Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

kennen Sie das? Sie lesen eine Zeitung oder ein Buch und plötzlich springt Sie ein Satz an, von dem Sie in der Sekunde, in der Sie ihn lesen, wissen, dass Sie ihn ein Leben lang im Gedächtnis behalten werden? Vielleicht nicht wörtlich, aber doch dem Sinn nach. Mir ist letztens dieser Satz begegnet: „Jeder von uns besteht bei seinem Tod aus so vielen ständig wieder verwerteten Atomen, dass eine beträchtliche Zahl davon – nach manchen Schätzungen bis zu einer Milliarde in jedem Menschen – vermutlich einst zu Shakespeare gehörte. Jeweils eine weitere Milliarde stammt von Buddha, Dschingis Khan und Beethoven oder jeder anderen historischen Gestalt, die uns einfällt.“* Dass alles in der Welt aus Atomen besteht und ihre Anzahl also gigantisch ist, haben wir zwar schon vorher gewusst, aber diese Folgerung war dann doch verblüffend, wenn nicht schockierend, in jedem Fall „merk-würdig“.

Jens Simon

Erika Schow

Jörn-Uwe Barz

Björn Helge Wysfeld

Alberto Parra del Riego

Als universelle Legosteine hatten sich ja schon die alten Griechen die Atome gedacht – als unveränderliche Bauteile in einer veränderlichen Welt. Und lange Jahrhunderte waren sie auch das einzig Unveränderliche, von dem die Menschheit wusste, bis … – ja, bis die Physiker (wer sonst?) anfingen, Ordnung in die vielgestaltigen Phänomene der naturwissenschaftlichen Welt zu bringen. Zu dem Alphabet der Atome (das allerdings auch erst nach und nach im Detail aufgedeckt wurde) gesellte sich eine Grammatik in Form von Grundprinzipien und Naturgesetzen. Doch es geht den Physikern hier ein wenig wie der Prinzessin auf der Erbse. Mit eleganten Gleichungen können sie sich und die Welt schön einbetten, aber ein paar Dinge pieksen sie doch arg. Denn in den Gleichungen tauchen mysteriöse Zahlen auf, die immer und überall dieselben Werte zu haben scheinen.

In das Dickicht dieser Naturkonstanten wollen die *maßstäbe* ein wenig hineinlinsen. Es wird von Eseln und Speisekarten ebenso die Rede sein wie von kleinen Orten und großen Zeiträumen. Die berüchtigste aller Zahlen, die 137, wird, ihrer Berühmtheit angemessen, gleich mehrfach die Bühne dieser *maßstäbe* betreten. Folgen Sie doch einfach der 137 von einem Krankenzimmer in Zürich bis in das Zeitlabor der PTB und machen Sie vielleicht einen kleinen Abstecher zu Quasaren mit. Der Umweg beträgt nur ein paar Milliarden Lichtjahre.

Im Namen der Redaktion wünsche ich Ihnen viel Spaß beim Blättern und Lesen. Vielleicht stoßen Sie auf die eine oder andere Überraschung, die Sie gerne im Gedächtnis behalten möchten. Ich drücke uns den Daumen.

Ihr Jens Simon

---

* Bill Bryson: Eine kurze Geschichte von fast allem
München 2004. S. 175

Inhaltsverzeichnis

Seiten

Jens Simon:
Vorwort

Was ist für Sie absolut unveränderlich?
Antworten im Postkartenformat

Rainer Scharf:
Naturkonstanten à la carte
Mehr als eine Handvoll Zahlen

Dörte Saße:
Die „Liste“
Die Welt der Nachkommastellen

1 4 8 10 14 18 22 26 28

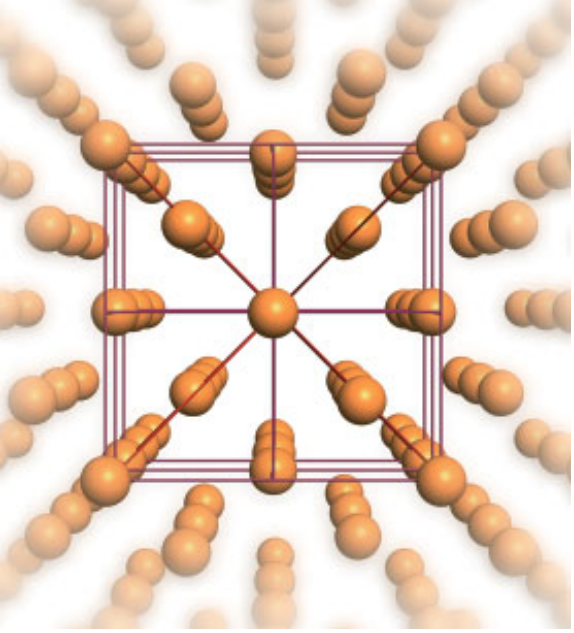
Naturkonstanten –
Nachhall des Urknalls?
Ein Interview mit
Hans-Joachim
Queisser

Anne Hardy:
Wie groß bist du?
Klassische Messverfahren der
Naturkonstanten

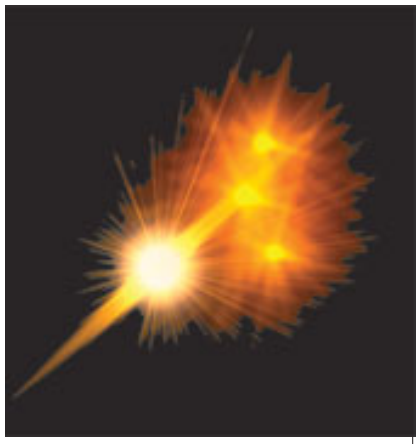
Jan Oliver Löfken:
Die Zahlenspieler
Keine krummen
Dinger

Brigitte Röthlein:
Metrologens Lieblinge
Maß nehmen in vier Stationen

Axel Tillemans:
Naturgesetze sind
keine Esel
Kommt die Theorie
von Allem?



Brigitte Röthlein:
Atome hinter Gittern
Sag', wie viel Atome steh'n



Ute Kehse:
Der Strichcode der Quasare
137 für immer und ewig?

Das Letzte
Sidney Harris:
Das Erste zuletzt

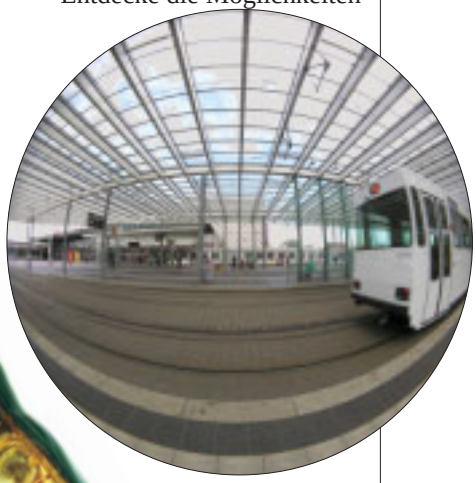
Lesenswertes

30 33 36 40 44 48 51 54 55 56

Leserbriefe

Andrea Hoferichter:
Die K&k-Connection
Mit Boltzmann zur Temperatur

Julia Förster:
Meine Abenteuer als Fremde-Welten-Kundler
Entdecke die Möglichkeiten



Birgit Ehlbeck:
Unser Wissen von der Welt ist vorläufig
Ein kurzer Besuch bei Ekkehard Peik

Frank Frick:
Im Räderwerk der Quantennormale
Vom Johannisbrotsamen zur Elementarladung

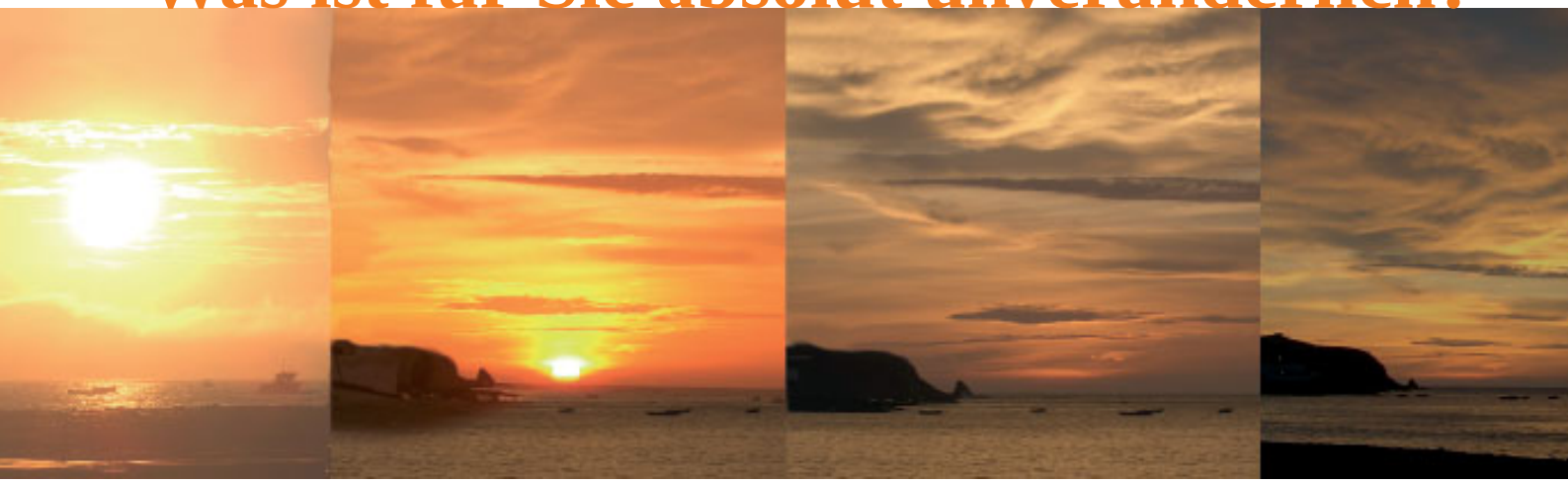
Jens Simon:
Mensch im Glück
Gereift auf der Insel

Was ist für Sie absolut unveränderlich? Einige Briefe mit dieser Frage haben wir auf die Reise geschickt – an Wissenschaftler verschiedener Disziplinen. Die einzige Randbedingung, die wir gestellt haben, war, das Unveränderliche in wenigen Worten zu charakterisieren, ungefähr mit einer Textlänge, die auf eine Postkarte passen würde. Es kamen zwar keine Postkarten zurück, aber stattdessen E-Mails und einige Briefe – mit diesen Antworten.

Im Wortsinne: Nichts. Es kommt aber auf den Zeitraum an, mit dem man Veränderungen misst. Allerdings gibt es Zeiträume, die so groß sind, dass der Begriff „Veränderung“ für Menschen keinen Sinn macht. Daher ist letztlich nur die Zeit unveränderlich.

WALTHER ZIMMERLI, PHILOSOPH
PRÄSIDENT, AUTOUNI WOLFSBURG

Was ist für Sie absolut unveränderlich?



Nicht nur als Physiker hat man gute Gründe, mit absoluten Aussagen vorsichtig zu sein. Zu viele Sicherheiten wurden – insbesondere im letzten Jahrhundert – widerlegt. Also kann ich nur sagen, welche Sicherheiten ich besonders schmerzlich vermissen würde und auf welche ich leichten Herzens verzichten könnte. Erführe ich, dass die Feinstrukturkonstante oder die Lichtgeschwindigkeit sich mit der Zeit ändern, so fände ich das aufregend. Verlöre der Energiesatz seine unveränderliche Absolutheit, so würde mich das traurig stimmen. In ähnlicher Weise übrigens, wie es mich traurig stimmen würde, wenn ich wüsste, dass eine Zeit kommt, wo niemand mehr die absolute Schönheit von Mozarts „Don Giovanni“ oder von Bachs „Kunst der Fuge“ empfindet.

JOACHIM TREUSCH, PHYSIKER
VORSTANDSVORSITZENDER, FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH

Die aus Wissenschaft und Erfahrung gewonnene Antwort auf die Frage, was für mich absolut unveränderlich ist, kann nur lauten: Nichts. In einem explodierenden Universum, wo jeder Blick in noch tiefere Vergangenheiten (bis 300 000 Jahre an den Urknall heran) führt, wo auf den „big bang“ in vielleicht 10^x Jahren der „big crush“ folgen wird, gibt es nichts absolut Unveränderliches. Auch die Spur des Menschen und sogar die Spuren der Liebe sind vergänglich. Wenn freilich die Frage nicht lautet, was ich weiß, sondern woran ich glaube, kann ich antworten mit dem Lebensmotto meiner Frau, das auch mich durchs Leben geführt hat. Es ist nachzulesen im Alten Testament bei Jesaja Kapitel 43, Vers 1 und setzt den Kontrapunkt zu allem Nichts. (Jesaja 43.1: Fürchte dich nicht. Ich habe dich bei deinem Namen gerufen. Mein bist du!)

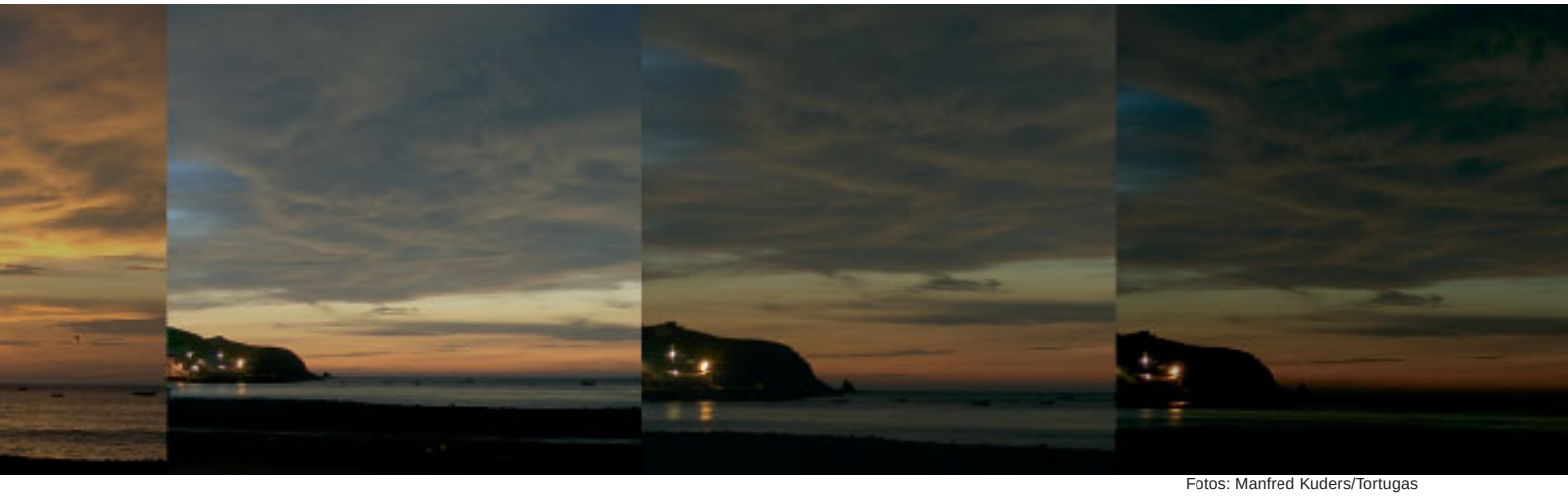
WOLFGANG FRÜHWALD, GERMANIST
PRÄSIDENT, ALEXANDER VON HUMBOLDT-STIFTUNG

Unveränderlich sind: die menschlichen Schwächen, der Filz in Berlin, die Eitelkeit berühmter Männer (und zunehmend auch Frauen, sofern sie in ähnliche Positionen kommen). Unveränderlich ist wohl auch die Sehnsucht der Menschen nach einer besseren, gerechteren Welt, aber auch der Neid, die Lust an Intrigen und wo nichts mehr hilft: der Glaube an Wunder.

HAZEL ROSENSTRAUCH, GERMANISTIN
CHEFREDAKTEURIN, GEGENWORTE

Absolut nichts ist unveränderlich.
Absolut unveränderlich ist nichts?
Nichts ist absolut unveränderlich.
Ist Nichts absolut unveränderlich?

EDUARD SALUZ, TECHNIKHISTORIKER
DIREKTOR, DEUTSCHES UHRENMUSEUM



Fotos: Manfred Kuders/Tortugas

Was ist für mich absolut unveränderlich? Eine physikalisch-technische oder philosophische Antwort zu geben sind andere Fachkollegen eher berufen als ich als Ökonom und Ökologe. Vielleicht gelingt ihnen eine schlüssige Antwort – trotz der (innerhalb sehr unterschiedlicher Zeitskalen) stetigen Veränderung von Erde, Natur und Gesellschaft. Eine einfache Antwort scheint nahe zu liegen: Die Mengen an Ressourcen der Erde, die nicht erneuerbar sind, sind absolut unveränderlich. Dies sind z. B. die absolut begrenzten Gesamtmengen nicht erneuerbaren Energiequellen wie Öl, Erdgas oder Uran. Zu einfach ist diese Antwort deshalb, weil dabei die für die Menschheit eigentlich relevanten Fragen der Verbrauchssenkung, der Substituierbarkeit und der Aufnahmefähigkeit der Senken ausgeblendet werden. Fossile und nukleare Energien können vollständig durch erneuerbare Energien und Energieeffizienz substituiert werden. Die gesamten heute bekannten Ressourcen fossiler Energieträger innerhalb eines Jahrhunderts zu verbrennen würde eine für den Menschen katastrophale Klimänderung hervorrufen. Die Aufnahmefähigkeit der Senken (Atmosphäre, Ozeane, Böden, Vegetation) ist somit der limitierendere Faktor als die physisch unveränderliche Gesamtmenge fossiler Energien.

PETER HENNICKE, ÖKONOM UND ÖKOLOGE
PRÄSIDENT, WUPPERTAL INSTITUT FÜR KLIMA, UMWELT, ENERGIE

Das Einzige, das für mich absolut unveränderlich ist, ist die Frage, ob es Konstanten und Naturgesetze gibt, die unveränderlich sind.

Wolfgang Ketterle
Physiker
Nobelpreisträger, Massachusetts Institute of Technology

In der Mathematik wechselt man die Betrachtungen, aus Veränderlichen werden Unveränderliche und umgekehrt. Das ist sehr erfolgreich.

Stefan Felsner
Mathematiker
Technische Universität Berlin

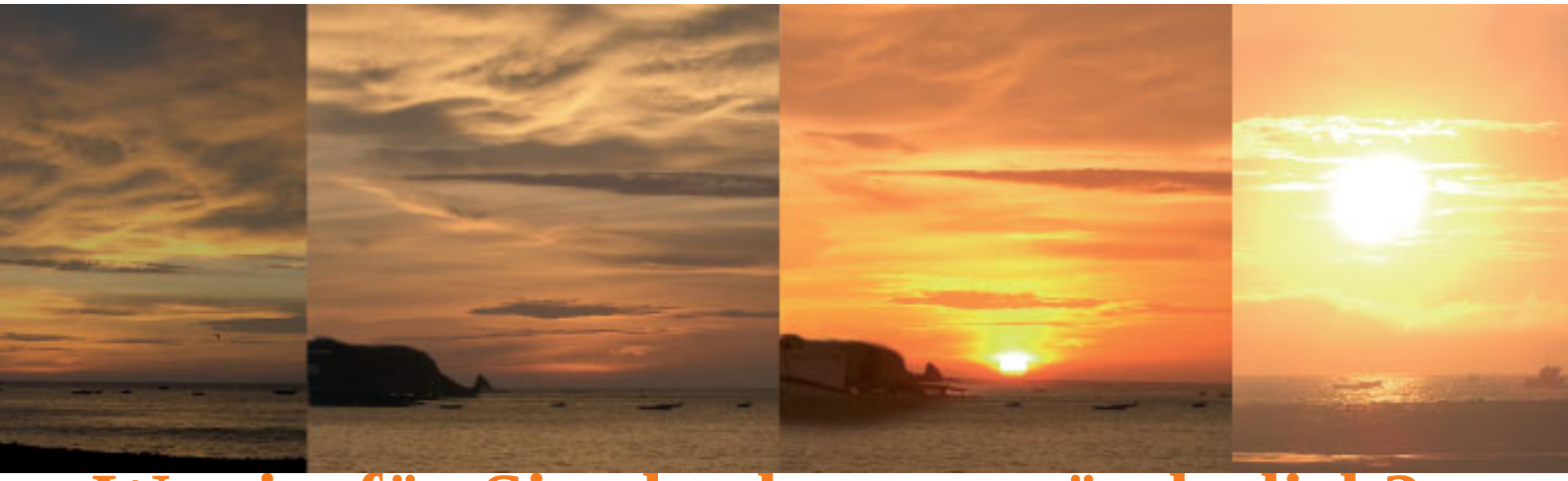
Was für mich absolut unveränderlich ist? Eine merkwürdige Frage, auf die ich mit einem doppelten Kalauer zu antworten geneigt bin: Absolut unveränderlich ist der stetige Wechsel – und unsere nichtendenwollende Sehnsucht danach, darin dennoch etwas Konstantes und sogar Unveränderliches zu finden.

Im Ernst: In dem Bereich, in dem ich wissenschaftlich tätig bin – menschliches Verhalten und Erleben in seiner Abhängigkeit von natürlichen und kulturellen Bedingungen – gibt es eigentlich keine Unveränderlichkeiten, schon gar keine absoluten. Menschliches Leben ist Wechsel und Veränderung – egal, ob wir es im Sekundenmaßstab oder im Maßstab von Jahrtausenden betrachten. Allerdings mögen die Menschen den Wechsel nicht, denn in ihrer kulturellen Tätigkeit stellen sie Konstanz und Berechenbarkeit her, so gut sie können. Sie bauen sich Institutionen (PTB!), entwickeln Normen (Maßstäbe!), denken sich übersinnliche Instanzen aus (Götter!) – oder sie betreiben Wissenschaft und suchen nach Regelhaftigkeit (Gesetze!). Und weil sie den ständigen Wandel, dem sie ausgesetzt sind, partout nicht ausstehen können, quälen sie sich – und nerven ihre Kollegen – mit der Frage nach dem absolut Unveränderlichen.

Wolfgang Prinz, Psychologe
Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences

Aus meiner Sicht als Psychologin ist nichts unveränderlich. Ganz im Gegenteil, Psychologinnen und Psychologen sind von der Veränderbarkeit ihres Gegenstandes – dem menschlichen Erleben und Verhalten – fest überzeugt. Auch die Vorstellungen davon, nach welchen Prinzipien sich diese Veränderungen vollziehen, sind einer ständigen Veränderung unterworfen. Und schließlich sind aus Sicht der Psychologie die Kriterien, anhand derer über das Vorliegen von Veränderungen entschieden wird, selbst das Resultat veränderlicher Konstruktionen.

Hannelore Weber, Psychologin
Universität Greifswald



Was ist für Sie absolut unveränderlich?

Unveränderlich ist die Erziehungstatsache: Jedes neugeborene Kind muss in eine sich rapide verändernde Gesellschaft hineinwachsen, sich im Austausch mit und durch die Hilfe anderer das kulturelle Erbe unserer Welt aneignen. Von Generation zu Generation werden wichtige Dinge weitergegeben und weiterentwickelt. Dies geht nicht ohne die anderen. Aufwachsen ist ein sozialer Prozess. Jedes Kind braucht die Zuwendung und den sozialen Kontakt zu seinen Mitmenschen. Der Mensch muss lernen!

Thomas Rauschenbach
Erziehungswissenschaftler
Vorstandsvorsitzender
Deutsches Jugendinstitut

Unveränderlich sind für mich die Strukturen unserer Welt: Die starke Wechselwirkung wird durch die Eichtheorie der QCD (Quantenchromodynamik) beschrieben, die schwachen und elektromagnetischen Kräfte durch die Eichtheorie der elektroschwachen Wechselwirkungen. Naturkonstanten, etwa die Konstante Alpha, oder die Masse des Elektrons, können durchaus zeitabhängig sein. Jedenfalls gibt es keinen theoretischen Grund, warum diese Größen absolut konstant sein sollen. Man sollte deshalb nach einer Zeitabhängigkeit suchen.

Harald Fritzsch, Physiker
Universität München

Naturkonstanten – Nachhall des Urknalls?

Viele Rätsel verbergen sich hinter den Naturkonstanten. Auch heute noch ist nicht geklärt, woher sie kommen und ob sie wirklich konstant sind. Wir sprachen darüber mit Hans-Joachim Queisser, dem früheren Direktor des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung in Stuttgart. Er beschäftigt sich seit seiner Emeritierung mit grundlegenden Fragen der Physik.

maßstäbe: *Herr Professor Queisser, wir haben Wissenschaftler aus den unterschiedlichsten Fachrichtungen gefragt: Gibt es bei Ihnen etwas Konstantes? Die meisten mussten eingestehen, dass es das in ihrer Sparte nicht gibt. Wie ist das eigentlich in der Physik?*
Queisser: Es ist ein uralter Traum des Menschen, etwas greifbar zu machen, was sich nicht verändert, etwas, auf das man sich verlassen kann. Das versuchen ja letztlich auch jede Religion und Weltanschauung. Für die Menschen der Antike gab es in dieser Hinsicht nur zwei Dinge: einerseits die Mathematik, also etwa den Satz des Pythagoras oder die Berechnung des Kreises, und andererseits die Sterne. Alles andere erschien ungeeignet: der Lauf der Flüsse, die Winde oder die Erntezeiten.

Warum hat man nun aber gerade in der Physik Konstanten gefunden?
So einfach war das gar nicht. Zunächst fand man lange nichts wirklich Konstantes. Der erste Treffer war vielleicht die Avogadrosche Zahl, die in der PTB heute mit großem Aufwand neu bestimmt wird. Dass ein Mol eines Stoffes immer die gleiche Anzahl von Atomen enthält, das war zunächst überraschend, und es ist von den Physikern erst einmal nicht so stark beachtet worden wie von den Chemikern.

Fing dann das große Staunen an?
Das große Staunen und die große Freude: Hinter dieser Erkenntnis steckt ja nichts Geringeres als der Gedanke, dass alle Atome gleich sind. Das ist schon etwas Besonderes. Noch zu Anfang des 20. Jahrhunderts hat man nicht einmal daran geglaubt, dass Atome wirklich real sind. Heute ist uns das völlig klar, aber damals war das keineswegs so. Erst als das Atom für die Wissenschaft greifbar wurde, konnte man sagen: Da ist etwas. Da fing es an. Rutherford erkannte, dass das Atom aus einem kleinen, aber schweren Kern besteht und aus Elektronen, die sich darum herum bewegen. Dann wurde auch entdeckt, dass das Elektron eine bestimmte Ladung hat und etwas Konstantes ist. Das war wirklich ein großer Durchbruch, dass man die Masse des Elektrons und seine Ladung *e* bestimmen konnte. Nun war man sicher: Doch, hier haben wir etwas Bleibendes, denn offensichtlich hängen die Grundbausteine der Materie aufs engste mit den Naturkonstanten zusammen.

Gibt es eine Art Hierarchie unter den Naturkonstanten?
Ja, die Mehrheit der theoretischen Astrophysiker und Kosmologen glaubt heute an eine Art Stammbaum. Das ist eine wunderschöne Vorstellung, die man an den Anfang stellt und jetzt zu beweisen sucht, ganz anders, als man das normalerweise tut. Sonst wird ja erst einmal gemessen und registriert, und danach zieht man seine Schlüsse. Jetzt aber sagt man, es gibt eine Vereinigung der Wechselwirkungen, am Anfang waren alle noch zusammen. Im Laufe der Ausbreitung des Weltalls nach dem Urknall haben sich die einzelnen Kräfte herauskristallisiert, und jede hat dann ihren charakteristischen Beitrag geliefert. Bei den Kernkräften, der schwachen Wechselwirkung und der elektromagnetischen Kraft ist es ja schon gelungen, eine entsprechende Theorie zu entwickeln. Zurzeit versucht man, die Gravitation in dieses Bild mit zu integrieren. Es ist eine große Hoffnung, dass es so eine Art Stammbaum gibt und dass zu jeder Wechselwirkung in der Welt eine Naturkonstante existiert, die sich dann ebenfalls getrennt entwickelt hat.

Und wie könnte eine solche Hierarchie aussehen?
Es ist wohl heute die allgemeine Meinung, dass *h* und *c* fundamentaler sind als *e*. Fundamentaler könnte heißen, dass die Konstanten *h* und *c* bei der Aufspaltung nach dem Urknall früher auftauchten als die Elementarladung.

Spiegelt sich vielleicht in den Naturkonstanten lediglich die zufällige Situation, die während des Urknalls herrschte, wider? Also Naturkonstanten als der Nachhall von „Anfangsbedingungen“? Könnte man sich den Naturkonstanten immer weiter annähern, indem man weiter zum Urknall zurückgeht?
Das ist im Augenblick eine häufig vertretene Meinung. Und ich finde es auch eine schöne Sache, dass damit eine Dynamik in das Thema kommt, die darstellt, wie sich das Universum entwickelt hat. Aber ich weiß nicht, ob es notwendig ist. Ich bin auch noch nicht sicher, ob eine entsprechende Theorie wirklich gelingen wird. Das Schlimme ist ja, dass wir dazu keine Experimente machen können. So bleibt alles eine kosmologische Spekulation. Aber naturphilosophisch ist es natürlich eine faszinierende Idee, dass man aus den Bedingungen im Urknall die Naturkonstanten errechnen kann.

In wissenschaftlichen Bibliotheken finden sich laufende Buchmeter, gefüllt mit Zahlen und Tabellen, etwa den berühmten „Landolt-Börnstein“ – Ergebnisse langer Experimentierarbeit von Generationen von Wissenschaftlern. Sind diese Zahlen nicht auch alles Naturkonstanten?
Nein, im physikalischen Sinne nicht. Eine Naturkonstante ist nicht wie eine normale Materialkonstante. Etwa der Widerstand eines Kupferdrahts hängt von dessen Länge ab, von dessen Querschnitt und vom spezifischen Widerstand. Da gibt es lange Tabellen, und die Messungen sind wichtig für die Technik. Ähnliches gilt für die vielen chemischen Konstanten. Oder für Siedepunkt und Gefrierpunkt. Das füllt ganze Bände. Es beruht auf einer Fleißarbeit am Ausgang des 18. und Anfang des 19. Jahrhunderts, hinter der auch immer der Versuch steckte, etwas Konstantes festzustellen.

Was adelt eigentlich eine Konstante zur Naturkonstante?
Dass sie nicht material- oder ortsabhängig ist. Man hat ja auch die Lichtgeschwindigkeit lange nicht als Naturkonstante angesehen, denn wenn Licht durch Glas läuft, hat es eine andere Geschwindigkeit als im Vakuum.

Hängen die Naturkonstanten nicht vor allem damit zusammen, wie die Physik die Dinge beschreibt?
Im Laufe der Wissenschaftsgeschichte hat sich immer wieder gezeigt, dass neue Erkenntnisse auch eine neue Betrachtungsweise erfordern. Es gibt eben immer wieder Neues, das das Alte hinwegwischt. Das ging ja schon Max Planck so: Er war todunglücklich, weil er Physik mit stetigen Funktionen machen wollte. Was wäre die Elektrodynamik oder die Optik ohne stetige Funktionen, ohne Differenzialgleichungen? Und dann musste er einsehen, dass die Energie gequantelt ist und dass man dafür eine nicht kontinuierliche Mathematik braucht. Er hatte große Angst, dass das fundamentale Rüstzeug der Physik, nämlich die Mathematik mit ihren stetigen, differenzierbaren Funktionen, dabei kaputtgeht. In Wirklichkeit entstand dann die Quantentheorie. Ähnlich war es früher schon bei der Thermodynamik. Sie wurde erst beweisbar, als die Statistik kam. Man brauchte eben eine andere mathematische Grundlage.

Glauben Sie, es könnte sich eines Tages herausstellen, dass unsere Naturkonstanten doch nicht konstant sind?
Nun, da berühren Sie ein Thema, das zurzeit sehr kontrovers diskutiert wird. Angenommen, *e* wäre nicht fundamental, sondern hätte früher einen anderen Wert gehabt. Vielleicht hat es dann in Spiralnebeln, die früher entstanden sind als unsere Milchstraße, andere Werte. Wir gehen heute einfach davon aus, dass auch entfernte Spiralnebel die gleichen Naturkonstanten haben wie wir. Das ist durch Messungen schwer festzustellen, denn wenn man auf diese Galaxien schaut, findet man eine Rotverschiebung. Die stillschweigende Annahme, dass die Naturkonstanten auch in den entferntesten Spiralnebeln die gleichen sind wie bei uns, führt dann dazu, dass wir diese Rotverschiebung als Zeichen für eine Fluchtgeschwindigkeit halten. Das ist naheliegend, aber nicht bewiesen. Es hat jedenfalls enorme Konsequenzen für unser Weltbild, ob die Naturkonstanten wirklich konstant sind. Wenn wir das nicht mehr mit Sicherheit sagen können, stehen wir auf schwankendem, aber vielleicht auch fruchtbarem Boden. Das ist wie auf einem Moorboden, in den man einsinken, der aber auch wertvoll sein kann.

Fotos: jes/PTB

Zum Abschluss noch eine persönliche Frage: Haben Sie eine Lieblingskonstante?
Na, das ist doch klar für einen Max-Planck-Mann: Das Wirkungsquantum *h*.

Herr Queisser, vielen Dank für dieses Gespräch.

Das Interview führten Brigitte Röthlein und Jens Simon.

Metrologens Lieblinge

Zum Vorbild nimmt der Mensch sich gerne selbst. Aber manche von ihnen, namentlich die Metrologen, schwenken auf etwas Dauerhafteres um – auf Naturkonstanten.

„Wissenschaft: Einem ist sie die hohe, die himmlische Göttin, dem andern eine tüchtige Kuh, die ihn mit Butter versorgt“, schrieb einst Friedrich Schiller. Das gilt heute noch wie damals, und für beide Aufgaben benötigt sie eine wichtige Fähigkeit: Sie muss den Menschen Sicherheit geben. Einerseits die göttliche Sicherheit, unveränderlich und zuverlässig zu funktionieren, unter allen Umständen und unabhängig von Ort und Zeit. Andererseits eine praktische Sicherheit im Alltag, die es erst möglich macht, ihre Gesetze anzuwenden und in geldwerten Nutzen umzusetzen, etwa beim Bau von Maschinen oder beim Messen bestimmter Größen.

Kein Wunder, dass die Geschichte der Naturwissenschaften, insbesondere der Physik, einhergeht mit der unablässigen Suche nach Fixpunkten, die solche Sicherheit garantieren. Von Anfang an haben die Forscher nach unveränderlichen Konstanten gesucht. Keine leichte Aufgabe, zeichnet sich doch gerade die Natur durch ihre Vielfalt aus. Sanfte Hügel, schroffe Berge, wallende Wolken, tosende Brandung kennzeichnen die Landschaft. Mensch und Tier sind unverwechselbar anhand ihrer Physiognomie. Selbst Zwillinge gleichen sich nur wie „ein Ei dem anderen“, also nicht hundertprozentig. In der Natur, wie sie sich unseren Augen darbietet, gibt es nichts Exaktes – keine Würfel, keine Schrauben, keine rechten Winkel, keine Treppen, keine Räder. Natur erscheint immer zufällig hingeworfen, willkürlich, malerisch. So gut wie alles, was uns technisch, regelmäßig, abgezirkelt erscheint, ist von Menschenhand gemacht: Legosteine, Plattenbauten, Dachziegel, Automotoren, Uhren. DIN-Normen stammen aus Menschenhand, nicht aus der Natur.

Wo also sollte man ansetzen bei der Suche nach Konstanz? Logischerweise zunächst einmal beim Menschen selbst. Längenmaße orientierten sich früher an den Abmessungen des Körpers: Fuß, Elle, Fingerbreit, Schritt usw.; Flächen ga-

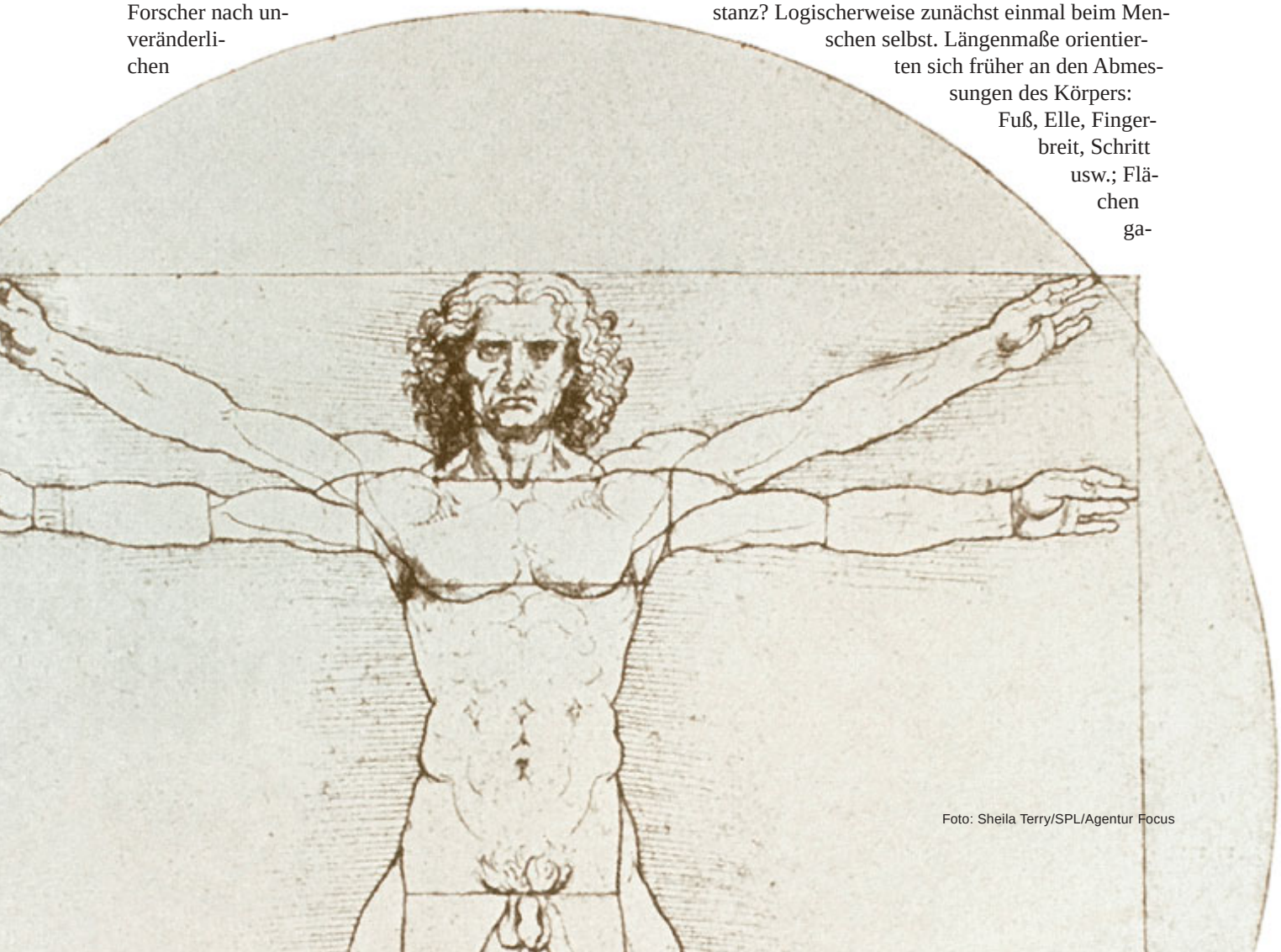


Foto: Sheila Terry/SPL/Agentur Focus

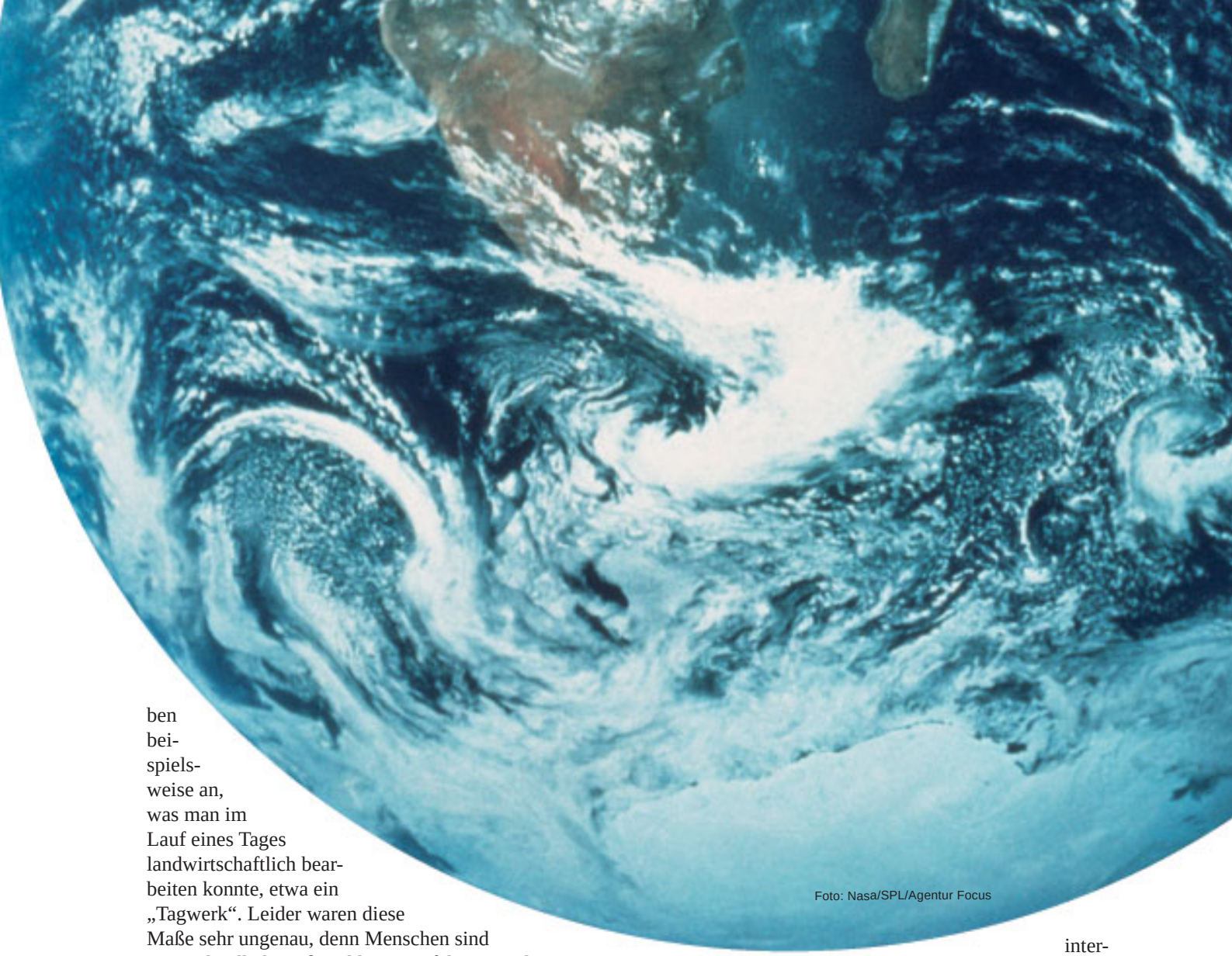


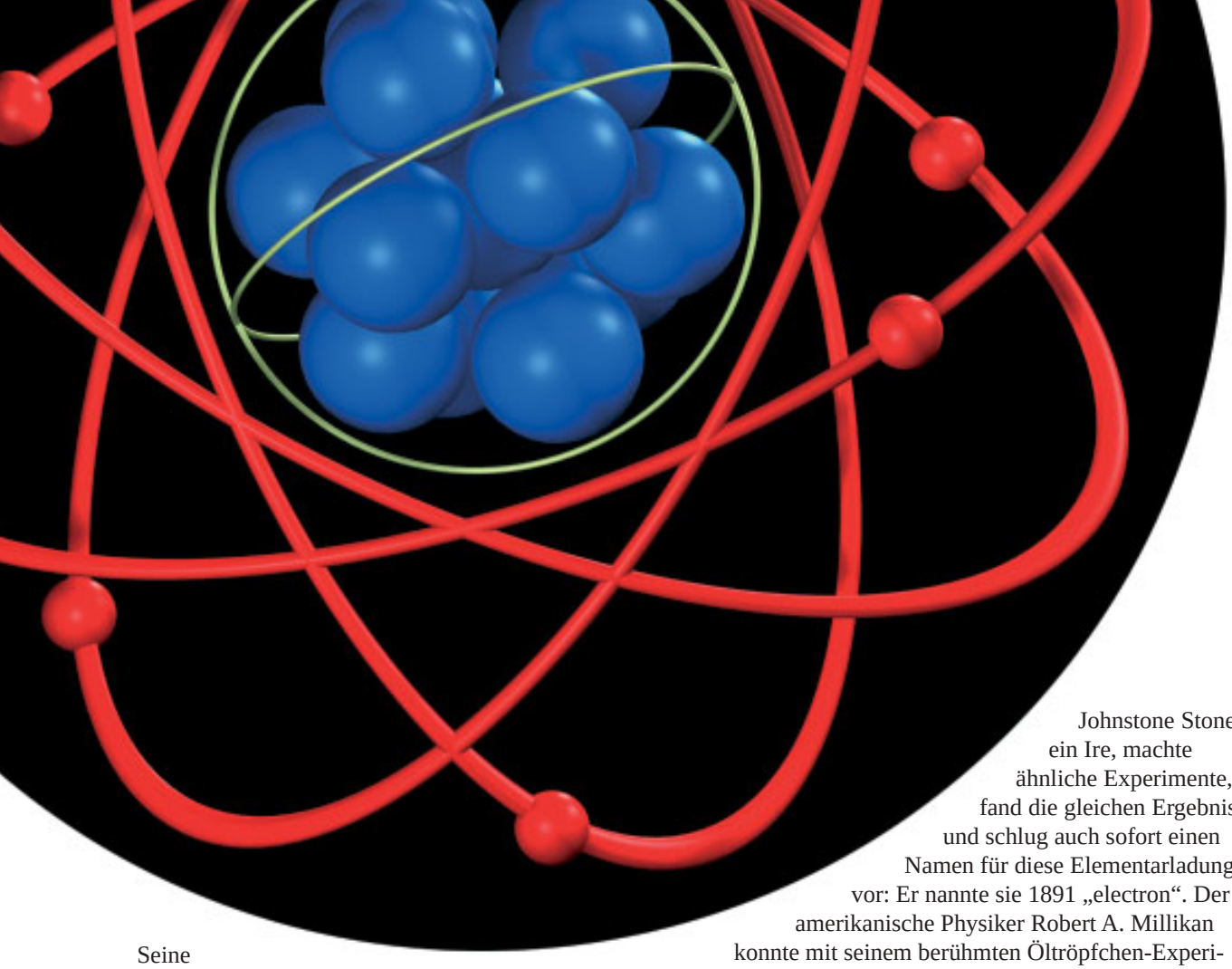
Foto: Nasa/SPL/Agentur Focus

ben beispielsweise an, was man im Lauf eines Tages landwirtschaftlich bearbeiten konnte, etwa ein „Tagwerk“. Leider waren diese Maße sehr ungenau, denn Menschen sind unterschiedlich groß und leistungsfähig. Mit dem Aufschwung des Handels auch über Dorf- und Landesgrenzen hinweg begann man deshalb mit ersten, zaghaften Versuchen, ein Maßsystem zu definieren, das überall gleich ist. Trotzdem gab es noch 1870 im Deutschen Reich hunderte verschiedene Längen- und Flächenmaße – und entsprechend viele Irrtümer, Betrügereien, Missverständnisse und Umrechnungsprobleme.

Die Franzosen waren da fortschrittlicher, vielleicht hatte auch die Französische Revolution den Boden bereitet für derartige Neuerungen, und so erstaunt es nicht, dass die nachhaltige Reform der Längenmaße von Paris ausging: Als Standard sollte ab 1791 nicht mehr der Mensch, sondern etwas viel Universelleres dienen: die Erde selbst nämlich. Charles Maurice de Talleyrand, damals Mitglied der französischen Nationalversammlung, begründete die Wahl so: „… das einzige Mittel ist, eine Einheit zu wählen, die nichts Willkürliches noch etwas der Lage irgendeines Volkes auf der Weltkugel Spezifisches enthält“, und so „billigt die Nationalversammlung die Größe des Viertels des Erdmeridians als Basis des neuen Maßsystems.“ Sein Standard, das Meter, wurde nun also definiert als der zehnmillionste Teil eines Viertels des Erdumfangs, der durch die Pole geht und auf dem Äquator senkrecht steht. Mit der Meterkonvention von 1875 begann das Meter seinen internationalen Siegeszug – zusammen mit dem Kilogramm, das direkt davon abgeleitet war, als die Masse eines Würfels der Kantenlänge ein Dezimeter von reinem, destilliertem Wasser bei vier Grad Celsius. Und noch eine weitere Einheit wurde zunächst von den Eigenschaften unseres Planeten abgeleitet: die Sekunde, deren Länge sich aus den Rhythmen der Erde ergab.

Doch Ende des 19. Jahrhunderts begannen einige Wissenschaftler zu zweifeln, ob die Eigenschaften der Erde wirklich die nötige Sicherheit boten als Grundlage für ein universelles Maßsystem. 1870 forderte der britische Gelehrte James Clerk Maxwell, „die Einheiten der Länge, Zeit und Masse nicht in der Bewegung oder der Masse unseres Planeten zu suchen, vielmehr in der Wellenlänge, Frequenz und Masse der unvergänglichen, unveränderlichen und vollkommen gleichartigen Moleküle“, womit man im damaligen Sprachgebrauch die Atome meinte.

Maxwell hatte sich schon lange mit der Untersuchung von Gasatomen befasst und war sehr von der Tatsache beeindruckt, dass sich alle Wasserstoffatome völlig gleichen. Maxwell erkannte, dass die Ununterscheidbarkeit, das völlig Fehlen von Individualität etwas war, was die Atome von der lebenden Natur unterscheidet.



Grafiken (2): alb/PTB

Seine Forderung wurde erfüllt: 1927 wählte man die rote Emissionslinie des Cadmiums als ersten atomaren Längenstandard, später orientierte man sich am Schwingungsverhalten des Edelgases Krypton.

Angesichts der Vielfalt in der Natur war es ein revolutionärer Gedanke, daran zu glauben, dass alles aus einheitlichen Bausteinen besteht, aus Bausteinen, die sich durch nichts unterscheiden, immer gleich groß, gleich schwer, gleich geladen sind. Und die sich auch immer gleich verhalten: Da gibt es keinen Ermessensspielraum, keine Abweichungen. Das Ganze lässt sich tatsächlich mit Zahlen beschreiben: mit Konstanten der Natur, beständig, unveränderlich, über Jahrtausende stabil, auf dem Mond oder Mars ebenso wie bei uns.

Diese Zahlen mussten aber erst einmal entdeckt werden, und je tiefer die Physiker in die Geheimnisse der Natur eindrangen, desto mehr solcher Konstanten fanden sie. Gleichzeitig wurden diese aber auch immer abstrakter und einem unmittelbaren Verständnis weniger zugänglich.

Zunächst ging es aber noch ganz anschaulich zu: Der Physiker Hermann von Helmholtz, ein Mann von großem Einfluss und Ansehen, der oft sogar scherzhaft „der Kanzler der deutschen Physik“ genannt wurde, postulierte 1881, dass es eine kleinste unteilbare elektrische Ladung geben müsse. Er hatte dies aus seinen Elektrolyse-Versuchen geschlossen. George Johnstone Stoney, ein Ire, machte ähnliche Experimente, fand die gleichen Ergebnisse und schlug auch sofort einen Namen für diese Elementarladung vor: Er nannte sie 1891 „electron“. Der amerikanische Physiker Robert A. Millikan konnte mit seinem berühmten Öltröpfchen-Experiment 1911 die Annahme bestätigen und ihren Wert bestimmen.

Stoney, ein origineller und kreativer Kopf, der bis ins hohe Alter wissenschaftliche Abhandlungen veröffentlichte, war es auch, der zum ersten Mal in geradezu hellsichtiger Weise die Möglichkeit durchdachte, alle Maßeinheiten auf fundamentalen physikalischen Konstanten aufzubauen. Als Grundlage wählte er die Gravitationskonstante G, die 1666 von Newton postuliert und 1798 von Henry Cavendish gemessen worden war, die Lichtgeschwindigkeit c und natürlich e, die für ihn so wichtige Elementarladung. „Wir haben guten Grund zu der Annahme, dass wir mit c, G und e drei aus einer Reihe systematischer Einheiten haben, die in einem besonderen Sinn Natureinheiten sind und in enger Beziehung zu den Vorgängen stehen, die im gewaltigen Laboratorium ablaufen, welches die Natur darstellt …“, schrieb er 1883. Aus reinen Dimensionsbetrachtungen entwickelte er aus diesem Trio von Konstanten Einheiten für Masse, Länge und Zeit, kam dabei aber auf extrem kleine Werte, die für eine praktische Anwendung nicht geeignet waren; seine Längeneinheit beispielsweise betrug 10^{-34} Zentimeter. Damals fielen seine brillanten Überlegungen wieder dem Vergessen anheim, erst heute kann man erkennen, wie genial sie waren. Beträgt doch die Planck-Länge, auf der die moderne Physik manche ihrer Theorien aufbaut, etwa 10^{-33} Zentimeter. Neuerdings gehen beispielsweise einige Theoretiker der Quantengravitation davon aus, dass diese Längeneinheit die Quantelung des Raums charakterisiert.

Nach Stoney dauerte es fast 20 Jahre, bis der deutsche Forscher Max Planck die Idee von Naturkonstanten als Fundamentalsystem wieder aufgriff. Aus seinen Arbeiten zur Strahlung schwarzer Körper hatte er das nach ihm benannte Wirkungsquantum *h* abgeleitet, das die Beziehung zwischen Wellenlänge und Energie eines Lichtquants charakterisiert. Damit hatte er eine weitere universelle Konstante beigesteuert. Planck hatte das Ziel, Einheiten zu schaffen, die nicht mehr auf menschliche Belange bezogen waren. In seinen Vorlesungen 1906/07 erklärte er dies näher: „Demgegenüber dürfte es nicht ohne Interesse sein, … Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Temperatur aufzustellen, welche unabhängig von speziellen Körpern oder Substanzen ihre Bedeutung für alle Zeiten und für alle, auch außerirdische und außermenschliche Kulturen notwendig behalten …können.“ Seine Grundeinheiten sind zwar bis heute anerkannt, aber auch sie sind extrem klein und spielen deshalb im Alltagsleben keine Rolle.

Sowohl bei Stoney als auch bei Planck spielt die Lichtgeschwindigkeit eine wichtige Rolle. Dass sie eine Naturkonstante ist, überraschte und irritierte die Gemeinde der Naturwissenschaftler Ende des 19. Jahrhunderts. 1887 hatten die amerikanischen Forscher Albert Michelson und Edward Morley in einem der wichtigsten Experimente der gesamten Wissenschaftsgeschichte gezeigt, dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum von der Erdbewegung nicht beeinflusst wird. So verwirrend dieses Ergebnis war, konnte doch in einer Unzahl von Versuchen bestätigt werden: Licht bewegt sich stur immer mit derselben Geschwindigkeit *c*. Auch der österreichische Quantenphysiker Anton Zeilinger staunt noch heute: „So wie bei der Naturkonstanten *h* ist es auch bei der Lichtgeschwindigkeit nicht möglich, ihren genauen Wert, ihre genaue Größe aus irgendeiner Theorie abzuleiten. Soviel wir heute wissen, ist sie einfach naturgegeben.“

Albert Einsteins Spezielle Relativitätstheorie war die Reaktion auf diese Erkenntnis. Wenn *c* sich nicht ändert, muss etwas anderes variabel sein. Dass dies Zeit und Raum sind, war für den gesunden Menschenverstand schwer zu begreifen, und ein direkter Beweis etwa für die Veränderung der Zeit war jahrzehntelang nicht möglich. Erst im Jahr 1947 entdeckte man, dass Myonen – Elementarteilchen, die im Ruhezustand nur 2,2 Mikrosekunden lang leben, bevor sie zerfallen – in der Höhenstrahlung um ein Vielfaches länger existieren als in Ruhe. Diese Beobachtung war ein Beleg, dass die Zeit in schnell bewegten Systemen langsamer abläuft.

All dies gilt heute als gesichert. Darüber hinaus hat die Wissenschaft inzwischen noch weitere Naturkonstanten entdeckt, beispielsweise die Feinstrukturkonstante, das magnetische Flussquant, die Josephson-Konstante und die von-Klitzing-Konstante, die allesamt auf inneratomaren oder quantenmechanischen Vorgängen beruhen. Aber die Forschung bleibt nicht stehen. Und sie rüttelt erneut an den Grundfesten der Physik, etwa an der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Vor allem die Gravitationsforscher entwickeln Theorien, gemäß denen sich die Lichtgeschwindigkeit seit dem Urknall geändert haben könnte – wenig nur, aber vielleicht messbar. So stehen wir heute erneut vor der Erkenntnis, dass es mit einer absoluten Sicherheit gar nicht so weit her ist: Vielleicht belegen Beobachtungen im Weltall oder an den großen Teilchenbeschleunigern in den kommenden Jahren, dass eine unserer wichtigsten Konstanten gar nicht konstant ist.

Brigitte Röthlein

Bilder (S. 10 bis S. 13):
Maß nehmen in vier Stationen:
Mensch – Erde – Atom – Naturkonstanten

Wie groß bist du? –
Klassische Messverfahren der Naturkonstanten

Seit der Mitte des 20. Jahrhunderts hat die präzise Bestimmung der Naturkonstanten sich derart rapide verbessert, dass alle Messungen aus der Zeit vor dem Zweiten Weltkrieg heute als historisch betrachtet werden. Das gesteigerte Interesse an einer theoretischen Beschreibung der Natur hat in den vergangenen Jahrzehnten zu einer Verfeinerung der Messmethoden geführt. Denn der Wert ein und derselben Naturkonstanten – ausgehend von unterschiedlichen physikalischen Phänomenen gemessen – ist ein wichtiger Test für die Konsistenz der physikalischen Theorien untereinander. Umgekehrt hängt die Genauigkeit theoretischer Vorhersagen davon ab, wie präzise die in die Berechnungen eingehenden Werte der Naturkonstanten bekannt sind.

Cavendish „wiegt“ die Erde

Als die älteste Messung der Gravitationskonstanten wird das Experiment des britischen Physikers Sir Henry Cavendish angesehen. Die von ihm verwendete Torsionswaage bestand aus einem Balken mit einer Bleikugel an jedem Ende. Um die Gravitationskraft messen zu können, hängte Cavendish die Waage in der Mitte auf und näherte jeder Kugel eine schwere Bleikugel. Durch die von der Gravitationskraft ausgeübte Anziehung drehte sich die Balkenwaage, wobei der Faden sich verdrillte. Interessant ist, dass Cavendish mit dieser Anordnung zwar im Prinzip die Gravitationskonstante hätte messen können, damals aber ein ganz anderes Ziel verfolgte: Er wollte die Dichte der Erde bestimmen.

Folgt man dem amerikanischen Wissenschaftshistoriker Beryl E. Clotfelter, so hatte der Urheber des Gravitationsgesetzes, Isaac Newton, die Messung der Erddichte 1687 selbst als eine vordringliche Aufgabe des Naturforschers bezeichnet. Denn damals kannte man weder die Masse der Erde noch der Planeten oder der Sonne. Zur Anwendung

Grafik: alb/PTB

des Gravitationsgesetzes in der Himmelsmechanik war dies aber notwendig. Gelang es daher, die Dichte der Erde zu ermitteln, so konnte man mit Hilfe des bereits bekannten Erddurchmessers auch ihre Masse bestimmen.

Viele Naturforscher versuchten in der Folgezeit die Dichte der Erde zu bestimmen, indem sie die Ablenkung einer aufgehängten Eisenkugel im Schwerefeld eines Berges untersuchten. Da die Gravitationskraft die schwächste der vier Fundamentalkräfte ist, war der Effekt kaum zu beobachten. Cavendish war einer der ersten, dem es mit seiner einfallsreichen Versuchsanordnung gelang, die gängigen Fehlerquellen auszuschalten. Der Wert, den er für die Dichte der Erde ermittelte, liegt nur 1,3 Prozent unter dem heute angenommenen Wert.

Erst 100 Jahre nach Cavendishs Experiment (1892) zeigte sein Landsmann C. V. Boys in einem Vortrag vor der Royal Institution, dass man aus den Messungen mit der Torsionswaage auch die Größe der Gravitationskonstanten bestimmen kann. Dies, so betonte er, sei die eigentliche Aufgabe des Physikers, während Messungen zur Dichte der Erde in den Bereich der Geologie gehörten. Verfeinerte Messungen nach dem Prinzip Cavendishs sind in jüngster Zeit erneut eingesetzt worden. Dabei ging es einerseits um eine präzisere Messung der Gravitationskonstanten, andererseits interessierte aber auch die Frage, ob das Gravitationsgesetz noch bei kleinsten Abständen gültig ist.

Name:	Gravitationskonstante
Kürzel:	Groß-G
geboren:	1687
Vater/Eltern:	Isaac Newton
bes. Kennz.:	etwas schwach geraten

Das Elektron – Teilchen oder Ätherschwingung?

Die Entdeckung des Elektrons in den letzten Jahren des 19. Jahrhunderts fiel in eine Zeit, da die Existenz von Atomen noch nicht als gesichert galt. Geradezu revolutionärer musste es deshalb wirken, als der englische Physiker Joseph John Thomson 1897 behauptete, es gäbe negativ geladene „Korpuskeln“ (Elektronen), die unter bestimmten Bedingungen aus den Atomen herausgelöst werden können. Demnach waren Atome nicht die kleinsten unteilbaren Bausteine der Materie.

Thomsons Aussage stand am Ende eines jahrelangen Rätselratens um die Natur der Kathodenstrahlen. Diese erzeugte man in fast luftleer gepumpten Glasröhren, in denen zwischen zwei eingeschmolzenen Elektroden eine hohe Spannung erzeugt wurde. Das farbenprächtige Leuchten der Röhren faszinierte sowohl Physiker als auch Laien. Der Deutsche Julius Plücker fand bald die Ursache dafür: Von der negativen Elektrode (Kathode) gingen Strahlen aus, die in der Folgezeit als Kathodenstrahlen bezeichnet wurden. Heute weiß man, dass es sich um einen Teilchenstrom aus Elektronen handelte, der die Glaswände zum Leuchten anregt. Damals herrschten aber über die Natur der Kathodenstrahlen unterschiedliche Ansichten. Während die Engländer Crookes und Thomson die Korpuskulartheorie bevorzugten (also von einem Strom negativ geladener Teilchen ausgingen), folgten die Deutschen zumeist der Ansicht des berühmten Heinrich Hertz. Der Entdecker der elektromagnetischen Wellen hielt die Kathodenstrahlen für Ätherschwingungen (also Wellen).

Das Blatt wendete sich 1895, als Wilhelm Conrad Röntgen beim Experimentieren mit einer Gasentladungsröhre zufällig eine weitere interessante Eigenschaft der Kathodenstrahlen entdeckte: Sie erzeugten an der positiv geladenen Anode mysteriöse und sehr durchdringende „X-Strahlen“. Die Vermutung lag nahe, dass diese durch den Aufprall von Teilchen erzeugt wurden. Röntgens Entdeckung spornte nun auch deutsche Physiker dazu an, elektrisch geladene Teilchen in den Kathodenstrahlröhren nachzuweisen. 1897 zeigten Emil Wiechert und viele andere unabhängig von J. J. Thomson in England, dass Kathodenstrahlen im Magnetfeld abgelenkt werden. Dieser Befund sprach deutlich für elektrisch geladene Teilchen.

Fotos (2): SPL/Agentur Focus

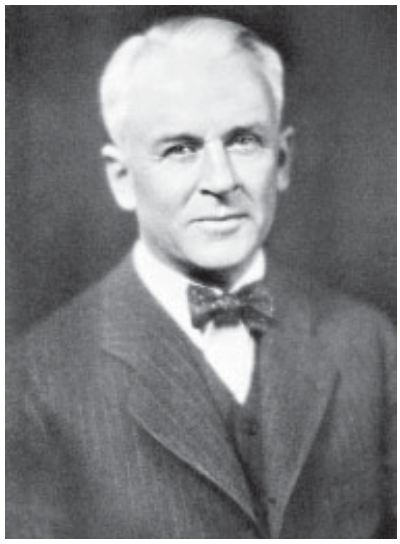
Joseph John Thomson (1856 bis 1940)

Thomson war der erste, der das Verhältnis von Masse *m* zu Ladung *e* beim Elektron ermittelte. Dazu ließ er den Elektronenstrahl durch ein Loch in der Kathodenstrahlröhre austreten und schickte ihn anschließend durch ein elektrisches und magnetisches Feld senkrecht zum Kathodenstrahl. Die Feldstärken wählte er so, dass die Ablenkung im Magnetfeld durch diejenige im elektrischen Feld genau kompensiert wurde. Zu seiner Verwunderung maß er ein Verhältnis *m*/*e*, das etwa 1000-mal kleiner als beim Wasserstoff-Ion (Proton) war. Da damals noch nicht bekannt war, dass Elektronen und Protonen entgegengesetzt gleiche Ladungen besitzen, konnte das zweierlei bedeuten: Entweder besaß das Elektron eine viel kleinere Masse als das Proton oder eine größere Ladung. Da der deutsche Physiker Philipp Lenard aber eine recht große mittlere freie Weglänge der Kathodenstrahlen in Luft ermittelt hatte, schloss Thomson, die Elektronen müssten wesentlich kleiner und leichter sein als Moleküle. 1906 erhielt Thomson für diese und spätere Arbeiten den Nobelpreis für Physik.

Name:	Elementarladung
Kürzel:	e
geboren:	1897
Väter:	Hermann von Helmholtz George Johnston Stoney Joseph John Thomson Robert A. Millikan
bes. Kennz.:	mal Teilchen, mal Welle

Millikans Öltröpfchenversuch

Bereits J. J. Thomson hatte mit Hilfe eines trickreichen Experiments versucht, die Ladung des Elektrons indirekt zu ermitteln: Mit Hilfe von Röntgenstrahlen ionisierte er ein verdünntes Gas in einem zylindrischen Behälter. Der Boden des Zylinders war mit Wasser bedeckt. Durch eine geschickte experimentelle Anordnung konnte er in dem Gefäß einen feinen Nebel zu erzeugen, wobei die Wassertröpfchen sich um die Gas-Ionen gruppierten und sie auf diese Weise sichtbar machten. Es war jedoch schwierig, die Ladung dieser Tröpfchen abzuschätzen. Dafür entwickelte Thomsons Schüler C. T. R. Wilson dieses Verfahren später zu der nach ihm benannten Nebelkammer weiter. Sie diente den Pionieren der Kern- und Teilchenphysik zum Nachweis einer Vielzahl geladener Elementarteilchen.



Robert A. Millikan (1868 bis 1953)

Der amerikanische Physiker Robert A. Millikan griff Thomsons Idee auf und entwickelte sie weiter. Um die Ladung der Gas-Ionen berechnen zu können, legte er ein elektrisches Feld an, das der Gravitationskraft entgegenwirkte, so dass die Tröpfchen schwebten. Weil die meisten Tröpfchen im Licht der Lampen aber schon nach zwei Sekunden verdampften, konnte ihre Ladung nur grob geschätzt werden. Daher ersetzte Millikan die geladenen Nebeltröpfchen durch geladene Öltröpfchen. Sein damaliger Doktorand, Harvey Fletcher, erinnert sich an das erste Mal, als er die beleuchteten Öltröpfchen durch das Mikroskop beobachtete: Sie ähnelten winzigen Sternen, die in allen Farben des Regenbogens schimmerten.

Millikan fand bald heraus, dass die Ladung auf den Öltröpfchen unterschiedlich groß war und sich auch spontan ändern konnte. Da die Ladung rein zufällig beim Zerstäuben des Öls entstanden war, versuchte er sie nun zu beeinflussen, indem er ionisierende Strahlung einsetzte. Dabei beobachtete er Ladungssprünge, die immer ein ganzzahliges Vielfaches einer kleinsten, elementaren Ladung *e* waren. Diese setzte er einerseits mit der Ladung von Thomsons Korpuskeln gleich, andererseits mit der Ladung von Wasserstoff-Ionen (Protonen), die von der Elektrolyse in leitenden Flüssigkeiten bekannt waren. Aus den von Thomson und anderen errechneten Werten von *e*/*m* berechnete Millikan die Elektronenmasse zu 1/1845 der Masse des Wasserstoffs. Nun war klar: Sowohl die Masse als auch die Ladung des Elektrons waren fundamentale Konstanten. Somit sprach einiges dafür, das Elektron als subatomaren Baustein des Atoms anzusehen. Millikan wurde für seine Arbeiten 1923 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

Wie schnell ist das Licht?

Name:	Lichtgeschwindigkeit
Kürzel:	c
geboren:	1905
Stiefvater:	Albert Einstein
bes. Kennz.:	keine Information ist schneller

Eine der frühesten Berechnungen der Lichtgeschwindigkeit geht auf den dänischen Astronomen Ole Rømer zurück. Bei dem Versuch, die Umlaufzeiten des Jupitermondes Io präzise zu messen, stellte er fest, dass der Monduntergang sich jedes Mal um einige Sekunden verspätete. Die Erklärung: Rømer hatte seine Beobachtungen begonnen, als Erde und Jupiter auf derselben Seite der Sonne standen (also nahe beieinander waren). Weil die Erde sich aber im Verlauf der Messungen zunehmend vom Jupiter entfernte, wuchs mit der Lichtstrecke auch die „Wegezeit“ zwischen Io und Erde kontinuierlich an. Innerhalb eines halben Jahres, in dem die Erde den größtmöglichen Abstand zum Jupiter erreicht hatte, summierte sich die Verspätung auf insgesamt 10 Minuten. Dies entsprach der Zeit, die das Licht braucht, um den Durchmesser der Erdbahn zu durchqueren. Aus der Kenntnis dieser Entfernung und der Zeitverzögerung errechnete Rømer für die Lichtgeschwindigkeit einen Wert von ungefähr 240 000 Kilometer pro Sekunde.

Die ersten Präzisionsexperimente auf der Erde machten 1850 die Franzosen Armand Hippolyte-Louis Fizeau und Léon Foucault. Fizeau ließ einen Lichtstrahl auf ein rotierendes Zahnrad fallen, bei Foucault fiel er auf einen rotierenden Spiegel. In beiden Fällen wurde das Lichtsignal von einem Spiegel reflektiert. Fizeau ermittelte die Zeit, die das Licht für den Weg zwischen Zahnrad und Spiegel benötigte, indem er die Rotationsgeschwindigkeit seines Zahnrads allmählich erhöhte. Ab einer bestimmten Umdrehungszahl gelang es dem Licht nicht mehr, zwischen zwei Zähnen zum Beobachter zurück zu gelangen. Damit war bekannt, wie lang es für die Strecke zwischen Zahnrad und Spiegel benötigte. Auf einem ähnlichen Prinzip beruhte das Experiment von Foucault. Beide ermittelten die Lichtgeschwindigkeit mit einer Genauigkeit von etwa zweitausend Kilometern pro Sekunde.

In den Jahren 1877 bis 1879 verfeinerte der amerikanische Physiker Albert Abraham Michelson die experimentelle Anordnung von Foucault so, dass er den Abstand zwischen dem rotierenden und dem reflektierenden Spiegel um das Fünfzehnfache erhöhen konnte. Dank einer verbesserten Optik und eines schneller rotierenden Spiegels konnte er die Lichtgeschwindigkeit bis auf 50 Kilometer pro Sekunde genau bestimmen. Michelson erhielt 1907 als erster Amerikaner den Physik-Nobelpreis. Zwei Jahre zuvor hatte Albert Einstein die fundamentale Bedeutung der Lichtgeschwindigkeit bei der Formulierung der speziellen Relativitätstheorie erkannt.

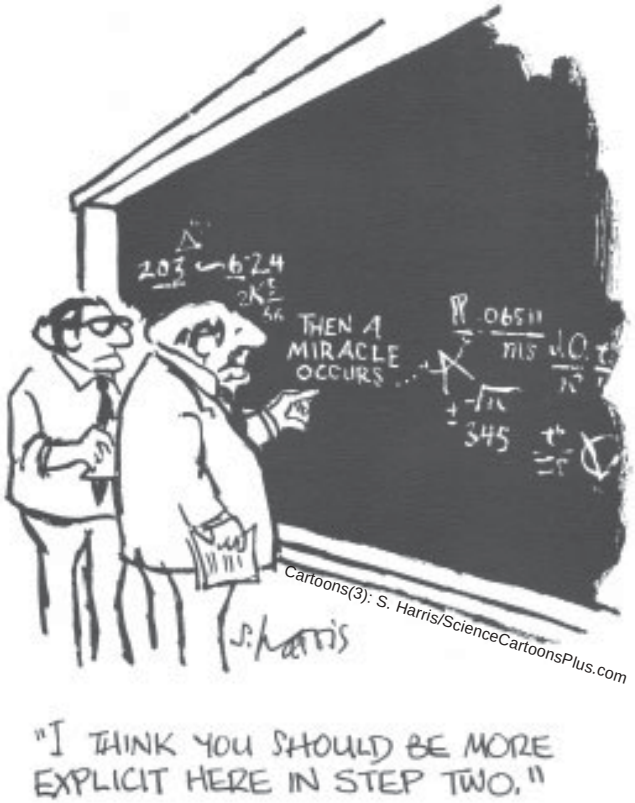
Anne Hardy

Grafik: wysi/PTB

Naturkonstanten à la carte

Die Liste der fundamentalen Naturkonstanten ist der Steckbrief unseres Universums. Eine Handvoll Zahlen und ein paar Naturgesetze sind die Quintessenz des Kosmos. Auf diesem unwandelbaren Fundament spielt sich eine oftmals zufällige Entwicklung ab, in deren Verlauf unsere Milchstraße, das Sonnensystem, die Erde und das irdische Leben entstanden sind. Während am Ende selbst die Sterne und die Galaxien vergehen, ist auf die Naturkonstanten Verlass. Sie haben überall im Kosmos und zu allen Zeiten denselben Wert, sie hängen von nichts anderem ab und sie lassen sich nicht auf andere Größen zurückführen. Diese Eigenschaften machen sie für die Naturwissenschaftler und Ingenieure so wertvoll, die bei ihrer Arbeit immer wieder die Liste der fundamentalen Naturkonstanten zu Rate ziehen.

l_{Pl} $1{,}616\,24 \cdot 10^{-35}\,m$ Plancksche Länge



Auf dieser Liste stehen vertraute Größen wie die Lichtgeschwindigkeit oder die Newtonsche Gravitationskonstante, mit deren Hilfe man das Herabfallen eines Apfels ebenso berechnen kann wie die Drehbewegung ferner Galaxien. Die Liste enthält aber auch weniger Geläufiges wie das Plancksche Wirkungsquantum, das die Grenze zum Schattenreich der Quantenwelt bezeichnet. Praktische Größen wie die von-Klitzing-Konstante – ein universeller Wert zur Messung elektrischer Widerstände – stehen neben Exotischem wie der Cabbibo-Kobayashi-Maskawa-Matrix, für die sich die Teilchenphysiker begeistern. Wie viele Naturkonstanten unsere Liste tatsächlich enthält, ist schwer zu sagen. Das hängt davon ab, ob man sie in erster Linie als Steckbrief des Universums ansieht oder für die Arbeit im Labor benutzt. Einem Ingenieur erscheint manches entbehrlich, was dem Teilchenphysiker heilig ist.

Der Fortschritt in der Physik hat dazu geführt, dass die Liste der Naturkonstanten immer wieder ergänzt und bisweilen vollständig überarbeitet werden musste. Manche Naturkonstante, die zunächst als fundamental galt, erwies sich später als zweitrangig. Die Massen der Atome der verschiedenen chemischen Elemente hatte man zunächst als fundamentale Konstanten angesehen. Doch dann fand man heraus, dass jedes Atom aus Elektronen und einem Kern besteht, der wiederum aus einer bestimmten Zahl von Kernbausteinen – Protonen und Neutronen – zusammengesetzt ist. „Fundamental“ waren also weder die Atome noch ihre Massen. Ähnlich erging es den Kernbausteinen und ihren Massen, als sich herausstellte, dass die Protonen und Neutronen aus Quarks zusammengesetzt sind. Heutzutage gelten Quarks und die mit ihnen verwandten Leptonen als elementar, so dass man deren Massen(verhältnisse) jetzt zu den fundamentalen Naturkonstanten zählt.

Plancksche Spezialitäten

Um 1899 versuchte Max Planck, der Entdecker der Quantentheorie, Ordnung in die wichtigsten damals bekannten Naturkonstanten zu bringen. Er wählte die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (c), die Gravitationskonstante (G) und das von ihm selbst entdeckte Wirkungsquantum (h). Diese drei Konstanten stecken „strategische“ Positionen in der Physik ab: c ist die entscheidende Konstante in Einsteins Spezieller Relativitätstheorie, G steht für die Schwerkraft, die zuerst von Newton als fundamentale Kraft erkannt wurde, und h markiert die Grenze zwischen klassischer Physik und Quantenphysik.

Die drei Naturkonstanten c, G und h (bzw. $\hbar = h/2\pi$) sind keine reinen Zahlen, sondern Größen mit Maßeinheiten, die sich aus dem Meter (m), der Sekunde (s) und dem Kilogramm (kg) zusammensetzen. Mit ihnen konnte Planck universelle Maßeinheiten für Länge, Zeit und Masse bilden, die an die Stelle der „irdischen“ Einheiten m, s und kg treten. So ist $\hbar c/G$ das Quadrat der „Planck-Masse“ ($m_{Pl} = 2{,}176 \cdot 10^{-8}$ kg), $\hbar G/c^3$ ist das Quadrat der „Planck-Länge“ ($l_{Pl} = 1{,}616 \cdot 10^{-35}$ m) und $\hbar G/c^5$ ist das Quadrat der „Planck-Zeit“ ($t_{Pl} = 5{,}391 \cdot 10^{-44}$ s). Während Meter, Kilogramm und Sekunde bloße Konventionen sind, die selbst auf der Erde nicht überall Verbreitung gefunden haben, kommt den Planck-Einheiten universelle Bedeutung zu: Vertreter einer außerirdischen Zivilisation wüssten, was wir mit diesen Einheiten meinen.

Einstein Special

Albert Einstein hielt jedoch Naturkonstanten wie c, G und h nicht für wirklich fundamental, da ihr Zahlenwert noch von „konventionellen“ Einheiten abhängt. Erst wenn es gelingt, aus mehreren Konstanten eine Größe zu bilden, die ein reiner Zahlenwert ohne Maßeinheit ist, liegt nach Einsteins Ansicht eine wirklich universelle Konstante vor. Doch auch damit gab er sich letztlich nicht zufrieden: Der Zahlenwert einer solchen Konstante sollte durch die logische Grundlage der physikalischen Theorie zwingend festgelegt sein: „ … ich kann mir keine einheitliche und vernünftige Theorie vorstellen, die explizite eine Zahl enthält, welche die Laune des Schöpfers ebenso gut anders hätte wählen können, wobei die Welt qualitativ anders in ihren Gesetzmäßigkeiten ausgefallen wäre.“ Einsteins Ziel war es, alle Naturkonstanten zu erklären und damit aus dem Weg zu räumen.

Ein Beispiel für eine Naturkonstante, die einheitslos, als reine Zahl auftaucht, ist die Feinstrukturkonstante α. Sie ist Maß für die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung, die dem Licht sowie den elektrischen und magnetischen Kräften zugrunde liegt. In die Feinstrukturkonstante geht neben c und h noch eine weitere Naturkonstante ein: die Elektronenladung e. Demnach ist $\alpha = e^2/2\epsilon_0 hc$, woraus sich der „krumme“ Zahlenwert 1/137,035 999 11 ergibt, für den bisher noch niemand eine Erklärung gefunden hat. Der Wert von α bestimmt auch, in welchen Farben die zum Leuchten angeregten Atome strahlen.

''Quarks. Neutrinos. Mesons. All those damn particles you can't see. *That's* what drove me to drink. But *now* I *can* see them.''

Mit dem Elektron beginnt der Reigen der Elementarteilchen, aus deren Eigenschaften eine wahre Flut von Naturkonstanten entspringt. Da ist es nicht verwunderlich, dass die Teilchenphysiker zunächst möglichst viele „überflüssige“ Naturkonstanten loswerden wollen. Indem sie Maßeinheiten wählen, bei denen die Zeit in (vom Licht zurückgelegten) Metern und die Masse oder Energie (entsprechend einer Frequenz) in 1/Sekunde oder 1/Meter gemessen wird, erhalten sie eine wichtige Vereinfachung: c = h = 1. Darüber hinaus haben die Teilchenphysiker auch Einsteins Programm konsequent beherzigt: Sie arbeiten nur noch mit universellen Konstanten, die reine Zahlenwerte sind wie das schon genannte α.

Nouvelle Cuisine

Welche weiteren Naturkonstanten lassen die Teilchenphysiker nun neben α gelten? Beginnen wir mit dem Elektron und seinen beiden schwereren Geschwisterteilchen, dem Myon und dem Tau. Teilt man die Masse jedes dieser drei „Leptonen“ durch die Planck-Masse, so erhält man drei Naturkonstanten, die reine Zahlen sind. Dann kommen die Quarks, aus denen die Kernbausteine Proton und Neutron sowie andere „Hadronen“ und die „Mesonen“ aufgebaut sind. Man kennt sechs verschiedene Arten von Quarks: up-, down-, charm-, strange-, bottom- und top-Quark. Ihre unterschiedlichen Massen liefern daher sechs Naturkonstanten. Vier weitere Konstanten beschreiben, wie sich die verschiedenen Quark-Arten ineinander umwandeln (dahinter steckt die oben erwähnte Cabbibo-Kobayashi-Maskawa-Matrix) und eine Konstante gibt die Kraft, die sie aufeinander ausüben. Das macht schon 15 Konstanten.

"THERE'S THE STRONG FORCE, THE WEAK FORCE, GRAVITY, ELECTROMAGNETISM, AND THEN THERE'S THAT CERTAIN SOMETHING I FEEL WHEN I SEE YOU."

Das Standardmodell der Teilchenphysik vereinigt die elektromagnetische mit der schwachen Wechselwirkung, die u. a. für den Beta-Zerfall radioaktiver Atomkerne verantwortlich ist. Die resultierende Kraft wird durch das masselose Photon und die massehaltigen W- und Z-Bosonen übertragen. Deren unterschiedlich große Massen steuern zwei Naturkonstanten bei. Eine weitere Naturkonstante rührt von der Masse des noch hypothetischen Higgs-Teilchen her, das mit dem neuen Beschleuniger LHC am Europäischen Forschungszentrum CERN bei Genf gefunden werden soll. Das rätselhafte „Higgs“ wird dafür verantwortlich gemacht, dass die bekannten Elementarteilchen überhaupt eine Masse haben. Damit sind es inzwischen 18 Naturkonstanten.

Doch es geht noch weiter – mit den drei Neutrinoarten: dem Elektron-, dem Myon- und dem Tau-Neutrino. Diese geisterhaften Teilchen fliegen nahezu ungehindert durch den Erdball hindurch, als bestünde er aus Luft. Lange Zeit hatte man ihnen keine Masse zugetraut. Doch vor ein paar Jahren hat man bei Experimenten mit dem gigantischen unterirdischen Neutrinodetektor Super-Kamiokande in Japan herausgefunden, dass die drei Neutrinoarten geringfügig unterschiedliche Massen haben. Die Neutrinomassen ergeben somit drei weitere Naturkonstanten. Dazu kommen noch vier Konstanten, die die Umwandlung der verschiedenen Neutrinoarten ineinander beschreiben. Das macht 25 Konstanten.

Während all diese Naturkonstanten in der Welt der Elementarteilchen angesiedelt sind, bringt die 26. Konstante kosmische Dimensionen ins Spiel: Es ist die kosmologische Konstante, deren Einführung Albert Einstein als seinen größten Schnitzer bezeichnet hatte. Sie beschreibt, wie das Weltall entgegen der abbremsend wirkenden Schwerkraft immer schneller auseinander fliegt. Die treibende Kraft dahinter ist die Dunkle Energie, die den Physikern nach wie vor Rätsel aufgibt.

Dass unserem Universum 26 voneinander unabhängige Naturkonstanten zugrunde liegen sollen, davon hätte man Einstein vermutlich nicht überzeugen können. Haben diese Konstanten ihre Zahlenwerte nur zufällig beim Urknall erhalten? Hätte alles auch ganz anders kommen können? Oder lassen sich zumindest einige dieser Konstanten durch eine umfassendere Theorie erklären? Das hoffen zumindest die Stringtheoretiker, die alle Elementarteilchen durch unvorstellbar winzige schwingende Fäden beschreiben wollen, deren Länge mit der Planck-Länge vergleichbar ist. Die Spannung in diesen Fäden wäre die eine fundamentale Naturkonstante, aus der man alle anderen berechnen könnte. Doch leider ist es der Stringtheorie bisher nicht gelungen, den Steckbrief des Universums auf diese Weise zu vereinfachen.

RAINER SCHARF

Seite 21:
Diese und weitere Zahlenwerte von Naturkonstanten (aktueller Stand: 2002) stehen im Internet auf der CODATA-Website:
http://physics.nist.gov/cuu/constants

Die Ziffern in Klammern geben die Unsicherheit in den letzten Stellen des jeweiligen Wertes an.
(Beispiel: 6,6742(10) = 6,6742 ± 0,0010)

CODATA: Empfohlene Werte der fundamentalen physikalischen Konstanten

Quantity	Symbol	Numerical value	Unit
speed of light in vacuum	c, c_0	299 792 458 (exact)	$\mathrm{m\ s^{-1}}$
magnetic constant	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ (exact)	$\mathrm{N\ A^{-2}}$
		$= 12.566\,370\,614... \times 10^{-7}$	$\mathrm{N\ A^{-2}}$
electric constant $1/\mu_0 c^2$	ϵ_0	$8.854\,187\,817... \times 10^{-12}$	$\mathrm{F\ m^{-1}}$
Newtonian constant of gravitation	G	$6.6742(10) \times 10^{-11}$	$\mathrm{m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}}$
Planck constant	h	$6.626\,0693(11) \times 10^{-34}$	J s
in eV s		$4.135\,667\,43(35) \times 10^{-15}$	eV s
$h/2\pi$	$\hbar$	$1.054\,571\,68(18) \times 10^{-34}$	J s
in eV s		$6.582\,119\,15(56) \times 10^{-16}$	eV s
elementary charge	e	$1.602\,176\,53(14) \times 10^{-19}$	C
magnetic flux quantum $h/2e$	Φ_0	$2.067\,833\,72(18) \times 10^{-15}$	Wb
Josephson constant $2e/h$	K_J	$483\,597.879(41) \times 10^9$	$\mathrm{Hz\ V^{-1}}$
von Klitzing constant $h/e^2 = \mu_0 c/2\alpha$	R_K	25 812.807 449(86)	Ω
Bohr magneton $e\hbar/2m_e$	μ_B	$927.400\,949(80) \times 10^{-26}$	$\mathrm{J\ T^{-1}}$
in eV $\mathrm{T^{-1}}$		$5.788\,381\,804(39) \times 10^{-5}$	$\mathrm{eV\ T^{-1}}$
nuclear magneton $e\hbar/2m_p$	μ_N	$5.050\,783\,43(43) \times 10^{-27}$	$\mathrm{J\ T^{-1}}$
in eV $\mathrm{T^{-1}}$		$3.152\,451\,259(21) \times 10^{-8}$	$\mathrm{eV\ T^{-1}}$
fine-structure constant $e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$	α	$7.297\,352\,568(24) \times 10^{-3}$	
inverse fine-structure constant	α^{-1}	137.035 999 11(46)	
Rydberg constant $\alpha^2 m_e c/2h$	R_∞	10 973 731.568 525(73)	$\mathrm{m^{-1}}$
	$R_\infty c$	$3.289\,841\,960\,360(22) \times 10^{15}$	Hz
energy equivalent in eV	$R_\infty hc$	13.605 6923(12)	eV
Bohr radius $\alpha/4\pi R_\infty = 4\pi\epsilon_0\hbar^2/m_e e^2$	a_0	$0.529\,177\,2108(18) \times 10^{-10}$	m
Hartree energy $e^2/4\pi\epsilon_0 a_0 = 2R_\infty hc = \alpha^2 m_e c^2$	E_h	$4.359\,744\,17(75) \times 10^{-18}$	J
in eV		27.211 3845(23)	eV
electron mass	m_e	$9.109\,3826(16) \times 10^{-31}$	kg
in u		$5.485\,799\,0945(24) \times 10^{-4}$	u
energy equivalent in MeV	$m_e c^2$	0.510 998 918(44)	MeV
electron-muon mass ratio	m_e/m_μ	$4.836\,331\,67(13) \times 10^{-3}$	
electron-proton mass ratio	m_e/m_p	$5.446\,170\,2173(25) \times 10^{-4}$	
electron charge to mass quotient	$-e/m_e$	$-1.758\,820\,12(15) \times 10^{11}$	$\mathrm{C\ kg^{-1}}$
Compton wavelength $h/m_e c$	λ_C	$2.426\,310\,238(16) \times 10^{-12}$	m
$\lambda_C/2\pi = \alpha a_0 = \alpha^2/4\pi R_\infty$	$\lambda\!\!\!^{-}_C$	$386.159\,2678(26) \times 10^{-15}$	m
classical electron radius $\alpha^2 a_0$	r_e	$2.817\,940\,325(28) \times 10^{-15}$	m
Thomson cross section $(8\pi/3)r_e^2$	σ_e	$0.665\,245\,873(13) \times 10^{-28}$	$\mathrm{m^2}$
electron magnetic moment	μ_e	$-928.476\,412(80) \times 10^{-26}$	$\mathrm{J\ T^{-1}}$
to Bohr magneton ratio	μ_e/μ_B	$-1.001\,159\,652\,1859(38)$	
to nuclear magneton ratio	μ_e/μ_N	$-1838.281\,971\,07(85)$	
electron magnetic moment anomaly $\lvert\mu_e\rvert/\mu_B - 1$	a_e	$1.159\,652\,1859(38) \times 10^{-3}$	
electron g-factor $-2(1 + a_e)$	g_e	$-2.002\,319\,304\,3718(75)$	
electron-proton magnetic moment ratio	μ_e/μ_p	$-658.210\,6862(66)$	
muon mass in u	m_μ	0.113 428 9264(30)	u
energy equivalent in MeV	$m_\mu c^2$	105.658 3692(94)	MeV
muon-electron mass ratio	m_μ/m_e	206.768 2838(54)	
muon magnetic moment	μ_μ	$-4.490\,447\,99(40) \times 10^{-26}$	$\mathrm{J\ T^{-1}}$
to Bohr magneton ratio	μ_μ/μ_B	$-4.841\,970\,45(13) \times 10^{-3}$	
to nuclear magneton ratio	μ_μ/μ_N	$-8.890\,596\,98(23)$	
muon magnetic moment anomaly			
$\lvert\mu_\mu\rvert/(e\hbar/2m_\mu) - 1$	a_μ	$1.165\,919\,81(62) \times 10^{-3}$	

Quantity	Symbol	Numerical value	Unit
muon g-factor $-2(1 + a_\mu)$	g_μ	$-2.002\,331\,8396(12)$	
muon-proton magnetic moment ratio	μ_μ/μ_p	$-3.183\,345\,118(89)$	
proton mass	m_p	$1.672\,621\,71(29) \times 10^{-27}$	kg
in u		1.007 276 466 88(13)	u
energy equivalent in MeV	$m_p c^2$	938.272 029(80)	MeV
proton-electron mass ratio	m_p/m_e	1836.152 672 61(85)	
proton magnetic moment	μ_p	$1.410\,606\,71(12) \times 10^{-26}$	$\mathrm{J\ T^{-1}}$
to nuclear magneton ratio	μ_p/μ_N	2.792 847 351(28)	
proton magnetic shielding correction $1 - \mu'_p/\mu_p$ (H_2O, sphere, 25 °C)	σ'_p	$25.689(15) \times 10^{-6}$	
proton gyromagnetic ratio $2\mu_p/\hbar$	γ_p	$2.675\,222\,05(23) \times 10^8$	$\mathrm{s^{-1}\ T^{-1}}$
	$\gamma_p/2\pi$	42.577 4813(37)	$\mathrm{MHz\ T^{-1}}$
shielded proton gyromagnetic ratio $2\mu'_p/\hbar$ (H_2O, sphere, 25 °C)	γ'_p	$2.675\,153\,33(23) \times 10^8$	$\mathrm{s^{-1}\ T^{-1}}$
	$\gamma'_p/2\pi$	42.576 3875(37)	$\mathrm{MHz\ T^{-1}}$
neutron mass in u	m_n	1.008 664 915 60(55)	u
energy equivalent in MeV	$m_n c^2$	939.565 360(81)	MeV
neutron-proton mass ratio	m_n/m_p	1.001 378 418 70(58)	
neutron magnetic moment	μ_n	$-0.966\,236\,45(24) \times 10^{-26}$	$\mathrm{J\ T^{-1}}$
to nuclear magneton ratio	μ_n/μ_N	$-1.913\,042\,73(45)$	
deuteron mass in u	m_d	2.013 553 212 70(35)	u
energy equivalent in MeV	$m_d c^2$	1875.612 82(16)	MeV
deuteron-proton mass ratio	m_d/m_p	1.999 007 500 82(41)	
deuteron magnetic moment	μ_d	$0.433\,073\,482(38) \times 10^{-26}$	$\mathrm{J\ T^{-1}}$
to nuclear magneton ratio	μ_d/μ_N	0.857 438 2329(92)	
helion (^{3}He nucleus) mass in u	m_h	3.014 932 2434(58)	u
energy equivalent in MeV	$m_h c^2$	2808.391 42(24)	MeV
shielded helion magnetic moment (H_2O, sphere, 25 °C)	μ'_h	$-1.074\,553\,024(93) \times 10^{-26}$	$\mathrm{J\ T^{-1}}$
to Bohr magneton ratio	μ'_h/μ_B	$-1.158\,671\,474(14) \times 10^{-3}$	
to nuclear magneton ratio	μ'_h/μ_N	$-2.127\,497\,723(25)$	
alpha particle mass in u	m_α	4.001 506 179 149(56)	u
energy equivalent in MeV	$m_\alpha c^2$	3727.379 17(32)	MeV
Avogadro constant	N_A, L	$6.022\,1415(10) \times 10^{23}$	$\mathrm{mol^{-1}}$
atomic mass constant $\frac{1}{12}m(^{12}\mathrm{C}) = 1$ u	m_u	$1.660\,538\,86(28) \times 10^{-27}$	kg
energy equivalent in MeV	$m_u c^2$	931.494 043(80)	MeV
Faraday constant $N_A e$	F	96 485.3383(83)	$\mathrm{C\ mol^{-1}}$
molar gas constant	R	8.314 472(15)	$\mathrm{J\ mol^{-1}\ K^{-1}}$
Boltzmann constant R/N_A	k	$1.380\,6505(24) \times 10^{-23}$	$\mathrm{J\ K^{-1}}$
in eV $\mathrm{K^{-1}}$		$8.617\,343(15) \times 10^{-5}$	$\mathrm{eV\ K^{-1}}$
molar volume of ideal gas RT/p ($T = 273.15$ K, $p = 101.325$ kPa)	V_m	$22.413\,996(39) \times 10^{-3}$	$\mathrm{m^3\ mol^{-1}}$
Stefan-Boltzmann constant $\pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	σ	$5.670\,400(40) \times 10^{-8}$	$\mathrm{W\ m^{-2}\ K^{-4}}$
first radiation constant $2\pi hc^2$	c_1	$3.741\,771\,38(64) \times 10^{-16}$	$\mathrm{W\ m^2}$
second radiation constant hc/k	c_2	$1.438\,7752(25) \times 10^{-2}$	m K
Wien displacement law constant $b = \lambda_{max}T = c_2/4.965\,114\,231...$	b	$2.897\,7685(51) \times 10^{-3}$	m K
Cu x unit: $\lambda(\mathrm{Cu\,K\alpha_1})/1\,537.400$	$\mathrm{xu(Cu\,K\alpha_1)}$	$1.002\,077\,10(29) \times 10^{-13}$	m
Mo x unit: $\lambda(\mathrm{Mo\,K\alpha_1})/707.831$	$\mathrm{xu(Mo\,K\alpha_1)}$	$1.002\,099\,66(53) \times 10^{-13}$	m

Energy equivalents

$(1\ \mathrm{m^{-1}})c$ = 299 792 458 Hz	$(1\ \mathrm{Hz})h/k$ = $4.799\,2374(84) \times 10^{-11}$ K	(1 J) = $6.241\,509\,47(53) \times 10^{18}$ eV	$(1\ \mathrm{eV})/c^2$ = $1.073\,544\,171(92) \times 10^{-9}$ u
$(1\ \mathrm{m^{-1}})hc/k$ = $1.438\,7752(25) \times 10^{-2}$ K	(1 Hz)h = $4.135\,667\,43(35) \times 10^{-15}$ eV	(1 eV) = $1.602\,176\,53(14) \times 10^{-19}$ J	(1 kg) = $6.022\,1415(10) \times 10^{26}$ u
$(1\ \mathrm{m^{-1}})hc$ = $1.239\,841\,91(11) \times 10^{-6}$ eV	$(1\ \mathrm{K})k/hc$ = $69.503\,56(12)\ \mathrm{m^{-1}}$	$(1\ \mathrm{eV})/hc$ = $8.065\,544\,45(69) \times 10^5\ \mathrm{m^{-1}}$	(1 u) = $1.660\,538\,86(28) \times 10^{-27}$ kg
$(1\ \mathrm{m^{-1}})h/c$ = $1.331\,025\,0506(89) \times 10^{-15}$ u	$(1\ \mathrm{K})k/h$ = $2.083\,6644(36) \times 10^{10}$ Hz	$(1\ \mathrm{eV})/h$ = $2.417\,989\,40(21) \times 10^{14}$ Hz	$(1\ \mathrm{u})c/h$ = $7.513\,006\,608(50) \times 10^{14}\ \mathrm{m^{-1}}$
$(1\ \mathrm{Hz})/c$ = $3.335\,640\,951... \times 10^{-9}\ \mathrm{m^{-1}}$	$(1\ \mathrm{K})k$ = $8.617\,343(15) \times 10^{-5}$ eV	$(1\ \mathrm{eV})/k$ = $1.160\,4505(20) \times 10^4$ K	$(1\ \mathrm{u})c^2$ = $931.494\,043(80) \times 10^6$ eV

Naturgesetze sind keine Esel

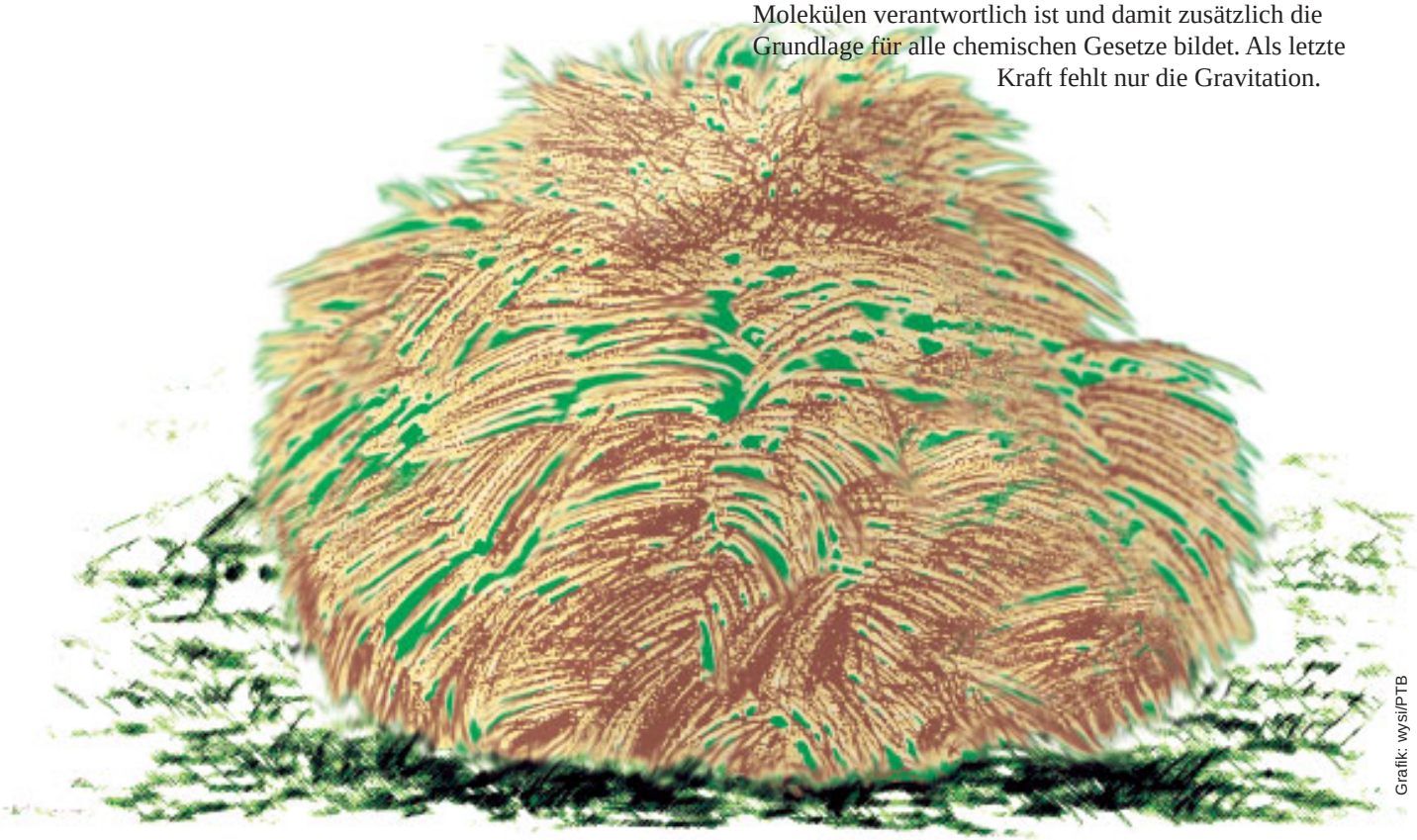
Die von den Physikern gesuchte Theorie von Allem soll die Anzahl nicht berechenbarer Naturkonstanten reduzieren. In einem gewissen Sinne tut sie das auch. Doch uns in unserem Universum nutzt das herzlich wenig.

Einst stand ein Esel zwischen zwei leckeren Heuhaufen. Beide Haufen waren gleich groß und der Esel war von beiden gleich weit entfernt. Der Esel überlegte, welchen der beiden Haufen er zuerst fressen sollte, aber er fand kein Argument, das mehr für den einen als für den anderen Haufen sprach. Schließlich verhungerte der Esel, weil er sich nicht entscheiden konnte. Würden sich die Naturgesetze in unserem Universum genauso verhalten wie dieser Esel aus Buridans Gleichnis, dann wären die Physiker ihrem Traum von einer „Theorie von Allem“ heute schon sehr nahe gekommen. Von dieser Theorie wird erwartet, dass sie die Zahlenwerte möglichst vieler, wenn nicht gar aller Naturkonstanten eindeutig bestimmt. Doch dummerweise sind Naturgesetze keine Esel.

Viele Physiker halten es heute mit Albert Einstein, der einmal sagte: „Eine Theorie, die in ihren Grundgleichungen ausdrücklich eine Konstante enthält, müsste irgendwie ein logisch unzusammenhängendes Stückwerk sein; ich bin jedoch zuversichtlich, dass diese Welt keine so hässliche Konstruktion braucht, um theoretisch fassbar zu sein.“ Anders als Einstein wären die meisten aber schon damit zufrieden, wenn die erwünschte Theorie von Allem die Anzahl nicht berechenbarer Naturkonstanten beträchtlich reduzieren würde.

Ob Einstein das Standardmodell der Teilchenphysik als hässliche Konstruktion bezeichnet hätte, wissen wir nicht. Mit Sicherheit nicht gefallen hätte ihm, dass man in die Gleichungen dieses Modells 26 Naturkonstanten hineinstecken muss. Die Kosmologen benötigen weitere fünf Konstanten zur Beschreibung des Universums. Die Zahlenwerte all dieser Konstanten werden nur durch Beobachtungsdaten und Experimente bestimmt und können von keiner Theorie berechnet werden. Aber dem Standardmodell ist es immerhin gelungen, drei der vier physikalischen Grundkräfte „unter einen Hut“ zu bringen und gleichzeitig Ordnung im vorher unübersichtlichen Teilchenzoo der Physik zu schaffen.

Mit einem „Baukasten“ aus zwölf Materieteilchen, vier Wechselwirkungsteilchen, dem Higgs-Teilchen als Joker und mit den zugehörigen Gleichungen bildet das Standardmodell das Fundament für einen großen Teil der Physik: Es beschreibt die starke Kernkraft, die die Kerne der Atome zusammenhält, die schwache Kernkraft, die den radioaktiven Zerfall der Atomkerne verursacht und die elektromagnetische Kraft, die unter anderem für die Bindungskräfte zwischen Atomen und Molekülen verantwortlich ist und damit zusätzlich die Grundlage für alle chemischen Gesetze bildet. Als letzte Kraft fehlt nur die Gravitation.



Grafik: wysi/PTB

Bezüglich zweier der drei im Standardmodell zusammengefassten Kräfte ist Einsteins Traum von einer einheitlichen Beschreibung der Naturkräfte sogar nahezu erfüllt worden. In den sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts gelang es den drei Physikern Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam, die elektromagnetische Kraft und die schwache Kernkraft zur elektroschwachen Kraft zu vereinigen. Korrekter sollte man das allerdings so ausdrücken: Sie erkannten, dass diese beiden Kräfte die „Überbleibsel“ einer elektroschwachen Urkraft sein mussten, die früher einmal in unserem Universum existiert hat. „Früher“ bedeutet hier: kurz nach dem Urknall, also vor etwa 13 Milliarden Jahren. Sehr lange blieben die beiden Kräfte aber nicht vereinigt. Bereits eine billionstel Sekunde nach dem Urknall trennten sie sich, weil die Temperatur im Universum eine Billiarde Grad Celsius unterschritt.

Aber was bedeutet es eigentlich, Kräfte zu vereinigen oder zu trennen, und was hätte Einstein an dieser Vereinigung so sehr gefreut? Zunächst einmal macht sich die Vereinigung in Form mathematischer Symmetrien in den physikalischen Gleichungen bemerkbar. So etwas freut Physiker grundsätzlich, weil es darauf hindeutet, dass sich hinter den zwei anscheinend grundverschiedenen Kräften ein gemeinsames Prinzip verbirgt. Doch viel mehr ist durch diese symmetrischen Gleichungen für die Beschreibung der heute im Universum gültigen Naturgesetze erst mal nicht gewonnen. Denn diese Gleichungen beschreiben eben die elektroschwache Urkraft, die nur in der allerersten billionstel Sekunde des Universums existierte.

Doch an dieser Stelle kommt der Joker ins Spiel – in Form des Higgs-Teilchens beziehungsweise des zu diesem Teilchen gehörigen Higgs-Feldes. Dieses Feld nahm kurz nach dem Urknall einen von Null verschiedenen Wert an und durchdringt bis heute das gesamte Universum. Dabei verleiht das Higgs-Feld dreien der vier Wechselwirkungsteilchen der elektroschwachen Urkraft eine Masse. Nur das Photon, das Wechselwirkungsteilchen der elektromagnetischen Kraft, bleibt masselos. Infolgedessen wird die in der elektroschwachen Urkraft vorhandene Symmetrie zwischen den vier Teilchen gebrochen und die von den vorher allesamt masselosen Teilchen übermittelte Urkraft spaltet sich in die schwache Kernkraft und die elektromagnetische Kraft auf.

Foto: mauritius images/age

So weit, so gut. Aber was hat das alles mit unseren Naturkonstanten zu tun? Nun, wenn Elementarteilchen – also Teilchen, die nicht weiter zerlegbar sind – Massen haben, dann sind diese Massen zunächst mal nicht berechenbare Naturkonstanten, deren Werte bislang nur gemessen, aber nicht theoretisch bestimmt werden konnten. Doch diesmal war es zum ersten Mal anders. Die Masse der beiden gleich schweren W-Bosonen und die des Z-Bosons konnten von der elektroschwachen Theorie berechnet werden, bevor das Z-Boson Anfang der siebziger und die W-Bosonen Anfang der achtziger Jahre im Europäischen Laboratorium für Teilchenphysik CERN in Genf gefunden wurden. Das hätte Einstein sicher gefreut!

Aber es bleibt ein Wermutstropfen, wenn man einmal die Gesamtbilanz der beteiligten Naturkonstanten aufmacht: Die Berechnung der beiden Bosonmassen „bezahlt“ man mit dem Auftauchen zweier neuer Naturkonstanten, die nun wieder nicht weiter berechenbar sind: der Masse des Higgs-Teilchens und dem so genannten Vakuumerwartungswert seines Feldes. Doch sei’s drum. Die Physiker hatten Blut geleckt. Was einmal so lala funktioniert, funktioniert ja beim nächsten Mal vielleicht schon viel besser. Immerhin geht es bei einer möglichen Vereinigung der elektroschwachen Kraft mit der starken Kernkraft um die Erklärung für zwölf weitere Teilchenmassen.

Anfang der siebziger Jahre tauchte die Idee auf, nach einer „Supersymmetrie“ zu suchen, die bisher unbekannte Symmetrien zwischen den Teilchen des Standardmodells aufdecken sollte. Dann – so die Hoffnung – würde man vielleicht Beziehungen zwischen den Teilchenmassen herstellen können und einige der Massen wären dann aus den Werten der anderen berechenbar. Doch der Schuss ging nach hinten los. Nach der mathematischen Ausarbeitung der Theorie fand man nicht etwa die erhofften neuen Beziehungen der bekannten Teilchen untereinander, sondern statt dessen Beziehungen zwischen den bekannten Teilchen und bisher unbekannten Teilchen. Die Anzahl der physikalischen Elementarteilchen hatte sich damit schlagartig verdoppelt!

Trotzdem gilt die Supersymmetrie auch heute noch als aussichtsreicher Kandidat für die Vereinigung der starken mit der elektroschwachen Kraft – unter anderem deshalb, weil sie vorhersagt, dass sich die unterschiedlichen Stärken der drei beteiligten Kräfte bei Erhöhung der Energie an einem gemeinsamen Punkt treffen, was für die Vereinigung unabdingbar ist. Außerdem gilt das leichteste der neuen Superteilchen als Kandidat für die von den Astronomen im Universum vermisste Dunkle Materie, die sich durch ihre Gravitationswirkung bemerkbar macht, sich aber ansonsten bisher allen Entdeckungsbemühungen entzogen hat. Ab dem Jahr 2007 werden die Physiker mit dem dann fertiggestellten neuen großen Teilchenbeschleuniger am CERN nach den Superteilchen und dem ebenfalls noch nicht gefundenen Higgs-Teilchen suchen.

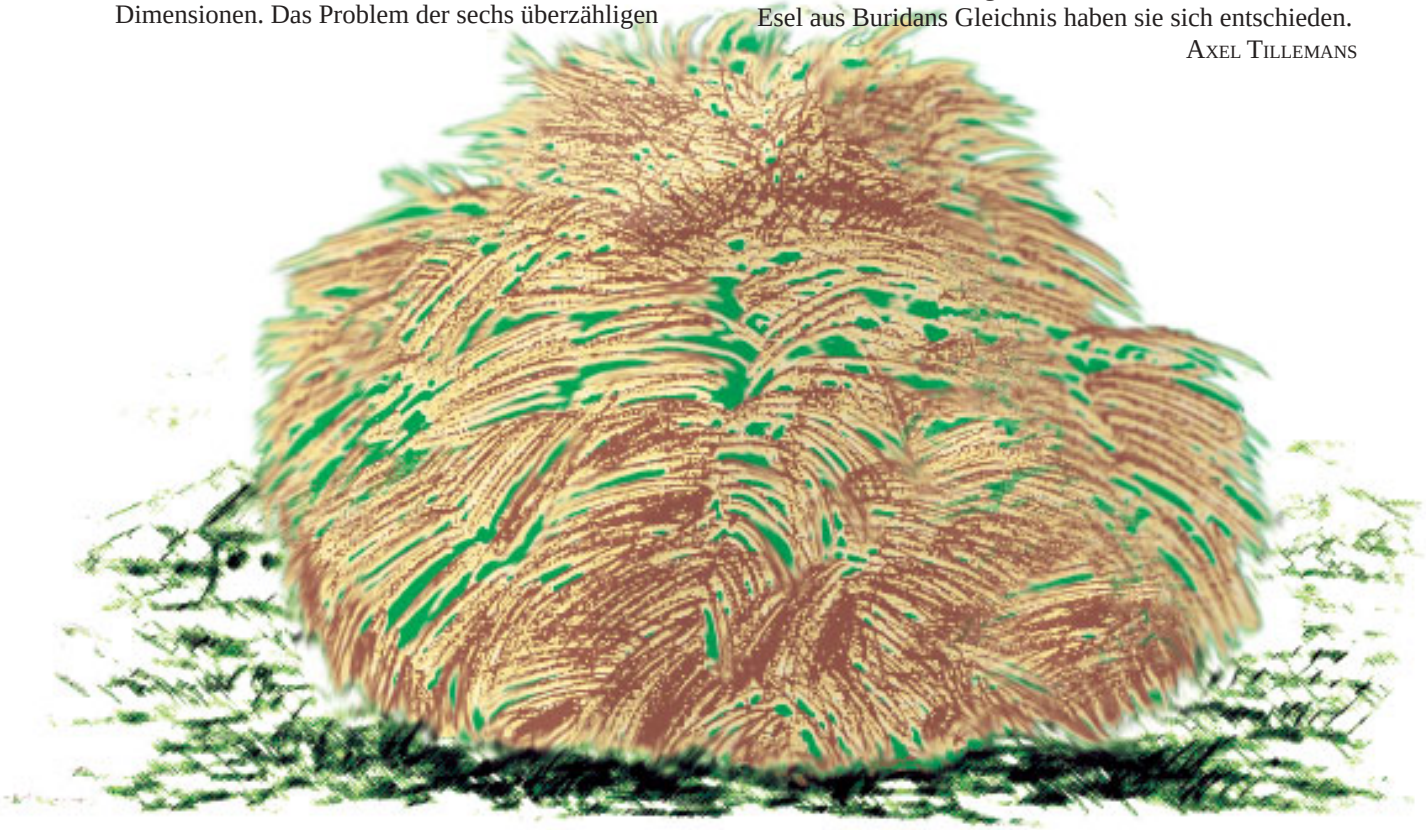
Parallel arbeiten viele Theoretiker aber bereits seit Jahrzehnten an der Stringtheorie, die endlich auch die letzte Naturkraft, die Gravitation, mit einbeziehen soll. Die kleinsten Bausteine dieser Theorie sind kleine schwingende Fäden – die „Strings“. Die bekannten physikalischen Elementarteilchen werden durch verschiedene Schwingungszustände dieser Strings erzeugt, so wie die Saite einer Geige verschiedene Töne und Obertöne hervorbringen kann. Einem bestimmten Elementarteilchen entspricht ein bestimmter Schwingungszustand. Die damit verbundene Hoffnung: Statt der vielen Massenwerte der Elementarteilchen benötigt man als fundamentale Naturkonstanten nur einige wenige Eigenschaften der Strings wie beispielweise die Spannung der Fäden. Einiges deutet heute darauf hin, dass diese Hoffnung erfüllt werden wird und die Anzahl der fundamentalen Naturkonstanten in der Stringtheorie tatsächlich drastisch reduziert wird.

Doch das dicke Ende kommt zum Schluss: Die Stringtheorie fordert die Existenz von neun Raumdimensionen. In unserem Universum hat der Raum aber nur drei Dimensionen. Das Problem der sechs überzähligen Dimensionen ist lösbar, wenn man etwa annimmt, dass diese sechs Raumdimensionen so eng zu Kugeln, Zylindern oder anderen geometrischen Objekten zusammengerollt sind, dass wir sie nicht wahrnehmen – so ähnlich wie uns ein Gartenschlauch aus großer Entfernung betrachtet wie ein eindimensionaler Strich in der Landschaft erscheint. Das Problem dabei: Es gibt schätzungsweise unvorstellbare 10 500 Möglichkeiten, die sechs Dimensionen auf verschiedene Weise zusammenzurollen oder zu „kompaktifizieren“, wie die Physiker es genauer ausdrücken. Jeder der 10 500 verschiedenen Kompaktifizierungen entspricht eine andere Vakuumenergie und zu jeder Vakuumenergie gehören andere Naturgesetze mit anderen fundamentalen Naturkonstanten.

Genauso wie die elektroschwache Theorie eine Urkraft beschreibt, die es in unserem heutigen Universum nicht mehr gibt, beschreibt die Stringtheorie eine noch fundamentalere Naturkraft, deren Symmetrie gebrochen wurde, als mit dem Urknall sechs der neun Raumdimensionen kompaktifiziert wurden. Dass diese Naturkraft – so wie es scheint – nur wenige nicht berechenbare Naturkonstanten verlangt, nutzt uns heute herzlich wenig. Denn der Übergang von dieser fundamentalen Kraft zu der gebrochenen Symmetrie unseres heutigen Universums mit seinen vier speziellen Naturkräften und 31 fundamentalen Naturkonstanten ist ein rein zufälliger Vorgang.

Selbst wenn es den Physikern gelingen sollte, für einige der 10 500 verschiedenen Kompaktifizierungsmöglichkeiten die sich ergebenden Naturgesetze und Naturkonstanten zu berechnen, könnten sie keine Begründung dafür liefern, warum sich die Naturgesetze gerade für die in unserem Universum verwirklichte Konfiguration „entschieden“ haben. Denn dieser Übergang wird von zufälligen Quantenfluktuationen bestimmt. Nur eins ist sicher: Im Gegensatz zu dem bedauernswerten Esel aus Buridans Gleichnis haben sie sich entschieden.

Axel Tillemans



Die Zahlen-spieler

Krumme Dinge sind Physikern nicht geheuer. Ihre Gleichungen sollen die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten der physikalischen Welt widerspiegeln – dies möglichst symmetrisch, einfach und elegant. Doch viele dieser Gleichungen funktionieren erst mit unschönen, „krummen“ Zahlenfaktoren, den Naturkonstanten, die keine Theorie erklären kann. Wo aber eine Erklärung fehlt, wird der Physiker unruhig und macht sich so seine Gedanken: Lassen sich die Konstanten vielleicht doch irgendwie herleiten, womöglich sogar aus „schönen“ Zahlen?

„Die Naturkonstanten spiegeln zugleich unser größtes Wissen und unsere größte Ratlosigkeit wider,“ bringt der Astrophysiker John Barrow von der Universität Cambridge das Problem auf den Punkt. „Wir messen sie mit immer größerer Genauigkeit, aber wir können ihre Werte nicht erklären.“ Aber weil dies letztlich nicht befriedigend ist, versuchen es viele Physiker – halb im Spaß, halb mit verbissenem Ernst – seit langem trotzdem irgendwie hinzubiegen.

Grafik: alb/PTB

Von Füßen und göttlichem Einfluss

Und auch Hobbyforscher hat es gepackt: Sie hantieren mit natürlichen Zahlen, der Zahl π, der Eulerschen Zahl e oder Quadratwurzeln und hoffen, so die Werte von Naturkonstanten oder anderen „berühmten Größen“ zu berechnen. Bis heute schlagen diese Numerologen auf einschlägigen Websites dafür abenteuerliche Rechenwege vor. So gelingt es ihnen etwa die Anzahl der britischen Füße je Meile, nämlich 5280, bis auf einen Bruchteil genau durch die Zahl $e^{(\pi \cdot \sqrt{67} / 3)}$ anzunähern, was durchaus verblüfft. Ebenfalls beliebt unter Numerologen: das Jonglieren mit „göttlichen“ Zahlen wie der 3 für die Dreifaltigkeit Gottes. Kombiniert mit Versangaben aus der Bibel und passenden Rechenoperationen lässt sich jede Zahl – und sogar ein Wert einer Naturkonstanten – erhalten. Die einen sehen hierin einen Beweis für die göttliche Schöpfung, die anderen können nur den Kopf schütteln.

Aber auch große Physiker wollten sich mit der Willkürlichkeit der Naturkonstanten nicht abfinden. Die Quantenphysiker Paul Dirac, Werner Heisenberg und Wolfgang Pauli suchten mit nahezu kindlichem Eifer nach einfachen Ursprüngen der Naturkonstanten. Max Planck träumte von einer allumfassenden Theorie, in der es eine einzige Konstante gibt, aus der man alle anderen ableiten könnte. Auch Albert Einstein hätte am liebsten nur noch Zahlen wie 2, π und e in einem alles erklärenden Formelwerk gesehen.

Der Zauber von Alpha

Der Lieblingskandidat der Erklärungs-Suchenden ist die 1916 von Arnold Sommerfeld eingeführte Feinstrukturkonstante Alpha mit ihrem Wert 1/137 oder genauer 1/137,035 999 11. „Als Zahlwert vermute ich $2^4\ 3^3/\pi$, aber das ist natürlich nur Spielerei“, schrieb Heisenberg in einem Brief an Dirac. Andere bedeutende Physiker von Gary Adamson bis Arthur Eddington beteiligten sich – mehr oder weniger im Spaß – mit wilden Gleichungen, die einzig auf natürlichen Zahlen und π basierten. Alle Lösungen ergaben immer irgendwie eine Zahl, die möglichst nah an 137 heranreichte – aber nie Alpha exakt entsprachen.

Besonders Wolfgang Pauli, der neben seinen herausragenden Leistungen in der Quantenphysik auch viel Sinn für Alchemie und Zahlenmystik hatte, ließ die Zahl 137 nicht los. So fand er heraus, dass das Wort der zahlenmystischen Geheimlehre Kabbala korrekt geschrieben die 137 ergibt. Dazu addierte er die den hebräischen Konsonanten entsprechenden Zahlenwerte: QABALAH, Q = 100, B = 2, L = 30, H = 5. Bis an sein Lebensende sollte die Zahl 137 Pauli begleiten: Er starb – Zufall oder nicht – in Zimmer 137 in einem Krankenhaus in Zürich.

Wenn die Naturkonstanten schon nicht zu berechnen sind, können sie sich nicht zumindest auf wenige Urkonstanten zurückführen lassen? Diese Frage bewegte den Astrophysiker Arthur Eddington. Er reduzierte die in den 1920er Jahren bekannten Größen wie Protonenmasse, Plancksches Wirkungsquantum oder Lichtgeschwindigkeit auf dimensionslose Zahlen wie 1840 (Verhältnis von Protonen- zu Elektronenmasse), 137 (Alpha) und 10^{40} (Verhältnis der elektrischen Kraft zur Gravitationskraft zwischen Proton und Elektron). „Meine Schlussfolgerung ist, dass nicht nur die Naturgesetze, sondern auch die Naturkonstanten von erkenntnistheoretischen Überlegungen abgeleitet werden können“, war Eddington überzeugt. In seinen Urkonstanten sah er einen ersten Schritt für eine – bis heute nicht gefundene – alles erklärende Theorie der Natur. Aber auch wenn Eddington ansonsten von seinen Kollegen hoch geschätzt wurde – diese Überlegungen wirken bis heute reichlich obskur.

Verlockende Symmetrie

Sein Zeitgenosse Paul Dirac dagegen ließ sich von Eddingtons Gedankengängen inspirieren. Aus damaliger Sicht waren die Zusammenhänge mit ihrer verlockenden Symmetrie durchaus reizvoll: Die Gravitation ist etwa um den Faktor 10^{40} kleiner als die elektromagnetische Wechselwirkung. Die Zahl der Protonen im bekannten Universum summiert sich auf 10^{80}, also 10^{40} zum Quadrat. Aber vor allem taucht auch im Alter des Universums (in Relation zur „Elektronenzeit“) die 10^{40} auf – mit der Konsequenz, dass die Naturkonstanten im kosmischen Maßstab zeitabhängig werden. In der Fachwelt fand diese „Hypothese der Großen Zahlen“ allerdings wenig Anerkennung. Sie sei ein Beispiel für eine Kombination von „der Lähmung der Vernunft mit der Vergiftung der Phantasie“, sagte der Philosoph und Physiker Herbert Dingle. George Gamow, Kosmologe und geistiger Vater der Kosmischen Hintergrundstrahlung, sagte zu Niels Bohr: „Schau, was mit den Leuten geschieht, wenn sie heiraten.“ Dirac hatte den Artikel während seiner Flitterwochen geschrieben.

Aktuell bleibt die Hoffnung auf eine allumfassende „Theory of Everything“ mit möglichst wenigen und erklärbaren Naturkonstanten. Nach dieser „Weltformel“ strebt auch Michael Duff vom Michigan Center for Theoretical Physics. Vor wenigen Jahren schlug er einen neuen – ganz und gar polemischen – Weg vor, die Naturkonstanten als „willkürliche menschliche Konstrukte“ aus dem Theoriegerüst der Physik zu verbannen. Er gründete die „Null-Konstanten-Partei“. Sollte sie je an die Macht kommen, wird das Problem der Naturkonstanten vermutlich per Gesetz gelöst werden – indem er sie abschafft. Wie die Formeln der Physik danach aussehen sollen, hat Duff bisher nicht verlauten lassen.

Jan Oliver Löfken

Wie vertrauenswürdig ist eigentlich ein Schulbuch der Physik? Falls Sie diese Frage interessiert, können Sie einen Vertrauens-Schnelltest durchführen: Schlagen Sie einfach das Schulbuch Ihrer Wahl ganz hinten auf. Hier finden Sie eine tabellarische Sammlung von Zahlen. Die Zahlen scheinen auf den ersten Blick nichts miteinander gemein zu haben, stehen doch Zahlenriesen von Zehn hoch 23 direkt neben Zwergen von Zehn hoch minus 27. Das gemeinsame Merkmal dieser Zahlen jedoch: Bei allen handelt es sich um Naturkonstanten. Und an eben den Zahlenwerten dieser Konstanten könnten Sie nun überprüfen, ob Ihr Schulbuch auf der Höhe der Zeit ist und tatsächlich die aktuellen Werte angibt. Aktuelle Werte? Der Naturkonstanten? Sollten nicht Naturkonstanten, wie der Name sagt, zeitlose Werte haben? Wer dies denkt, hat die Rechnung ohne die Physiker gemacht. Zwar glauben die Physiker, dass die Naturkonstanten unveränderliche Größen sind. Aber die Physiker wissen zugleich, dass sie diese Werte nicht exakt kennen. Sie können nur versuchen, die Naturkonstanten so gut wie möglich zu messen, um den „wahren Werten“ möglichst nahe zu kommen. Wird neu und besser gemessen, kommen neue und bessere Zahlenwerte heraus. Damit ändern sich zwar nicht die Naturkonstanten, aber unser Wissen ändert sich. Und dies sollte in einem guten Schulbuch dokumentiert sein. Und wie geht nun der Schnelltest? Suchen Sie sich eine beliebige Konstante aus der Liste aus, sagen wir die Gravitationskonstante. Jetzt gehen Sie ins Internet und rufen die Website des Committee on Data for Science and Technology, CODATA, auf (http://physics.nist.gov/cuu/constants/), geben den Namen der ausgewählten Konstante in die Datenbank ein und erhalten den aktuellen CODATA-Wert, mit dem Sie den Vergleich anstellen können. So geht der Schnelltest. Und falls Sie sich jetzt fragen, ob der CODATA-Wert vertrauenswürdig ist, kann Ihnen vielleicht der nebenstehende Beitrag eine Antwort geben.

jes

Die „Liste“

Grob alle vier Jahre bekommen die Herausgeber der „Reviews of Modern Physics“, einer Fachzeitschrift, die gerne längere Übersichtsartikel veröffentlicht, einen ganz besonderen Aufsatz auf den Tisch, der auch großzügige Längenvorgaben gerne missachtet: Die „Liste mit empfohlenen Werten für die fundamentalen Naturkonstanten“ – einen Aufsatz voll unglaublich detaillierter Beschreibungen einzelner physikalischer Messungen und deren Hintergründe. Aber braucht die Liste der Naturkonstanten tatsächlich einen extralangen Aufsatz zur Untermalung, wäre nicht eine reine Aufstellung der Zahlen völlig ausreichend? Keinesfalls, meint der Mathematiker Wolfgang Wöger, früherer PTB-Forscher, nachdrücklich: „Der Zweck ist, die Messungen auch in vielen Jahren noch im Detail nachvollziehen zu können. Damit sich nicht wie bei vielen alten Experimenten hinterher die Frage stellt: Was haben die sich dabei gedacht?“

CODATA

Selbstverständlich wollen die Metrologen mit weltweit einheitlichen Werten für die Konstanten arbeiten, und hier kommt CODATA ins Spiel, jene Organisation, die regelmäßig diesen extralangen Aufsatz veröffentlicht. Seit seiner Gründung 1966 hat das „Committee on Data for Science and Technology“ mit Sitz in Paris nur ein Ziel: die wichtigen Daten für Naturwissenschaft und Technik systematisch und umfassend zu sammeln, kritisch zu bewerten, zu speichern und nicht zuletzt zu publizieren. Das Sammeln betrifft auch Daten aus Biologie, Chemie und den Ingenieurwissenschaften. Doch eine Umfrage ergab kürzlich, dass die Bekanntheit von CODATA unter Wissenschaftlern weltweit vor allem auf der Naturkonstanten-Liste beruht, die samt zugehöriger Messdetails den Aufsatz ausmachen. Dabei ist dafür an sich nur ein kleiner Teil des CODATA zuständig, die „Task Group on Fundamental Constants“, der auch Wöger angehört.

Bald ist es wieder soweit, die neue Liste ist schon in Arbeit: Ende Dezember 2005 endete bereits die Abgabefrist für neue Messberichte zu den Naturkonstanten. Die Arbeitsgruppe sammelt nicht selbst, sie empfängt nur die Daten, die dem Komitee in den letzten vier Jahren angetragen wurden oder die es aktiv eingefordert hat. Liegen alle Daten vor, folgt die Phase der Überprüfungen und der Ausgleichsrechnungen, die sich über ein bis zwei Jahre hinziehen kann. Für die Mitglieder der Arbeitsgruppe ist intensives Papierstudium angesagt, bevor sie die Messungen und Ergebnisse in diversen Sitzungen mehr oder weniger heiß diskutieren.

Ausgleichende Rechnungen

Um die neuen Werte untereinander und diese mit den alten Daten konsistent zu halten, ist eine Ausgleichsrechnung fällig. Nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate, die schon seit Gaußschen Zeiten im Einsatz ist, gewichtet die Ausgleichsrechnung alle anerkannten Experimente, die zur jeweiligen Naturkonstante führen. Grundlage dafür sind die Messunsicherheiten, die die unterschiedlichen Versuchsaufbauten bieten: Je größer die Unsicherheit, desto weniger fällt die Methode ins Gewicht, wenngleich sie auch nicht komplett zu vernachlässigen ist.

Ergebnis all des Hin- und Herrechnens sind untereinander abgestimmte Naturkonstanten, unter Berücksichtigung aller bekannten Messmethoden zum Zeitpunkt der Abgabefrist. So will die Arbeitsgruppe Anfang 2007 die nächste Aktualisierung der Naturkonstanten-Liste veröffentlichen. Sie wird die Werte enthalten, die ab dann weltweit und einheitlich in allen physikalischen, chemischen oder technischen Berechnungen zum Einsatz kommen sollten. Um das zu gewährleisten, fällt jetzt die letzte Aufgabe der Arbeitsgruppenmitglieder ins Gewicht: die gewonnen Werte auf Experten-Konferenzen vorstellen und möglichst umfassend bekannt machen – in Schulen, Universitäten und Ingenieurbüros.

Groß-*G*

So klar und vorgegeben dieser Arbeitsauftrag für Wöger und Kollegen auch scheint, gelegentlich gibt es harte Nüsse zu knacken. Immer wieder zum Beispiel mit Newtons Gravitationskonstante *G*. Sie ist zwar eine der am längsten bekannten Naturkonstanten, aber auch die mit der höchsten Messunsicherheit – denn die Gravitationskraft ist im Vergleich zu den anderen drei Grundkräften der Natur die schwächste. Wer sie messen will, muss das Experiment vor allem vor Verfälschungen durch die elektromagnetische Kraft abschirmen. Auch kleinste Vibrationen und Temperaturveränderungen können die Daten verfälschen, wenn in kompliziertesten Anordnungen die Anziehungskraft zweier Körper aufeinander gemessen wird, um *G* daraus zu berechnen.

Gleichzeitig ist *G* ein Sonderfall im Netz der Naturkonstanten, weil sie mit keiner der anderen zu verknüpfen ist. Als einzige Konstante der Liste geht sie nicht in die Ausgleichsrechnungen ein. Noch fehlt die physikalische Theorie, die etwa alle vier Grundkräfte miteinander verknüpfen würde – bis dahin steht *G* allein und braucht feinste Messmethoden. Und so entwickeln Metrologen immer neue Anordnungen in der Hoffnung, damit die altbekannten Fehlerquellen der Messungen zu vermeiden. Und laufen Gefahr, in neue unerwartete Schwierigkeiten zu geraten.

Im Jahre 1995 drohte eine Messung von PTB-Experten die CODATA-Liste durcheinanderzubringen. Mit innovativer Methode – das Team hatte eine schwere Drehwaage verwendet und die Massekörper anders als sonst üblich nicht an Fäden aufgehängt, sondern auf einem Quecksilberbad schwimmen lassen – war es gelungen, die Messunsicherheit für *G* deutlich zu verringern, auf nur noch 83 ppm (parts per million = 10^{-6}). Gleichzeitig lag der Messwert aber um 0,6 Prozent höher als alle anderen Werte für *G* – ohne dass ein Messfehler klar erkennbar gewesen wäre. Nach jahrelangen Überlegungen zeigte sich schließlich eine so nie erwartete und nur schwer zu verstehende Fehlerquelle. Immerhin jedoch, so der damalige Versuchsleiter Winfried Michaelis, „hat unser Versuch und die Diskussion darüber eine ganze Reihe neuer Experimente initiiert“.

Die Welt hinter dem Komma

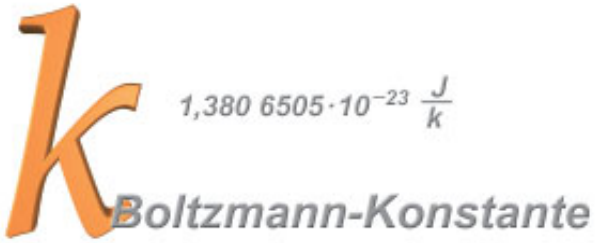
Bis heute arbeiten Physiker daran, die Naturkonstanten immer genauer zu bestimmen. Sie benennen mittels extrem aufwendiger und sehr teurer Versuchsanordnungen nicht nur die x-te Stelle hinter dem Komma, sondern dazu auch den Unsicherheitsfaktor für die Messung, der Milliardstel bis Billionstel betragen kann. Forscherteams rund um den Globus sind damit so intensiv beschäftigt, dass tatsächlich alle vier Jahre genügend Messungen beisammen sind, um diese zusammenzufassen und der Welt einen Überblick über die Fortschritte und Veränderungen zu geben. Dabei genügen für die praktische Arbeit der meisten Physiker und Techniker die ersten Stellen hinter dem Komma völlig. Warum also dieser Aufwand? Warum ist es für Metrologen, die sich dem Messen und Analysieren von Naturkonstanten verschrieben haben, „nicht ungewöhnlich, zehn Jahre am Experiment und zwei Jahre an der Auswertung zu sitzen“, wie es Wöger beschreibt?

Zum einen können die Naturkonstanten die physikalischen Einheiten – vom Meter bis zum Ampere – auf sichere Füße stellen, sie können für ein System unveränderlicher und reproduzierbarer Einheiten sorgen. Zum anderen treiben Metrologen den Aufwand, um das physikalische Weltbild grundsätzlich abzusichern: Die Messverfahren und die immer genaueren Ergebnisse der Experimente könnten früher oder später Fehler in den grundlegenden Theorien der Physik offenbaren. Andersherum können präzise Messungen auch Theorien bestätigen. Sinken nämlich die Unsicherheiten in den Messwerten, wie in den vergangenen Jahrzehnten bei den Naturkonstanten, so werden die Theorien immer vertrauenswürdiger.

Dörte Sasse

Die K&*k*-Connection

Eis, Wasser und darüber Dampf: Die Mixtur aus festem, flüssigem und gasförmigem Wasser heißt Tripelpunkt und kann ausschließlich bei einer Temperatur von 273,16 Kelvin beziehungsweise 0,01 Grad Celsius existieren. Diese Temperatur ist momentan noch die Basis für die Definition der Temperatureinheit Kelvin. Sie kann jedoch leicht schwanken, wenn das Wasser verunreinigt ist oder wenn es Isotope – also Atome eines Elements aber unterschiedlicher Kernmasse, in ungewöhnlichen Mengen enthält. Metrologen wollen das Kelvin deshalb über den unumstößlichen Zahlenwert einer Naturkonstanten festlegen. Wissenschaftler der PTB in Berlin feilen zurzeit an der Messung dieser Konstanten.



Ein Februartag in Berlin-Charlottenburg, vor dem sandgelb gestrichenen Backsteinbau der PTB. Die Temperatur wassertripelpunktsverdächtig. Drinnen, im Büro von Bernd Fellmuth, Leiter der Arbeitsgruppe „Tieftemperaturmetrologie“ der PTB, ist es um gefühlte 20 Grad wärmer. Fellmuth, weißhaarig mit Bart und Lesebrille, erklärt in waschechter Berliner Mundart, es sei die sogenannte Boltzmann-Konstante, kurz: klein *k*, um die man bei der Definition des großen K für die Temperatureinheit Kelvin nicht umhin könne. „In keinem physikalischen Gesetz taucht die Boltzmann-Konstante ohne die Temperatur auf“, betont der Physiker. „Sie stellt den Zusammenhang zwischen der mittleren mechanischen Energie von Atomen oder Molekülen und der thermischen Energie des Gesamtsystems her.“ Denn je stärker Atome schwingen und je flotter Gasteilchen durch die Luft flitzen, desto höher ist die Temperatur. Doch obwohl die Verkupplung von Boltzmann-Konstante und Kelvin, von klein *k* und groß K, auf der Hand liegt: Bisher hat niemand den Zahlenwert der Konstanten, deren hintere Kommastellen Wackelkandidaten sind, genau genug ermitteln können, um der aktuellen Tripelpunktdefinition des Kelvin wirklich Konkurrenz zu machen. „Dafür müsste die Zahl auf die sechste Stelle hinter dem Komma genau bekannt sein“, erklärt Fellmuth. Genau um diese Stelle ringen die Berliner Forscher zurzeit.

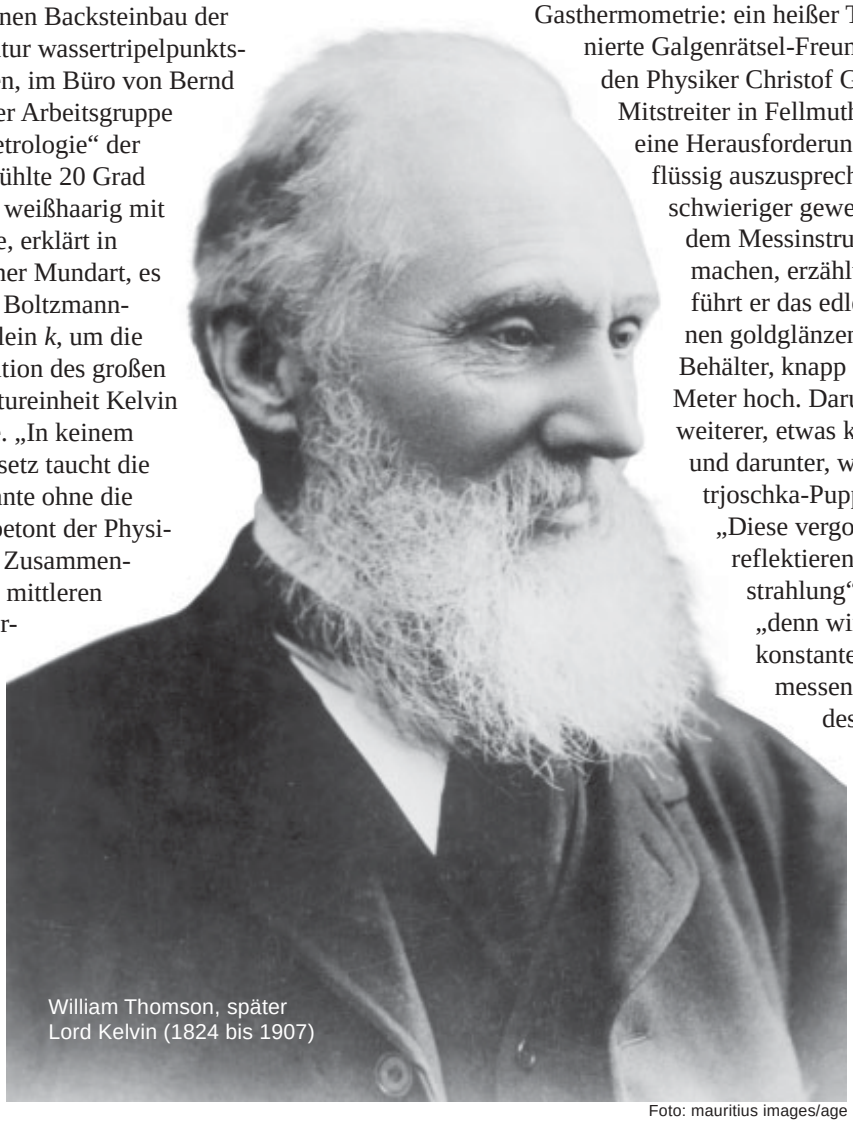

William Thomson, später Lord Kelvin (1824 bis 1907)

Foto: mauritius images/age

Ihre Messmethode heißt Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie: ein heißer Tipp für passionierte Galgenrätsel-Freunde und selbst für den Physiker Christof Gaiser, jüngster Mitstreiter in Fellmuths Arbeitsgruppe, eine Herausforderung. Dieses Wort flüssig auszusprechen sei bald schwieriger gewesen als sich mit dem Messinstrument vertraut zu machen, erzählt er. Im Labor führt er das edle Stück vor: Einen goldglänzenden kreisrunden Behälter, knapp einen halben Meter hoch. Darunter steckt ein weiterer, etwas kleinerer Behälter und darunter, wie bei einer Matrjoschka-Puppe, noch einer. „Diese vergoldeten Zylinder reflektieren störende Wärmestrahlung“, erklärt Gaiser, „denn wir müssen bei konstanter Temperatur messen.“ Das Herzstück des Messinstruments steckt im dritten Zylinder: Zwei doppelwandige Kupfer-Röhrchen mit Durchmessern wie Zwei-Euro-Stücke. Es sind Kondensatoren, deren Innen- und Außenwände im

schnellen Wechsel elektrisch entgegengesetzt aufgeladen werden. Einer der Kondensatoren ist komplett evakuiert, zwischen den Wänden des anderen strömt das Messgas Helium. Durch das Helium erhöht sich die Ladungsdichte auf den Kondensatorwänden. Diesen Effekt können die Physiker als Kapazitätsänderung messen und daraus die Dielektrizitätskonstante des Heliums ermitteln. Der Hintergrund: Ein Gasatom besteht aus einem elektrisch positiv geladenen Atomkern und negativ geladenen Elektronen drumherum. Zwischen zwei elektrisch entgegengesetzt aufgeladenen Flächen driften nun Kern und Elektronen ein wenig – zigarrenförmig – auseinander. Die Dielektrizitätskonstante ist dabei ein Maß dafür, wie geordnet sich die Gasatome zwischen den Kondensatorwänden ausrichten. Sie hängt also von der Bewegungsenergie der Teilchen ab und deshalb letztlich mit der Boltzmann-Konstante zusammen. „Bei bekannter Temperatur können wir aus der Druckabhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten schließlich die Boltzmann-Konstante errechnen“, fasst Gaiser den Weg zum begehrten Zahlenwert zusammen. Die Forscher vergleichen ihre experimentell ermittelten Werte dabei immer wieder mit denen aus theoretischen Berechnungen. Erst wenn Theorie und Experiment übereinstimmen, ist das Ziel erreicht. Der große Vorteil der elektrophysikalischen Messmethode gegenüber klassischen Druck- und Temperaturmessungen, mit denen die Boltzmann-Konstante ebenfalls berechenbar ist: Die Zahl der Gasatome im Messbehälter spielt keine Rolle. Sie in ausreichender Genauigkeit zu ermitteln ist derzeit eine unlösbare Aufgabe.

Zurzeit betreiben die Berliner Physiker ihre Apparatur ausschließlich bei sehr tiefen Temperaturen von nur wenigen Kelvin. „Bei diesen Temperaturen frieren sämtliche Verunreinigungen aus“, erklärt Gaiser. „Das sind ideale Bedingungen, um sich mit der Messmethode vertraut zu machen.“ Ziel sei es jedoch, am Tripelpunkt von Wasser zu messen, um einen direkten Bezug zur aktuellen Kelvin-Definition zu schaffen. Bis es soweit ist, wartet noch eine Menge Arbeit auf die Wissenschaftler. Die Messanlage muss umgebaut werden, unter anderem um auch bei höheren Temperaturen Verunreinigungen zu vermeiden. So soll sie beispielsweise besser abgedichtet werden, damit sich keine Moleküle aus der Luft unter die Heliumteilchen schummeln können und so das Messergebnis verfälschen. „Wir müssen außerdem noch ein geeigneteres Material für die Kondensatoren finden als Kupfer“, ergänzt Gaiser die notwendigen Schritte. Die Kupferelektroden der aktuellen Kondensatoren seien zu druckempfindlich und könnten sich während der Messungen verformen. Insgesamt helfen vier weitere PTB-Arbeitsgruppen die nötige Messtechnik an ihre Grenzen zu treiben, um Drücke, Kapazitäten und Temperaturen ausreichend genau erfassbar zu machen. Anfang nächsten Jahres soll mit dem Aufbau der neuen Anlage begonnen werden.

Spitzenreiter im Boltzmann-Konstante-Messen sind derzeit noch amerikanische Forscher des National Institute of Standards and Technology (NIST). Sie können den bisher besten Wert für die Konstante vorweisen. Ihre Strategie: Sie messen die Schallgeschwindigkeit in einer mit Gas gefüllten stählernen Kugel. Wie schnell der Schall den Weg durch die Kugel findet, hängt wie die Dielektrizitätskonstante letztlich von der Bewegungsenergie der Gasteilchen ab und so mit der Boltzmann-Konstante zusammen. Auch französische und italienische Forscher versuchen mit eben dieser Methode der Boltzmann-Konstanten auf der sechsten Stelle hinter dem Komma Herr zu werden. Wissenschaftler prüfen zudem die Tauglichkeit weiterer neuartiger Messstrategien, weltweit und mit Hochdruck. Es gehe den Physikern dabei jedoch nicht vorrangig um einen Wettkampf, sagt Gaiser: „Am schönsten wäre es, wenn alle unabhängig voneinander zum gleichen Ergebnis kommen würden.“ Gehen die Pläne der Physiker auf und werden nötige Gelder nicht unerwartet aufs Eis gelegt, sollte die sechste Stelle der Boltzmann-Konstante spätestens 2011 dem Nebel entrückt sein und eine „wasserfreie“ Neudefinition des Kelvin ermöglichen.

ANDREA HOFERICHTER

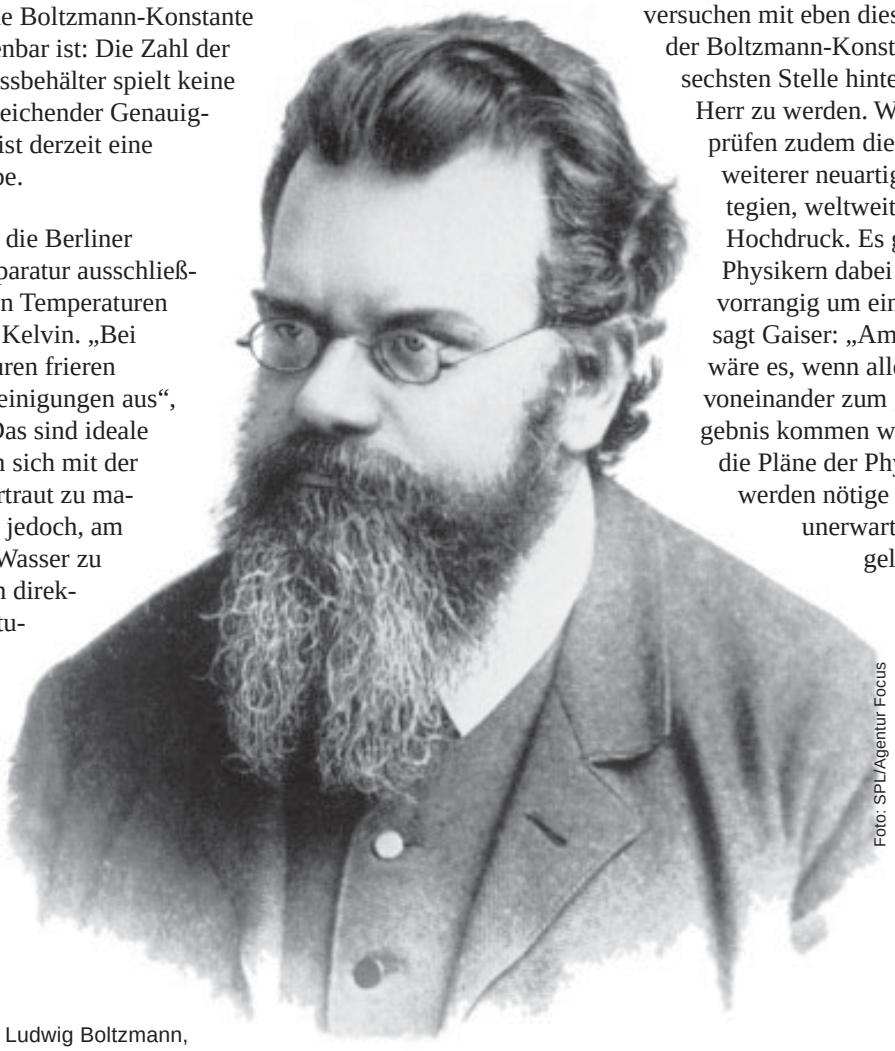


Foto: SPL/Agentur Focus

Ludwig Boltzmann, (1844 bis 1906)

Auf Wasser gebaut

Das Wasser aus dem Ozean rund um die Antarktis könnte halbwegs funktionieren, das aus dem Eisberg eher nicht – zur exakten Realisierung der Temperaturskala, die ja auf Wasser als Grundstoff basiert. Das Problem: Wasser ist nicht gleich Wasser. Denn die Komponenten Wasserstoff und Sauerstoff kommen in mehreren Spielarten, den Isotopen, vor. Und diese verschiedenen Isotope beeinflussen – zwar gering, aber doch merklich – die Schmelz- und Siedetemperatur. Zur Definiton der Temperaturskala hat man sich daher auf eine ganz spezielle Wassersorte verständigt, auf das „Standard Mean Ocean Water“, einer Mixtur ozeanischen Wassers. Der Eisberg scheidet daher aus: Er wurde wahrscheinlich von einem Gletscher „gekalbt“ und besteht letztlich aus Schnee, der eine für Meerwasser untypische Isotopenzusammensetzung hat.

jes

Aufwärts von absolut Null: die Kelvinskala

Negative Temperaturen gibt es bei ihr nicht. Denn die Kelvinskala beginnt am „absoluten Temperaturnullpunkt“. Tiefer geht nicht. Da ein Schritt auf der Kelvinskala einem Schritt auf der Celsiusskala entsprechen sollte, ergibt sich die aktuelle, etwas sperrige Definition: „Ein Kelvin ist der 273,16te Teil der Temperatur des Tripelpunktes von Wasser.“ Gelingt es, die Boltzmann-Konstante hinreichend genau zu bestimmen, dann könnte die Kelvin-Definiton in Zukunft so lauten: „Ein Kelvin ist die Änderung der thermodynamischen Temperatur, die zu einer Änderung der thermischen Energie von exakt $1{,}380\,6505 \cdot 10^{-23}$ Joule führt.“ Dieser Zahlenwert ist derjenige der (dann festgelegten) Boltzmann-Konstante.

ah

Chaos mit Konstante

Unordnung breitet sich wie von selbst aus. Was uns alltägliche Erfahrungen lehren, fasst die Thermodynamik („Wärmelehre“) in ihrem zweiten Hauptsatz zusammen: „Alle spontanen Prozesse der Natur sind mit einer Zunahme der Entropie verbunden.“ Die Entropie S als Maß für die Unordnung hat auch Ludwig Boltzmann beschäftigt. Seinen Berechnungen zufolge musste sie mit dem Logarithmus der Gesamtzahl aller möglichen Zustände W wachsen und zwar um einen bestimmten Faktor: die Boltzmann-Konstante. Das Gesetz lautet $S = k \log W$ und ziert bis heute Boltzmanns Grabstein auf dem Wiener Zentralfriedhof.

ah

Foto: mauritius images/Superstock

Atome hinter Gittern

Irgendwann waren Fragen dieser Art für uns eine Herausforderung: „Wie viele Kühe stehen da auf der Weide?“ Und wir haben geantwortet: „Drei!“ „Wie viele Bauklötzchen liegen auf dem Fußboden?“ Nach kurzem Nachzählen: „14!“ Aber bald schlief das Zählinteresse ein, spätestens als wir das Prinzip verstanden hatten. Bei den meisten währt dieser Schlaf dann ein Leben lang. Nicht jedoch, wenn man Peter Becker oder Arnold Nicolaus heißt, in der PTB arbeitet und folgende Aufgabe bekommen hat: „Zählt doch mal eben nach, wie viele Atome in einem Mol Silizium stecken.“ Eine echte Zähl-Herausforderung. Schließlich stecken mehr Atome in einem Mol, als es Sterne im Universum gibt. Eine Aufgabe also, die locker ein ganzes, hellwaches Wissenschaftlerleben ausfüllen kann.

Ganz im Zeichen der Kugel steht die Arbeit von Arnold Nicolaus. Um zu lernen, wie viele Atome im Kristallgitter der Siliziumkugel stecken, muss Nicolaus zunächst das Kugelvolumen bestimmen. Allerdings gibt es perfekte Kugeln nur in der Mathematik. Und so genügt es nicht, den Durchmesser einmal zu messen und in die Volumengleichung für eine Kugel einzusetzen. Gefragt ist vielmehr die genaue Topographie. Nach Abertausenden Messungen ist klar: Zwar keine Kugel, aber eine sehr gute Annäherung.

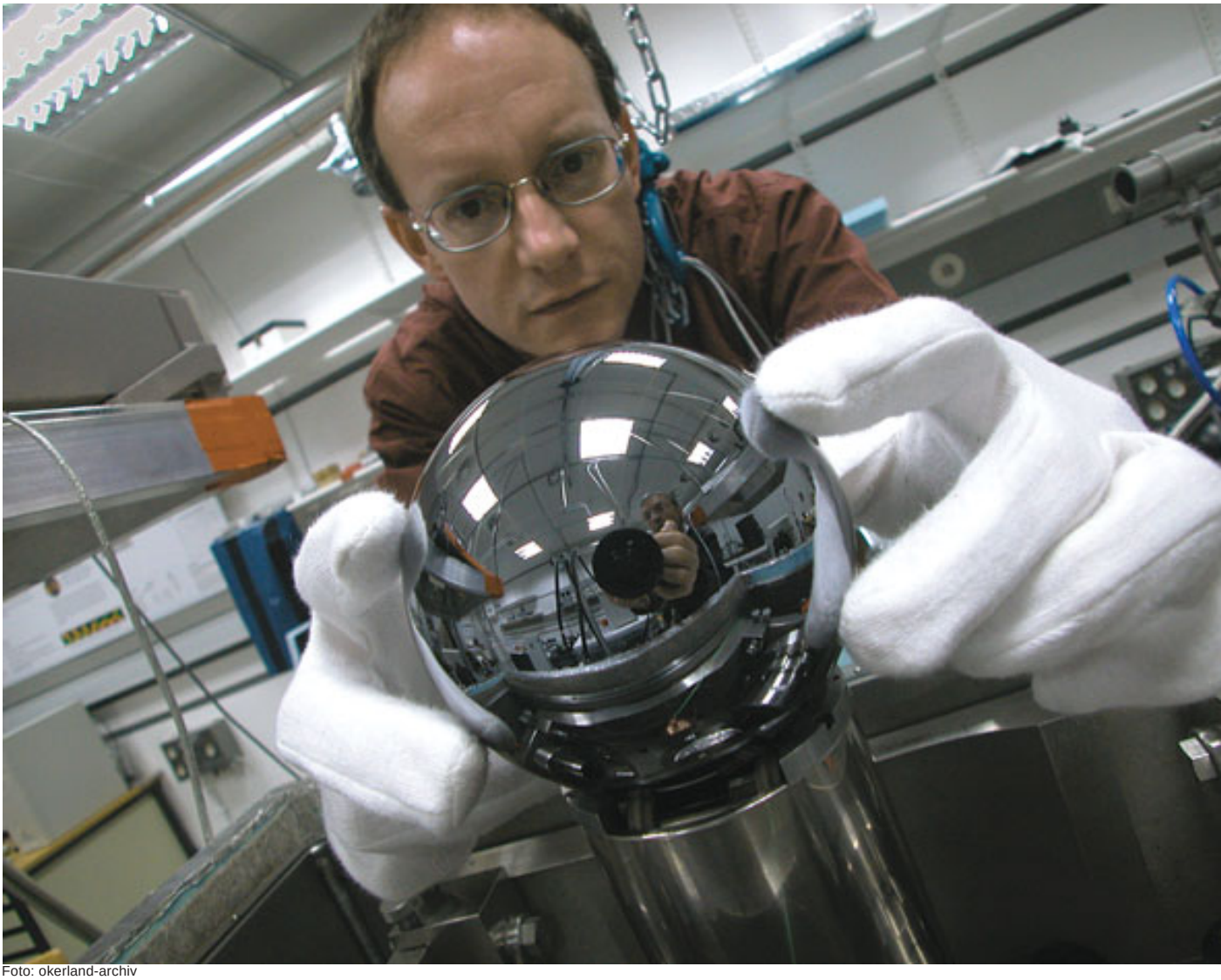


Foto: okerland-archiv

Im Labor im Erdgeschoss des Friedrich-Paschen-Baus der PTB in Braunschweig befindet sich der wahrscheinlich kugeligste und sauberste Gegenstand der Erde. Es handelt sich um eine knapp zehn Zentimeter dicke Siliziumkugel, die in etwa ein Kilogramm wiegt. Arnold Nicolaus hat sie nach einer genau vorgeschriebenen Prozedur abgewischt, gewaschen und getrocknet. Das war nötig, weil es hier um millionstel Millimeter geht. Und ein Fingerabdruck auf der Kugel wäre um ein Vielfaches höher. Mühsam ist die Reinigung, aber danach liegt das Objekt blitzblank in einer Vakuumkammer, wo es extrem genau ausgemessen werden soll. Zunächst allerdings muss es sich der Umgebungstemperatur von exakt 20 Grad Celsius anpassen. Das dauert wieder ein paar Stunden.

Geduld braucht unbedingt, wer beim Avogadro-Experiment arbeiten will. In diesem Projekt, an dem zehn internationale Partner beteiligt sind, versuchen Forscher herauszufinden, wie viele Atome in einem Mol stecken, wobei sie versuchen, sich um höchstens ein Atom pro einhundert Millionen zu verzählen. Die Natur hat es so eingerichtet, dass diese Zahl immer gleich groß ist, eine Konstante also, benannt nach dem italienischen Physiker Amedeo Avogadro, der Anfang des 19. Jahrhunderts entscheidende Beiträge zur Molekulartheorie lieferte. Der Umstand, hier tatsächlich eine Konstante vor sich zu haben, ist nicht verwunderlich, wenn man bedenkt, dass das Mol eine atomare Masseneinheit mit einer makroskopischen Masse verknüpft. Wie viel ein Mol einer Atomsorte wiegt, lässt sich an der Anzahl der schweren Kernbausteine (Protonen und Neutronen) ablesen. Je nach Sorte geben ein Mol Atome etwa 12 Gramm Kohlenstoff oder 197 Gramm Gold.

Natürlich sind das ziemlich viele, etwa $6 \cdot 10^{23}$, also ein paar hundert Trilliarden. Wer da anfangen möchte, die Teilchen einzeln abzuzählen, wäre lange beschäftigt. Selbst dann, wenn man sich als Hilfsmittel eine schnelle Zählmaschine vorstellt. Vielleicht eine, die in der Lage ist, pro Sekunde eine Million Atome zu registrieren. Leider würde es dann immer noch 20 Milliarden Jahre dauern, die Atome in nur zwei Gramm Wasserstoff abzuzählen – länger, als das Universum bisher existiert.

Die Physiker in der PTB gehen wesentlich schlauer und zeitsparender an das Vorhaben heran. Sie benutzen für ihre Zählarbeit einen Silizium(Si)-Einkristall, der so regelmäßig aufgebaut ist, dass man eigentlich nur noch den Abstand der einzelnen Atome im Kristallgitter messen müsste, um zu wissen, wie viele Atome in sein Volumen passen. Eigentlich … Aber hier wie überall bei hochgenauen Messungen steckt der Teufel im Detail. Denn „kein Einkristall ist perfekt, jeder enthält Fremdatome und kleine Fehler, die die Perfektion des Kristallgitters unterbrechen“, erläutert Peter Becker, Chef des Avogadro-Projekts. Außerdem ist es mit der Messung des Gitterabstands allein noch nicht getan, denn parallel müssen auch noch das Volumen der Kugel sowie ihre Masse möglichst genau bestimmt werden. Daraus ergibt sich, wie viele Atome ein Mol enthält.

Das Ganze wird natürlich nicht aus Freude am puren Zählen gemacht, sondern hat einen tiefen praktischen Sinn: Es geht hier um nichts Geringeres als darum, das Kilogramm auf universelle Naturkonstanten zurückzuführen. Bislang nämlich ist das Ur-Maß für das Kilogramm in unserer hochtechnisierten Welt noch ein echter Anachronismus. Seit 1889 dient ein kleiner Platin-Iridium-Zylinder als Maß für alle Kilogramms dieser Welt. Das Bureau International des Poids et Mesures bewahrt ihn in einem Tresor in Sèvres auf, am Rand von Paris. Kopien davon dienen als nationale Prototypen, mit denen jede Nation Massenormale zum praktischen Gebrauch herstellt. Beim regelmäßigen Vergleich der Prototypen hat sich in den letzten 100 Jahren aber gezeigt, dass entweder das Ur-Kilogramm allmählich ein ganz kleines bisschen leichter wurde oder alle nationalen Prototypen entsprechend schwerer. Ein seltsamer Befund, der sich kaum erklären lässt. Allein schon aus diesem Grund wäre es sinnvoll, endlich die Definition des Kilogramms auf eine stabile Basis zu stellen. Aktivitäten dazu gibt es in mehreren Ländern. Und die PTB in Braunschweig konzentriert sich auf die Siliziumkugel.

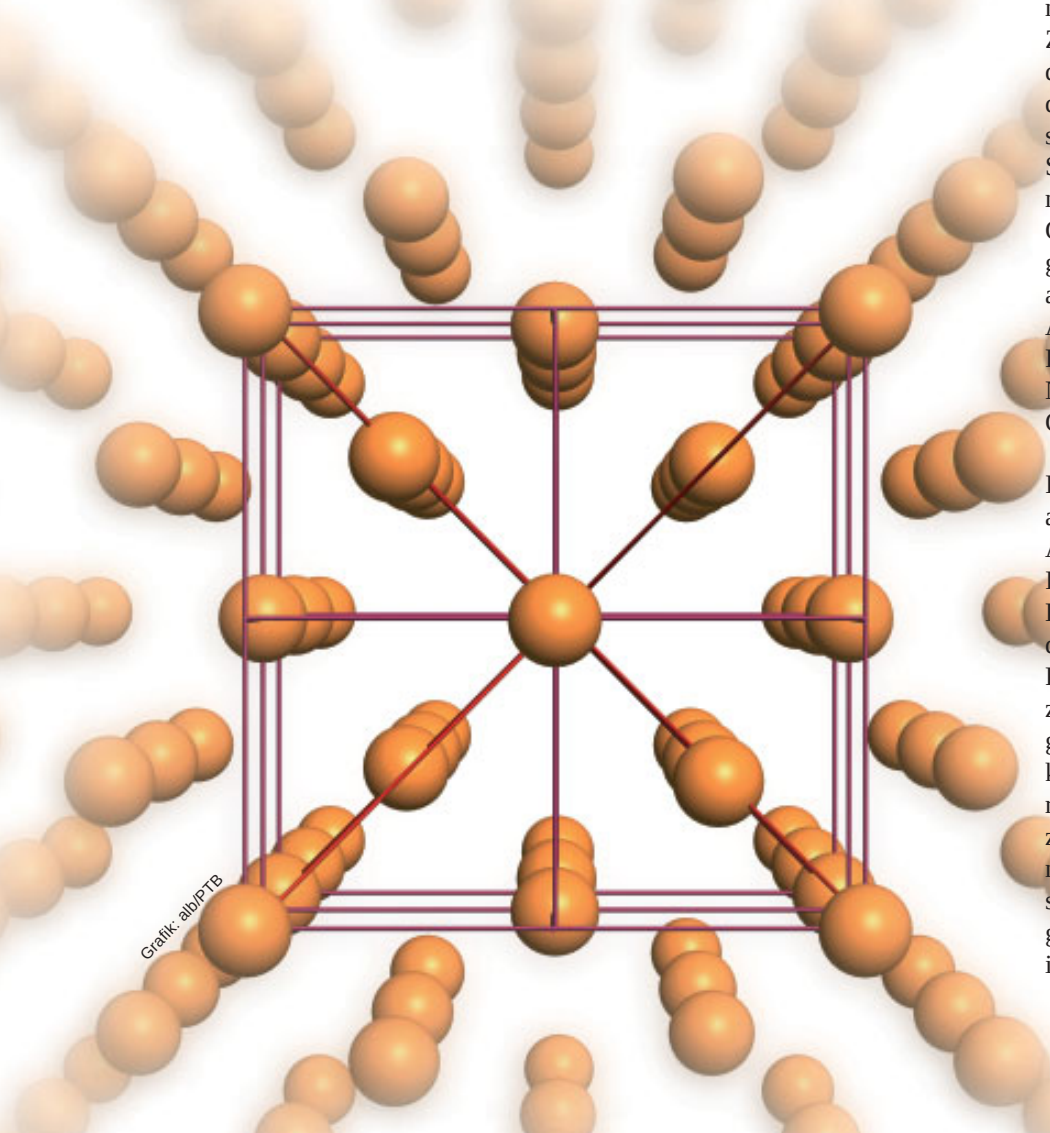
Die exakte Form der Kugel auszumessen, dafür ist Arnold Nicolaus zuständig. Zuvor hat Nicolaus allerdings – denn seine Apparatur ist für das Messen großer Längen viel zu feinsinnig – von seinen Kollegen aus dem Dichtelabor den ungefähren Kugeldurchmesser erfahren. Nicolaus stellt nun, mit diesem Vorwissen ausgestattet, die Kugel in ein so genanntes Fizeau-Interferometer und bestrahlt die Kugel in einer Vakuumkammer mit zwei Laserlichtkegeln. Die Kugeloberfläche reflektiert die Strahlen, und diese wiederum überlagern sich mit dem eingestrahlten Laserlicht -– Stichwort: Interferenz. „Wäre die Kugel perfekt,“ so Arnold Nicolaus, „würden sich die Strahlen gegenseitig völlig auslöschen. Dort jedoch, wo kleine Unebenheiten sind, entstehen auf dem Interferenzbild helle Muster.“ Das Gerät reagiert extrem genau: Es erkennt mit Leichtigkeit noch Abweichungen in der Höhe von 0,5 Nanometern. Umgerechnet auf die Größe der Erdkugel entspräche das einer Erhebung von nur 3,5 Zentimetern. Durch Auswertung von Hunderten dieser Bilder lässt sich das Volumen der Siliziumkugel sehr genau bestimmen. Nicolaus konnte zeigen, dass die Kugel fast perfekt ist – die Unebenheiten auf ihrer Oberfläche betragen maximal 50 Nanometer.

Elektromagnetische Wellen überlagern die Forscher nicht nur, um die Kugelgestalt auszumessen, sondern auch, um in das Innere des Kristalls zu sehen. Allerdings benutzen sie hierfür Röntgenstrahlung – denn sichtbares Licht dringt in diesen Kristall nicht ein, dazu ist es zu langwellig, zu „grob“. Im Kristallinneren sieht es in etwa so aus: Jedes Siliziumatom ist mit vier benachbarten Siliziumatomen so verbunden, dass sich ein Tetraeder ergibt. Der immer gleiche Atomabstand in dieser Struktur ist die Gitterkonstante

des Kristalls. Und diese Gitterkonstante lässt sich aus dem Interferenzmuster der Röntgenstrahlen ablesen.

Fehlt noch die Masse der Kugel. Um sie zu bestimmen, vergleicht man die Kugel in einer Präzisionswaage mit dem Masse-Normal der PTB. Dieses Vorgehen gewährleistet gleichzeitig, dass alte und neue Massedefinition nahtlos ineinander übergehen.

Theoretisch müssten all diese Bemühungen ausreichen, um die Anzahl der Atome in der Siliziumkugel zu bestimmen. Aber die Natur hat den Forschern einen Strich durch die Rechnung gemacht. „Natürliches Silizium besteht immer aus drei Atomarten, so genannten Isotopen, die sich in ihrem Atomgewicht unterscheiden“, erklärt Peter Becker. „Das häufigste ist das Si-28, daneben stecken aber noch rund fünf Prozent Si-29 und geringe Mengen Si-30 in unserer Kugel.“ Um ein Kilogramm auf eine atomare Masse zurückzuführen, muss man diese Tatsache berücksichtigen und die Zusammensetzung genau kennen. Dazu arbeiten die Braunschweiger mit Forschern im belgischen Geel zusammen.



Diese analysieren eine Probe des Materials, indem sie die Atome nach ihrem Gewicht trennen – in einem Massenspektrometer. Dort fliegen die Atome durch ein Magnetfeld: Schwerere machen dabei einen größeren Bogen, leichtere einen kleineren. Am Ende kann man sie an verschiedenen Stellen aufsammeln und zählen. Das Ganze funktioniert jedoch nur mit einem Gas. Also müssen die Geeler Forscher erst das Silizium in ein Gas überführen, natürlich möglichst ohne jede Verunreinigung, um das Ergebnis nicht zu verfälschen.

Um derartige Probleme zu vermeiden, haben sich die Avogadro-Forscher aber einen anderen Weg ausgedacht: Sie bestellten 2003 in Russland Silizium, das zu 99,99 % sortenrein aus dem Isotop Si-28 besteht. Die Technik zu dessen Herstellung ist die gleiche, wie sie bei der Anreicherung von Uran benutzt wird. Deshalb kommen den russischen Wissenschaftlern auch ihre Erfahrungen aus dem Atomwaffenprogramm zugute. Man arbeitet ebenfalls mit einer gasförmigen Verbindung, genauer gesagt mit Siliziumfluorid. Hunderte von Zentrifugen wirbeln das Gas durch, dabei fliegen schwerere Moleküle durch die größere Zentrifugalkraft schneller nach außen als leichtere. So bleiben nach und nach immer mehr der leichten Si-28-Atome im Gas zurück. Die Anreicherung geschieht in Sankt Petersburg, die anschließende Reinigung und Aufbereitung des Siliziums als Feststoff machen Forscher in Nischni Nowgorod, dem früheren Gorki.

In diesem Jahr kommt das hoch angereicherte Material in Berlin-Adlershof an, wo Spezialisten des Instituts für Kristallzüchtung einen Einkristall daraus ziehen. Aus diesem wiederum fräst die PTB eine Rohkugel, die 2007 für fünf Monate zum Polieren nach Australien geschickt wird. Wenn alles klappt, könnte Mitte 2007 die neue, hochreine Siliziumkugel für Messungen zur Verfügung stehen. Dann dürfte nicht mehr allzu viel Geduld nötig sein, bis endlich auf acht Stellen genau bekannt ist, wie viele Atome in ein Mol passen.

Brigitte Röthlein

Grafik:
In einem Kristall haben die Atome keine Wahl – ihnen sind genaue Plätze zugewiesen. Im Fall von Silizium ist die Grundeinheit dieser Gitterstruktur ein Kubus mit acht Atomen in den Ecken, sechs in der Mitte der Seitenflächen und vier auf den Raumdiagonalen im Inneren.

Im Räderwerk der Quanten-normale

Das Ampere, das Kilogramm und das Mol wird es weiter geben, aber man wird darunter wohl schon in wenigen Jahren etwas anderes verstehen als heute. Die Experten des „Internationalen Komitees für Maß und Gewicht“ sind sich einig, dass diese Basiseinheiten künftig direkt mit Naturkonstanten verknüpft sein sollen. Auf welche Weise allerdings genau – an dieser Frage erhitzen sich die Gemüter

Wir schreiben das Jahr 500 v. Chr.: Händler im Mittleren Osten wiegen Edelsteine mit Samen des Johannisbrotbaums auf. Denn sie wissen: Alle Samen sind nahezu gleich schwer. Betrug ist kaum möglich, denn jede Manipulation an den harten Kernen ist leicht erkennbar. Außerdem lässt sich die Messung mit eigenen Exemplaren der überall verfügbaren Pflanzensamen überprüfen. „Somit hatten schon die Menschen in der Antike die Idee, für Messungen eine Art Naturkonstante zu nutzen“, schmunzelt Franz Josef Ahlers. Der Leiter des Fachbereichs „Elektrische Quantenmetrologie“ hat die historische Wägung mit Johannisbrot-Samen schon einmal nachgestellt, um an einem Tag der offenen Tür den Besuchern der PTB einen ersten Zugang zu seiner wissenschaftlichen Arbeit zu verschaffen. „Was das Gewicht der Johannisbrot-Samen für die Händler war, ist für uns die Ladung eines Elektrons. Statt des Gewichts einer wertvollen Ware möchten wir mit der Naturkonstante „Elementarladung“ allerdings die Stärke eines Stroms messen“, erläutert Ahlers.

Wenn man exakt zählen könnte, wie viele Elektronen in einer bestimmten Zeit durch einen Leiter fließen, hätte man damit automatisch die Stärke eines Stroms bestimmt. Wie man dessen Wert angibt, ist dann eine Vereinbarung. Auch das verdeutlicht der Blick auf die Johannisbrot-Samen, die auf Griechisch Kération heißen: Aus ihrem antiken Gebrauch heraus ist die Einheit Karat entstanden, die dem Gewicht eines Samens – 200 Milligramm – entspricht und die bis heute in der Schmuckindustrie benutzt wird. Selbstverständlich lässt sich jedoch ein Diamant auch in Gramm aufwiegen.

Bei der Stromstärke ist die Einheit Ampere gebräuchlich. Würde man sie zu Gunsten einer Einheit „Elementarladung pro Sekunde“ aufgeben, entstände ein Wirrwarr – im internationalen Handel, in der Wirtschaft, in der Wissenschaft und in den Köpfen von Studenten. Doch eine teure und anstrengende Umstellung lässt sich vermeiden. Dazu muss sich die Weltgemeinschaft lediglich auf einen einzigen Satz einigen: „Das Ampere ist der elektrische Strom in der Richtung des Flusses von exakt $1/(1{,}602\,176\,53 \cdot 10^{-19})$ Elementarladungen pro Sekunde.“ Der angegebene Zahlenwert entspricht dabei dem derzeitigen Kenntnisstand. Für Elektriker, Ingenieure und Stromkonzerne bliebe nach einer solchen internationalen Übereinkunft alles beim Alten: Sie könnten wie bisher mit dem Ampere rechnen. Ausgemustert wäre jedoch die derzeitige Definition: „Die Basiseinheit 1 Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes, der, durch zwei im Vakuum parallel im Abstand 1 Meter voneinander angeordnete,

Foto: TH-Foto-Werbung/SPL/AgenturFocus

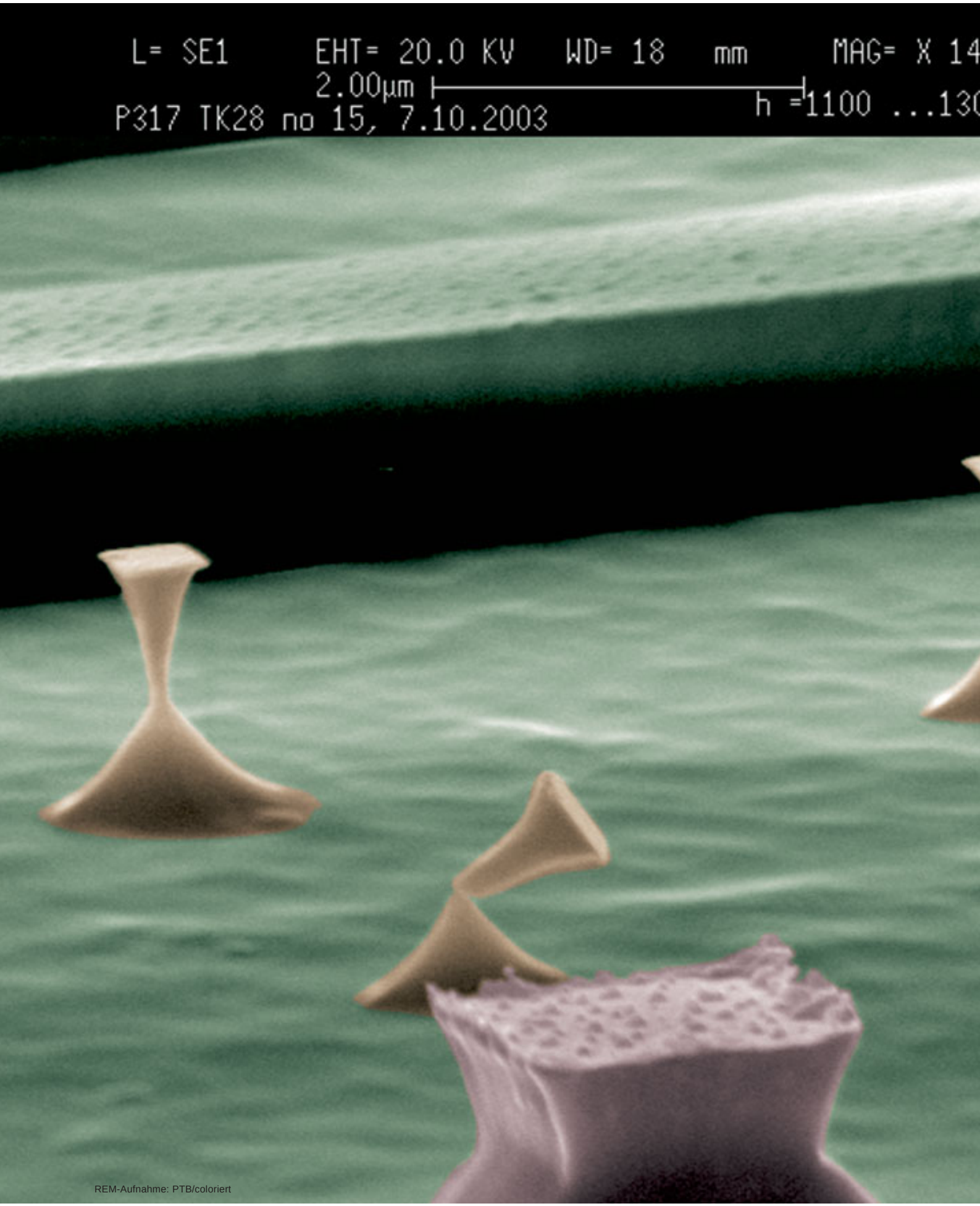
geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigen Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je 1 Meter Leiterlänge die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde.“ Schüler und ihre Physiklehrer atmen sicher erleichtert auf, wenn sie erfahren, dass sie sich künftig mit solch einem Satzungetüm nicht mehr herumschlagen müssen. Was aber wäre sonst gewonnen, wenn sich doch der alltägliche Umgang mit dem Ampere nicht ändert?

Die verblüffende Antwort von Metrologie-Experten: Die Gewissheit würde größer, dass ein in hochpräzisen Messungen erhaltenes Ergebnis „1 Ampere“ tatsächlich richtig ist, also dass in Wirklichkeit nicht beispielsweise 1,000 000 01 Ampere geflossen sind. „Das bisherige System verwendet Definitionen, die so schlecht umzusetzen sind, dass sie zu einer relativ hohen Messunsicherheit bei den Einheiten führen“, sagt Ahlers. In bestimmten Experimenten, deren Messergebnisse direkt mit Fundamentalkonstanten gekoppelt sind, können metrologische Staatsinstitute wie die PTB heute den Wert mancher physikalischer Größen immer wieder neu mit einer Präzision erzeugen – Fachsprache: reproduzieren –, die größer ist als die Genauigkeit einiger bisheriger Einheiten-Definitionen. Ahlers: „Eine Neufestlegung würde dem Rechnung tragen und wäre ein wichtiger Schritt hin zu industriellen Quantennormalen – vielerorts verfügbare, nutzerfreundliche und hochpräzise Geräte, mit denen Unternehmen die von ihnen eingesetzten Messinstrumente exakt kalibrieren können.“

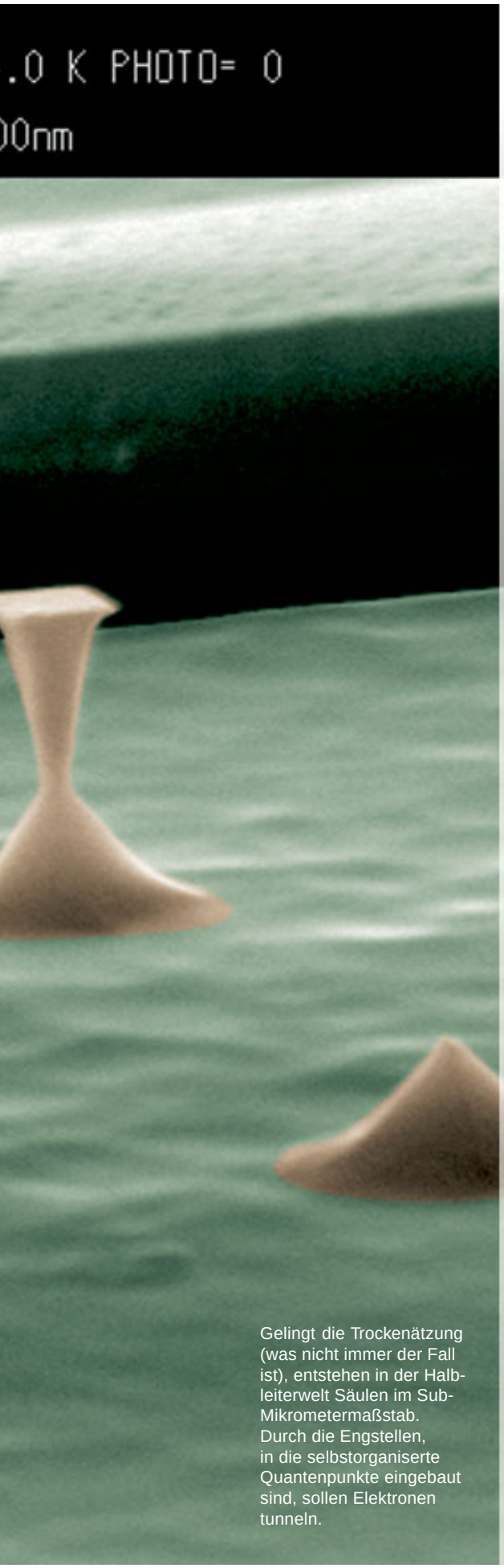
Mensch-Maschine-Kommunikation in der PTB. Franz Josef Ahlers an und in einem Experiment für Quantenelektronik.

Foto: okerland-archiv

Physikalische Größen und ihre Einheiten sind über eine Vielzahl von Formeln – Gesetzen – miteinander verbunden. Daher greift beim Einheiten-System wie bei einer mechanischen Uhr ein Rad ins andere. Wer an einer einzigen Stellschraube dreht, verändert das ganze Werk. Zum Beispiel ist über das heutige Ampere der Zahlenwert zweier Fundamentalkonstanten – der magnetischen und der elektrischen Feldkonstante des Vakuums – festgelegt. Nach einer neuen Ampere-Definition gibt es für diese Konstanten plötzlich eine Messunsicherheit, die für die Elementarladung – Symbol *e* – dagegen wegfällt.



REM-Aufnahme: PTB/coloriert



Gelingt die Trockenätzung (was nicht immer der Fall ist), entstehen in der Halbleiterwelt Säulen im Sub-Mikrometermaßstab. Durch die Engstellen, in die selbstorganiserte Quantenpunkte eingebaut sind, sollen Elektronen tunneln.

Insgesamt würden die resultierenden Veränderungen die Qualität unterschiedlichster Messungen verbessern. Ähnlich einem mechanischen Uhrwerk, das stabiler läuft, wenn man es an den richtigen Punkten aufhängt, so verringern sich auch die Messunsicherheiten, wenn man das Einheiten-System mit den richtigen Fundamentalkonstanten abstützt.

Hinzu kommt: Die elektrische Spannungseinheit Volt und die Widerstandseinheit Ohm lassen sich extrem präzise reproduzieren. Dabei nutzen die metrologischen Staatsinstitute physikalische Effekte aus, durch die *e* in Kombination mit dem so genannten „Planckschen Wirkungsquantum“ *h* sehr genau messbar ist. Da Stromstärke, Spannung und Widerstand direkt miteinander verknüpft sind, erscheint es sinnvoll, über eine neue Ampere-Definition *e* festzulegen und zusätzlich den Wert der Fundamentalkonstante *h* als „sicher“ zu bezeichnen.

Das wirft die Frage auf, warum die internationale Gemeinschaft am heutigen komplizierten Ampere-Begriff festhält. Wer auf Trägheit oder Tradition tippt, liegt falsch. „Probleme wirft auf, dass die elektrischen Einheiten über *h* auch mit der Masseneinheit Kilogramm zusammenhängen“, sagt Ahlers. Das Kilogramm, das durch einen Metallzylinder – des Internationalen Prototyp in Paris – verkörpert wird, bringt vergleichsweise große Unwägbarkeiten in das gegenwärtige Einheitensystem. Daher arbeiten Wissenschaftler fieberhaft daran, die Masse des Urkilogramms auf Basis von Fundamentalkonstanten genau zu bestimmen. Gelingt dies ausreichend gut, steht auch bei der Masseneinheit eine Neudefinition an. Wäre dann aber bereits *h* festgelegt, müsste sich auch die Neudefinition des Kilogramms darauf beziehen – und nicht auf eine andere Naturkonstante, die Avogadro-Zahl N_A. Als weitere Möglichkeit könnten auch *h* und N_A fixiert werden, dann aber müsste die gegenwärtige Definition der Stoffmengeneinheit Mol angetastet werden. Stolze 60 Seiten lang ist ein aktueller Fachartikel, der sich mit den komplizierten Zusammenhängen beschäftigt.

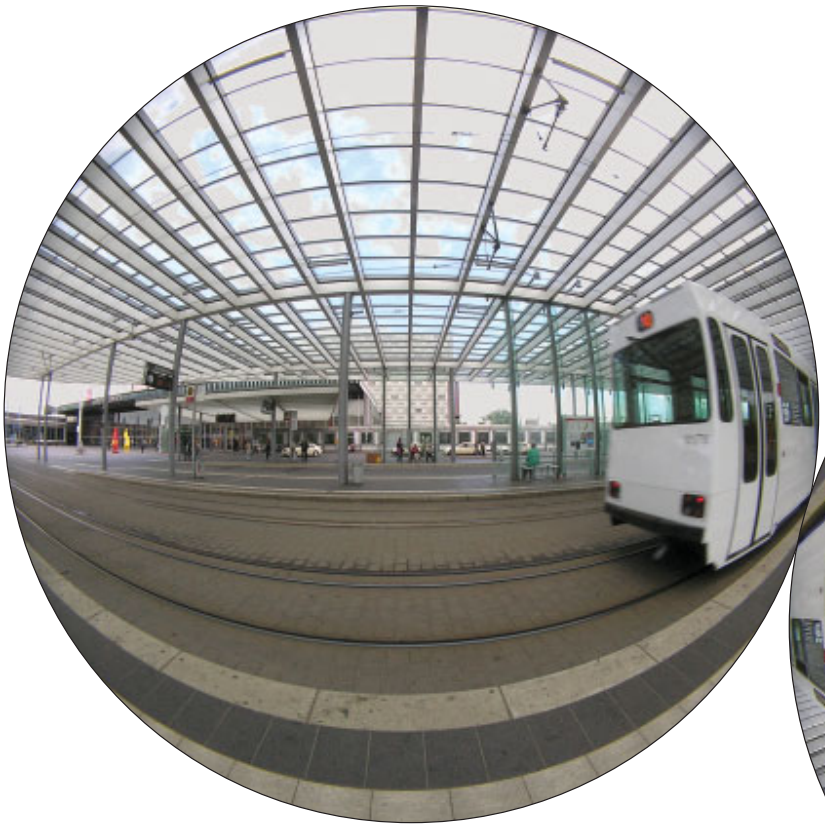
Wie zäh die Experten um eine Übereinkunft ringen, lässt das trockene Protokoll der 2005er Sitzung des internationalen „Beratendes Komitee für Einheiten (CCU)“ erahnen: „Es kam zu einer Diskussion über die alternativen Definitionen. Allgemeiner Tenor war, dass man die *h*-basierte Definition bevorzugt. Borghi und andere … vertraten den Standpunkt, dass wir vorsichtig die ganze Tragweite der alternativen Definitionen bedenken müssen. Gläser drückte seine persönliche Präferenz für die Avogadro-basierte Definition aus.“

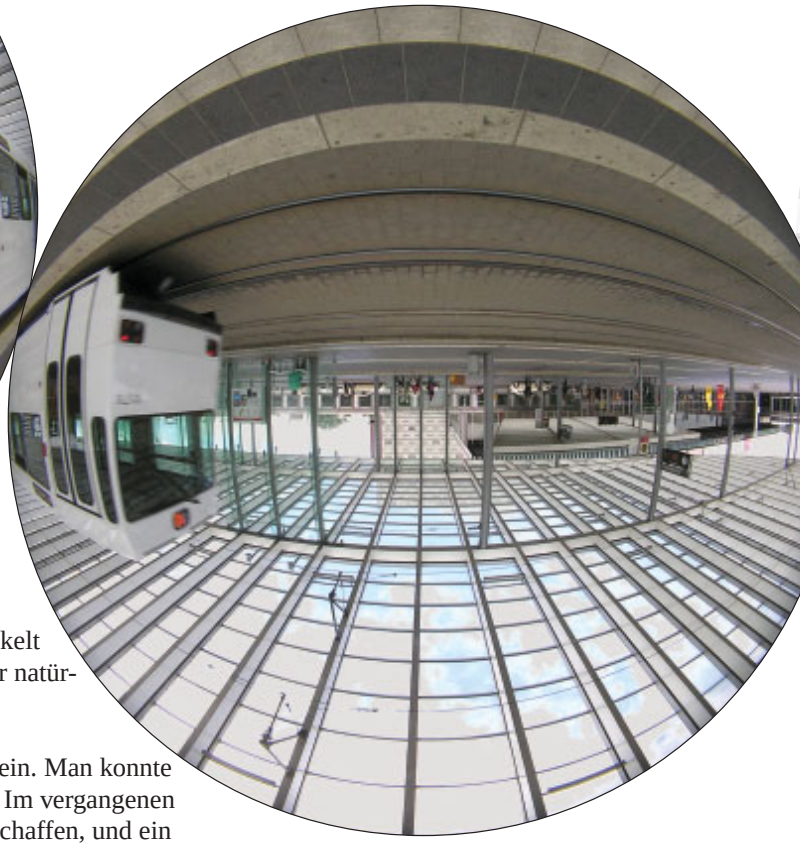
Die CCU-Experten verständigten sich jedenfalls darauf, dass eine Neudefinition von Ampere, Kilogramm, Mol und Kelvin vorbereitet werden sollte. Diese Empfehlung übernahm daraufhin auch das übergeordnete „Internationale Komitee für Maß und Gewicht“. Wann genau die Systemumstellung erfolgt, wird vom Erfolg der Kilogramm-Experimente abhängen. Doch auch bei der neuen Ampere-Definition ist bisher nicht alles klar: Noch speist sich der Wert $1/(1{,}602\,176\,53 \cdot 10^{-19})$ Elementarladungen darin aus Spannungs- und Widerstandsmessungen. Die Fundamentalisten unter den Messexperten werden aber erst dann zufrieden sein, wenn tatsächlich Elektronen ähnlich wie Johannisbrot-Samen gezählt wurden oder wenn sich zumindest die Elementarladung gleichsam nackt vor den Forschern zeigt. Entsprechenden Experimenten haben Franz Josef Ahlers und seine Mitarbeiter ihr berufliches Leben verschrieben.

Frank Frick

Meine Abenteuer als Fremde-Welten-Kundler

Teil eins: Die Prüfung





Ich stand in der Prüfungsmaschine. Der Raum war abgedunkelt und leer. Für Zuschauer war es einfach zu gefährlich; es war natürlich auch für mich gefährlich. Aber ich war ja der Prüfling.

Früher sollen Abschlussprüfungen recht harmlos gewesen sein. Man konnte durchfallen. Mehr passierte nicht. Bei uns ging es um alles. Im vergangenen Jahr hatte die Maschine n-dimensionale Prüfungsräume geschaffen, und ein paar Prüflinge hatten nicht in die vierdimensionale Raumzeit zurückgefunden.

Ich atmete tief durch und drückte vorsichtig den roten Knopf. „Level eins“, sagte eine strenge Frauenstimme. Sonst passierte gar nichts. Wenn man die Prüfung nicht gleich versteht, so hatte ich es gelernt, sollte man sich auf die Suche nach ihr machen. Also verließ ich die Maschine, ging aus dem leeren Raum, stieg das Treppenhaus hinunter und trat hinaus. Ich blinzelte in die Sonne. Alles war normal. Bis die Straßenbahn um die Ecke bog und in meine Richtung kam. Sie wurde schneller – und immer kürzer. Als sie an mir vorbeiratterte, waren die Türen so schmal, dass ich niemals durchgepasst hätte. Etwas weiter unten an der Straßengabelung gab es eine Haltestelle, und das wollte ich doch zu gern sehen, wie sich die Leute, die nicht dünner waren als ich, durch diese schmalen Türen quetschten. Also sprintete ich los.

Das heißt: ich bewegte mich so, wie ich es normalerweise tue, wenn ich lossprinte. Nur dass mir vor Anstrengung schon nach ein paar Schritten der Schweiß auf der Stirn stand und ich das Gefühl hatte, zwei Tonnen auf Trab bringen zu müssen. Und dann hörte ich die strenge Stimme sagen: „Zwei Punkte Abzug. Benutzen Sie Ihren Kopf.“ Es war offenbar die Prüfung selbst, die zu mir sprach und mich daran erinnerte, dass ich nicht Leichtathlet, sondern Ferne-Welten-Kundler werden wollte.

Die Straßenbahn stand mittlerweile an der Haltestelle; eine ganz normale Straßenbahn, in die Leute ein- und ausstiegen. Hatte ich Halluzinationen? Dann kam mir eine andere Erklärung in den Sinn: Konnte es sein, dass in dieser Prüfungswelt die Höchstgeschwindigkeit sehr klein war? Würde die Lichtgeschwindigkeit nicht 300 000 Kilometer pro Sekunde betragen, sondern beispielsweise 50 Kilometer pro Stunde, dann wäre schon ein Fahrradfahrer, der an mir vorbeifährt, in Fahrtrichtung verkürzt. Für den Radfahrer wäre ich verkürzt, während er an mir vorbeifährt. Man könnte die Auswirkungen der Relativitätstheorie jeden Tag sehen. Und sie natürlich spüren, denn wenn man sehr schnell wird, nimmt die Masse zu …

Neben mir stand ein altes Fahrrad, nicht abgeschlossen, vielleicht war es für meine Prüfung dort abgestellt worden. Ich schwang mich drauf und probierte den Effekt mit der Massenänderung aus. Erstaunlich! Je schneller ich versuchte, in die Pedalen zu treten, desto schwerer wurde es, desto kürzer wurde aber auch der Weg, der vor mir lag. Langsam kam ich auf gleiche Höhe mit einem anderen Radfahrer, ein Student, schätzte ich. Neben mir fahrend sah er ganz normal breit aus. „Hallo“, rief ich ihm zu, „findest du es nicht anstrengend, bei einer so niedrigen Geschwindigkeitsbegrenzung unterwegs zu sein?“ Er sah mich seltsam an. „Es gibt hier kein Tempolimit. Du darfst so schnell fahren, wie du kannst.“ „Aber man kommt gar nicht vorwärts“, schnaufte ich. Auch diesen Einwand ließ er – wir waren inzwischen am Bahnhof angekommen – nicht gelten. „Erstens wird die Strecke immer kürzer, je schneller du fährst. Und wenn du auf die Uhr guckst: Ich finde, wir waren ziemlich schnell.“ Die Bahnhofsuhr zeigte fast zwanzig nach neun.

Meine Armbanduhr zeigte zehn nach neun. „Die Bahnhofsuhr geht vor“, sagte ich, etwas naiv. „Benutzen Sie Ihren Kopf“, sagte streng die Prüfungsstimme, „Kommst du vom Mond?“ fragte ungläubig der Student.

Während er sein Rad anschloss, ergänzte die Stimme: „Level eins abgeschlossen, berichten Sie“. Mir brach der Schweiß aus. Während ich noch über die Uhr nachdachte, begann ich stotternd meinen Bericht. „In dieser Welt ist – äh – die Konstante *c*, also die Lichtgeschwindigkeit, offenbar sehr – äm – klein, dadurch werden relativistische Effekte im Alltag sichtbar. Man sieht bewegte Objekte verkürzt, man spürt die relativistische Massenzunahme, und – äh – die Zeitdilatation macht Verabredungen quasi unmöglich. Denn meine Uhr, die sich mit mir und dem Fahrrad bewegt, geht viel langsamer als die Uhren, die fest montiert sind. Also: Jemand, der meine Fahrt vom Prüfungsgebäude zum Bahnhof beobachtet, misst ein längeres Zeitintervall als es für mich tatsächlich vergangen ist. Je schneller ich zum Bahnhof fahre, desto größer wird der Unterschied …“ Und dann fiel mir noch was Praktisches ein: „Wenn ich länger jung bleiben will, muss ich eigentlich nur ständig durch die Gegend fahren. Am besten, ich nehme meine Freunde mit, sonst sind die plötzlich doppelt so alt wie ich.“

Mit einem hellen Klick wie bei einer automatischen Fahrstuhltür sagte die Stimme: „Level zwei“. Der Student war weg, sonst hatte sich meine Umgebung nicht geändert. Und weil die Bahnsteige noch leerer waren als die kleine Kneipe links im Bahnhofsgebäude, öffnete ich die Tür und spähte hinein. Am Billardtisch setzte eine junge Frau gerade zum Stoß an und – Bingo! – dies war ganz sicher der gesuchte Level zwei: Die angestoßene Kugel verlor ihre Kontur. Es sah aus, als vervielfältige sie sich in viele schattenhafte Kugeln, die sie wie in einem Schwarm links und rechts begleiteten. Mir fiel ein Stein vom Herzen, denn jetzt wusste ich, was hier passierte. Die Prüfungsmaschine hatte „Mr. Tompkins in Wonderland* “ gelesen, ein kleines kurioses Büchlein des Physikers George Gamow aus den 40er Jahren, und sich davon inspirieren lassen. Dies war das Kapitel „Quantenbillard“, und ich konnte es auf Anhieb erklären.

Damit die Prüfung mich hörte und mir dieses Mal zwei Extra-Punkte gab, dozierte ich laut vor mich hin: „Hier ist die Planck-Konstante *h* viel größer als in unserer normalen Welt …“ – die Billardspielerin guckte irritiert, aber ich ließ mich nicht beirren, „… deshalb kann man die Merkwürdigkeiten aus der Quantenwelt an normalen Billardkugeln beobachten. Zum Beispiel die Unschärferelation: Eine Billardkugel hat nie gleichzeitig eine präzise Geschwindigkeit und einen präzisen Aufenthaltsort. Es bleibt immer eine Ungenauigkeit, und die ist etwa so groß wie *h*. Und weil *h* hier groß ist, kann man diese Ungenauigkeit des Ortes wie ein Verschmieren der Kugel sehen. Moment …“ , ich schob die Spielerin beiseite, nahm das Dreieck und legte eine Kugel hinein, die mit einem Flirren sofort das ganze Dreieck ausfüllte. „Jetzt habe ich den Ort der Kugel ziemlich genau bestimmt“, erklärte ich, „und deshalb ist jetzt ihre Geschwindigkeit verschmiert.“ In der Hoffnung auf Extra-Punkte fügte ich hinzu: „Und wenn wir etwas warten, wird die Kugel einfach durch ihr Gefängnis hindurchtunneln. Ich könnte mal berechnen …“ Es klickte.

„Begeben Sie sich zur Prüfmaschine“, sagte die Stimme emotionslos, „Level drei beginnt in 15 Minuten.“ Ich wusste, was das bedeutete: Level drei war nur im Schutz der Maschine zu überleben! Ich rannte aus der Kneipe zu meinem Fahrrad, und während ich gegen meine Massenzunahme antrampelte, während sich der Weg verkürzte und ich gleichzeitig spürte, wie ich selbst seltsam „verschmierte“, versuchte ich zu verstehen, was „in 15 Minuten“ bedeutete. 15 Minuten auf meiner Armbanduhr wären gut gewesen, aber ich vermutete, dass die Prüfmaschine ihre ruhende Uhr verwendete. Ich versuchte kurz, alle relativistischen Effekte gegeneinander aufzurechnen, aber ich war viel zu unscharf und zu nervös. Also fuhr ich mit schmerzenden Beinen so schnell ich konnte. Denn jetzt wurde es ernst, wirklich ernst.

Fotos (4): okerland-archiv

Was, wenn die Maschine im dritten Level Alpha veränderte, die Konstante aller Konstanten?! Anders als die Lichtgeschwindigkeit oder die Planck-Konstante hat Alpha, die Feinstrukturkonstante, keine Einheit. Sie ist universal und rätselhaft – sie hat ziemlich genau den merkwürdigen Wert „1 durch 137“. Um gegen mein verschmiertes Hirn andenken zu können, redete ich laut. „Die Lichtgeschwindigkeit in dieser Welt ist viel kleiner, die Planckkonstante viel größer – und Alpha hängt vom Produkt von beiden ab …“ Die Hoffnung, dass das Alpha dieser Welt, falls es im Level drei wirksam würde, sich deshalb nicht allzu viel von unserem unterscheiden würde, war trügerisch. „Wenn Alpha nur ein paar Prozent anders ist, gibt es keinen Kohlenstoff“, schrie ich den verkürzten Passanten am verkürzten Wegesrand zu. „Es kann kein Leben geben!“

Und mich vor allem nicht, dachte ich verzweifelt. Ungefähr sieben Minuten waren vergangen, auf meiner Uhr, als ich das Fahrrad vors Prüfgebäude warf, durch den schmalen Eingang rannte und in einer verschmierten Wellenfront die Treppe hochwalzte. Ich hörte das schreckliche Geräusch eines Countdowns, wusste aber nicht, wie lange er noch zählen würde, bis … es fing schon an! Die Luft begann, anders zu schmecken, überall um mich herum knackte es, wahrscheinlich löste auch ich mich auf. Ich rannte – volles Risiko – gegen die Tür des Prüfungsraums und durchtunnelte sie tatsächlich glatt, mit letzter Kraft hievte ich meine verschmierte Masse dorthin, wo ich den Eingang der mit Nullpunktenergie zitternden Prüfungsmaschine vermutete. Zusammen mit dem letzten Alarmton landete ich in der Maschine.

Die Welt draußen verdunkelte sich schlagartig. Die Maschine schwebte in Finsternis. „Ich glaube“, murmelte ich, „in dieser Welt ist Alpha kleiner als bei uns, es kann dann nur Sterne geben, die kleiner sind als die Sonne. Und in kleinen Sternen können keine schweren Elemente erzeugt werden. Es gibt also keine Sonne, keine Erde und kein Leben.“ Das nächste, was ich sah, waren die Gesichter meiner Kommilitonen, die ängstlich in die Maschine starrten und mich dann – erleichtert – am Boden liegen sahen.

Ja, das war meine Abschlussprüfung zum „Welten-Kundler“. Unsere Feier verlief sehr gedämpft, denn drei von uns hatten nicht bestanden, einer war nicht zurückgekommen. Und natürlich wussten auch wir anderen, dass diese erste „echte“ Erkundung nur der Anfang war. Wir hatten einen gefährlichen Job – aber wir hatten ihn uns ausgesucht. Und bis heute sind wir unserem Motto treu geblieben. Die Welt ist nicht genug; entdecke die Möglichkeiten.

Julia Förster

* George Gamow: Mr. Tompkins im Wunderland

Wenn wir in das Universum hinausblicken und erkennen, wie viele Zufälle in Physik und Astronomie zu unserem Wohle zusammengearbeitet haben, dann scheint es fast, als habe das Universum gewusst, dass wir kommen.

FREEMAN J. DYSON

Foto: Yann Arthus-Bertrand/Altitude

Mensch im Glück

Die Katastrophe lauerte gleich hinter der nächsten Ecke. Sie wäre, hätte sie sich hervorgewagt, vollständig gewesen. Aber die Welt und mit ihr die Menschheit hatte unwahrscheinliches Glück. In der Geburtsstunde des Kosmos fügten sich die Dinge – niemand weiß, warum – auf eine einzigartige Weise und alles nahm seinen Lauf: Energie wandelte sich in Materie; aus ersten Materieteilchen bildeten sich Verklumpungen; irgendwann entstanden Sonnen, die in ihrem Inneren schwere Elemente zusammenkochten; Sterne explodierten und schleuderten ihre Fracht ins All; die umherfliegenden Bruchstücke sammelten sich zu Staubwolken und Planeten; einer dieser Planeten fand seine Bahn in kommoder Entfernung zu einem Zwergstern mittlerer Klasse; Wasser und eine Sauerstoff-Stickstoff-Atmosphäre machten den Planeten zu einem blauen; Leben entwickelte sich und kroch irgendwann an Land; und heute, 13,7 Milliarden Jahre nach dem Urknall, steht homo sapiens sapiens da, schaut ins Weltall und wundert sich.

Und beginnt Fragen zu stellen. Warum sind wir überhaupt da? Hätte nicht alles auch ganz anders kommen können? Wenn wir aber offensichtlich hier sind, was war nötig, dass dies geschehen konnte? Fragen dieser Art. Bei solch grundlegenden Fragen könnte Mensch anfangen nachzudenken, vielleicht mit folgendem Ergebnis: Diese Welt ist so irrwitzig komplex, sie bringt Sternennebel und Mondscheinnächte, Pantoffeltierchen und Philosophen hervor. Hätte dies und alles andere nicht ganz leicht ins Wasser fallen können?

Es hätte! Nämlich dann, wenn die Naturgesetze nicht ebenso wären, wie sie sind. Schon leichte Änderungen in den Naturkonstanten, die als mysteriöse Größen in den Naturgesetzen auftauchen, würden jede denkbare Form von Leben im Weltall – und also auch uns – verhindern. Da wir keinerlei Gründe für die Werte der Naturkonstanten kennen, können wir nicht ausschließen, dass auch jeder andere Zahlenwert für jede einzelne der Konstanten in der Geburtsstunde möglich gewesen wäre. Jede Wahl hätte zu einer ganz eigenen Welt geführt. Wobei die allermeisten dieser Welten furchtbar langweilig, nämlich leblos ausgefallen wären. Auf der Welten-Landkarte der Naturkonstanten existiert nur eine ganz kleine „bewohnbare“ Insel und wir haben das Glück, auf ihr zu leben. Glück? Großes Glück! Denn die Alternative zum Inselleben wäre: gar kein Leben.

Drehen wir doch einmal gedanklich an einigen der Naturkonstanten und schauen der Katastrophe ins Auge. Nehmen wir einfach diejenigen Konstanten, die ein Maß für drei der fundamentalen Kräfte in der Natur sind: Ändern wir in unserem Gedankenexperiment die Stärken der elektromagnetischen Kraft, die alle Phänomene zwischen geladenen Teilchen wie Elektronen und Protonen regiert, der starken Kraft, die zwischen Protonen und Neutronen wirkt und damit die Atomkerne zusammenhält, und schließlich ändern wir die Gravitationskraft, die dafür sorgt, dass alles, was eine Masse hat, sich anzieht.

Heikle Kinderstube Sonne

Zunächst ändern wir die elektromagnetische Kraft, die für den Aufbau der Atomhüllen verantwortlich ist, die in allen chemischen Bindungen der Moleküle „sichtbar“ wird, die aber zugleich auch innerhalb eines Atomkerns die Abstoßung zwischen den Protonen reguliert. Die Masterkonstante für diese Kraft: die Feinstrukturkonstante Alpha. Sie ist es, die den Elektronen und Protonen ihre Plätze im Atom zuweist – ein neues Alpha und schon geht das große Umsortieren los, da alle Energieniveaus in der Atomhülle und im Atomkern in allen Atomsorten betroffen wären. Also auch die Energieniveaus in dem Atom, aus dem wir vorwiegend bestehen: dem Kohlenstoff. Kohlenstoff wird im Universum nur an ganz bestimmten Stellen ausgebrütet: in Sternen.

Der stellare Geburtsvorgang des Kohlenstoffs, bei dem aus leichten Kernen schwere Kerne werden sollen, vollzieht sich in mehreren Schritten (aus vier mach acht mach zwölf). Die Grundsubstanz sind Heliumkerne, sogenannte Alphateilchen, die aus zwei Protonen und zwei Neutronen bestehen (mit vier fangen wir an!). Stoßen zwei Heliumkerne heftig aufeinander, was bei den Bedingungen im Sterninneren häufig der Fall ist, verschmelzen beide zu einem Berylliumkern mit vier Protonen und vier Neutronen (macht acht). Zum Kohlenstoff (zwölf) fehlt noch ein Schritt: der Berylliumkern muss sich noch einen weiteren Heliumkern einfangen. Dies tut er auch tatsächlich, da seine eigene Lebensdauer von immerhin 10^{-16} Sekunden ausreicht, um einen von den zahlreichen Heliumkernen in der Nachbarschaft zu treffen, und weil die Energieniveaus von Ausgangskernen und Endkern gerade richtig justiert sind, dass diese Reaktion wahrscheinlich ist. Damit wären wir beim Kohlenstoff-Happy-End gelandet. Aber

warum hört das Heliumeinfangen hier einfach auf? Der Kohlenstoff könnte sich doch einfach (aus zwölf mach sechzehn) mit einem weiteren Heliumkern zu einem Sauerstoffkern verbinden. Und hier kommt auf sehr feinsinnige Weise Alpha ins Spiel. Das Alpha, wie es heute ist, sorgt dafür, dass die Energiestruktur des Sauerstoffkerns gerade nicht besonders gut zur Kernreaktion von Kohlenstoff mit Helium passt. Diese Kernreaktion ist daher selten, was sich aber schlagartig änderte, hätte Alpha einen leicht anderen Wert. Schon leichte Verschiebungen um wenige Prozent würden die Verhältnisse kippen und für ein „Aussterben“ der Kohlenstoffkerne im Inneren der Sonnen sorgen. Stirbt der Kohlenstoff aus oder wird einfach nur das genau ausbalancierte Verhältnis der Kohlenstoff- und Sauerstoffproduktion gestört, hat das „Folgeprodukt Mensch“ keine Chance. Dank Alpha können wir sagen: Glück gehabt!

Diffizile Massenverhältnisse

Wo wir schon von Kernphysik sprechen, können wir gleich der nächsten fundamentalen Kraft ins Handwerk pfuschen: der starken Kernkraft, die dafür sorgt, dass die elektromagnetische Abstoßung der Protonen im Kern überkompensiert wird und somit stabile Kerne überhaupt erst möglich werden. Der Zahlenwert, den wir jetzt vorsichtig verändern wollen, ist das Massenverhältnis des Protons zum Neutron. In unserem Universum ist es so eingerichtet, dass das Neutron einen Hauch gewichtiger als das Proton ausfällt – genauer gesagt: das Neutron ist um weniger als ein Prozent schwerer. Um es vorweg zu sagen: Gottseidank ist es um eben diese kleine Differenz schwerer! Denn so wie es ist, zerfällt ein sich selbst überlassenes Neutron zwar binnen weniger Minuten in ein paar Bestandteile, darunter in ein Proton, aber gebunden in einem Kern bleibt das Neutron stabil. Erhöhen wir jedoch die Massendifferenz nur ein wenig, dann würde bei einem Neutronenzerfall auch etwas mehr Energie frei und Neutronen wären in einem Atomkern keine sicheren Kantonisten mehr: Atomkerne würden durch die Abstoßung der in ihrem Inneren neu entstandenen Protonen einfach zerplatzen.

Aber auch eine Änderung in anderer Richtung wäre fatal. Drehen wir jetzt das Massenverhältnis einmal um und geben also dem Proton einen kleinen Masseüberschuss gegenüber dem Neutron, dann würde plötzlich das Proton (auch jenseits des radioaktiven Beta-Zerfalls) instabil und zerfiele in seine leichteren Nachkommen, darunter ein Neutron. Und dieser Zerfall wäre sogar im gebundenen Zustand eines Atomkerns energetisch begünstigt. Dies liefe auf ein Universum hinaus, das aus nichts als Neutronen bestünde. Schöne eintönige Welt!

Keine gelben Zwerge mehr

Schließlich legen wir einmal Hand an die Kraft, die zwar die schwächste von allen ist, die aber doch alles beschwerlich macht. Wagen wir uns an die Gravitation. Drehen wir sie etwas herunter, würde uns die Erde weniger hart auf den Boden pressen und die Evolution – so stellen wir uns cartoonartig vor – hätte uns auch zu Riesen machen können. Erhöhen wir dagegen die Gravitationskonstante, so würden wir vielleicht platt wie Käfer über den Boden krabbeln. Ob ein solches Käferleben angenehm wäre? Keine Ahnung. Aber soweit würde es bei geänderter Gravitationskonstante gar nicht kommen. Denn natürlich würden auch die Planeten in unserem Sonnensystem andere Bahnen ziehen und es wäre fraglich, ob wir wieder auf einer derart begünstigten Bahn im richtigen Abstand zur Sonne, unserem Gelben Zwerg, landeten. Aber auch soweit würde es gar nicht kommen. Denn die Typologie der Sonnen im Universum wäre eine völlig andere, stünden Gravitationskraft und elektromagnetische Kraft in einem anderen Verhältnis zueinander. Eine größere Schwerkraft triebe die Sonnenentstehung in Richtung der massereichen Blauen Riesen, die aber so gierig sind, dass sie die Entstehung von Planetensystemen verhindern. Eine geringere Schwerkraft hingegen produzierte vor allem massearme Rote Zwerge, die zwar Planetensysteme ermöglichen, dafür aber am Ende ihres Daseins nicht explodieren. Ohne Supernovae jedoch könnten die Sterne ihre erbrüteten schweren Elemente, etwa den Kohlenstoff, nicht mehr ins Weltall schleudern. In beiden Fällen also hätte ein Leben, wie wir es uns vorstellen können, keine Chance.

Das Inselprinzip

Die glücklichen Fügungen, an deren vorläufigem Ende der Mensch steht, sind – das lebenermöglichende Geflecht der Naturkonstanten als kleiner stellvertretender Beleg – überaus zahlreich und auf das Harmonischste aufeinander abgestimmt. Wie bei einem Mobile kommt alles ins Trudeln, sobald nur an einem der vielen Fäden gezogen wird. Etwas zu stark gezogen und das gesamte Gefüge stürzt ab. Die Tatsache, dass wir da sind, führt manche zum Glauben. Zum Glauben an einen Gott, der hier seine Finger im Spiel hat und von Anfang an geplant hat, worauf alles hinauslaufen soll. So könnte es sein. Aber es könnte auch alles viel profaner sein. Vielleicht ist unser Universum nur eines unter unzähligen anderen, von denen die meisten wüst und leer sind. Und wir? Wir sitzen halt in dem, in dem Leben möglich ist – und staunen trotzdem. Wir sind reif für die Insel!

Jens Simon

Der Strichcode der Quasare

Die Feinstrukturkonstante Alpha ist der Topkandidat bei der Suche nach veränderlichen Naturkonstanten. Kernphysiker fahnden in einem einst aktiven natürlichen Reaktor, Astronomen im Licht weit entfernter Galaxien nach Belegen dafür, dass sich Alpha geändert hat und somit vor Urzeiten die Atome anders aufgebaut waren.

Alpha ist keine schöne Zahl: 0,007 297 352 568 oder ungefähr 1/137. Solche krummen Werte lassen das Herz eines Physikers nicht gerade höher schlagen. Und doch: Bei den Theoretikern ist die Feinstrukturkonstante äußerst beliebt: Sie sei eine „magische Zahl“, schrieb zum Beispiel der Nobelpreisträger Richard Feynman. Auch für den Kosmologen John Barrow von der Universität Cambridge hat sie einen „legendären Status“. Kein Wunder: Von Alpha – genauer gesagt, von Alphas Unveränderlichkeit – hängt nichts weniger als das Schicksal der Physik ab. Sollte Alpha sich als veränderlich erweisen, dann wäre das unter anderem ein Hinweis für eine Physik jenseits des Standardmodells, mit einem Universum mit mehr als vier Dimensionen. Aber es wäre noch viel mehr: Das ganze Weltbild der Physiker würde ins Wanken geraten. Was bisher als unveränderlich gegolten hat, ist es vielleicht gar nicht – eine atemberaubende Vorstellung. „Es geht nur um winzige Abweichungen“, erklärt der Hamburger Astrophysiker Dieter Reimers. „Doch jede noch so kleine Veränderung von Alpha wäre eine Sensation.“

Foto: François Gauthier-Lafaye/Centre de Géochimie de la Surface, Strasbourg

Uranmine bei Oklo im afrikanischen Gabun

Alpha ist aus zwei Gründen prädestiniert, um Veränderungen der Naturkonstanten auf die Spur zu kommen: Erstens muss man sich nicht mit Einheiten abmühen, denn die Feinstrukturkonstante ist eine einfache Zahl. „Misst man dagegen die Lichtgeschwindigkeit *c* zweimal hintereinander und erhält verschiedenen Werte,“ sagt der Astrophysiker Michael Murphy aus Cambridge, „dann könnte man daraus schließen, dass sich *c* wirklich geändert hat. Genauso gut könnte sich aber auch die Zeit verlangsamt oder beschleunigt oder der Metermaßstab verändert haben.“ Alpha ist natürlich nicht irgendeine Zahl, sondern sie gibt das Verhältnis zwischen drei Naturkonstanten an: der Lichtgeschwindigkeit *c*, der Elementarladung *e* und des Planckschen Wirkungsquantums *h*. Schwankungen von Alpha würden anzeigen, dass sich das Verhältnis dieser Größen verändert hat, also dass mindestens eine der drei Konstanten nicht konstant ist. Welche das ist, müsste man dann noch herausfinden.

Spuren im Reaktor: Alpha geschrumpft?

Der zweite Vorteil der Feinstrukturkonstante ist, dass sie in vielen verschiedenen physikalischen Gleichungen auftaucht. So öffnen sich den physikalischen Detektiven mehrere Möglichkeiten der Spurensuche. Die erste führt in den Kern eines Atoms. Weil Alpha als Kopplungskonstante die elektromagnetische Kraft regelt, die alle Atome und Moleküle zusammenhält, spielt sie auch bei Kernreaktionen eine Rolle. Und die haben an einem Ort der Erde schon vor langer Zeit und ohne Zutun des Menschen stattgefunden: In den 1970er Jahren stellte sich heraus, dass eine Uran-Lagerstätte im westafrikanischen Gabun vor rund zwei Milliarden Jahren ein natürlicher Kernreaktor war, der Oklo-Reaktor. Er lief etwa eine Million Jahre lang und verbrannte dabei einige Tonnen Uran-235. Dieser Reaktor ist heute so etwas wie ein Archiv, das einen früheren Wert von Alpha aufgezeichnet hat: Man kann hier ablesen, ob eine solche Kernreaktion damals genauso ablief, wie sie heute ablaufen

würde. Wenn nicht, wäre das ein Hinweis auf Veränderungen von Alpha.

Schon 1976 wies der russische Physiker Alexander Shlyakhter vom Institut für Kernphysik in Leningrad darauf hin, dass der Oklo-Reaktor sich gut eignet, um eine Veränderung von Alpha zu testen. Anhand einer Elementanalyse in der Umgebung des Reaktors wies er nach, dass Alpha sich in den vergangenen zwei Milliarden Jahren höchstens um zwei Hundertmillionstel verändert haben kann. Der Physiker Steve Lamoreaux vom Los Alamos National Laboratory analysierte die Oklo-Daten 2004 zusammen mit Kollegen neu und kam zu dem Ergebnis, dass Alpha seit der Aktivitätsphase des Reaktors um bis zu 4,5 Hundertmillionstel kleiner geworden sei.

Spuren im All: Alpha gewachsen?

Eine andere Spur führt weg vom Atomkern zur Atomhülle. Denn die Feinstrukturkonstante bestimmt auch die Lage der Energieniveaus in den Atomen. Springt ein Elektron von einem Energieniveau in ein anderes, dann sendet es entweder ein Lichtteilchen aus oder absorbiert eins. Die Wellenlänge dieser Photonen hängt direkt von Alpha ab. Also lohnt es sich, Wellenlängen zu beobachten, denn sie führen die Forscher direkt zu kleinsten Veränderungen in der Struktur der Atomhülle.

Wenn Alpha früher einmal anders aussah, dann sahen auch Atome früher etwas anders aus. Also muss man Nachrichten von Atomen aus der Vergangenheit suchen. Die Forscher finden sie im All: verschiedenste Elemente in galaktischen Staubwolken, die sie mit dem Licht von riesigen natürlichen „Glühbirnen“ sichtbar machen: dem Licht von Quasaren, das die Astronomen mit ihren besten Teleskopen auffangen. Quasare sind Schwarze Löcher mit einer Masse von Milliarden Sonnen. Sie befinden sich bis zu zwölf Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt im Zentrum einer Galaxie und verschlingen große Mengen Staub und Gas. Weil sich die angesaugte Materie extrem aufheizt, strahlen Quasare heller als die umgebende Galaxie. Sie geben Licht in vielen Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums ab. Das Quasar-Licht, das heute auf der Erde ankommt, stammt aus einer Zeit, in der das Universum noch in den Kinderschuhen steckte. Dieses Licht spalten die Forscher mit einem Spektrographen in seine Wellenlängen auf. Ein Spektrograph funktioniert ähnlich wie ein Prisma, das sichtbares Licht in die Farben des Regenbogens zerlegt. Und dieses Licht erzählt eine Geschichte: Hat das Quasarlicht auf seinem Weg zur Erde eine galaktische Staubwolke durchquert, dann haben die darin enthaltenen Atome (zum Beispiel Magnesium, Aluminium oder Silizium) einige Wellenlängen aus dem Spektrum des Quasars absorbiert und so das Quasarlicht verändert – sie prägten dem Licht quasi einen Strichcode auf. Dieser Strichcode ist sehr charakteristisch für die einzelnen Elemente. Er zeigt ihre Energieniveaus, wie sie damals aussahen, als das Quasarlicht die Atome getroffen hat. Vergleicht man diesen Strichcode mit einem aus heutiger Zeit (bei denselben Elementen im Labor gemessen), kann man direkt erkennen, ob sich die Struktur der Atome – und damit auch Alpha – geändert hat.

Foto: David Nunuk/SBL/Agentur Focus

Die Observatorien Keck I und Keck II mit dem Kometen Hale-Bopp

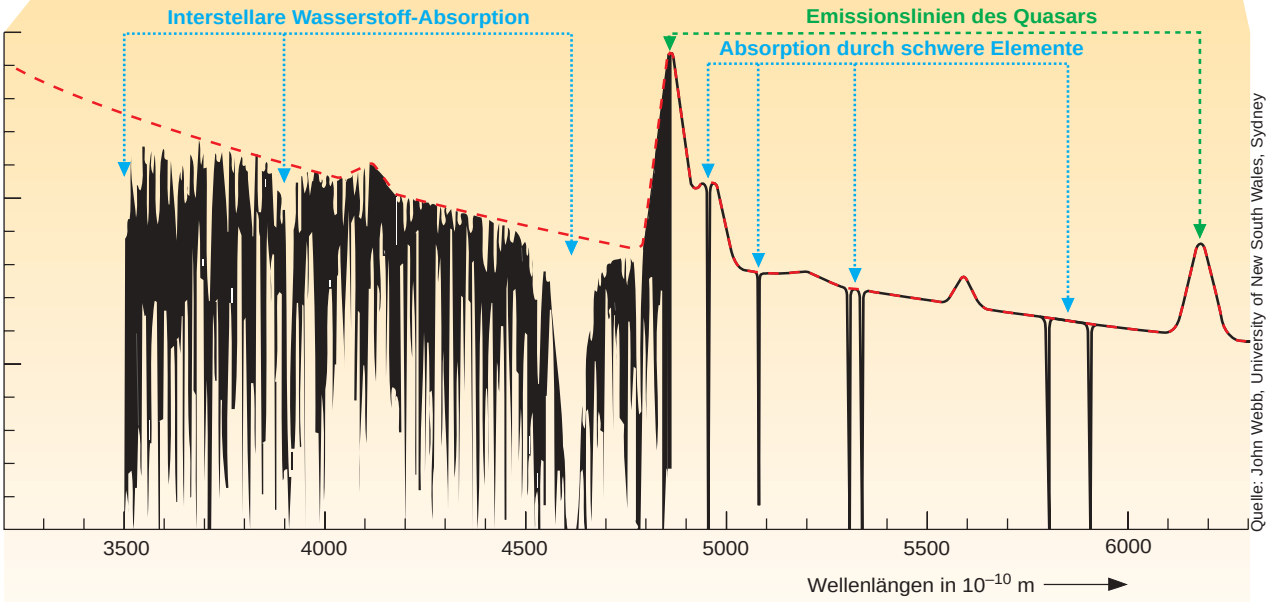
Alles noch unklar

Die bisherigen Ergebnisse der Quasarstudien sind widersprüchlich: Ein Team um John Webb von der University of New South Wales in Sydney, darunter auch John Barrow und Michael Murphy, verkündete im August 2001 in den Physical Review Letters die Sensation: Laut ihren Ergebnissen haben sich die Strichcodes im Laufe der Zeit verändert – und Alpha sei vor 12 Milliarden Jahren um etwa ein hunderttausendstel kleiner gewesen als heute. Die Forscher nahmen sich für diese und andere Studien insgesamt 128 Absorptionslinien von 75 Quasaren vor, die sie mit dem größten optischen Teleskop der Welt, dem Keck-Teleskop auf Hawaii, untersuchten. Niemand fand bisher einen systematischen Fehler. Trotzdem konnte seitdem keine weitere Gruppe von Astrophysikern das Anwachsen von Alpha bestätigen. Ein Team um Patrick Petitjean vom Observatoire de Paris benutzte den UVES-Spektrographen am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte in Chile und stellte fest, dass Alpha sich, wenn überhaupt, in den letzten zehn Milliarden Jahren um höchstens 0,6 Teile von einer Million verändert haben kann – also deutlich weniger, als das Team um Webb es behauptet. Ein anderes Team um Jeffrey Newman vom Lawrence Berkeley National Laboratory untersuchte Emissionslinien von 300 Galaxien in einer Entfernung von vier bis sieben Milliarden Lichtjahren – ebenfalls ohne Ergebnis. Dieter Reimers nahm sich den hellsten Quasar am Südhimmel ebenfalls mit dem Very Large Telescope vor und untersuchte speziell die Absorptionslinien von Eisen-Ionen. „Die Qualität der Daten ist sehr gut, aber im Rahmen der Messunsicherheit ist keine Änderung von Alpha zu sehen“, resümiert der Leiter der Hamburger Sternwarte.

Angesichts der widersprüchlichen Messungen sieht es so aus, als würde die Feinstrukturkonstante ihre mystische Stellung noch eine Weile behalten. „In der nächsten Zeit wird es bei den Quasar-Messungen keine entscheidenden Fortschritte geben, die Instrumente sind jetzt ausgereizt“, prognostiziert Dieter Reimers. Doch noch lassen sich die Verfechter einer neuen Physik nicht so leicht entmutigen. John Barrow vertritt die Theorie, dass Alpha nach der Entstehung des Universums zuerst langsam anwuchs, seit sechs Milliarden Jahren aber wohl konstant bleibt. So will er die Oklo- und die Quasar-Ergebnisse vereinbar machen. Andere gehen davon aus, dass Alpha oszilliert. Aber etwas unsicher sind sie alle. Der 2005 verstorbene Physiker John Bahcall vom Institute for Advanced Studies in Princeton sagte just in dem Moment, nachdem er anhand einer Studie mit 165 Quasaren Änderungen von Alpha für die letzten drei Milliarden Jahre ausgeschlossen hatte, dem britischen Magazin New Scientist: „Ich habe den Verdacht, dass Alpha sich tatsächlich mit der Zeit ändert“. Der Strohhalm, an den er sich klammerte: „Das Ausmaß der Variationen dürfte jenseits der derzeit möglichen Messmöglichkeiten liegen.

UTE KEHSE

Von fernen Quasaren ist das Licht Milliarden Jahre bis zu uns unterwegs. Alle „Hindernisse“, wie interstellare Gaswolken, hinterlassen in diesem Licht ihren Fingerabdruck – einen Strichcode aus Absorptionslinien. Das Bild zeigt die Simulation eines solchen Spektrums. Die rotgestrichelte Linie entspricht dem Lichtkontinuum, das der Quasar aussendet.



Quelle: John Webb, University of New South Wales, Sydney

Unser Wissen von der Welt ist vorläufig

Ein kurzer Besuch bei Ekkehard Peik

Ich vergesse immer wieder, dass unsere Welt aus Atomen besteht. Die kraftvollen weißen Magnolienblüten: Atome, das Vanilleeis im Waffelhörnchen: Atome, der Eiswagen, der Eisverkäufer, der heute wolkenlose Himmel, der wunderbar grüne Rasen, meine Karodecke, meine Sandalen, das Sommerkleid, die spielenden Kinder, ihre Roller, Dreiräder, Fussbälle und Zopfspangen: alles Atome; ebenso meine Zeitung und das laue Lüftchen, das bei diesem strahlendem Sonnenschein weht und nach Flieder, Lavendel und von weither nach Autoabgasen riecht. Was für ein plötzlich seltsamer Blick auf den Weltbaukasten!

Eine Ahnung von Ewigkeit kann einen da beschleichen. Und sie beschleicht mich auch an diesem wunderbar sonnigen Nachmittag. Okay, haltet sie an, die Welt, jetzt! – Wie immer passiert nichts. Munter wirbeln die Atome herum, gruppieren sich zu Magnolienblüten und allem anderen in dieser Welt. Ein paar trudeln gerade als verblühtes Blütenblatt auf meine Decke.

Wie ich zu dieser Vorstellung komme? Ich habe Herrn Peik getroffen.

Herr Peik vergisst niemals, dass die Welt aus Atomen besteht, nicht einmal unter der Dusche oder im Schlaf. Dabei ist Herr Peik ein Ästhet. Seine runde Brille mit dem schmalen Rand spricht ebenso dafür wie das helle Hemd mit den feinen Streifen und der Picasso-Druck an der Wand in seinem Büro. Für Herrn Peik liegt viel Schönheit in einer fundierten, dabei möglichst bestechend einfachen wissenschaftlichen Theorie. Und das nicht erst, seit er nach der Promotion für zwei Jahre mit einem Stipendium in Paris war.

Ein guter Beweis zeigt nicht nur, dass etwas wahr ist, sondern auch wieso. Und wenn beides der Fall ist, dann ist der entsprechende Beweis nicht nur gut und wahr, sondern auch schön, möchte ich mit Herrn Peik ergänzen, der schon immer genau wissen wollte, wie etwas funktioniert, und zwar „nicht nur technisch“, sagt Herr Peik.

Fotos (5): okerland-archiv

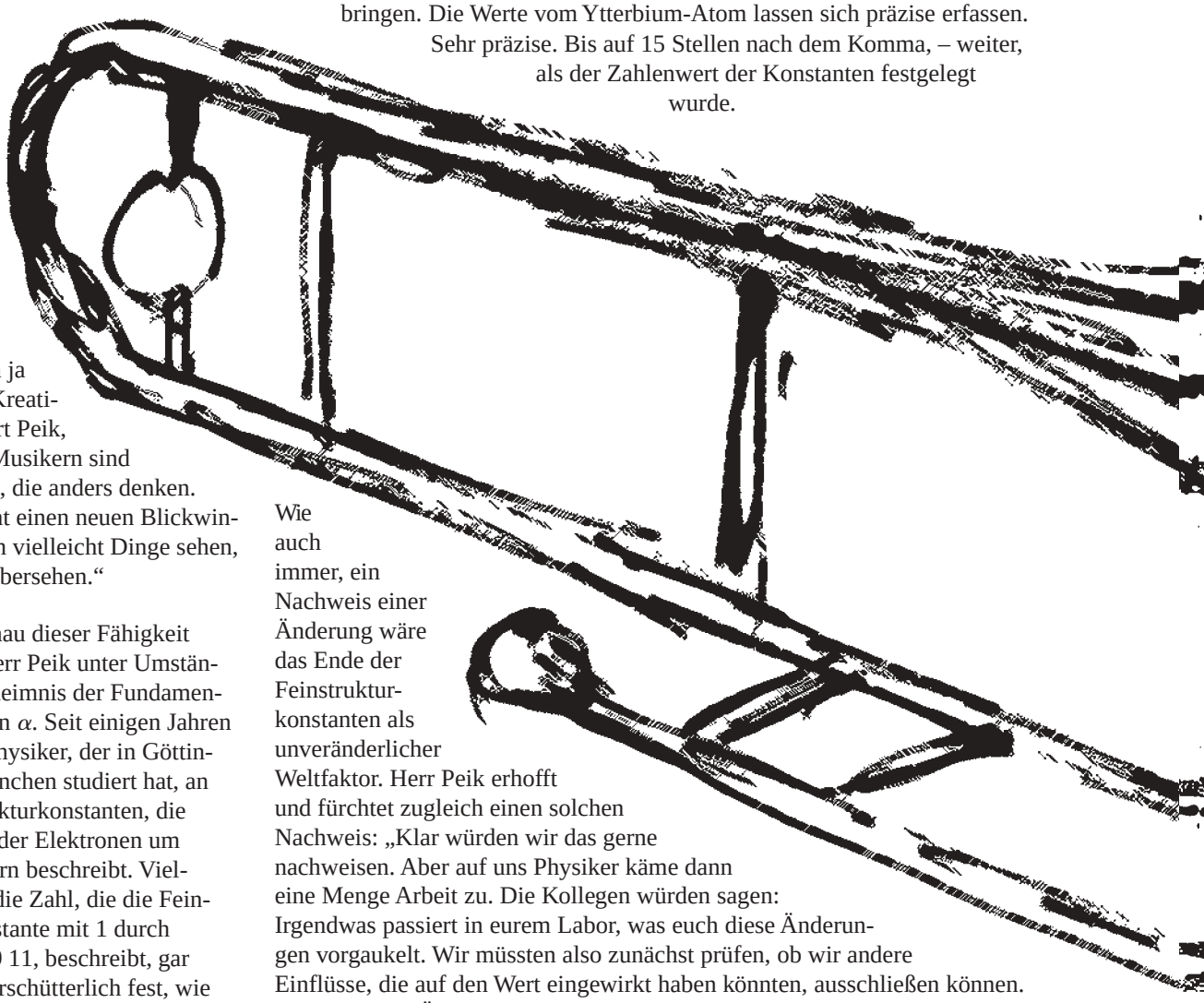
Ekkehard Peik, Jahrgang 1963, hat in der Schule in Göttingen etwas ganz anderes gelernt als ich. Vor allem im Physikunterricht. Schon da wurde ihm klar, dass ein guter Beweis nicht nur wahr ist und darüber hinaus auch zeigt, wieso etwas wahr ist. Eine weitere Regel besagte, dass jeder Beweis immer nur vorläufig sein kann. Vorläufig! Jedes Experiment, das die Lehrer von Herrn Peik mit ihren Schülern durchführten, zeigte immer nur: Bis hier wissen wir mit unseren aktuellen Mitteln vorläufig Bescheid. Näheres bleibt weiterhin Sache der Forschung, denn die genaue Kenntnis, die die Zukunft bringen könnte, wird unser Wissen verändern oder erweitern. Den Schüler Ekkehard Peik, der auch exzellent im Fach Mathematik war, faszinierte diese grundsätzliche Annahme. „Ich hatte einen sehr guten Physiklehrer“, erinnert sich der Sohn eines Chemikers.

Heute leitet Herr Peik die Arbeitsgruppe „Optische Uhren“ im Fachbereich „Zeit und Frequenz“ in der PTB und sieht diese vorläufige Kenntnis von der Beschaffenheit der Welt als persönliche Herausforderung. Doch der Physik gehört sein Herz nicht allein. „Orchestermusiker, das wäre noch eine Option gewesen“, erzählt Herr Peik, „aber das Physikstudium schien mir doch intellektuell spannender“. Die Posaune wurde sein Hobby und der Jazz in der Big Band der Technischen Universität inspiriert den Physiker für den Alltag in der Forschung. „Als Wissenschaftler braucht man ja auch diese Kreativität“, erklärt Peik, „unter den Musikern sind Typen dabei, die anders denken. Man gewinnt einen neuen Blickwinkel und kann vielleicht Dinge sehen, die andere übersehen.“

Und mit genau dieser Fähigkeit enträtselt Herr Peik unter Umständen das Geheimnis der Fundamentalkonstanten α. Seit einigen Jahren rüttelt der Physiker, der in Göttingen und München studiert hat, an der Feinstrukturkonstanten, die die Bahnen der Elektronen um den Atomkern beschreibt. Vielleicht steht die Zahl, die die Feinstrukturkonstante mit 1 durch 137,035 999 11, beschreibt, gar nicht so unerschütterlich fest, wie sie 1916 von Arnold Sommerfeld eingeführt wurde. „Schon in meiner Zeit im Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München haben wir uns dort mit Fragestellungen befasst, die mit der Feinstrukturkonstanten in Zusammenhang standen. Und auch hier in der PTB wurde an dieser Frage gearbeitet“, berichtet Herr Peik.

So schien es logisch, dass Ekkehard Peik mit seinen Forschungsanliegen nach Promotion und Habilitation in Braunschweig landete.

Es wäre tatsächlich möglich, dass sich der Zahlenwert der Feinstrukturkonstanten ändert. Vielleicht nur ein bisschen seit Bestehen der Welt, vielleicht nur gelegentlich ...? In den letzten Jahren sorgen astronomische Beobachtungen in der wissenschaftlichen Welt für Aufruhr, die besagen, dass sich vor Milliarden Jahren bedeutende Veränderungen an der Feinstrukturkonstanten vollzogen haben. Doch die Ergebnisse bleiben umstritten. Eine weitere Gruppe von Astrophysikern konnte diese Beobachtung nicht bestätigen. Kann die Atomuhr in dieser strittigen Frage weiterhelfen? Schließlich arbeitet sie mit einzelnen Atomen und gilt als das genaueste Messinstrument überhaupt. Der in der PTB unternommene Versuch, mit Hilfe der Atomuhr eine Änderung der Feinstrukturkonstanten zu ermitteln, könnte durch die hier mögliche sehr genaue Messung nähere Aufschlüsse bringen. Die Werte vom Ytterbium-Atom lassen sich präzise erfassen. Sehr präzise. Bis auf 15 Stellen nach dem Komma, – weiter, als der Zahlenwert der Konstanten festgelegt wurde.



Wie auch immer, ein Nachweis einer Änderung wäre das Ende der Feinstrukturkonstanten als unveränderlicher Weltfaktor. Herr Peik erhofft und fürchtet zugleich einen solchen Nachweis: „Klar würden wir das gerne nachweisen. Aber auf uns Physiker käme dann eine Menge Arbeit zu. Die Kollegen würden sagen: Irgendwas passiert in eurem Labor, was euch diese Änderungen vorgaukelt. Wir müssten also zunächst prüfen, ob wir andere Einflüsse, die auf den Wert eingewirkt haben könnten, ausschließen können. Und sollte die Änderung dann tatsächlich als erwiesen gelten, wäre die Wissenschaft zwar einen Schritt weiter, viele der heute geltenden Regeln und Nachweise müssten aber neu geprüft werden.“ Routiniert erzählt Herr Peik von seinen Forschungen und wagt eine Prognose: „Bisher haben sich noch keine Anzeichen für Änderungen gefunden. Aber wenn, dann werden sich alle Naturkonstanten irgendwie verändern.“ Und dann sagt er noch: „Das heutige Wissen der Physik ist unvollständig.“ Und schließlich: „Eine neue Erkenntnis in Sachen Feinstrukturkonstante wäre ein Nobelpreis.“ Dass die Nobelpreis-Urkunde physikalisch gesehen auch nur aus Atomen besteht, daran möchte ich jetzt nicht denken. Herr Peik sicher auch nicht.

Birgit Ehlbeck

Grafik: wysi/PTB

Leserbriefe zu Heft 6 „Zeitgeschichten“

Das ist ja ein geniales Heft!
Birgit Hans, Norderstedt, o. Datum

Herzlichen Dank, die Hefte sind ganz toll gemacht. Tolle Bilder. Tolle Beiträge. Super lehrreich und verständlich.
Sandra Metz, Köln, ohne Datum

Zu Ihrem 6. Heft der *maßstäbe* kann man Ihnen nur gratulieren. Die Einführung in die Problematik der Zeit ist methodisch und didaktisch hervorragend.
Adi Heß, Offenbach, 4.10.2005

Ich habe gestern Ihre 6. Ausgabe der „Zeitgeschichten“ erhalten und bin begeistert. So eine interessante Zusammenstellung von Beiträgen habe ich bisher selten zu lesen bekommen – auch wenn ich die Zeitschriften „GEO“ oder „Spektrum der Wissenschaft“ gerne und regelmäßig lese.
Kai Hock, Seeheim-Jungenheim, 5.10.2005

Die Auswahl ihrer Artikel sowie deren Inhalte sind hervorragend! Ebenso finde ich das Design, obwohl es manchmal schon etwas verwirrend sein kann, im Großen und Ganzen sehr erfrischend und innovativ.
Simon Tempel, 5.10.2005

Mir gefällt das Heft so, wie es ist. Das Heft hat einen „roten Faden“, d. h. jeweils ein gemeinsames Oberthema, und beleuchtet es in den verschiedenen Artikeln von ganz unterschiedlichen Seiten, teils mehr wissenschaftlich, teils mehr philosophisch. Jedenfalls macht diese bunte Mischung gerade den Reiz des Heftes aus.
Oliver Schmid, Ulm, 7.10.2005

Ich möchte diese Gelegenheit nutzen, Ihnen ein ganz großes Lob für Ihr Magazin auszusprechen! Als Physiker, der im Berufsalltag leider nicht mehr allzu viel mit Physik zu tun hat, ist ihr Magazin für mich immer wieder eine Freude!
Stephan Redmann, Bonn, 21.11.2005

Ein ausdrückliches Lob für die Themenwahl, Umsetzung und Gestaltung der Reihe. Es war mir immer eine Freude, mehr oder weniger (meist mehr) in den jeweiligen Heften mich vertiefen zu können. Vielfältige Anregungen für meinen Unterricht habe ich so für Unterrichtsthemen erhalten. Danke!
Werner Termaat, 8.10.2005

Als interessierter Leser der *maßstäbe* finde ich immer wieder wertvolle Beiträge für den Unterricht in der Oberstufe des Gymnasiums. Sehr angenehm hebt sich der lockere, unkonventionelle Schreibstil von anderen wissenschaftlichen Publikationen ab – ohne an sachgemäßer Darstellung zu verlieren. Kompliment – und weiter so.
Herbert Schmolze, Saarbrücken 10.10.2005

Seit Sie mich unfallfrei durch das Labyrinth des Zufalls geleitet haben, freue ich mich jedesmal, wenn ich eine Ausgabe der *maßstäbe* aus dem Briefkasten ziehe. Und auch diesmal wurde meine Vorfreude nicht enttäuscht. Hätte ich während meiner Schulzeit jemanden gehabt, der mich so durch physikalische Untiefen und Tiefen geleitet hätte, wer weiß, was dann hätte werden können.
Frank Becker, 12.10.2005

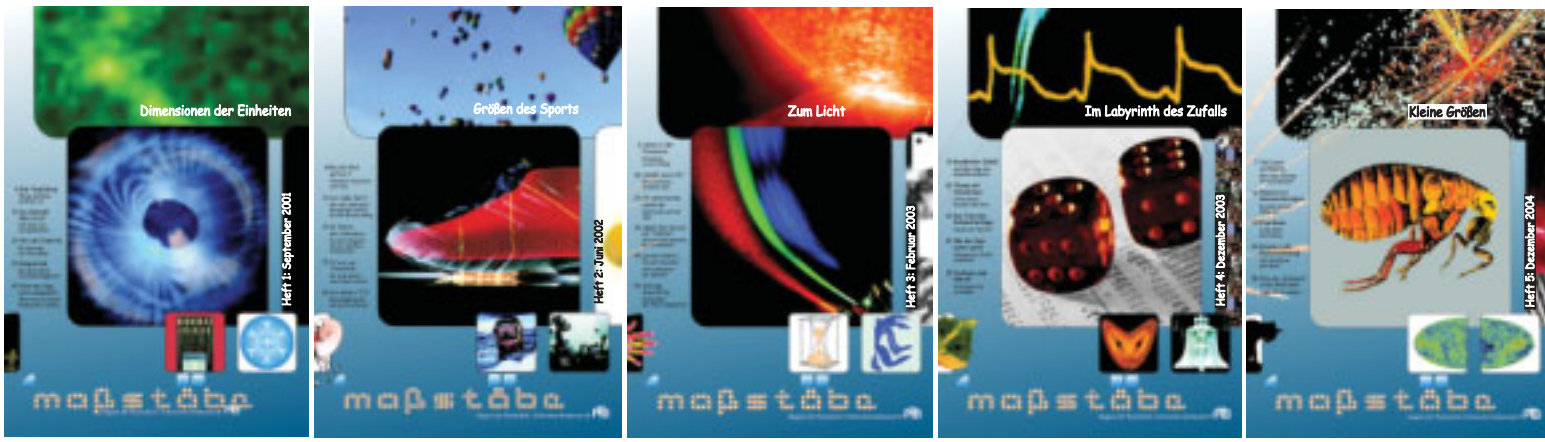
Natürlich machen Sie sich mit der neuen Ausgabe der *maßstäbe* wieder des Zeitdiebstahls schuldig! Aber von Ihnen lasse ich mich mit den „Zeitgeschichten“ gern bestehlen!
Georg Heymann, 14.10.2005

Zunächst muss ich ein großes Lob für dieses Magazin an die gesamte Redaktion aussprechen. Ich glaube, es gab noch nie ein Magazin, in dem ich in jeder Ausgabe auch wirklich jedes Wort gelesen habe. Und das, obwohl die Artikel meist nicht gerade kurz und ich eigentlich ein „Überschriften-Leser“ bin ;-) Alle Artikel enthalten neben dem Fachlichen immer eine sehr persönliche Note, die jeden Artikel von den anderen abhebt und deswegen einzigartig wissenswert, interessant und spannend macht. Eine Ausnahme bildet hierbei der Artikel „Auszeit“ im aktuellen Heft. Er hatte zu wenig Themaorientiertes.
Stefan Hüttenrauch, Beelitz, 16.10.2005

Mit Ihren „Zeitgeschichten“ behandeln Sie wieder ein sehr interessantes Thema aus dem Reich der Naturwissenschaften mit geradezu angelsächsischem pädagogischen Geschick. Ich hoffe, dass unsere Gymnasien jeweils ein Exemplar abbekommen, um die Schülerschaft an naturwissenschaftliche Probleme auf gefällige Art heranzuführen.
Gerhardt Soltau, 18.10.2005

Ich finde es klasse, wie Sie in relativ verständlichen Worten versuchen, Otto-Normalverbrauchern die Physik näherzubringen. Ihr Magazin ist viel interessanter als die Physikbücher meiner Schulzeit, mal ganz davon abgesehen, dass ich heute nie auf die Idee kommen würde, so ein Buch nochmal in die Hand zu nehmen. (Ich habe den Physikunterricht gehasst!)
Sabine Podubrin, Solingen, 23.10.2005

Zunächst gefällt mir, dass ein sehr gutes Deutsch durchgängig von allen Autoren gepflegt wird. Es wird nie ein Thema langatmig zu Tode geritten. Die Autoren verstehen es, mich bis zum Ende des Artikels zu fesseln. Man spürt, dass nicht Routine herrscht.
Heinrich Barthel, Lüneburg, Reformationstag 2005



Frühere Ausgaben der *maßstäbe*

Macht, Watt Ihr Volt, ich finde Ihre Arbeit faszinierend und bin „Bild der Wissenschaft“ dankbar, dass sie mich auf Ihre – noch dazu kostenlose – Publikationen hingewiesen hat.
Eckart W. Fitzke, Oyten, 26.11.2005

Kurz und bündig möchte ich meine Begeisterung über die Inhalte und die Aufmachung dieser Hefte zum Ausdruck bringen. Eine absolut kurzweilige Informationsquelle, die so super formuliert und erklärend ist, dass sogar ein Otto-Normalverbraucher, wie ich es bin, alles sehr gut verstehen kann!!! Macht weiter so, und ich freue mich schon auf die nächste Ausgabe. Danke :-)
Kurt Geißler, 1.3.2006

Dieses Magazin ist nicht nur physikalisch interessierten Menschen zu empfehlen, sondern auch denen, die von Physik im Moment noch nicht so viel Ahnung haben. Beleben Sie ihre Artikel weiterhin mit so guten Fotos, Bildern und Hintergründen! Weiter so!
Susanne Michel, Lautertal, 8.4.2006

Die Aufmachung macht sogar mir, einem Endfünfziger, richtig Lust aufs Lesen. Ich kann mir vorstellen, dass Sie den Geschmack von Jugendlichen, für die die *maßstäbe* ja gedacht sind, 100%ig treffen. Das gilt auch für die Länge der Artikel und die Bebilderung. Das größte Plus der Zeitschrift sehe ich in der Auswahl der Artikel und der Illustrationen: Da ist so viel Verblüffendes, Kurioses, praktisch Nutzbares, im Alltag Relevantes, dass es einfach Spaß macht. Das Niveau der Beiträge scheint mir gut angepasst. Wir wissen ja alle, wie schnell man einen naturwissenschaftlich/technischen Text „verdrögen“ kann – ich habe nur positive Beispiele gefunden. (Liegt es vielleicht daran, dass Ihre Autoren überwiegend Autorinnen sind?).
Ernst Dreisigacker, Hanau, 9.6.2006

Lesenswertes zu diesem Heft:

Barrow, John D.: Das 1 × 1 des Universums
Neue Erkenntnisse über die Naturkonstanten
Frankfurt/M. 2004 (Campus).
Auch als Taschenbuch, Rowohlt 2006

Barrow, John D.: Theorien für Alles
Die philosophischen Ansätze der modernen Physik
Heidelberg 1992 (Spektrum)

Breuer, Reinhard: Das anthropische Prinzip
Der Mensch im Fadenkreuz der Naturgesetze
Frankfurt/M., Berlin, Wien 1984 (Ullstein)

Bryson, Bill: Eine kurze Geschichte von fast allem
München 2005 (Goldmann)

Gamow, George: Mr. Tompkins im Wunderland oder
Träumereien von *c*, *g* und *h*
Wien 1954 (Paul Zsolnay Verlag)
Lieferbar als: Mr. Tompkins in Paperback
Cambridge University Press 2000

Genz, Henning: War es ein Gott? Zufall, Notwendigkeit
und Kreativität in der Entwicklung des Universums
München, Wien 2006 (Hanser)

Harris, Sidney: There Goes Archimedes. Cartoons
Sri Lanka 1993

Harris, Sidney: What’s so funny about Science?
Cartoons by S. Harris from American Scientist
Los Altos, Ca., 1970 (William Kaufmann, Inc.)

Harris, Sidney: Wenn Einstein recht hat ...
Science Cartoons. Basel 1997 (Birkhäuser)

Smolin, Lee: Warum gibt es die Welt?
Die Evolution des Kosmos
München 1999 (C. H. Beck)
Als Taschenbuch: dtv 2002

Das Letzte

oder: Das Erste zuletzt

Wenn Sie hier keine Karte mehr vorfinden, können Sie die *maßstäbe* als kostenloses Abonnement bei der Redaktion direkt bestellen. Ein Abo-Formular finden Sie auf unserer Internetseite.

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

☐ dieser Ausgabe (Heft 7)
☐ kommender Ausgabe (Heft 8)

an die umseitig angegebene Adresse.

Bitte schicken Sie mir zusätzlich das

☐ vierte Heft der *maßstäbe* „Im Labyrinth des Zufalls“
☐ sechste Heft der *maßstäbe* „Zeitgeschichten“.

Die Hefte 1 „Dimensionen der Einheiten“, 2 „Größen des Sports“, 3 „Zum Licht“ und 5 „Kleine Größen“ sind vergriffen. Sie finden die *maßstäbe* aber im Internet (www.ptb.de) unter „Publikationen“. Dort können Sie die Hefte im pdf-Format herunterladen.

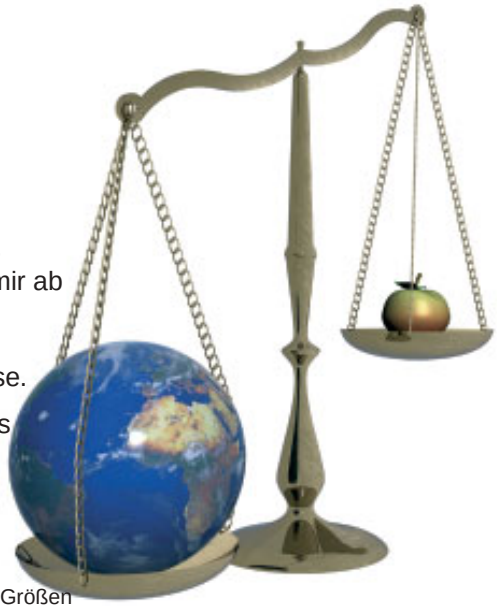
Ich möchte die *maßstäbe* kostenlos abonnieren. Bitte schicken Sie sie mir ab

☐ dieser Ausgabe (Heft 7)
☐ kommender Ausgabe (Heft 8)

an die umseitig angegebene Adresse.

Bitte schicken Sie mir zusätzlich das

☐ vierte Heft der *maßstäbe* „Im Labyrinth des Zufalls“
☐ sechste Heft der *maßstäbe* „Zeitgeschichten“.



Die Hefte 1 „Dimensionen der Einheiten“, 2 „Größen des Sports“, 3 „Zum Licht“ und 5 „Kleine Größen“ sind vergriffen. Sie finden die *maßstäbe* aber im Internet (www.ptb.de) unter „Publikationen“. Dort können Sie die Hefte im pdf-Format herunterladen.

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

☐ dieser Ausgabe (Heft 7)
☐ kommender Ausgabe (Heft 8)

an die umseitig angegebene Adresse.

Bitte schicken Sie mir zusätzlich das

☐ vierte Heft der *maßstäbe* „Im Labyrinth des Zufalls“
☐ sechste Heft der *maßstäbe* „Zeitgeschichten“.

Die Hefte 1 „Dimensionen der Einheiten“, 2 „Größen des Sports“, 3 „Zum Licht“ und 5 „Kleine Größen“ sind vergriffen. Sie finden die *maßstäbe* aber im Internet (www.ptb.de) unter „Publikationen“. Dort können Sie die Hefte im pdf-Format herunterladen.

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. Ein Abo-Formular finden Sie auf unserer Internetseite.