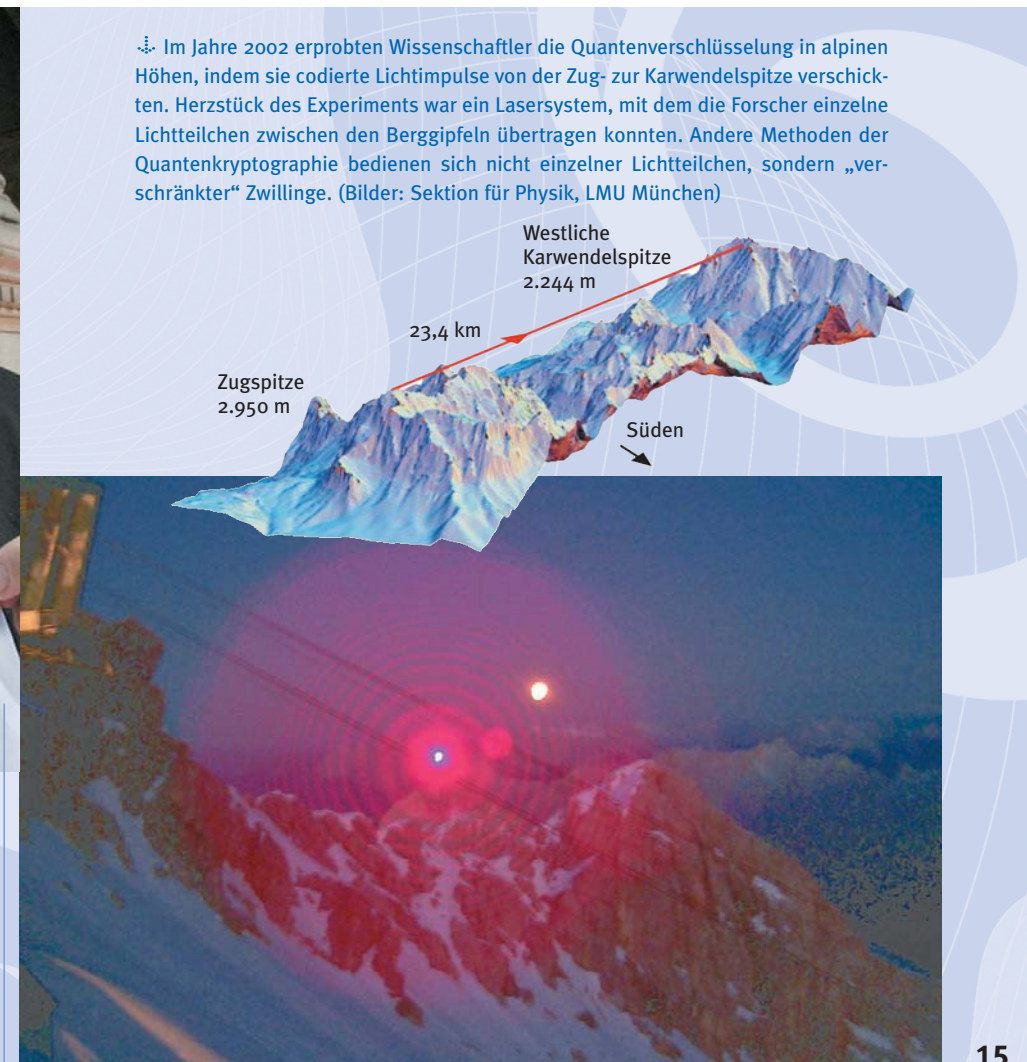
Teilchenstrom eines Atomlasers, graphisch aufbereitet: Aus einem Bose-Einstein-Kondensat (bunte Säule links im Bild – dort ist die Dichte der Atome besonders hoch) entweicht ein durchgängiger Atomstrahl. Er ist als blauer Keil dargestellt. (Bild: MPI für Quantenoptik, München)

Beim Hantieren mit Quantengasen ist eine Menge Hightech nötig. (Bild: 5. Physikalisches Institut, Uni Stuttgart)

Ultrakalte Wölkchen sind die Lieblingkinder der Atomoptik, mit Laserstrahlen kann man sie zum Leuchten bringen. (Bild: G. Rempe, MPI für Quantenoptik)



April 2004: Physiker Anton Zeilinger freut sich über die erste mit Quantentechnik verschlüsselte Banküberweisung. (Quelle: J. Godany, Wien)



Im Jahre 2002 erprobten Wissenschaftler die Quantenverschlüsselung in alpinen Höhen, indem sie codierte Lichtimpulse von der Zug- zur Karwendelspitze verschickten. Herzstück des Experiments war ein Lasersystem, mit dem die Forscher einzelne Lichtteilchen zwischen den Berggipfeln übertragen konnten. Andere Methoden der Quantenkryptographie bedienen sich nicht einzelner Lichtteilchen, sondern „verschränkter“ Zwillinge. (Bilder: Sektion für Physik, LMU München)

Westliche Karwendelspitze 2.244 m
Zugspitze 2.950 m
23,4 km
Süden

die Bühne, dessen Mitglieder – es können hunderttausende sein – sich nicht unterscheiden lassen. Gemeinsam bilden sie alle eine große „Materiewelle“. Klingt unglaublich? Das ist noch gar nichts: Gemeinsam mit dem Team von Nobelpreisträger Ketterle ist es Stuttgarter Physikern sogar gelungen, einen Verstärker für Materiewellen zu bauen. Der vermehrt die Atomzahl eines Bose-Einstein-Kondensats mit viel Fingerspitzengefühl – so, dass die Wellenform der ursprünglichen Atom-Clique erhalten bleibt. Die Wellenlänge eines Bose-Einstein-Kondensats liegt im Übrigen bei einigen zehn Mikrometern und ist damit groß genug, um sie mit einem normalen Mikroskop unter die Lupe zu nehmen.

Atomare Optik

Experimente wie diese sind mittlerweile unter dem Stichwort „Atomoptik“ be-

kannt. Licht und Materie vollziehen dabei eine Art Rollentausch. Während in der normalen Optik Lichtwellen über Spiegel – also mit Hilfe von Materie – manipuliert werden, lassen sich Materiewellen auch per Laserlicht dirigieren. Dahinter steckt der Wunsch, mit Atomen einmal so vielseitig experimentieren zu können wie mit Licht. Und einige Paradestücke sind bereits gelungen, etwa der [Atomlaser](#). Dieser sendet kein Licht aus, sondern fein dosierte Materiewellen. Der Sinn solcher Feinheiten? Mit atomarer Optik lassen sich Atomuhren bauen, die so genau sind, dass sie einen allmählichen Wandel der Naturkonstanten nachweisen könnten – wenn die denn tatsächlich variabel sind. Die Atomare Optik ebnet ferner den Weg für die so genannte Atomlithographie, mit der sich Werkstoffe strukturieren lassen, um Atom für Atom

etwas Kompliziertes zusammen zu häufeln.

Im Jahr 2002 berichteten Münchner Wissenschaftler erstmals von der Umwandlung eines Bose-Einstein-Kondensats in einen so genannten Mott-Isolator: die Forscher hatten das nebulöse Atomkollektiv mit Laserstrahlen traktiert, worauf sich dessen Mitglieder zu einem dreidimensionalen Kristall arrangierten. Das Laserlicht drängte die Atome auf genau definierte Gitterplätze – die ursprüngliche Gemeinschaft zerfiel gewissermaßen in zahlreiche Splittergruppen. Solche, in Lichtnetzen gefangene Atome sind womöglich das Gewebe, aus dem eines Tages Quantencomputer entstehen könnten – von ihnen erhoffen sich Fachleute atemberaubende Rechenleistungen.

Zahlung per Quanten Express

Ein Quantenphänomen, das Forscher ebenfalls beflügelt, ist die „Verschränkung“ – ein heißes Thema auch in Sachen Datenverschlüsselung. Kupferdrähte und Lichtleiter sind schließlich die Adern unserer Informationsgesellschaft. Doch nicht alles was durch die Kabel saust, ist auch für neugierige Augen oder Ohren bestimmt. Wer möchte schon, dass die eigene PIN-Nummer in falsche Hände gerät? Seit jüngster Zeit nun können Kryptographen auf Beistand der Quantenphysiker hoffen. Deren Verfahren – natürlich Quantenverschlüsselung genannt – gilt als absolut zuverlässig. Dass eine Leitung angezapft wird, kann sie allerdings nicht verhindern. Der Clou ist vielmehr, dass ein Lauschangriff sofort auffallen würde. Bei der Quantenverschlüsselung bedient man sich bisweilen

„verschränkter“ Photonen, Paaren von Lichtteilchen, die in besonderer Beziehung zueinander stehen. Eine Messung an einem der Teilchen liefert augenblicklich Informationen über dessen Partner und umgekehrt. Das gilt selbst dann, wenn sie Kilometer weit voneinander entfernt sind. Angesichts dieser Vorstellung sprach der ehrwürdige Einstein einst von „spukhafter Fernwirkung“. Forscher sehen dieses Phänomen heute differenzierter, die Verschränkung ist gleichwohl Realität: ein Team um den Wiener Physiker Anton Zeilinger nutzte sie sogar, um im April 2004 die weltweit erste [Banküberweisung](#) mit Quantenverschlüsselung zu tätigen. Dabei wechselten 3.000 Euro von der Bank of Austria an die Universität Wien – als Finanzspritze für Zeilingers Arbeitsgruppe.

DIE PC'S VON ÜBERMORGEN

Wie Quantencomputer aussehen werden, ist ungewiss. Aber mit den Zahlenfressern der heutigen Zeit werden sie aller Voraussicht nach wenig gemein haben. In Sachen Hardware setzen manche Forscher auf Atome in Lichtnetzen, einige sperren Atome in elektromagnetische Käfige, andere wiederum hoffen auf „Quantendots“ – besondere Nanostrukturen, die sich auf einem Halbleiter-Chip unterbringen lassen. Hardware hin oder her, der Clou beim Quantenrechnen liegt im Prinzip der Informationsverarbeitung: statt mit üblichen Bits jonglieren Quantencomputer mit „Quantenbits“. Diese beruhen auf dem Phänomen der Überlagerung, wonach Quantenobjekte gleichzeitig in verschiedenen Zuständen existieren können. Werden die Quantenbits noch passend verschränkt, lassen sich zahllose Rechenoperation *gleichzeitig* ausführen – und das bringt Tempo.



Galaxien drehen im Sog der Schwerkraft eine Pirouette: Das kosmische Paar ist rund 300 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt. Nach Expertenmeinung werden die beiden Sternensysteme letztlich zu einer Riesengalaxie verschmelzen. Unserer heimischen Milchstraße dürfte Ähnliches widerfahren, wenn sie sich in Jahrmilliarden mit ihrem Nachbarn, dem Andromeda-Nebel, vereinigt. (Bild: NASA/STScI/ESA)

Nächtliches Europa aus der Vogelperspektive: Was wäre unsere Welt ohne Licht und Strom – sprich Elektromagnetismus? (Bild: NASA/NOAA)

Beim Crash von Atomkernen entsteht für Sekundenbruchteile ein tobendes Konglomerat von Teilchen, vielfach heißer als das Innere der Sonne. Die Erforschung dieses „Quark-Gluon-Plasmas“ (bunte Kügelchen) verrät einiges über die Starke Wechselwirkung und die Kindheit des Universums. Gilt es doch als Ursuppe, die einst das gesamte Weltall erfüllte – direkt nach dessen Geburt vor rund 14 Milliarden Jahren. (Bild: CERN)

Die Sonne versorgt seit über vier Milliarden Jahren unseren Planeten mit Licht und Wärme. Das Kraftwerk in ihrem Inneren „verheizt“ via Kernfusion pro Sekunde rund 700 Millionen Tonnen Wasserstoff. Der dabei maßgebliche Prozess – pp-Zyklus genannt – wird von der Schwachen Wechselwirkung beeinflusst. (Bild: ESA)



Kraftvolles Quartett

„Ist es der Sinn,
der alles wirkt und schafft?
Es sollte stehn:
Im Anfang war die Kraft!“

AUS FAUST, TEIL 1, VON JOHANN WOLFGANG
VON GOETHE (1749 - 1832)

Empedokles der Griechen (ca. 483 - 425 v. Chr.) begründete einst die Lehre von den vier „Elementen“. Demnach beruht die ganze Vielfalt der Natur auf dem Reigen von Erde, Wasser, Feuer und Luft. Wobei „Hass“ und „Liebe“ – vulgo: Abstoßung und Anziehung – die Elemente immer wieder aufs Neue zusammenwürfeln. Seitdem hat sich unsere Sicht der Welt ziemlich verändert. An die Stelle der antiken Elemente traten Elementarteilchen, „Hass“ und „Liebe“ machten Platz für ein Quartett fundamentaler Naturkräf-

te. In der Physik heißen sie auch „Wechselwirkungen“. Zwei davon begegnen uns auf Schritt und Tritt: da ist zum einen die Schwerkraft, auch Gravitation genannt, sie fesselt uns an den Erdboden. Andererseits gibt es den Elektromagnetismus, der zum Beispiel den Strom aus der Steckdose treibt. Die übrigen Naturkräfte – namentlich „Schwache“ und „Starke“ Wechselwirkung – agieren eher im Verborgenen, genauer gesagt im Reich der Elementarteilchen.

Auch wenn Wissenschaftler darüber rätseln, wieso das Universum gerade vier Naturkräfte regieren, ein gemeinsamer Ursprung gilt als sicher. Und tatsächlich stießen Forscher in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts auf eine enge Verwandtschaft zwischen Elektromagnetismus und Schwacher Wechselwirkung. Die Starke

Wechselwirkung entlarvten sie als fernen Cousin. Nur die Schwerkraft fügt sich bislang nicht ins Familienbild. Deshalb gilt sie als größte Hürde für eine umfassende Beschreibung aller Naturphänomene, die vom Volksmund mitunter „Weltformel“ genannt wird.

Das Kraftquartett im Einzelnen:

Alle Objekte folgen der **Gravitation**: sie zwingen den Turm von Pisa in Schiefelage, regelt die Gezeiten und ballt Sterne, Staub- und Gaswolken zu Galaxien. Isaac Newton (1643 - 1727) stieß auf einen ihrer Wesenszüge: die Massenanziehung. Der Legende nach brachte den Briten ein vom Baum fallender Apfel zur Einsicht, dass dieselbe Kraft, die das Fallobst zu Boden zieht, den Mond um die Erde kreisen lässt. Albert Einstein (1879 - 1955) erkannte später, dass die Ursachen der

Massenanziehung bei Raum und Zeit liegen, die zu einem kosmischen Netzwerk verwoben sind. Jedes Objekt verformt dieses Gefüge vergleichbar einem Schlafen, der eine Matratze eindrückt, und fängt andere Körper per Schwerkraftmulde ein. Die Schwerkraft von Sternen kann sogar einen Lichtstrahl aus der Bahn werfen. Fachleute sprechen dann von einer „Gravitationslinse“. Bei allem Erfolg ist Einsteins Relativitätstheorie in der Mikrowelt gleichwohl lückenhaft. Physiker bemühen sich deshalb, Einsteins Gedankengut mit dem Bild der Quantenwelt in Einklang zu bringen. Hilfreich scheint dabei die so genannte String-Theorie. Einige Forscher hoffen sogar, damit einen Zipfel der „Weltformel“ in den Händen zu halten.

Ohne die **Starke Wechselwirkung** wäre das Universum längst in einem Teilchenschauer vergangen, denn sie ist der

„Klebstoff“, der Atomkerne zusammenhält und auch tief im Innern der Kernbausteine den Ton angibt. Gemäß der Quantentheorie tummeln sich dort „Quarks“ und „Gluonen“ in einem frenetischen Tanz. Und fast die gesamte Masse aller sichtbaren Dinge ist letztlich auf dieses Zusammenspiel zurückzuführen – vom Flohkrebs bis zum Gasplaneten.

Die **Schwache Wechselwirkung** ist für bestimmte Arten der Radioaktivität und für die Energieproduktion der Sonne von Bedeutung. Ihre Geschichte geht zurück auf die Entdeckung der Radioaktivität durch Henri Becquerel, der 1896 erstmals einen radioaktiven Prozess dokumentierte. Diesen „Beta-Zerfall“ entschlüsselten Wolfgang Pauli und Enrico Fermi zu Beginn der 1930er und legten damit den Grundstein für das heutige Quantenmodell der Schwachen Wechselwirkung. Demzufolge wird sie durch Teilchen ver-

mittelt, die W- bzw. Z-Bosonen genannt werden.

Der Brite James Clerk Maxwell (1831 - 1879) erkannte einst, dass Elektrizität und Magnetismus verschiedene Seiten einer Medaille sind. Heute wissen wir: ob wir sehen, tasten, schmecken oder riechen – unsere Umwelt nehmen wir letztlich per **Elektromagnetismus** wahr. Wenn wir uns einen Sonnenbrand holen oder uns der Wind durch die Haare bläst, dann ist Elektromagnetismus im Verein mit den Regeln der Quantenphysik am Werk. Elektromagnetische Wechselwirkung wird laut Quantentheorie von „Photonen“ übertragen, kleine Energiebündel, die wir im sichtbaren Frequenzbereich als Licht empfinden. Neben der Gravitation ist es also diese Wechselwirkung, die am unmittelbarsten unseren Alltag bestimmt, die mechanische Kräfte überträgt und auch TV-Bilder in Bewegung setzt.

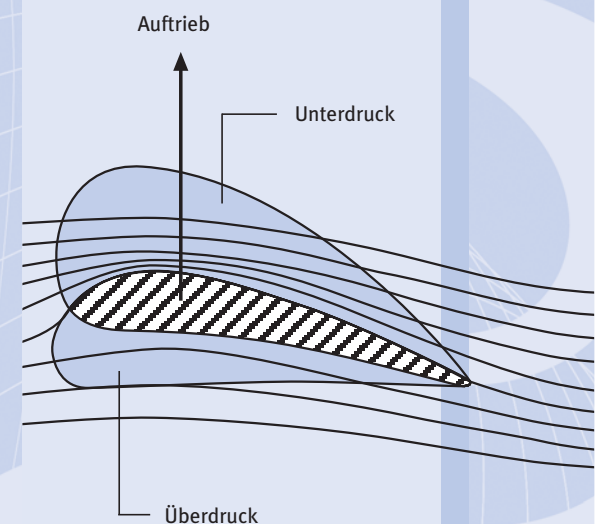


✦ Fast 400 Tonnen kann ein Jumbo-Jet an den Start bringen. Um dieses Gewicht in die Luft zu stemmen, bedarf es starker Triebwerke und eines steilen Anstellwinkels – letzterer erhöht den Auftrieb. (Bild: Lufthansa)

✦ Tragfläche im Luftstrom: unterhalb des Flügels (dessen Querschnitt ist schraffiert) entsteht Überdruck, darüber Unterdruck. Deren Zusammenwirken hält Flugzeuge in der Luft. (Bild: ius)

✦ Der Venturi-Flügel auf dem Dach dieses Berliner Gebäudes sorgt für angenehmes Büroklima, indem er – nur per Windkraft – Frischluft zwischen Innen- und Außenfassade leitet. Dies verhindert ein Aufheizen der Glasfront. (Planung: BRANDI IGH Ingenieure, Köln; Fotograf: J. Willebrand, Köln)

✦ Präriehunde belüften ihre Bauten mit Hilfe des Bernoulli-Effektes. Die Bezeichnung „Präriehund“ ist allerdings irreführend, denn die Nager sind mit unseren häuslichen Vierbeinern keineswegs verwandt. Ihr Warnruf erinnert allerdings an Klaffen. (Bild: E. Hejda, Wien)



BERNOULLI & CO.

Es gibt eine Menge berühmter Bernoullis, von denen einige auch noch miteinander verwandt ist. Die für die Naturwissenschaft wichtigsten sind Johann und Daniel. Johann war Vater des Daniel und neidete diesem seinen wissenschaftlichen Erfolg. Als Daniel 1735 zusammen mit seinem Vater einen Preis für Arbeiten über die Planetenbahnen bekam, warf ihn der Vater aus dem Haus, weil er meinte, den Preis alleine verdient zu haben. Die Nachwelt aber maß Daniel den höheren Rang zu.

Zu seinen wichtigsten Leistungen zählen Erkenntnisse über die Eigenarten bewegter Flüssigkeiten und Gase – insbesondere über den Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Druck. Auf den Punkt gebracht lautet Bernoullis Gesetz: der Druck einer Strömung fällt mit zunehmender Geschwindigkeit und nimmt zu, wenn die Geschwindigkeit sinkt. Die daraus folgenden Regeln über Auf- und Abtrieb haben sich in Schiff- und Luftfahrt millionenfach bewährt: ihnen gemäß lassen Kapitäne die Segel setzen und halten sich Flugzeuge in der Luft. Trotzdem widersprechen sie der Intuition: Wenn etwa zwei Rheindampfer dicht aneinander vorbeifahren, meint man, das zusammen gequetschte Wasser dazwischen sollte sie auseinander treiben. Tatsächlich jedoch entsteht ein Sog, der die Schiffe zueinander zieht – Bernoulli lässt grüßen.

INFO

Zwischen Himmel und Erde

„Ich will euch mein Erfolgsrezept verraten: Meine ganze Kraft ist nichts als Ausdauer.“

LOUIS PASTEUR, FRANZ. CHEMIKER UND MIKROBIOLOGE (1822 - 1895)

Seit Jahrhunderten hat es der Mensch verstanden, sich der klassischen „Elemente“ und der in ihnen schlummernden Kräfte immer geschickter zu bedienen. Segelschiffe und Wassermühlen sind dafür nur zwei Beispiele. Aber nicht nur Menschen, nordamerikanische Präriehunde etwa belüften ihre unterirdischen Bauten ganz pfiffig nach den Regeln, die der Schweizer Ahnherr der Hydro- und Aerodynamik, Daniel Bernoulli (1700 - 1782), aufgestellt hat. So haben

die Erdhundbauten lange unterirdische Kanäle, die mit hügelartigen Belüftungskaminen abgeschlossen sind – einige dieser Wälle sind höher, andere niedriger. Wenn der Wind über diese Öffnungen streicht, entsteht nach dem Gesetz von Bernoulli ein Unterdruck. Nun bläst der Wind am Boden etwas langsamer als in der Höhe. Deshalb stellt sich zwischen den verschiedenen Öffnungen ein Druckgefälle ein, das Frischluft durch die Stollen treibt. Das wissen die Präriehunde auch und wählen einen höheren Kamin für die Abluft, einen niedrigen für die Zuluft. Der Erdboden gleicht als Wärmespeicher allzu starke Temperaturschwankungen aus.

Luftströmungen sind an anderer Stelle ebenfalls von Bedeutung: beim Fliegen.

Der Auftrieb ist allerdings ein ziemlich verwickelteres Phänomen. Wirbel spielen eine Rolle, die Zähigkeit der Luft, Flügelprofil und Anstellwinkel. Fazit ist: Durch ein kompliziertes Zusammenspiel strömt die Luft oberhalb der Tragfläche letztlich schneller als darunter. Nach dem Gesetz von Bernoulli geht damit ein Druckunterschied einher: Unterdruck an der Flügeloberseite, Überdruck unterhalb der Tragfläche. Daraus folgt eine Kraft gen Himmel – und diese weiß jeder Pilot als Auftrieb zu schätzen.

Die moderne Architektur bedient sich übrigens desselben Prinzips. Allerdings stellt sie es gleichsam auf den Kopf, um damit Hochhäuser zu belüften. Zu diesem Zweck haben Ingenieure so genannte **Venturi-Flügel** entworfen: im Grunde

genommen umgedrehte Tragflächen auf den Dächern der betreffenden Gebäude. Bläst der Wind über diese Konstruktionen, so entsteht unterhalb des Venturi-Flügels ein Unterdruck. Und mit diesem Sog lässt sich kühle Luft in die Gebäude schaufeln. Besonders nützlich ist diese Form der Klimatisierung für Bürobauten mit weiter Glasfront, die im Sonnenlicht stets dazu neigen, sich aufzuheizen.

Fahrrad im Gegenwind

Natürlich hat es nie an Versuchen gefehlt, die Kraft des Luftstroms auch für das Fortkommen per Fahrrad zu nutzen. Ein „Hülfstreibapparat“-Patent wider den Wind, des Regensburgers Sebastian Müller aus dem Jahr 1893, fand vor den Augen eines zeitgenössischen Besprechers allerdings keine Gnade: „Der Propel-

ler, der das Rad vorwärts reißen soll, muss ja auch erst angetrieben werden – das bedeutet vermehrten Kraftaufwand bzw., bei gleicher Kraft, weniger Power für den Primärtrieb.“

Es ist wahr, Meister Müller hatte einen Fehler gemacht, nur nicht den vom Kritiker bemängelten, vielmehr war der Propeller zu klein. Wenn man den Propeller genügend groß macht, kann auch Gegenwind ein Fahrrad vorwärts, also in den Wind treiben. Das Prinzip funktioniert sogar auf dem Wasser mit einem Boot, dessen Wasserschraube von einem Windrad angetrieben wird: das Boot fährt in den Wind, muss also nicht mehr kreuzen. Die Geschwindigkeit kann etwa ein Fünftel der des Gegenwindes erreichen.

FERNHEIZUNG FÜR EUROPA

Da die Sonne so häufig über der karibischen See brennt, haben die Engländer Grund zur Freude. Die Hitze lässt Unmengen an Wasser verdunsten, dadurch steigt der Salzgehalt des Meerwassers, das sich nun – unter anderem vom Wind getrieben – auf die Reise nach Norden macht. Ausläufer dieses Stroms finden bis nach Westeuropa und heizen unserem Kontinent kräftig ein. Norwegen bekommt genug ab für den Anbau von Erdbeeren und Pflaumen, Südengland kann mit Seebädern glänzen. Das nun erkaltete, schwere Wasser sinkt im Nordatlantik in die Tiefe und wälzt sich zurück Richtung Süden.

Wenn die globale Erwärmung wahr wird, fürchten die Gelehrten, könnte diese Wärmepumpe unterbrochen werden. Ein Motor des Golfstroms liegt nämlich am nördlichen Ende der Schleife. Und dort könnten abschmelzende Eismassen und vermehrte Niederschläge das Meerwasser zu stark verdünnen. Hintergrund: um abzusinken, muss das Meerwasser nicht nur kalt sein, sondern auch reichlich Salz enthalten, denn Salz erhöht die Dichte. Die Szenarien sind komplex, aber es ist durchaus möglich, dass eine globale Erwärmung für Europa mehr Kälte bedeuten könnte.

Das Kunststück, exakt gegen den Wind zu segeln, dürfte selbst ausgebufften Seeleuten Schwierigkeiten bereiten. Gewieften Skippern gelingt es aber immerhin, schneller als der „wahre“ Wind zu segeln. Entscheidend ist dabei wie wahrer Wind (der Luftstrom über unbewegtem Grund) und Fahrtwind (bläst stets von vorne) ins Segel greifen. Das Zusammenspiel beider Stömungen – Segler sprechen vom „scheinbaren“ Wind – kann das Boot mit **Eiltempo** vorantreiben. Strandsegler, an deren Fahrzeuge keine Wassermassen zerren und die nur den Rollwiderstand mit dem Boden überwinden müssen, erreichen auf diese Weise mehr als 120 Kilometer in der Stunde.

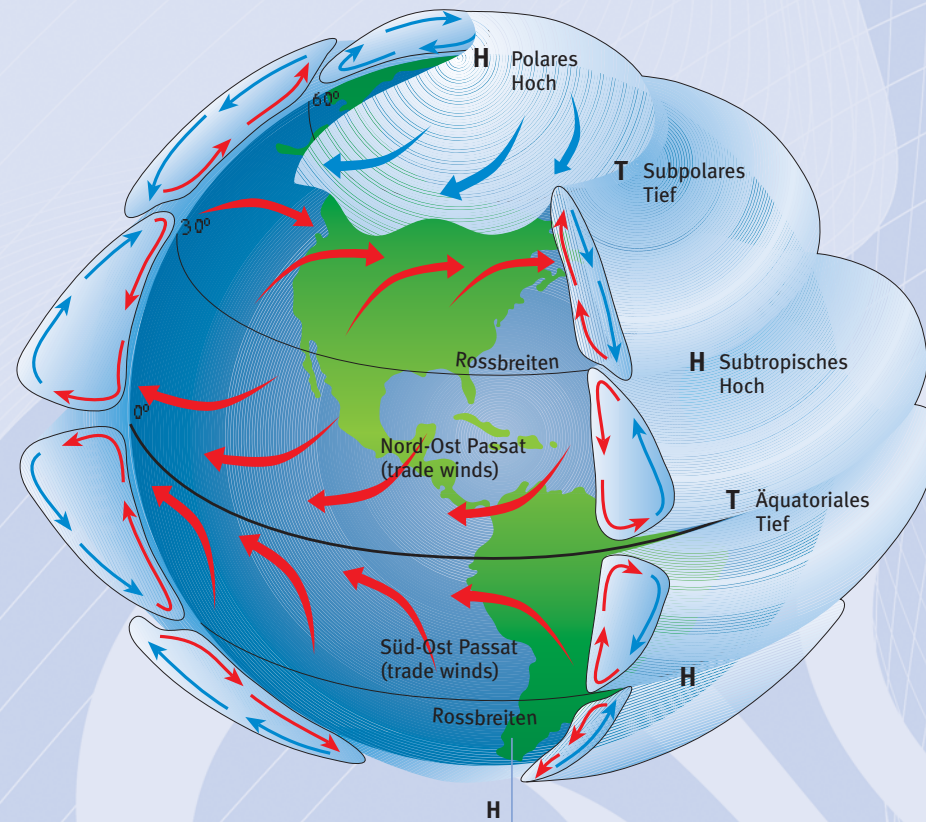
Wetter unter Druck

Wenn Luft erwärmt wird, verliert sie an Dichte, wird also leichter und steigt in der dichteren Luft der Umgebung auf. Jeder

Heißluftballon bezeugt diesen Effekt. Und jede Kumuluswolke. Die entsteht, wenn eine Warmluftssäule aufsteigt und oben abkühlt, wobei Wasserdampf in unzähligen Tröpfchen auskondensiert, die in der Summe eine Wolke bilden. Aufwinde wiederum entstehen dort, wo das Sonnenlicht den Boden stärker erwärmt hat, etwa weil er dort dunkler war. Die aufstrebende Luft hinterlässt in Bodennähe einen leichten Unterdruck, der durch seitlich herbeiströmende Luft ausgeglichen wird. Blätter rascheln.

Wie viel Sonne eine Gegend abbekommt, hängt im globalen Maßstab vom Breitengrad ab. Am Äquator wird die meiste Energie eingestrahlt – schließlich steht die Sonne mehr oder weniger senkrecht am Himmel. Die dort aufsteigenden heißen Luftmassen sinken in kühleren, den Polen näheren Gegenden wieder ab. Auf

Die verquirlten Luftbewegungen in der Atmosphäre machten den alten Seglern ganz schön zu schaffen. Das gesamte Wettergeschehen spielt sich übrigens in einer hauchdünnen Schicht ab. Hätte die Erdkugel zwei Meter Durchmesser, so wäre der wetterrelevante Atmosphärenbereich gerade mal zwei Millimeter dick. (Bild: ius, Quelle: The Atmosphere, Prentice-Hall Internat. Ltd.)



RABIALE WIRBEL

Tornados sind vergleichsweise kleine, schnell rotierende Luftwirbel, die meist während eines Gewitters in der Frühjahrs- und Sommerzeit entstehen. Hierzulande sind sie selten, in den USA jedoch verwüsten sie regelmäßig ganze Landstriche. Tornados produzieren enorme Windgeschwindigkeiten, solide Quellen nennen 500 Kilometer pro Stunde. Sie können immer dann auftauchen, wenn die Bedingungen für ein ordentliches Gewitter gegeben sind: also eine bodennahe, mit Feuchtigkeit gesättigte Luftschicht von einer kühlen, hohen Überdacht wird. Dann ist die Energie für etwas Großes da, denn die leichte Warmluft gehört eigentlich nach oben, die schwere Kaltluft nach unten. Ein Wirbel ist ein effektives Mittel, den unvermeidlichen Ausgleich herbei zu führen. (Bild: Photodisc)

⚡ Blitzschlag, ausgelöst per Wolkendraht
(Bild: A. Rakov, University of Florida)



⚡ Optische Solitonen teilen mit ihren wässrigen Verwandten die Eigenschaft, über lange Strecken ohne Schwächung reisen zu können. Wasserwellen werden durch die besondere Form des Wasserkanals zu Solitonen, Lichtimpulse durch die speziellen Eigenschaften von Lichtfasern. Kürzlich wurde in Australien ein mit Solitonen arbeitendes Glasfasernetz in Betrieb genommen, das tausende von Kilometern lang ist und ohne Zwischenverstärker auskommt, wodurch erhebliche Kosten entfallen. Die Leitung zwischen Perth und Adelaide kann 1,6 Terabit pro Sekunde übertragen. Ein DVD-Video wäre damit in 30 Sekunden überspielbar. (Bild: ius)

WETTERLEUCHTEN

Über Gewitter ist lang und breit geforscht worden. Genau geklärt ist das dennoch Phänomen nicht. So viel ist klar: In einem Tohuwabohu von Wolken, Waser und Wind werden elektrische Ladungen getrennt. Offenbar spielen hierbei Ionisationsvorgänge durch kosmische Strahlung eine Rolle, aber auch Reibungseffekte zwischen Wassertröpfchen und der umgebenden Luft – ähnlich wie bei einem Nylon-Pullover, der am Körper scheuert. Letztlich wird der obere Teil von Gewitterwolken meist positiv, der untere meist negativ gepolt. Über Entladungen – den Blitzen – gleicht sich alles wieder aus. Nur ein Drittel der Blitze finden von den Wolken zum Boden, der Rest wird zwischen den Wolken und mit der Luft ausgetauscht. Weltweit zischen etwa 100 Blitze pro Sekunde durch die Atmosphäre, von elektrischen Spannungen befördert, die zwischen 10 und 100 Millionen Volt liegen. Die Luft wird dabei plötzlich auf 30.000 Grad Celsius erhitzt, dehnt sich schlagartig aus und dann donnert es.

nach Verdunstung in der Höhe kondensiert, werden gewaltige Energien freigesetzt. In den Subtropen wiederum galt es die Rossbreiten zu beachten, eine wind-schwache Region, in der die Pferde über Bord mussten, wenn es an Futter und Trinkwasser zu mangeln begann. Es war nicht leicht auf See zu sein.

Flackern am Himmel

Diese Luftbewegungen beschäftigen heute ein ganzes Heer von Forschern, die im Übrigen auch das elektrische Geschehen in der Atmosphäre untersuchen: Wenn sich über dem Gelände des Zentrums für Blitzforschung an der University of Florida der Himmel verdunkelt, frohlocken die Wissenschaftler; erst recht, wenn es zu grummeln beginnt. Wenn dann noch eine mutmaßlich mit Blitzen schwangere Wolke heranzieht,

kommt Action auf: Die Forscher schicken Miniraketen in die Höhe, die einen mit Kevlar verstärkten Kupferdraht hinter sich herziehen, der am Startturm verankert ist. Und dann passiert's: Blitzentladungen rauschen den Raketendraht hinunter und hinauf, wobei der Draht vollständig verdampft. Das eigentlich Interessante aber wird in der Nähe des Starturms registriert: von Detektoren für hochenergetische Strahlung. Und die kriegen gut zu tun: Sie registrieren Röntgenstrahlung, Gammastrahlung sowie hochenergetische Elektronen und Positronen. Die herkömmliche Gewittertheorie gibt das nicht her, die Wissenschaftler tippen deshalb auf den „Runaway-Prozess“. Das ist eine exotische Entladungsart, bei der Elektronen fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden, wobei eine Menge Energie freigesetzt wird.



⚡ Wasserspiele im Dienste der Wissenschaft: Anlässlich einer Tagung über „nicht-lineare“ Wellenphänomene wird Russells Wasserbuckel nachgestellt. Solche „solitären“ Wellen können übrigens auch von Seebeben ausgelöst werden und sich in Küstennähe als verheerende „Tsunamis“ äußern. (Bild: Heriot-Watt University, Edinburgh)

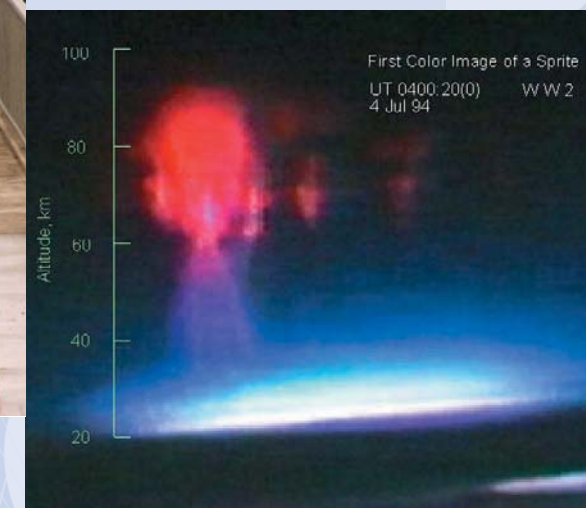
Von Wasser und Wellen

Auch das „nasse Element“ hat Ungewöhnliches zu bieten. Im Jahre 1834 ritt der junge Ingenieur John Scott Russell den Edinburgh-Glasgow-Kanal entlang, als eine von Pferden gezogene Barke anhielt. Nichts Besonderes, vom Bug der Barke aber löste sich ein Wasserbuckel, der es in sich hatte: Er eilte den Kanal entlang, ohne an Höhe oder Geschwindigkeit abzunehmen. Russell ritt über einen Kilometer neben dem Buckel her, in der festen Überzeugung, eine große Entdeckung gemacht zu haben. Das war auch so, allein, die Zeitgenossen dachten anders. Heute ist das „Soliton“ genannte Phänomen, das bei speziellen Bedingungen auftritt, in einer ganzen Reihe physikalischer Gebiete bekannt. Besonders wichtig: die Optik. Wenn Lichtpakete als Solitonen durch eine Glasfaser laufen, stabilisieren sie sich selbst wie Russells

Wasserbuckel und sind somit weniger anfällig für Störungen – wichtig für die optische Nachrichtenübertragung.

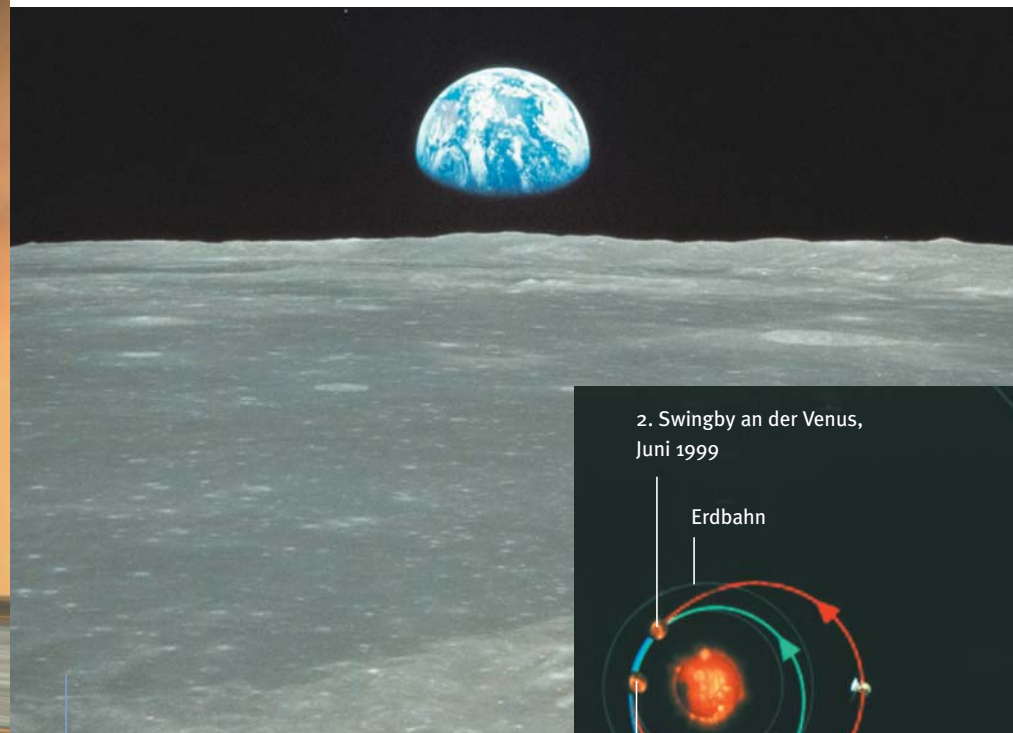
Wasser ist noch für viele andere interessante Phänomene gut. 1836 gab ein französisches Marine-Handbuch den Rat, Schiffe in wellenreicher See in gehöriger Distanz zueinander ankern zu lassen, anderenfalls sie sich mit womöglich fatalen Konsequenzen anzögen. Eine mögliche Ursache wurde erst 160 Jahre später gefunden: Zwischen der Bordwänden beider Schiffe kann nur ein im Vergleich zu den Außenseiten eingeschränktes Wellenspektrum existieren. Der äußere „Wellenüberschuss“ kommt einem Druck gleich, der die Schiffe aufeinander zu treibt. Ein ähnlicher Effekt wird in der Gestalt der „Casimir-Kraft“ heute sogar für die Nanotechnologie interessant.

⚡ „Elfen“ galten lange als Hirnge-spinnste gestresster Piloten – bis es gelang, diese Leuchterscheinungen auf Film zu bannen. Dieser Schnappschuss zeigt eine Elfe über dem Mittleren Westen der USA, aufgenommen aus einem Forschungsflugzeug. Die Beobachter taufen sie „Big Red“. Ihre Spitze reicht bis in 90 km Höhe. (Bild: University of Alaska, Fairbanks)



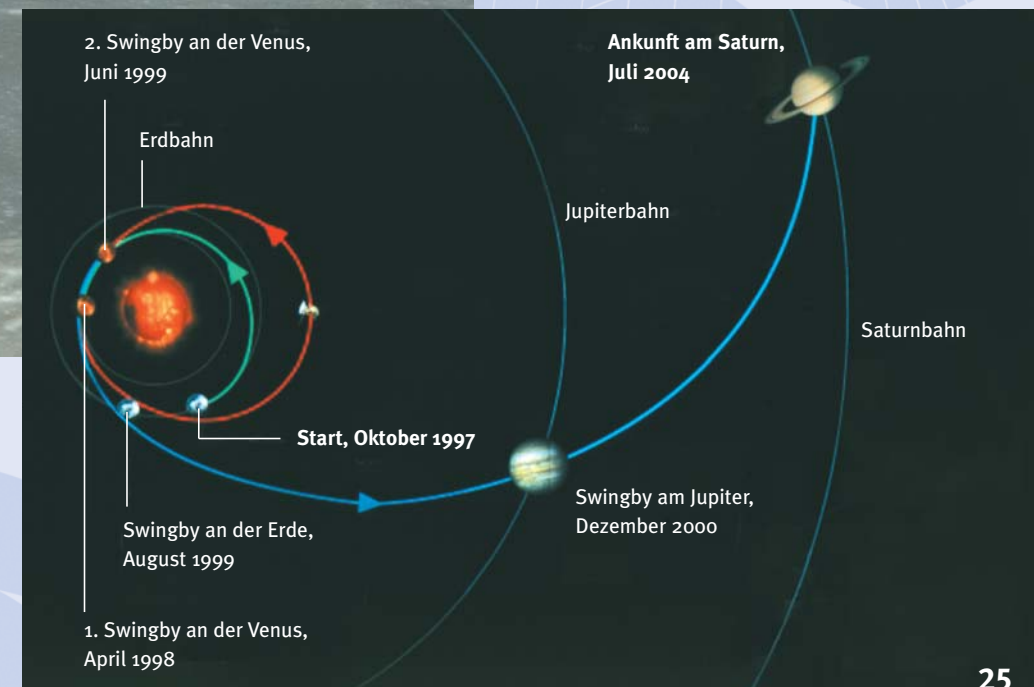
ELFE UND KOBOLDE ÜBER DEN WOLKEN

Seit Menschen über den Rand ihrer Atmosphäre hinaus sehen können, tun sich neue Wunder auf. Eines erscheint, wenn vom oberen Wolkenrand ein besonders starker Blitz zu Boden rast: über der Gewitterwolke, in 50 bis 80 Kilometern Höhe, flackert dann zuweilen ein rotes, flächiges Leuchten. „Elfen“ (engl. Sprites) hat die Wissenschaft diese Erscheinung getauft. „Kobolde“ dagegen sind ebenso ätherische schmale, senkrecht leuchtende Streifen, die für das menschliche Auge gerade noch erkennbar sind. Und es gibt noch weitere Rätsel zwischen Himmel und Erde wie „blaue Jets“, die aus einer Gewitterwolke mit irrsinnigem Tempo fast senkrecht in die Höhe schießen. Piloten, die über solche Dinge berichteten, wurde zunächst nicht geglaubt, erst Satellitenmessungen und Fotos vom Space Shuttles aus machten das Naturschauspiel dingfest. Zurückzuführen ist es offenbar auf „Funkensprünge“ zwischen den Wolken und elektrisch geladenen Luftschichten in großer Höhe.



Erde und Mond pflegen seit Jahrmilliarden eine innige Beziehung. Der Erdtrabant sorgt für Ebbe und Flut und stabilisiert die Drehachse unseres Planeten. (Bild: Photo-disc)

Besuch beim „Herrn der Ringe“: Im Sommer 2004 soll die Raumsonde *Cassini* den Planeten Saturn anfliegen. (Bild: NASA/JPL)



Über dem Horizont

„Bei der Eroberung des Weltraums sind zwei Probleme zu lösen: die Schwerkraft und der Papierkrieg. Mit der Schwerkraft wären wir fertig geworden.“

WERNHER VON BRAUN (1912 - 1977),
AMERIKANISCHER RAUMFAHRTPIONIER
DT. HERKUNFT

Die Gravitationskraft gelangte in der Öffentlichkeit zu großem Ruhm, weil sie von Isaac Newton in eine Formel gebannt wurde, die die Bahn der Planeten und des Mondes berechenbar machte. Die Schwerkraft ist eine relativ schwache Kraft, was auch Newton bemerkte, tatsächlich braucht man schon einen Planeten vom Format der Erde, um an dessen Oberfläche ein Weizenbier

dauerhaft im Glas zu halten. Mars, der an seiner Oberfläche immerhin noch ein Drittel der Erdanziehung produziert, hat sein Wasser weitgehend preisgeben müssen. Der Mars ist staubtrocken und seine Lufthülle im Vergleich zur irdischen nur ein Hauch. Das Weizenbier würde sich dort – wegen des geringen Luftdrucks – schnellstens verflüchtigen.

„Schwach“ ist natürlich relativ, Versicherungen führen die Gravitation als Schadensursache an vorderster Stelle, und auf der Ebene der Sterne und Galaxien, des Kosmos, ist die Schwerkraft dominant.

Die Schwerkraft muss unter Umständen kunstvoll gestrickt sein, um auf einem Planeten intelligentes Leben zuzulassen. Die Fachwelt ist sich derzeit nämlich nicht sicher, ob Sonneneinstrahlung, Masse

und chemische Zusammensetzung für einen Planeten tatsächlich die wesentlichen Größen für eine wohnliche Welt sind, oder ob nicht auch ein natürlicher Begleiter, wie wir ihn haben, zwingend dazu gehört. Der Mond nämlich erzeugt auf der ihm zugewandten Seite der Erde durch seine Schwerkraft eine Beule, vornehmlich aus Wasser. Auf der dem Mond abgewandten Seite der Erde entsteht ebenfalls eine Beule, die durch Fliehkräfte produziert wird. Denn Erde und Mond bewegen sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt, der knapp unter der Erdoberfläche liegt. Weil die Erde rotiert, wandern auch die Beulen über unseren Planeten, was sich unter anderem in den Gezeiten bemerkbar macht. Der auf Dauer wichtigere Effekt: Der Mond stabilisiert so, mechanisch, die Drehachse der Erde. Wäre das nicht der Fall, hätte die Erde auch Epochen

erlebt, in denen die Erdachse in der Ebene der Erdbahn lag. Unter solchen Umständen wären an den Polen extreme Temperaturunterschiede aufgetreten, die womöglich klimatische Katastrophen und damit das Ende allen höheren Lebens bedeutet hätten.

Dem Erdtrabanten haben wir womöglich auch die Existenz unserer technischen Zivilisation zu verdanken. Die mittlerweile respektable Einschlagstheorie nämlich sieht den Mond als das Produkt des streifenden Zusammenstoßes der Erde mit einem marsgroßen Himmelskörper an. Beim großen Crash vor über vier Milliarden Jahren wurde ein großer Teil der auf dem Erdmantel schwimmenden Erdkruste in den Weltraum befördert. Die Restkruste war lückenhaft. Sie ließ Raum für Ozeanbecken, und hatte nun auch genügend Bewegungsfreiheit, in Schollen über den heißen, in geologischen Zeiträumen durchaus mobilen Erdmantel zu driften. An den

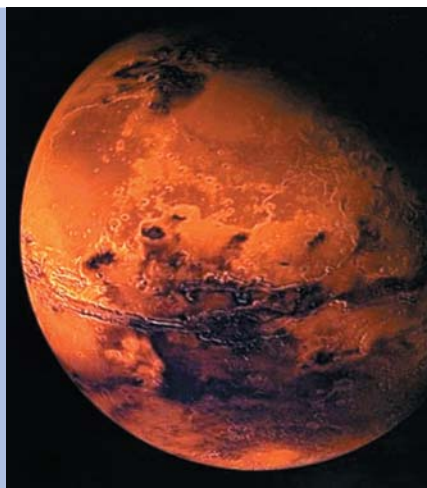
Rändern zusammen stoßender Kontinentalschollen türmten gigantische Kräfte dann Gebirge wie die Alpen oder den Himalaya auf. Ohne diese Plattentektonik wäre die Erde eine ziemlich glatte Kugel und – bis auf gelegentlich hoch wachsende Vulkankegel – vollständig von Wasser bedeckt. In einer Wasserwelt aber hätte unsere Technik nicht entstehen können. Kein anderer Planet unseres Sonnensystems hat eine derart mobile Kruste.

Die Erde im Blick

Das Interesse an der Schwerkraft wird in Zukunft wachsen, weil die Techniken zu ihrer Messung ständig besser werden. Seit Juli 2000 umzirkelt CHAMP die Erde, ein Satellit, dessen Position im Zusammenspiel mit eben dem GPS-Satellitensystem bestimmt wird, das auf der Erde Autofahrern den Weg weist. Das Ergebnis ist eine Karte des Schwerfeldes der Erde. Seit März 2002 zeichnet an dieser Karte das

VON PLANET ZU PLANET

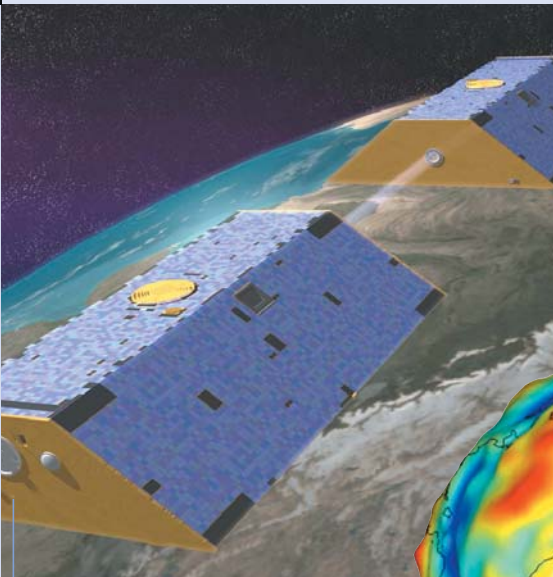
Die Raumfahrt beherrscht das Spiel mit der himmlischen Gravitationskraft mittlerweile perfekt. So hangeln sich Sonden durch die Gravitationsfelder verschiedener Himmelskörper und gewinnen dabei an Schwung (engl. Swingby), was Treibstoff spart. Die *Voyager*-Sonden hat es so als erste ganz aus dem Sonnensystem getrieben. Und auch die Raumsonde *Cassini* bedient sich solcher Manöver, um – vorbei an Venus, Erde und Jupiter – den Saturn anzusteuern. Nach siebenjähriger Reise und einer Strecke von rund fünf Milliarden Kilometern soll der irdische Gesandte im Juli 2004 den Ringplaneten erreichen. (Bild: NASA)



INFO URGEWALTEN

Titanische Kräfte formten nicht nur die Erdoberfläche. Brachiale Gewalten vermuten Forscher auch hinter den Narben des Roten Planeten. Die Furchen auf seiner Oberfläche rühren mutmaßlich von tektonischen Kräften her, die die Marskruste regelrecht aufgerissen haben und den *Valles Marineris* – einen Canyon mit 600 Kilometer Breite am Zentralteil – entstehen ließen. An anderer Stelle ragt mit dem *Olympus Mons* der höchste Vulkan des Sonnensystems 25 Kilometer weit in den Himmel. Zudem gibt es Hinweise auf Erosion durch Wind und Wasser. Die Frage ob letzteres einst in flüssiger Form über den Mars strömte, führte jahrzehntelang zu hitzigen Debatten. Inzwischen jedoch deutet vieles auf ein „Ja“ hin. Die neuesten Messdaten der Sonde *Mars Express* und die der mobilen Roboter *Opportunity* und *Spirit* lassen wenig Zweifel. (Bild: ESA)

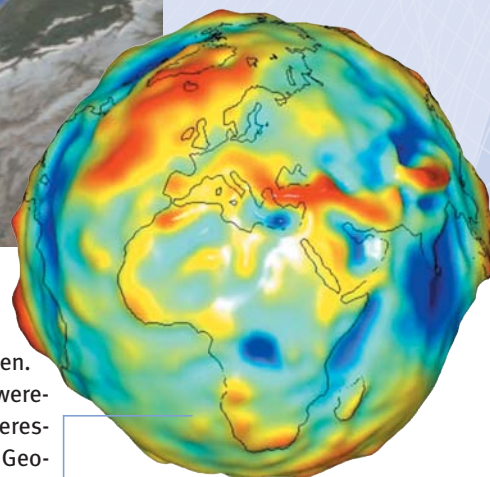
Satellitenpaar **GRACE** mit, das in 220 Kilometern Abstand hintereinander fliegt, dabei seine Relativposition bestimmt, Beschleunigungskräfte misst, Korrekturen bestimmt etc. Das Ergebnis ist eine noch genauere Karte des **Schwerefeldes der Erde**, die schon geophysikalische Eigenheiten wie die höhere Massenkonzentration an zusammen prallenden Kontinentalplatten erkennen lässt. Und 2006 wird eine modifizierte russische Interkontinentalrakete GOCE in einen nur 250 Kilometer hohen Erdborbit heben. GOCE ist ein Satellit mit hoch empfindlichen Beschleunigungsmessern, die noch den zehnten Teil eines Billionstels der am Boden gefühlten Erdschwere bestimmen können. Die Auflösung der resultierenden Schwerefeld-



karten wird bei 100 Kilometern liegen. Ozeanographen werden aus den Schwerefeldanomalien dann auch tiefe Meeresströmungen rekonstruieren können, Geophysiker die Wurzeln der Gebirge sehen, mehr über Erdbebenursachen erfahren, Lagerstätten ausfindig machen und mehr. An den Gravitationsunternehmungen sind deutsche Wissenschaftler maßgeblich beteiligt.

Wenn der Raum erzittert

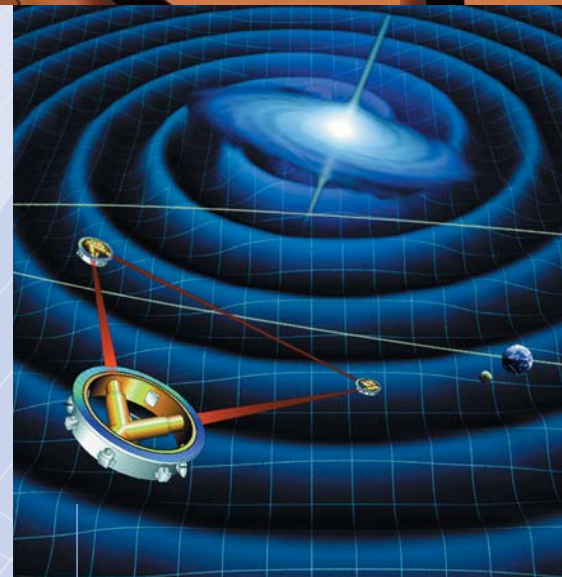
Als Beschreibung der Gravitation ist Einsteins Relativitätstheorie nach wie vor eine Klasse für sich. Zu ihren subtilsten Vorhersagen zählt die Existenz von Gravitationswellen, von kleinen Stauchungen und Dehnungen des Raumes, die sich im Weltraum mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, ähnlich Wellen auf einem See. Auf der Erde liegt man bereits seit einigen Jahren auf der Lauer, hier ist u. a. die Messstation GEO600 in der Nähe von Hannover zu nennen. Doch bislang sind



↑ Die Erdanziehung schwankt von Ort zu Ort. Auf dieser Karte sind Bereiche hoher Schwerkraft rot, Bereiche geringer Schwerkraft blau dargestellt. (Bild: U Texas/NASA/GFZ)

diese extrem schwachen Wellen den Forschern nicht ins Netz gegangen. **LISA** heißt das Satellitentrio von NASA und ESA, das sich ab 2011 ebenfalls um ihren Nachweis kümmern soll: drei Raumsonden, die in einem gleichschenkligen Dreieck von fünf Millionen Kilometern Seitenlänge wie die Erde um die Sonne kreisen und mit Lasern aufeinander zeigen. Die Laserstrahlen werden von Testmassen in den Raumsonden reflektiert – frei schwebende hochpolierte Platin-Gold-Würfel mit vier Zentimetern Kantenlänge – und zur Interferenz gebracht.

☞ Das Projekt GRACE kartiert das Schwerefeld unseres Planeten, indem es kleinste Änderungen in der Flugbahn zweier Satelliten erfasst. Die Abbildung ist nicht maßstabsgetreu, tatsächlich halten die GRACE-Sonden rund 200 Kilometer Abstand. (Bild: NASA)



↑ Vorbeiflug am Saturn mit Tempo 0,99c, d. h. mit 99 Prozent Lichtgeschwindigkeit. (Computersimulation: D. Weiskopf, Uni Stuttgart)

☞ Das Sonden-Trio LISA soll die Ausläufer von Schwerkraftwellen aufspüren. Als Quelle der Erschütterungen ist hier eine Galaxie angenommen. Abgebildet ist außerdem ein Ausschnitt der Erdbahn, Mond und Erde sind rechts im Bild. (Bild: ESA)

Wenn der Raum im Strahlengang von Gravitationswellen erschüttert wird, teilt sich das den Interferenzmustern mit und schließlich – per Funk – den Wissenschaftlern am Boden. Ein Gravitationswellennachweis wäre eine weitere Bestätigung der Relativitätstheorie.

Wenn auch Gravitationswellen fernab ihres Entstehungsortes so schwach sind, dass sich ihre Entdeckung irdischen Instrumenten bislang entzogen hat – an der Quelle reicht ihre Kraft nach neuesten Erkenntnissen sogar, ein „Schwarzes Loch“ aus der Bahn zu werfen. Tatsächlich ist in dieser dynamischen Welt nichts auf Dauer sicher, selbst unsere heimische Milchstraße – mit hundert Milliarden Sternen ein imposantes Territorium – wird sich in einigen Milliarden Jahren mit ihrem Nachbarn, der Andromeda-Galaxie, zu einem neuen Sternensystem vereinen. Und dann gibt es Streit: In beiden Galaxien sitzt im Zentrum ein Schwarzes Loch, eine

Region, in der Millionen Sonnenmassen so dicht gepackt sind, dass selbst Licht ihr nicht entkommen kann. Bisher wurde angenommen, dass sich die Schwarzen Löcher bei solchen Fusionen immer zu einem neuen, noch mächtigeren vereinen, dabei werden im großen Stil Gravitationswellen frei gesetzt. Neue Rechnungen zeigen, dass bei Verschmelzungen unterschiedlich großer Galaxien die entstehenden Gravitationswellen das Schwarze Loch des kleineren Partners aus dem Verband herausbugsieren können. Die Astronomie mit Gravitationswellen wird spannende Geschichten zu erzählen haben.

Relativistischer Augenschmaus

Wird je ein Mensch Augenzeuge solcher Ereignisse werden können? Das würde nur unter touristisch attraktiven Bedingungen Sinn machen, mit einem schnellen Raumschiff-Antrieb. Optimistische Physiker halten wieder die Casimir-Kraft, gespeist aus der Nullpunkts-Energie des

MIT TOPSPEED

Albert Einsteins Relativität ist nichts Exotisches, wer mit einem Elektronenmikroskop zu tun hat, muss bei Experimenten mit flinken Elektronen „relativistische Korrekturen“ berücksichtigen, auf die Anfänger für gewöhnlich stolz sind. Was aber sagt die Theorie darüber, wie Mr. Spock den Saturn sehen würde, wenn er fast lichtschnell vorbei flöge? Es fällt sehr schwer, sich das vorzustellen. Wie steht es etwa um die relativistische Längenkontraktion? Gemäß Einstein werden schließlich alle Objekte, die fast lichtschnell daherkommen, in Flugrichtung gestaucht. Nun, der Effekt ist vorhanden. Man kann ihn messen, aber erstaunlicherweise nicht sehen. Was daran liegt, dass hier noch Lichtlaufzeiten mit ins Spiel kommen. Relativistische Objekte erscheinen daher gedreht und verzerrt, nicht platt gedrückt. Und tatsächlich ist es Wissenschaftlern mittlerweile gelungen, Spocks Sehfeld physikalisch korrekt zu simulieren – mit Computerhilfe. Fazit: der Ring des Saturn sähe ganz schön verbeult aus.

Vakuums, für fähig, einen Warp-Drive zu befeuern. Würde der funktionieren – Wissenschaftler wüssten schon, was dicht an der Lichtgeschwindigkeit Reisende zu sehen bekämen. Der Saturn etwa wäre im lichtschnellen Vorbeiflug wunderbar verformt und verfärbt. Ach ja, dem Casimir-Effekt wird übrigens noch viel mehr zugeraut, er könnte sogar für die stetige Ausdehnung des Universums verantwortlich sein, und als eine Art Antigravitation auf großer kosmischer Skala wirken. Aber es muss nicht immer Casimir sein.

INFO