



### Die Zukunft des Einheitensystems (SI)

#### stabil

Konstanten als feste Basis für alles Messbare

#### genau

Punktlandung in den Metrologielaboren

#### innovativ

Technologische Fortschritte als Versprechen

#### abstrakt

Neue Definitionen der Einheiten sorgen für neuen Schulstoff

#### universell

Eine Sprache für alle, wirklich alle





# Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

diese *maßstäbe* sind ein lauter „Tusch!“ für einen grundlegenden Wandel im Internationalen Einheitensystem (SI), welcher auf der 26. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) im November 2018 beschlossen wurde: Kein Artefakt mehr wie das Urkilogramm (für die Masseskala) oder ein spezielles Isotopengemisch von Wasser (für die Temperaturskala) sollen die Einheiten definieren, sondern vielmehr das Stabilste, was die Physik zu bieten hat: Naturkonstanten. Diese tauchen in allen fundamentalen Gleichungen der Physik auf und bestimmen somit das „Regelwerk“ der Natur. Naturkonstanten als „Hauptdarsteller“ für die Einheiten? Auf eine solche Idee kamen schon vor weit über hundert Jahren große Geister wie James Clerk Maxwell, Ludwig Boltzmann und Max Planck. Und jetzt wird diese Idee ganz praktisch. Denn nachdem metrologische Institute auf der ganzen Welt in extrem aufwendigen Experimenten die Werte ausgewählter Naturkonstanten möglichst exakt gemessen haben, wurden deren Werte im November 2018 nun ein für alle Mal festgelegt. Am 20. Mai 2019, dem Weltmetrologietag jenes Jahres, wird „das neue SI“ in Kraft treten.

Unzulänglichkeiten bei den Definitionen von Kilogramm, Kelvin und Co. machten diesen Paradigmenwechsel notwendig. Besonders prägnant: Das Urkilogramm und seine Kopien unterscheiden sich in ihrer Masse zum Teil um ein halbes Mikrogramm pro Jahr – ein auf Dauer unhaltbarer und im Detail unverstandener Effekt. Ähnlich ergeht es anderen Einheiten, was ironischerweise derzeit dazu führt, dass die offiziellen Werte der Naturkonstanten regelmäßig angepasst werden mussten und daher „veränderlich“ waren! So bekam die Ladung des Elektrons alle vier Jahre einen neuen Zahlenwert – obwohl sie sich real natürlich nicht geändert hat.

Der Rückgriff auf Naturkonstanten macht die Einheitendefinitionen nun prinzipiell universell. Für die Wissenschaft ist dies allein schon aus systematischen Gründen ein enormer Fortschritt. So sind die Metrologen entsprechend stolz auf das jetzt Erreichte. (Wer sehr neugierig auf diese wissenschaftliche Erfolgsgeschichte ist, könnte auch schon einmal ans Ende dieses Heftes zu dem Gespräch mit dem Nobelpreisträger Klaus von Klitzing springen.) Die Redakteure dieses Heftes berichten vom Weg zu den neuen Definitionen, sie haben dabei auch skurrile Details und unerwartete Einsichten aufgesammelt, und sie haben sich umgehört, welche Auswirkungen diese Neuerungen gerade auch jenseits der Wissenschaft haben. In Technik und Industrie werden die Folgen als positive Langzeitwirkung spürbar sein. Denn ein Clou am neuen Einheitensystem ist, dass in ihm keinerlei technische Barrieren mehr eingebaut sind. Und auch für alle Bürger hat das neue SI

eine gute Nachricht parat: Niemand muss umdenken. Die Messungen am Tag nach der Verabschiedung der Neudefinitionen werden nicht anders ausfallen als die Messungen am Tag zuvor. Anders sieht es schon im Schulbetrieb aus. Das neue SI wird deutlich abstrakter und intellektuell anspruchsvoller als das bisherige System – eine Herausforderung nicht nur an jeden Schüler, sondern auch an die didaktischen Konzepte jedes Lehrers (was übrigens ganz ähnlich auch für die *maßstäbe*-Redakteure bei der Arbeit an diesem Heft gilt).

Es wünscht Ihnen eine unterhaltsame und nicht zu herausfordernde Lektüre

im Namen der gesamten *maßstäbe*-Redaktion

IHR JENS SIMON



Weil die *maßstäbe*-Redakteure nicht so ohne Weiteres die Gabe besitzen, in die Zukunft zu schauen, haben sie eine Silizium-Kristallkugel genommen, um zu sehen, ob das neue Einheitensystem auch wirklich verabschiedet wurde – denn der Redaktionsschluss dieser Ausgabe lag etwas vor dem magischen Datum 16. November 2018. Falls die Kugel nicht gelogen hat, und warum sollte sie, ist auf der Generalkonferenz alles glatt gegangen. (v.l.n.r. Erika Schow, Jens Simon, Alberto Parra del Riego, Imke Frischmuth)



# Inhaltsverzeichnis

genau

stabil

Was ist für Sie  
unveränderlich?  
Seite 6  
REDAKTION

Die Erbsenzähler  
Seite 20  
ANDREA HOFERICHTER

Das  
„revolutionäre“  
Ampere  
Seite 24  
DÖRTE SASSE

Von der  
Kunst, sich  
durchzubeißen  
Seite 28  
UTE KEHSE

Ein Wimperschlag  
in der Geschichte  
des Universums  
Seite 32  
BRIGITTE RÖTHLEIN

Das Kilogramm-  
Problem – und  
seine Lösung  
Seite 12  
JENS SIMON

Kilogramm-  
Brief  
Seite 13  
IMKE FRISCHMUTH

Der Blick in die  
Kristallkugel  
Seite 14  
IMKE FRISCHMUTH

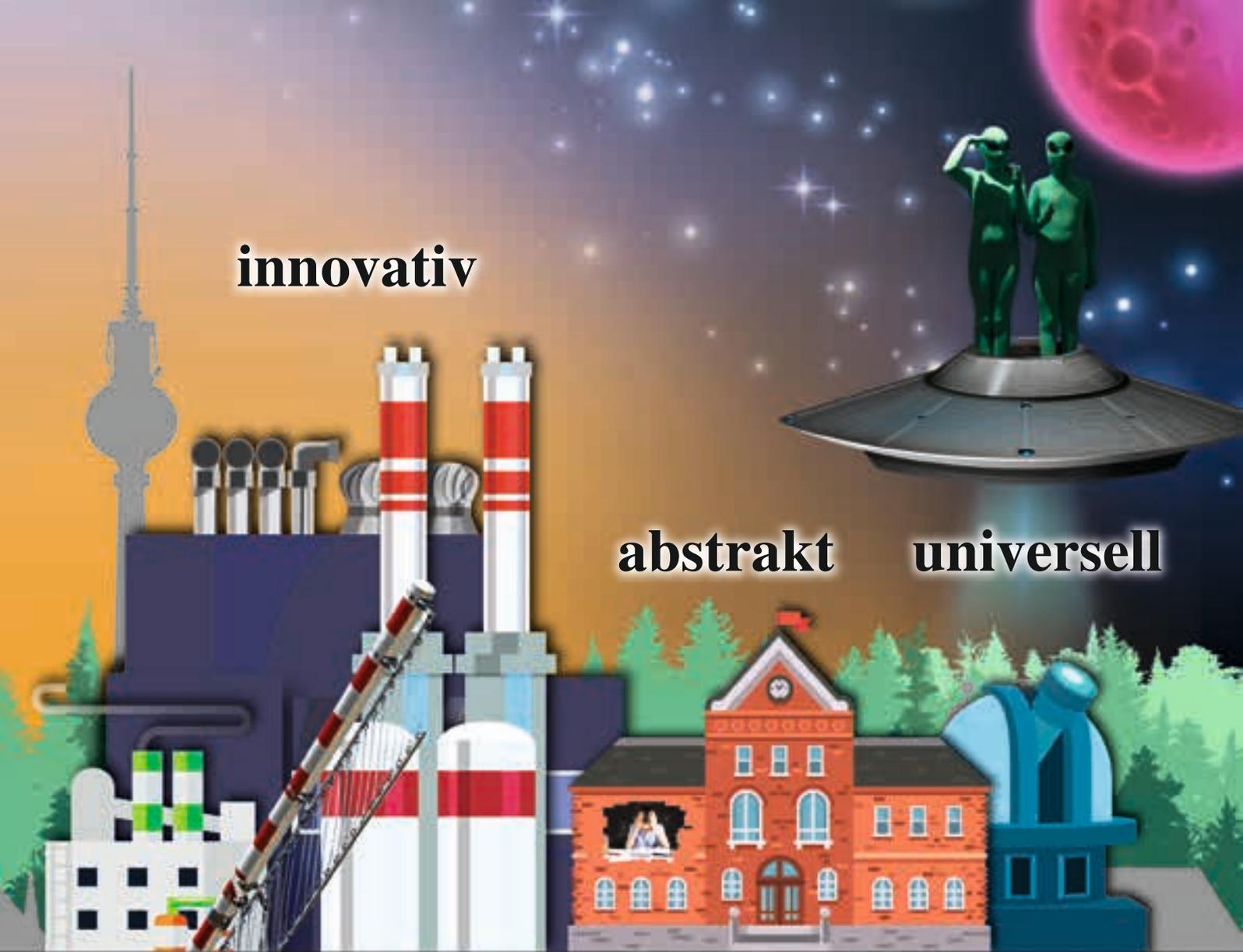
Wo steckt  
Planck in der  
Kugel?  
Seite 16  
JENS SIMON

Punktlandung –  
Weltweite Messwerte  
am Stichtag  
Seite 18  
JENS SIMON

**innovativ**

**abstrakt**

**universell**



Unsicherheit abwägen  
Seite 38  
FRANK FRICK

Joseph und seine  
Kollegen  
Seite 42  
ALEXANDER STIRN

Candela-Brief  
Seite 44  
ERIKA SCHOW

Doppelschulstunde  
Seite 48  
ERIKA SCHOW UND  
IMKE FRISCHMUTH

Meter-Brief  
Seite 52  
ERIKA SCHOW

Die größte Umwälzung  
im Einheitensystem  
seit der Französischen  
Revolution  
Seite 56  
RAINER SCHARF

Das Letzte  
Seite 64  
JENS SIMON







Foto: mauritius images / Old Visuals

# Stabil

Eijejei – da sind ja einige Kilos mehr auf der Waage als beim letzten Rendezvous – von wem mögen denn die stammen? Tja, meine Dame und mein Herr, das werden Sie alleine klären müssen. Wir hier in der PTB sind jedenfalls nicht schuld. Auch nicht, wenn eine solche Szene sich am 20. Mai 2019 wiederholen sollte. Denn an diesem Tag, dem Weltmetrologietag jenes Jahres, wird ja der große Umbruch geschehen: Das neue SI gilt! War ein Kilogramm am Tag davor noch gleich der Masse eines Klotzes in einem Pariser Tresor, werden ab der ersten Sekunde dieses magischen Tages alle Massen der Welt auf drei Naturkonstanten beruhen. Aber wie sehr Sie als Bürger auch aufpassen: Sie werden rein gar nichts bemerken. Selbst jener frühere PTB-Mitarbeiter, der jahrzehntelang sämtliche Tankquittungen sammelte, um akribisch nachzuvollziehen, wie sich dort die Preise verändert haben, hätte keine Chance, Entsprechendes, sagen wir mal, bei Supermarktwagen zu tun: Ein Kilo Bananen bleibt ein Kilo Bananen, basta!

Übrigens: Auch nach dem 20. Mai 2019 können Sie noch zum Gemüsehändler Ihres Vertrauens auf den Wochenmarkt gehen, sich vorsichtig umsehen, ob Sie beobachtet werden, ein schnelles „ein Pfund Kartoffeln bitte“ herüberzischen – und Sie werden in aller Gemütsruhe Ihre 500 Gramm Kartoffeln herübergereicht bekommen. Selbst diese Parallelwelt mit ihren seit den 70er Jahren ungesetzlichen Einheiten wird weiter bestehen. Und nicht nur hier bei uns. Auch in England werden Sie – trotz SI in Wissenschaft und Wirtschaft – wohl niemals einen halben Liter Bier bekommen; es muss schon ein Pint sein. Nebenbei: Wegen der festen Umrechnungsfaktoren zwischen SI- und Nicht-SI-Einheiten ist das auch gar nicht weiter schlimm; Hauptsache, Sie benutzen diese „Ausreißer“ nicht in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung. Na, darauf können wir doch jetzt in aller Ruhe ein Käffchen trinken und ein paar Pralinen füttern – aber nach dem Blick auf die Waage bitte nicht bei der PTB beschweren!

es

# Was ist für Sie unveränderlich?

Die *maßstäbe*-Redaktion wollte von Braunschweiger Bürgern wissen, was konstant ist oder es sein sollte. Hier ist das Ergebnis der kleinen Umfrage.

**Carola Reimann**

„Was immer bleiben sollte? Meine Heimat. Da, wo ich mich zuhause fühle.“

„Wenn ich an unsere deutsche Vergangenheit und manche Auswüchse in unserer Gegenwart denke, dann wünsche ich mir, dass eines für immer bestehen bleiben sollte: das demokratische System.“



**Karin Schenke,  
Inge Aschenbroich**

„Es wäre doch langweilig, wenn alles gleich bliebe. Veränderung ist doch gut und wichtig!“

„Verlassen möchte ich mich auf meine Freundin (guckt sie an) und auf meine Familie.“



**Simon Polatzek**

„Wenn ich mir etwas wünsche dürfte, was für immer bleibt, dann ist die Antwort klar: Corinna (meine Freundin)“



**Volker Meier**

„Konstant ist, dass jeden Tag die Sonne aufgeht. Daher hat man früher die Sonne als Norm genommen, um Zeiten festzulegen. Ansonsten ist Veränderung gut – es wäre ja langweilig, wenn sich nichts ändern würde.“

„Ich würde mich gerne darauf verlassen wollen, dass ich noch möglichst lange mit meiner Frau zusammenleben kann.“



**Karen Minna Oltersdorf**

„Nur die Veränderung ist unveränderlich.“



**Hans-Walter Schnurre**

„Wirklich konstant ist mein Glaube.“

„Konstanz gibt Verlässlichkeit; man hat damit Wurzeln; in der Wissenschaft wird dadurch etwas nachvollziehbar.“

„Unbedingt verlassen möchte ich mich auf alle Menschen, mit denen ich näher zu tun habe.“



**Marcus**

„Unveränderlichkeit ist nicht mehr wichtig. Man bekommt ja im Internet jederzeit die aktuelle Version einer veränderlichen Information. Ich wünsche mir das auch gar nicht anders. Wenn etwas immer gleich bliebe, fände ich das eher langweilig.“

**Ulrike und Wolfgang Schaper**

„Ich würde mich gerne drauf verlassen, dass die Erde sich weiterdreht und bestehen bleibt – langsam ist man sich ja nicht mehr so sicher, ob wir sie für unsere Enkel und Urenkel erhalten können.“

### Caroline Haubold

„Es geht immer weiter – selbst wenn jemand stirbt. Auch wenn ein Baum kaputtgeht, kommt ein neuer aus der Asche heraus. Ein schönes Bild dafür gibt es im Disneyfilm „Der König der Löwen“, als am Schluss an dem Ort, wo Simbas Vater gestorben ist, ein neuer Baum wächst.“



### Christian Paulsen

„Es wäre schön, wenn menschliche Werte wie Nächstenliebe und Kants kategorischer Imperativ überdauern würden. Konstanz bedeutet Planbarkeit und Sicherheit. Aber manchmal kann sie auch Langeweile erzeugen.“



### Nadine Koch

„Wir Menschen lieben Konstanz. Wir stecken gerne Dinge in Schubladen, um dann darauf zu vertrauen, dass alles darin genau so bleibt, wie es ist. Wenn ein Kilogramm oder eine Stunde in Zukunft etwas anderes wären als heute, fänden wir das schlecht.“



### Malte

„Im Leben ist alles im Wandel. Lediglich Naturkonstanten sind relativ konstant. Da kommt nur hin und wieder ein Wissenschaftler vorbei, der meint, sie noch besser messen zu können.“

**Regina und  
Peter Schulz**

Sie: „Leben und Sterben sind Konstanten auf der Welt, das muss jeder. Veränderung ist ohnehin besser als Stillstand.“ Er: „Also ich wäre gerne immer Mitte 30 geblieben!“



**Dirk Tucholla mit  
Robin**

„Das Glück sollte konstant sein!“



**Susanne Thiele**

„Ich bin für den dynamischen Wandel! Lediglich die Gesundheit meiner Familie dürfte gerne unveränderlich sein.“



**Angelina Capelle**

„Auf Anhieb fällt mir gar nichts Unveränderliches ein. Ich hoffe, dass zumindest die Neugier des Menschen eine konstante Größe bleibt!“

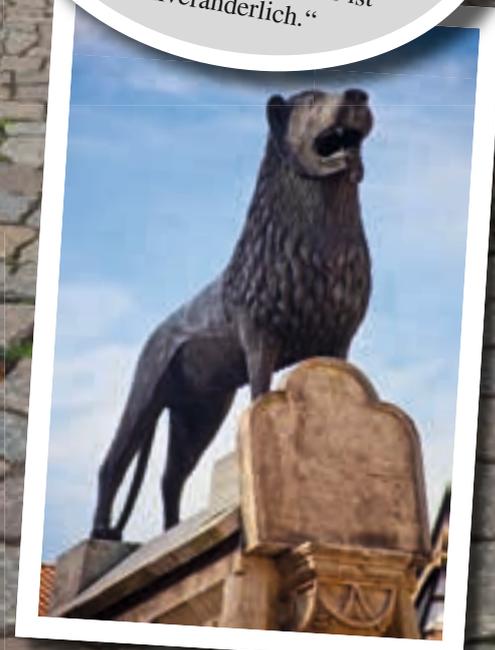
**Helga Schilling**

„Vielleicht wäre konstante finanzielle Sicherheit etwas Gutes. Nicht weil ich geldgierig bin, sondern weil sie uns entspannen und offen sein lässt für all das Schöne, dass man ansonsten vor lauter Sorgen vielleicht nicht sieht.“



**Braunschweiger Löwe**

„Was die Menschlein da unten so reden. Sollen lieber mal nach oben schauen. Hier habe ich die Macht – okay, zusammen mit Heinrich. Aber das seit 1166. Das ist unveränderlich.“



S. 6-9: Hintergrundfoto: Manuel Datmann / www.kubische-panoramen.de  
Portraits: SPD (Reimann), Haus der Wissenschaft (Oltersdorf), Braunschweig Stadtmarketing GmbH / Steffen und Bach GmbH (Löwe), alle anderen: PTB



Parafoil 2010

2010





Foto: Igor Kupljenik/MI-Press

# genau

War es vielleicht so? Anfang Juli 2017. Der Abend ist lau, die Stimmung aufgeräumt, die Seine fließt träge vor sich hin. Fünf Männer, alle ein wenig müde, sitzen in einem kleinen Konferenzzimmer an einem mit grünem Samt bezogenen Tisch, der ein wenig an Glücksspiel denken lässt. Auf dem Tisch steht ein urnenartiger Behälter. Ein Bediensteter tritt auf, überprüft den Inhalt der Urne, schenkt Rotwein nach und überlässt die Fünf ihrem Schicksal. Draußen rauscht leise der Wind durch die Pappeln. Martin: „Jetzt ist es soweit. Lasst uns das Glück suchen.“ Als Erster ist Willie an der Reihe, greift in die erste Urne, zieht eine Sechs und legt die Kugel zurück. „Ich hab’s ja gewusst.“ „Lass mich mal“, sagt Hector und zieht eine Zwei. „Komm, Willie, zieh noch mal.“ Und wieder eine Sechs. Willie nimmt einen tiefen Schluck aus seinem Glas, lehnt sich, man hat den Eindruck, beleidigt, zurück. Luc: „Muss erst der Franzose kommen, um dem Glück auf die Sprünge zu helfen?“ Er greift in die Urne. „Ha, eine Null. Darf ich nochmal?“ Zustimmunges Gemurmel. „Oh là là, eine Sieben. Wenn jetzt noch eine Null kommt, bestelle ich mir einen Martini dry.“ Er zieht. Eine Null. „Lasst die Kindereien“, meldet sich Joachim zu Wort. Schneller, als alle gucken können, zieht Joachim, nicht ganz regelgerecht, zwei Kugeln. Eine Eins. Und eine Fünf. Martin: „Männer, wir haben es getan. Lasst uns anstoßen. Und ihr wisst ja: Stillschweigen, auf ewig.“ Gläser klirren. Draußen rauscht der Wind.

Oder war es vielleicht so? Anfang Juli 2017. Aus allen Ecken der Welt sind Meldungen eingetroffen. Und nicht nur nackte Zahlen. Sondern Zahlen mit allem Brimbamborium. Größenordnungen, Einheiten, Unsicherheiten. Ergebnisse aus jahrelanger Arbeit in den Laboren der Metrologie. Eine kleine Experten-Gruppe beackert die Meldungen nach allen Regeln mathematischer Kunst. Und kommt, an den entscheidenden Stellen, zu dem Ergebnis Sechs-Zwei-Sechs-Null-Sieben-Null-Eins-Fünf. Und Punkt. Und so geht es weiter auch für anderes, bis schließlich alle Dinge ihre Zahlenwerte bekommen haben.

Und in den Laboren der Metrologie wird angestoßen. Dort mit Rotwein oder Bourbon, hier mit Pils. Ein Hoch auf die punktgenaue Landung!

jes



Internationales Klassentreffen der Massemetrologen im BIPM. Die eigentlichen Hauptdarsteller sitzen jeweils auf dem Schoß oder werden auf Händen getragen: die nationalen Kopien des Urkilogramms. (Bild: Aus dem Film „1001 Gramm“. Die Szene wurde im BIPM gedreht.)

# Das Kilogramm-Problem – und seine Lösung

Manchmal kann es ein Problem sein, wenn das Schwere leichter wird. Die Rede ist von einem kleinen Metallzylinder, den sich die Welt Ende des 19. Jahrhunderts (!) als Bezugsobjekt gewählt hat, um zu sagen, was ein Kilogramm sein soll. Nur leider nagt der Zahn der Zeit an allem und also auch an diesem nahezu heiligen Objekt, das scheinbar sicher und vor allen Einflüssen geschützt in einem Tresor im Internationalen Büro für Maß und Gewicht (BIPM) in Sèvres bei Paris verwahrt wird. Dass sich dieses Urkilogramm verändert, wurde durch Vergleichsmessungen mit seinen offiziellen Kopien (die ebenfalls im BIPM zuhause sind) und mit den in die Welt geschickten nationalen Prototypen deutlich. Bei diesen Vergleichsmessungen fuhr den Metrologen der Schreck in die Glieder. Denn sie mussten konstatieren, dass die Massen dieser Kilogramm-Objekte schwanken. Tendenziell werden die Unterschiede zwischen den nationalen Prototypen und dem Urkilogramm immer größer, und zwar um etwa ein halbes Mikrogramm pro Jahr. Da eine lange Zeit

verflossen ist, seit das Urkilogramm seinen Dienst angetreten hat, ist eine beachtliche Massendifferenz aufgelaufen. Und noch ärger: Die Veränderungen geschehen nicht geradlinig und vorhersehbar, sondern fallen mal so oder auch mal ganz anders aus.

Foto:  
original-Okerland

Diese Diagnose verlangte eine angemessene Therapie. Ein Herumdoktern an den Symptomen – neues Urkilogramm kuren; über kurz oder lang dieselben Probleme

bekommen – stand dabei eher nicht zur Debatte. Eine dauerhafte Heilung, so die Überzeugung der Community, kann nur erzielt werden, wenn wirklich unveränderliche Größen die Einheiten bestimmen und eben keine Artefakte, so edel (90 % Platin und 10 % Iridium wie beim Urkilogramm) sie auch sein mögen. Alle Einheiten sollten sich in Zukunft als eine Kombination von Naturkonstanten darstellen lassen. Die Sekunde mit dem Bezug auf einen Elektronenübergang im Cäsiumatom und der Meter mit dem Bezug zur Lichtgeschwindigkeit hatten dies schon vorgemacht. Und auch die elektrischen Einheiten Volt und Ohm hatten sich schon bei Quanteneffekten und entsprechenden Konstanten für ihre Realisierung bedient. Auf der 23. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) im Jahr 2007 wurde dann die als Auftrag zu verstehende Empfehlung an alle nationalen Metrologieinstitute ausgesprochen, alle Experimente voranzutreiben, die eine Neudefinition von Kilogramm, Ampere, Kelvin und Mol auf der Basis von Naturkonstanten ermöglichen könnten.

Für das Kilogramm gingen weltweit mehrere Experimente an den Start. Nachdem einige auf der Strecke blieben, waren und sind es schließlich zwei grundsätzlich unterschiedliche Verfahren, die das Rennen gemacht haben. Da ist zum einen das Prinzip der Wattwaage, welches unter anderem von Großbritannien, Frankreich, den USA und Kanada favorisiert wird, und da ist zum anderen das Prinzip des Zählens von Atomen mithilfe von hochreinen Siliziumkugeln (der Favorit einer internationalen Kooperation unter Leitung der PTB). Alle Ergebnisse liegen mittlerweile vor, mit einschneidenden Konsequenzen: Le kilogramme est mort, vive le kilogramme! ■

JENS SIMON

Pierre LeBillot  
BIPM  
12bis Grande Rue  
F-92310 Sèvres

Margaux LeBillot  
7 Rue du Village  
F-19311 Lieu d'origine-au-Loain



Chère maman,  
ich schreibe Dir, weil ich sehr aufgeregt bin! Große Veränderungen kündigen sich an – aber ich weiß noch nicht, ob sie gut oder schlecht für mich sein werden.

Du erinnerst dich doch, dass ich anfangs sehr zufrieden war mit meinem neuen Job als Hausmeister des Büros für Maß und Gewicht hier in Sèvres, so nah unserer wunderbaren Hauptstadt Paris? Ich fühlte mich sehr geschmeichelt, dass ich einer von ganz wenigen Menschen auf der Welt bin, die wissen, wo das einmalige Urkilogramm aufbewahrt wird! Und nein, ich darf es dir immer noch nicht verraten! Womöglich erzählst du es Madame Fleury im Gemüseladen, und die erzählt es dann ihrem nichtsnutzigen Sohn Jean-Paul. Nicht auszudenken, wenn es sich in dessen Kreisen herumsprechen würdel! Der hat doch früher schon Bonbons stibitzt, und seine Freunde sind heute bestimmen keinen Deut besser! Nur so viel: Es steht unter drei Glasglocken in einem Tresor in einem geheimen Keller, und man benötigt drei Schlüssel, um den Safe zu öffnen. Das Verrückte ist: Die Schlüssel sind im Besitz dreier Menschen, die an ganz unterschiedlichen Orten der Erde leben. Sie alle müssen zusammenkommen, um aufzuschließen. Du kannst dir vorstellen, dass das nicht allzu oft geschieht. Aber wenn, dann ist das sehr feierlich!

Kurz nach dem Krieg haben sie es mal rausgenommen und gewogen. Und dann nochmal zwischen 1988 und 1992. Beide Male haben sie lange Gesichter gemacht, denn im Vergleich zu seinen Kopien war es wohl leichter geworden. Da dachten sie, „na, das geht jetzt wohl immer so weiter mit dem Gewichtsverlust“, und haben munter so getan, als würde es auch nach '92 jedes Jahr ein klitzekleines bisschen weniger werden. Und alle Waagen auf der ganzen Welt mussten sich dem ja anpassen! Als sie dann 2014 nochmal nachgeguckt haben, hatte sich das Urkilogramm aber gar nicht mehr verändert. Dafür stimmte nun irgendetwas mit den Kopien nicht mehr. Es waren alle ganz verdattert, und dann mussten sie lauter Briefe in die Welt schicken, à la: „Oh, pardon, wir haben uns verschätzt und euch jahrelang falsche Werte geliefert.“ Peinlich!

Verständlicherweise hat man nun die Nase voll von diesem Wankelmut und will das Kilogramm ersetzen. Doch stell dir vor: Ein *h* soll an seine Stelle treten! Wie soll das gehen!? Ein Buchstabe soll das Maß aller Dinge ersetzen? C'est fou! Die Welt muss verrückt geworden sein! Und was wird dann mit mir? Muss ich dann Heerscharen von Besuchern hier durchführen, weil der Tresorkeller ein Museum für das betagte Kilogramm wird? Wer bezahlt die Überstunden? Oder wird die Welt den Klotz im Keller vergessen und das Wissen um den geheimen Ort verloren gehen?

Ach maman, so vieles ist ungewiss. Ich hoffe, wenigstens du bleibst mir gewogen.

À bientôt!

*Pierre*



# Der Blick in die Kristallkugel

hat im Laufe der vergangenen 20 Jahre fast alle ihre Geheimnisse enthüllt. Wohl kaum ein Objekt auf der Welt ist so genau untersucht worden wie die Silizium-28-Kugeln der PTB.

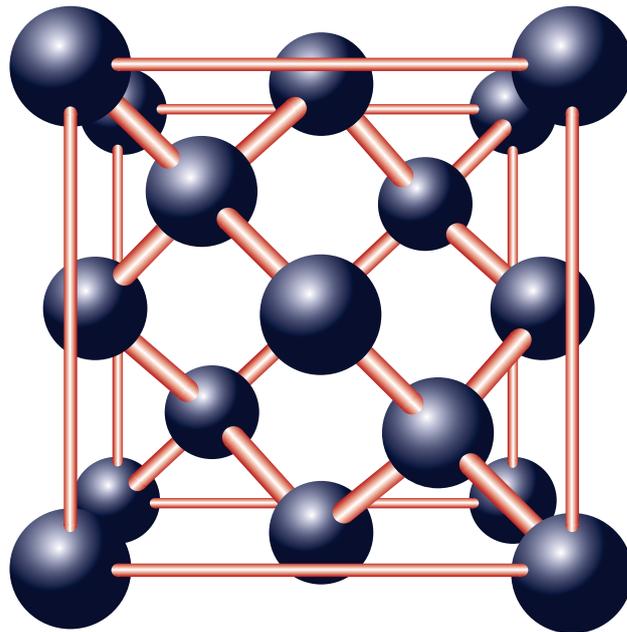
Am Anfang stand der Wunsch, mithilfe einer hochreinen Siliziumkugel die Avogadrozahl genauer zu bestimmen – also die Anzahl von Teilchen in einem Mol. Angetreten war ein internationaler Verbund von Forschungspartnern aus aller Welt zum „Avogadroprojekt“. Anschließend wäre es nur ein kleiner Schritt gewesen, auch das Kilogramm über eine genaue Anzahl von Siliziumatomen zu definieren. Doch die internationale Gemeinschaft entschied sich für einen anderen Weg, und so verschob sich der Forschungsschwerpunkt mit den Jahren hin zur Ermittlung der Planckkonstante  $h$ .

Nach und nach baute die PTB als einziges Metrologieinstitut weltweit alle Mess- und Fertigungskompetenzen auf, die für die Herstellung und Charakterisierung hochreiner Siliziumkugeln nötig sind. Nun, da sowohl Avogadro- als auch Planckkonstante genau gemessen und festgelegt sind, rückt wiederum ein neues Ziel in den Fokus: die Weitergabe des Kilogramms an die Wirtschaft auf Basis seiner neuen Definition, die voraussichtlich im Mai 2019 in Kraft tritt. Nach so vielen Jahren in den Händen neugieriger Wissenschaftler gehören die Siliziumkugeln mittlerweile wohl zu den bestuntersuchten Objekten der Welt.

Anzahl Atome:



Etwa 21,52 ... Quadrillionen, je nach Kugel. Dabei erlaubt man sich eine Unsicherheit von höchstens  $\pm$  zwei Atomen pro 100 Millionen gezählter bzw. gemessener Atome.



Material:



Die besten Kugeln bestehen zu 99,999 % aus Silizium-28. Das hochreine Material ist Ergebnis eines langwierigen (und teuren) Zentrifugier- und Reinigungsprozesses, durchgeführt von russischen Projektpartnern. Natürliches Silizium, wie es überall im Sand vorkommt, setzt sich dagegen aus drei Isotopen zusammen:  $^{28}\text{Si}$  (92 %),  $^{29}\text{Si}$  (5 %),  $^{30}\text{Si}$  (3 %).

Kristall:



Das Institut für Kristallzüchtung in Berlin zieht aus dem polykristallinen Rohmaterial mit viel Fingerspitzengefühl und Erfahrung jeweils einen rund 5 kg schweren „Einkristall“, in dem die Atome in einem gleichmäßigen Gitter angeordnet sind – ohne Unregelmäßigkeiten. Aus einem Einkristall lassen sich später in der PTB zwei Siliziumkugeln fertigen.

**Form:**

Die Kugeln haben einen Durchmesser von rund 93,7 mm. Dabei beträgt die Abweichung von der perfekten Kugelform nur wenige 10 Nanometer (1 nm = 1 milliardstel Meter). Übertragen auf die Erde wäre die höchste Erhebung auf unserem Planeten gerade mal 2 Meter hoch. Diese nahezu perfekte Oberfläche wird durch einen langwierigen Schleif- und Polierprozess erreicht.

**Volumen:**

Erfasst wird das Volumen mithilfe eines Fizeau-Interferometers, das tausende Durchmesser gleichzeitig misst. Das Volumen der Kugel „AVO28-S5c“ beträgt beispielsweise 430,891289 cm<sup>3</sup>. Auch die Topografie der Kugeloberfläche lässt sich auf diese Weise genau erfassen.

**Oberfläche:**

Auf der Kugel bilden sich natürlicherweise dünne Oxid-, Wasser- sowie kohlenstoffhaltige Kontaminationsschichten. Zusammen können sie bis 3 Nanometer dick sein. Sie müssen bei der Messung des Kugelvolumens und der Kugelmasse berücksichtigt werden. Die PTB hat eine Ultrahochvakuumanlage mit einer kombinierten Röntgenfluoreszenz- und Photoelektronenspektroskopie aufgebaut, um sowohl die chemische Zusammensetzung als auch die Massenbelegung an der Oberfläche der Kugeln zu ermitteln.

**Masse:**

Die Siliziumkugeln der PTB haben jeweils die Masse von 1 kg. Aber dieses „etwa“ lässt sich sehr genau messen. So beträgt beispielsweise die Masse der Kugel mit der Bezeichnung „Si28kg01b“ 1,000 012 601 kg. Bestimmt wird sie mithilfe eines Vakuum-Massekomparators des Typs Sartorius CCL1007 mit einer Messunsicherheit von 6 Mikrogramm. ■

IMKE FRISCHMUTH

# Wo steckt Planck in der Kugel?

Masse der Si-Kugel

$$= \text{Masse eines Si-Atoms} \times$$

Zahl der Atome

$$= \text{Masse eines Si-Atoms} \times$$

Volumen der Si-Kugel

Volumen eines Atoms

Masse eines Si-Atoms

$$=$$

Molare Masse des Kugelmaterials

Avogadrokonstante  $N_A$

Avogadrokonstante  $N_A$

$$=$$

Molare Massenkonzstante

Atomare Masseneinheit  $m_u$

Atomare Masseneinheit  $m_u$

$$=$$

Elektronenmasse

Relative Elektronenmasse

Elektronenmasse

$$=$$

2

Rydbergkonstante  $R_\infty$

$h$

Lichtgeschwindigkeit  $c$

Feinstrukturkonstante  $\alpha^2$

Masse der Si-Kugel

$$=$$

Molare Masse des Kugelmaterials

$\times$

Volumen der Si-Kugel

$\times$

2

$\times$

$R_\infty$

$\times$

$h$

Molare Massenkonzstante

$\times$

Relative Elektronenmasse

$\times$

Volumen eines Atoms

$\times$

$c$

$\times$

$\alpha^2$

Was lässt sich alles aus einer perfekten Kristallkugel (zweifach perfekt: Kristall und Kugel) durch einige Messungen und einiges Vorwissen erschließen? Z. B. die Masse eines Atoms im Kristallgitter. Aber auch die Werte einiger Naturkonstanten – etwa der Avogadro-Konstanten und der Planck-Konstanten. Im Labor ist dazu eine Unmenge akribischer Arbeit von Experimentatoren nötig. Auf dem Papier geht es (theoretisch) leichter – mit ein paar Umformungen, Ersetzungen und einigen Begriffsdefinitionen. So kommt schließlich auch die tief in der Quantenmechanik verwurzelte Planck-Konstante aus einem makroskopischen Kristall zum Vorschein.

■ diese Größe wird in der PTB gemessen

■ bekannte Größe (aus anderen Zusammenhängen)

■ noch unbekannt bzw. zu ungenau bekannt

Geschafft: In dieser Gleichung stecken jetzt, bis auf  $h$ , nur noch gemessene oder bekannte Größen.



## Molare Masse des Kugelmaterials

Silizium kommt in drei Spielarten vor, den drei Isotopen Si-28 (14 Protonen p und 14 Neutronen n), Si-29 (14 p und 15 n) und Si-30 (14 p und 16 n). Durch aufwendige Isotopentrennung kann „hochangereichertes“ Material von 99,999 % Reinheit gewonnen werden. Aber auch der verbleibende kleine „Rest“ muss, wenn man es genau nimmt, berücksichtigt werden. Die molare Masse ergibt sich stets aus einer Mischung (entsprechend der prozentualen Anteile) dieser drei Isotope.

## Volumen eines Atoms

Wenn lax vom „Volumen eines Atoms“ die Rede ist, dann ist der Raum gemeint, den ein Atom im Kristallverbund „besetzt“. Die Kristallstruktur entsteht dabei durch eine raumfüllende Wiederholung einer sogenannten Elementarzelle. Beim Siliziumgitter ist diese Elementarzelle ein Würfel, wobei Si-Atome in jeder Würfecke, in der Mitte jeder Würfelfläche sowie auf einer speziellen Position jeder Raumdiagonale sitzen. Jedes Atom in einer Ecke gehört dabei zu acht Elementarzellen, jedes Atom auf einer Fläche zu zwei und nur die Atome im Inneren auf den Raumdiagonalen gehören gänzlich zu dieser einen Zelle. Wenn man alles addiert ( $8 \times 1/8 + 6 \times 1/2 + 4 \times 1$ ), sieht man, dass 8 Si-Atome zu einer Elementarzelle gehören. Das „Volumen eines Atoms“ ist also, wenn man es genauer formuliert, ein Achtel des Volumens eben dieser Elementarzelle.

## Avogadrokonstante $N_A$

Die Avogadrozahl ist die Anzahl der Teilchen, die in 12 Gramm isotopenreinem Kohlenstoff C-12 enthalten sind. Die Avogadrozahl gehört zu den sieben Konstanten, deren Werte im neuen Einheitensystem festgelegt werden. Daher war zuvor die Aufgabe, diese Konstante so gut es irgend geht zu ermitteln. Im Avogadro-Experiment gelingt dies im Prinzip über vier Messungen: Masse der Kugel, molare Masse, Kugelvolumen und „Atomvolumen“.

## Atomare Masseneinheit $m_u$

Der Name legt es nahe: Die atomare Masseneinheit ist eine Einheit, in der sich Atommassen zweckmäßig angeben lassen. Die Definition von  $m_u$  ist sehr einfach, nämlich als 1/12 der Masse eines einzelnen Kohlenstoffatoms C-12 (im Grundzustand). In einem Atom sitzt der Hauptanteil der Masse im Kern – in den Protonen und den (einen Hauch schwereren) Neutronen. Dazu kommen dann aber noch die Massen der Elektronen. Und was ebenfalls zu berücksichtigen ist: die Bindungsenergien im Atom, die nichts anderes als umgewandelte Masseanteile sind. Über den Daumen ist eine atomare Masseneinheit in etwa die Masse eines Kernbausteins. Aber etwas genauer ausgedrückt stecken in einer atomaren Masseneinheit ein halbes Proton, ein halbes Neutron, ein halbes Elektron und (abzüglich) ein wenig Bindungsenergie.

## Molare Massenkonstante

Diese Konstante hat den simplen Zahlenwert 1/1000 (und die Einheit Kilogramm pro Mol). Sie „repariert“ lediglich den Umstand, dass als Einheit für die Masse das Kilogramm und nicht das Gramm gewählt wurde. Die Reparatur bezieht sich darauf, dass bei der Definition der Avogadrokonstanten die Einheit Gramm verwendet wird.

## relative Elektronenmasse

Ein Elektron ist im Gegensatz zu einem Kernbaustein ein Leichtgewicht; es hat in etwa ein halbes Promille von dessen Masse. Wird die Masse des Elektrons in Einheiten der atomaren Masseneinheit angegeben, spricht man von der relativen Elektronenmasse ( $= m_{\text{Elektron}} / m_u$ )

## Elektronenmasse

Viel einfacher geht nicht: Ein Elektron kreist um ein Proton. Dennoch steckt in diesem Zweikörper-System eine ganze Welt, d. h. eine Quantenwelt. Welche energetischen Zustände für ein Elektron dabei möglich sind, kann in der Quantentheorie exakt ausgerechnet werden. In diese Zustände geht eine Reihe von Naturkonstanten ein – und eben auch die Masse des um den Kern kreisenden Teilchens.

JENS SIMON

# Punktlandung – Weltweite Messwerte am Stichtag

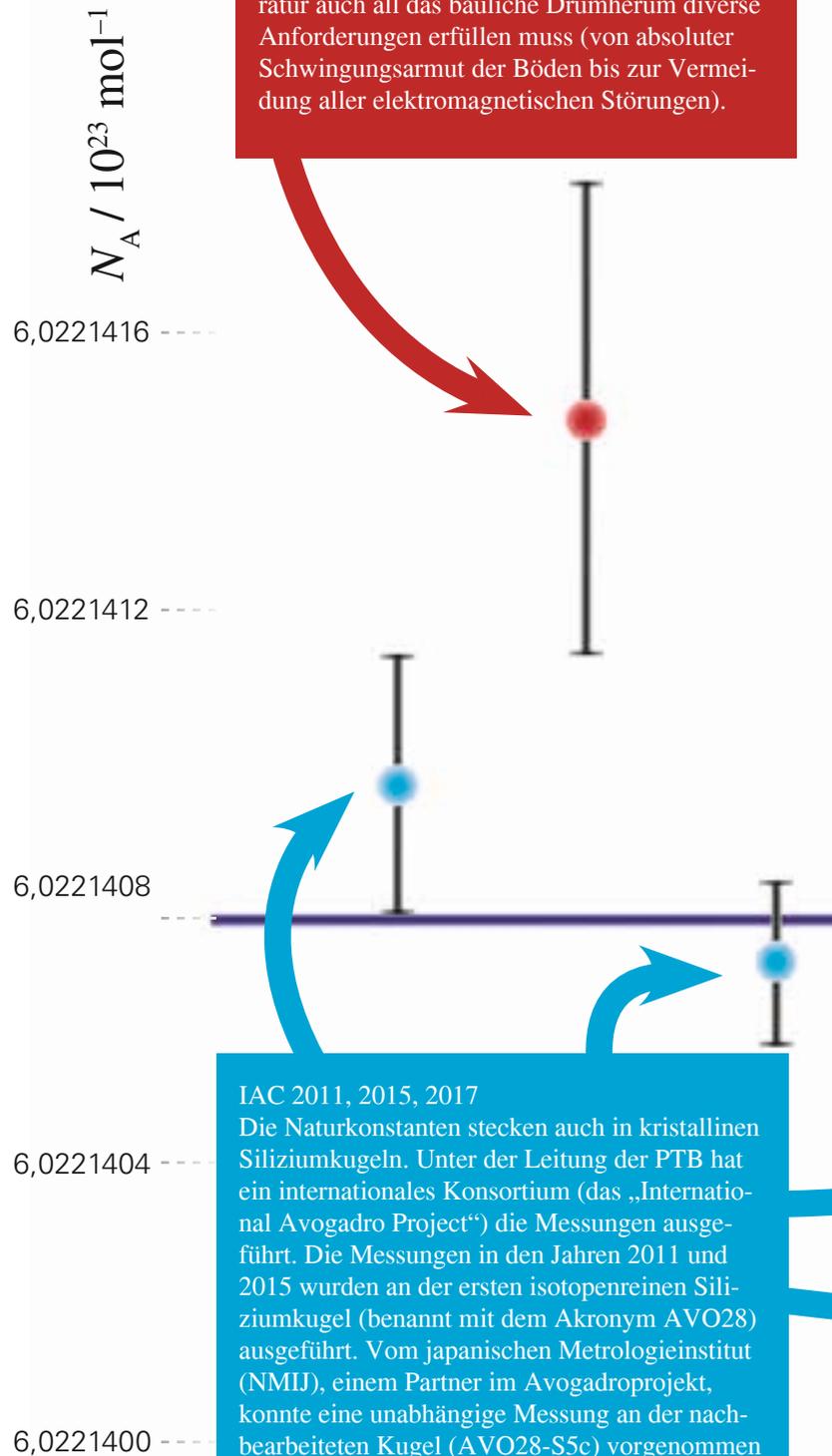
Die Grenze des Messbaren verläuft durch Braunschweig, Gaithersburg, Ottawa, Trappes, Tsukuba und Turin. In den dort ansässigen nationalen Metrologieinstituten haben Wissenschaftler in den vergangenen Jahren in extrem aufwendigen Experimenten zwei Naturkonstanten so gut es irgend geht gemessen: die Avogadro-Konstante  $N_A$  (dargestellt als Skala am linken Rand der Grafik) und die Planck-Konstante  $h$  (dargestellt als Skala am rechten Rand). Diese beiden gehören zu dem Ensemble von Naturkonstanten, das in Zukunft das Internationale Einheitensystem (SI) bestimmen wird. Gemessen wird dabei in zwei prinzipiell sehr unterschiedlichen Experimenten. Zum einen sind dies Wattwaagen-Experimente (rote Symbole), in denen die Schwerkraft auf ein Kilogrammobjekt durch eine elektromagnetische Kraft (gemessen mit Quanteneffekten) kompensiert wird. Zum anderen sind dies Experimente mit Siliziumkugeln, in denen die Anzahl der Atome in einem großen Kristallverbund bestimmt wird – die Experimentvariante, die auch die PTB verfolgt. Die metrologische Weltgemeinschaft hatte sich nun einen Stichtag gegeben: Alle Experimente, die bis zum 1. Juli 2017 erfolgreich waren und publizierte Ergebnisse vorweisen konnten, wurden in die Berechnung des „Ausgleichswertes“ der jeweiligen Naturkonstante einbezogen. Dies sind die hier abgebildeten Resultate – mit dem jeweiligen Mittelwert, markiert als farbiger Punkt, und einem Balken, dessen Länge die Unsicherheit der Messung angibt. Die internationale Gruppe, die für die Ausgleichsrechnung verantwortlich zeichnet, ist „CODATA“ (The Committee on Data for Science and Technology). Und CODATA errechnete nun im Sommer 2017 aus den vorliegenden acht Messwerten folgende Zahlenwerte für die Konstanten:

- Avogadro-Konstante  
 $N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Planck-Konstante  
 $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ J s (J s = kg m}^2 \text{ s}^{-1})$

Die beiden Konstanten hängen dabei voneinander ab (siehe vorhergehende Doppelseite). Hat man eine Konstante, bekommt man die andere „geschenkt“. (Das Produkt aus beiden ist sehr genau bekannt bzw. viel genauer messbar als die einzelnen Faktoren.)

Wer dabei ein Gefühl für den Begriff „Präzisionsmessung“ bekommen möchte, der muss die Avogadro- oder Wattwaagen-Experimente besuchen. Alle noch so klein und nebensächlich scheinenden Präparations- und Umgebungsbedingungen können sich auf die Messergebnisse auswirken. Unter diesem Blickwinkel ist es kein Wunder, dass sich etwa die beiden größten Metrologieinstitute der Welt, PTB und NIST, nicht wirklich einig sind, wie groß nun  $h$  und  $N_A$  sind.

NIST-3, 2015  
Diese mit NIST-3 bezeichnete Wattwaage (sie basierte auf zwei kleineren Vorläufern) wurde vom National Institute of Standards and Technology (USA) betrieben. Die Waage bekam ein eigenes Gebäude – und dies nicht nur wegen ihrer Größe, sondern weil neben der Messapparatur auch all das bauliche Drumherum diverse Anforderungen erfüllen muss (von absoluter Schwingungsarmut der Böden bis zur Vermeidung aller elektromagnetischen Störungen).



IAC 2011, 2015, 2017  
Die Naturkonstanten stecken auch in kristallinen Siliziumkugeln. Unter der Leitung der PTB hat ein internationales Konsortium (das „International Avogadro Project“) die Messungen ausgeführt. Die Messungen in den Jahren 2011 und 2015 wurden an der ersten isotonenreinen Siliziumkugel (benannt mit dem Akronym AVO28) ausgeführt. Vom japanischen Metrologieinstitut (NMIJ), einem Partner im Avogadroprojekt, konnte eine unabhängige Messung an der nachbearbeiteten Kugel (AVO28-S5c) vorgenommen werden. Eine deutliche Verbesserung der Messunsicherheit gelang in der Folgezeit an neueren Kugeln. Erreicht wurde eine Messunsicherheit von nur noch  $1,2 \cdot 10^{-8}$ . Der Name „Si28-23“ verweist auf eine Kugel aus Silizium, Isotop 28 sowie auf den 3. Kristall im sogenannten Kilogramm-2-Projekt. (Diese Projekt Nummerierung bezieht sich auf die mit Russland geschlossenen Verträge zur Anreicherung von Silizium.)

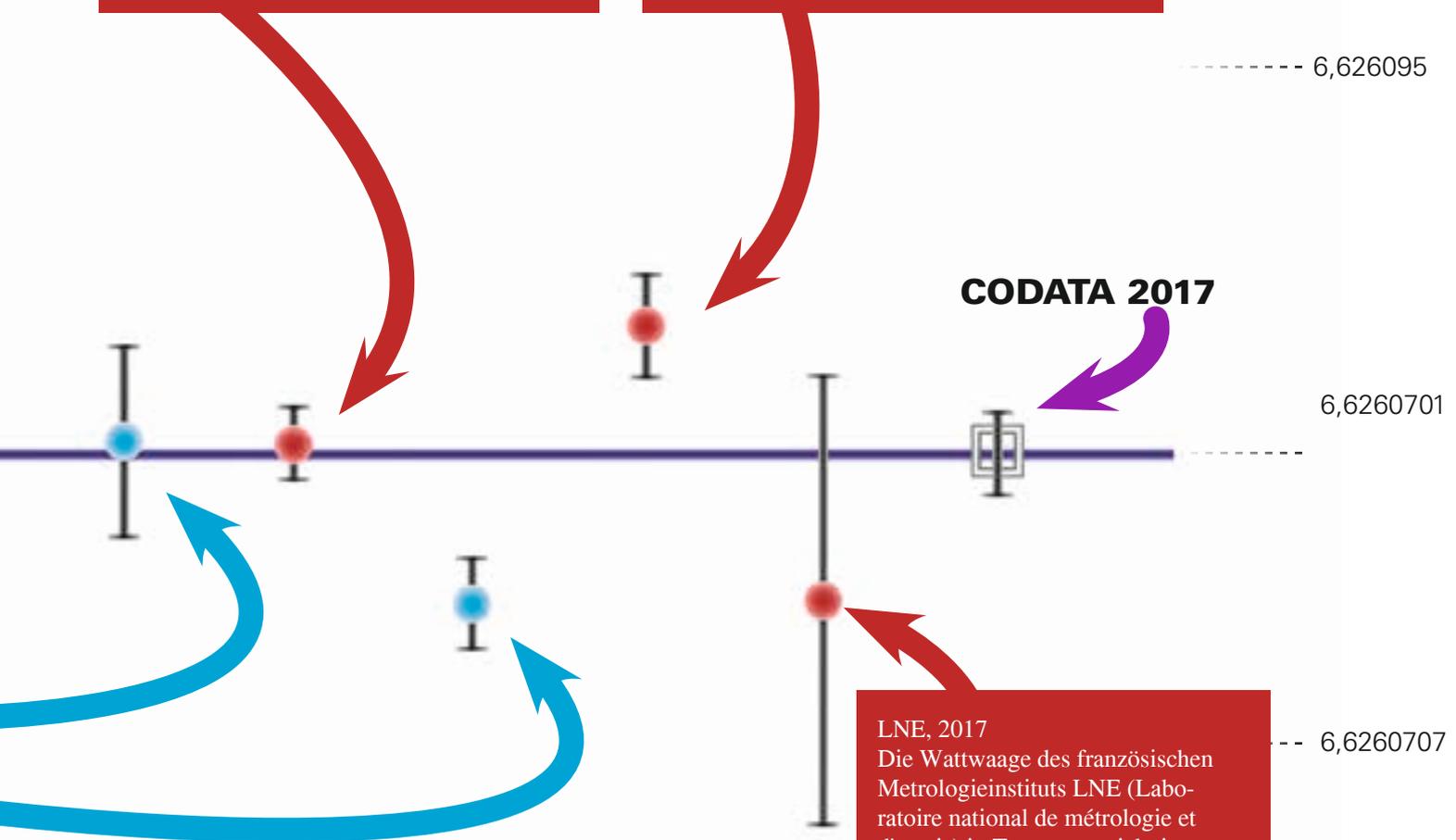
NRC, 2017

Dies ist der aktuelle Wert, den die Wattwaage am National Research Council (NRC) in Kanada liefert. Das Besondere an dieser Wattwaage ist auch ihre Vorgeschichte: Ursprünglich stammt diese Wattwaage aus England vom National Physical Laboratory (NPL). Als dort jedoch die Institutspolitik andere Schwerpunkte setzte, wurde die Wattwaage verkauft. Der Käufer: das NRC in Kanada. Und dort reüssiert die Waage nun mit extrem kleinen Unsicherheiten, in denen sich auch die langjährige Erfahrung mit dieser Apparatur widerspiegeln. Im Jahr 2018 wurde diese Waage allerdings auseinandergebaut, um die Voraussetzungen für noch kleinere Unsicherheiten zu schaffen. Man will den Wert der lokalen Erdbeschleunigung im Zentrum der Apparatur messen, und zwar auf ein Milliardstel (1 ppb) genau.

NIST-4, 2017

Mit dieser Wattwaage konnte das NIST seine bisher besten Resultate erzielen. Die relative Unsicherheit beträgt lediglich  $1,3 \cdot 10^{-8}$ . Um vor Umwelteinflüssen weitgehend unbeeinflusst zu sein, hat man den Laborraum für diese Waage ein paar Stockwerke tief unter die Erde verlegt. Mit einem Einfluss hatte man aber wohl nicht gerechnet: Wasser. Starke Regenfälle haben – das Labor liegt unterhalb des Grundwasserspiegels – zu einem massiven Wassereintrich mit verrutschenden Wänden geführt. Die gute Nachricht: „Balance is secured“. Die schlechte: Im nächsten Jahr heißt das Ziel nicht „besser messen“, sondern schlicht „Wiederaufbau (am anderen Orte)“.

$h / 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$



Ihre neuesten Messwerte liegen, auch unter Berücksichtigung der Unsicherheiten, deutlich auseinander (wobei sich dieses „deutlich“ auf den Maßstab bezieht, den ein Metrologe anlegen würde – man beachte die betroffenen Nachkommastellen, angegeben am linken und rechten Rand). Wo die Wahrheit liegt? Das weiß keiner. Für die Zeit nach der Neudefinition der Einheiten wird man aber eine zumindest provisorische Wahrheit brauchen, nämlich eine, die sagt, was ein Kilogramm sein soll. Da jede Apparatur ein leicht anderes Kilogramm realisieren würde, muss die Welt einen Kompromiss finden, den sogenannten „consensus value“. In den Gremien der Metrologie wird

LNE, 2017

Die Wattwaage des französischen Metrologieinstituts LNE (Laboratoire national de métrologie et d'essais) in Trappes erreicht im Vergleich nur eine mäßig gute Unsicherheit. Ihr Beitrag in der Ausgleichsrechnung von CODATA ist entsprechend gering.

noch darüber debattiert, wie dieser Wert zu ermitteln ist. Aber welches Prozedere auch immer gewählt wird, der Übergang zwischen dem alten und dem neuen System wird ohne Sprünge vonstattengehen. Denn die Welt braucht vieles, aber auch eines: ein stabiles Kilogramm. ■

JENS SIMON



# Die Erbsenzähler

**Der eine macht aus einem Witz eine bahnbrechende Messstrategie, der andere setzt sie penibel in die Praxis um. Zwei Chemiker schaffen die Voraussetzung für die Neudefinition des Kilogramms. Eine Geschichte mit Krimiquälitäten.**

Die Braunschweiger Olaf Rienitz und Axel Pramann kennen sich seit der Schulzeit und waren schon damals für ihre Detailverliebtheit bekannt. „Mich wundert es nicht, dass die beiden Erbsenzähler hier gelandet sind“, foppte sie ihr damaliger Physiklehrer erst kürzlich bei einem Besuch in der PTB. Die promovierten Chemiker stört der Spruch nicht, zumal der Pädagoge gar nicht mal so falsch liegt. Sie zählen zwar keine Hülsenfrüchte, sondern Atome, und das Zählen ist auch nur ein Nebenkriegsschauplatz. Aber um Genauigkeit geht es auf jeden Fall. Denn das Chemiker-Duo hat einen wichtigen Bei-

trag dazu geleistet, das Kilogramm neu zu definieren, auf mindestens acht Stellen hinter dem Komma genau.

Nötig wurde das, weil die bisherige Referenz, ein Metallklotz aus Platin und Iridium namens Urkilogramm, schleichend an Gewicht verliert. Im Avogadro-Projekt setzen die PTB-Forscher deshalb auf die unveränderliche Masse von Atomen. Sie vermessen dazu einen penibel polierten, silbern glänzenden Siliziumkristall vom Format einer Boulekkugel mit Laser- und Röntgenstrahlen. „Man kann damit sehr genau das Volumen der Kugel und den

$\omega_{\text{up}}$   
 $\mu_n = P, N_n$   
 $\mu = \lambda \cdot n \cdot R_e$

Abstand der Atome im Kristallgitter ermitteln und daraus errechnen, wie viele Atome drin sind“, erklärt Rienitz. Über die Gesamtmasse der Kugel lasse sich dann die Masse eines Atoms ermitteln – oder die molare Masse, wie Chemiker die auf eine bestimmte Stoffmenge bezogene Masse nennen.

Das klingt einfacher, als es ist, denn Silizium ist immer ein Cocktail aus drei Isotopen, die sich zwar chemisch gleich verhalten, aber wegen ihrer unterschiedlichen Zahl an Neutronen im Atomkern verschieden schwer sind. Natürliches Silizium etwa enthält zu über 90 Prozent das leichteste Isotop Silizium-28 und ein paar Prozente Silizium-29 und Silizium-30. Um nun die molare Masse von Silizium-28 zu bestimmen, müsste man wissen, wie groß die Anteile der beiden anderen Isotope sind. „Das lässt sich zwar über Messungen in einem Massenspektrometer ermitteln, aber eben nicht in der geforderten Genauigkeit“, betont Rienitz.

Um die Messunsicherheit zu verkleinern, wurde die Kugel damals zunächst aus angereichertem Silizium-28 gefertigt, mit einer Isotopenreinheit von 99,99 Prozent. Ein Riesenangehen, die Fertigung dauert etwa anderthalb Jahre. Doch selbst mit diesem aufwendigen Kniff konnte die molare Masse nur auf sechs Stellen hinter dem Komma genau bestimmt werden.

Das war vor etwa zehn Jahren, und die Forscher wähten sich in einer Sackgasse. Auch Horst Bettin, der das Avogadro-Projekt leitet, sah das wohl so und forderte die beiden Chemiker scherzhaft zu neuen Ufern auf: „Bestimmt doch eure Molmasse mal durch Isotopenverdünnung“, soll er gesagt haben. Was an diesem Spruch witzig ist, erschließt sich natürlich nur den Experten. „Isotopenverdünnung ist die derzeit genaueste Methode, um zum Beispiel Blei-Konzentrationen im Trinkwasser zu bestimmen. Sie funktioniert aber nur, wenn man die molare Masse des gesuchten Stoffes schon kennt, und die wollten wir ja in der geforderten Genauigkeit erst noch herausfinden“, erklärt Rienitz.

Doch ein paar Tage später, zu Hause unter der Dusche, kam ihm Bettins Idee plötzlich gar nicht mehr so abwegig vor. Vielleicht könnte man sich den Zirkelschluss doch irgendwie zunutze machen, überlegte er. „Was wäre, wenn wir mal annehmen, das Silizium-28 unseres Kristalls entspricht dem Wasser in einer Trinkwassermessung und Silizium-29 und Silizium-30 zusammen, als eine Art virtuelles Element, entsprechen dem Blei? Dann könnte man vielleicht aus der Konzentration dieses virtuellen Elements auf die molare Masse des ‚Lösemittels‘ Silizium-28 zurückrechnen.“

Um seine doch etwas verrückt klingende Idee zu prüfen, schloss sich Rienitz 14 Tage im Büro ein, verließ es nur, um zu essen und nachts zu Hause zu schlafen. Das Handy blieb ausgeschaltet. Er entwarf Gleichungen auf Papier, rechnete hin und her und simulierte alles am Computer, bis er schließlich sicher war: „Es hört sich absurd an, aber

es funktioniert.“ Allerdings waren selbst die Kollegen anfangs skeptisch. Und einer der Gutachter des Papers, das Rienitz und Pramann dazu im Fachblatt International Journal of Mass Spectrometry veröffentlichen wollten, verweigerte sogar die Prüfung des Rechenwegs. „Wenn das so funktionieren würde, hätte es doch längst schon jemand gemacht“, soll er gesagt haben. Rienitz gab aber nicht klein bei, sondern wendete sich direkt an den damaligen Herausgeber der Zeitschrift. „Der rechnete alles über Nacht nach und befand es für stimmig“, freut er sich noch heute. Es konnte also weitergehen, und das virtuelle Element aus Silizium-29 und Silizium-30 bekam sogar einen Namen: „Braunschweigium“.

Doch schon ergab sich das nächste Problem: die mangelnde Genauigkeit des Messgeräts. Wie bei der Isotopenverdünnung üblich, wird zum einen das Isotopenverhältnis der Originalprobe im Massenspektrometer gemessen und zusätzlich das Isotopenverhältnis einer Mischung aus Probe und einem Silizium-Isotopencocktail bekannter Zusammensetzung. Aus der Änderung der Isotopenverhältnisse lassen sich dann die gesuchten Größen ermitteln. „Leider misst kein Massenspektrometer der Welt tatsächliche Isotopenverhältnisse, und die Signalverhältnisse bilden die Wahrheit leider nicht eins zu eins ab“, erklärt Rienitz.

Um das zu verstehen, muss man wissen, wie die Messungen im Massenspektrometer funktionieren. Eine in Wasser gelöste Siliziumprobe wird in einem Argonplasma bei rund 10 000 Grad Celsius atomisiert. Die Siliziumatome werden elektrisch positiv aufgeladen, in einem elektrischen Feld beschleunigt und mit einem Magneten um eine Kurve gezwungen. Dabei trägt es die schweren Isotope weiter aus der Kurve als die leichteren, sodass sie am Ende der Strecke an verschiedenen, entsprechend platzierten Detektoren auftreffen. Je mehr Teilchen auf einen Detektor treffen, desto stärker das Signal.

Das größte Problem ist das Plasma, ein Gemenge aus Elektronen, Argon- und Siliziumteilchen. Die schweren Partikel kommen hier schlicht besser durch und damit auch zahlreicher auf die Teststrecke. „Das ist wie am Kinoausgang. Die korpulenteren Menschen kommen in der Regel schneller raus“, erklärt Rienitz. Dieses Phänomen verfälsche die Messung, was normalerweise durch eine Kalibrierung mit einer bekannten Referenzsubstanz herausgerechnet werde. Doch eine Referenz in der geforderten Genauigkeit gibt es eben nicht.

Noch einmal durchforsteten Rienitz und Pramann das Reich der chemischen Analytik, wurden fündig und konnten eine „uralte Methode“, so Rienitz, für ihr Problem umstricken. Noch einmal zog sich der Chemiker für zwei Wochen zum Durchrechnen in sein Büro zurück. Und wieder hatte er Erfolg. Die zweite Veröffentlichung kam gleich im ersten Anlauf durch.

Die Umsetzung in die Praxis ist Teil drei des Krimis und vor allem Axel Pramanns Verdienst. Er gibt sich bescheiden,

aber Metrologen aus Kanada, Japan, China und den USA waren schon zu Gast, um von ihm zu lernen. „Das größte Problem ist, dass Silizium das zweithäufigste Element der Welt ist“, erzählt der Chemiker. Es steckt vor allem in Sand und Glas, aber auch in vielen anderen Materialien. Für die Messungen kommen deshalb Spezialflaschen aus einem teflonartigen Kunststoff zum Einsatz, die zudem in mehreren Schritten gereinigt werden müssen. „Allein die Vorbereitung der Flaschen dauert mehrere Tage“, berichtet er.

In den Flaschen werden schließlich Stücke des Siliziumkristalls gelöst, was noch einmal zwei bis drei Wochen Zeit braucht. Die Stücke müssen zudem supergenau eingewogen werden, in einem Raum mit elektrisch leitfähigem Boden, damit keine Aufladungseffekte durch den Bediener die elektronischen Waagen stören. Auch Luftdruck und Luftfeuchtigkeit gilt es zu berücksichtigen. Zudem misst Pramann nicht nur die Siliziumproben im Massenspektrometer, sondern auch immer wieder reines Lösungsmittel ohne Silizium, um zu sehen, wie Lösungsmittel und Flaschen das Ergebnis beeinflussen. „Das muss dann bei der Auswertung berücksichtigt werden“, betont er.

Dass sich das „Erbsenzählen“ bis hierher schon gelohnt hat, davon sind die Forscher überzeugt. Sie können die molare Masse von Silizium und damit auch die Avogadro-Konstante auf acht Stellen hinter dem Komma genau bestimmen. Auch die Avogadro-Konstante gehört zu dem Club der sieben Naturkonstanten, auf die sich das neue SI stützt. Sie besagt, wie viele Teilchen

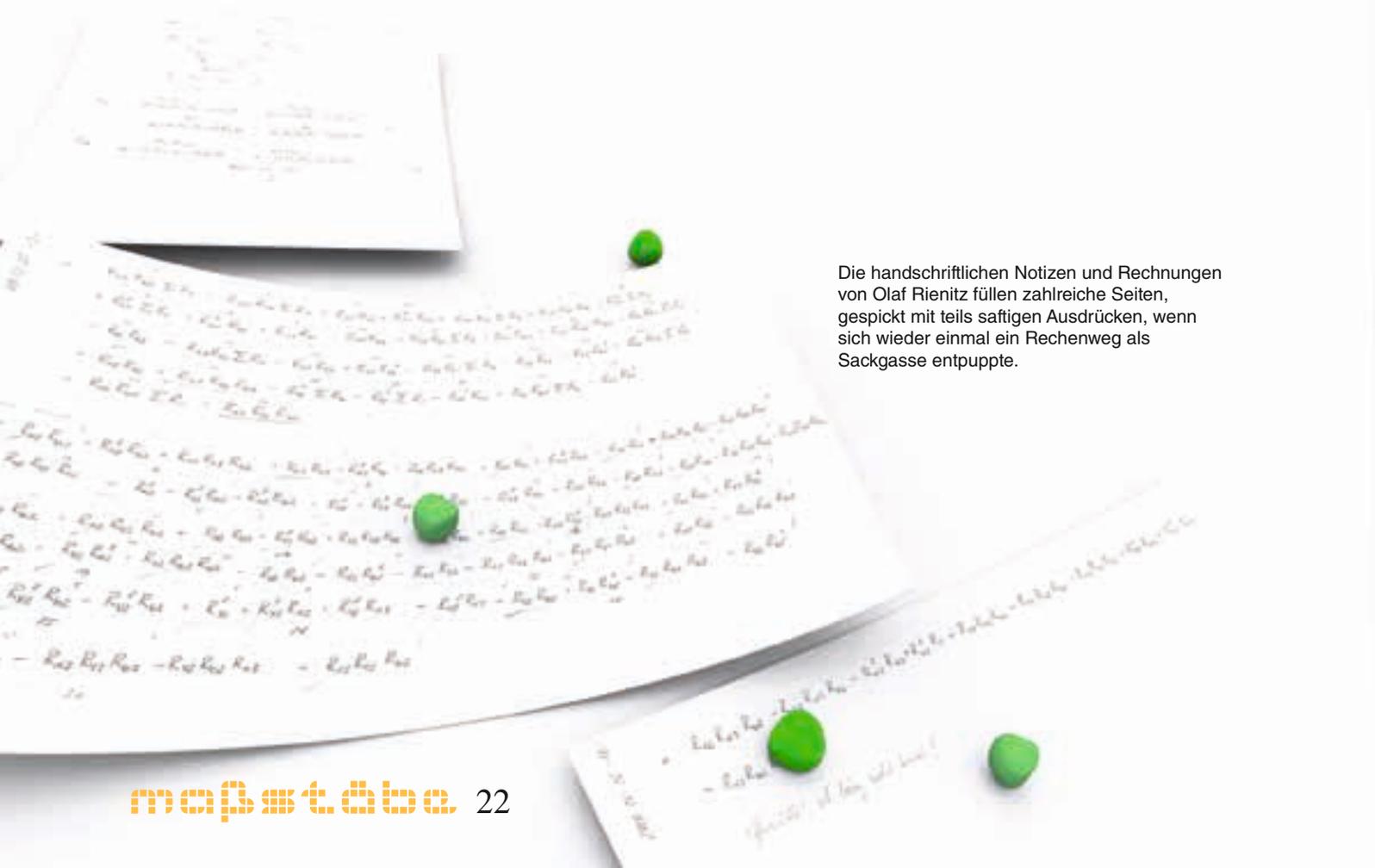
die Stoffmenge „Mol“ hat, und lässt sich zudem in die Planck-Konstante umrechnen und damit in die Grundlage für die Kilogramm-Neudefinition der metrologischen Konkurrenz.

In internationalen Ringversuchen konnten die Ergebnisse der Braunschweiger schon bestätigt werden. Auch Messungen mit verschiedenen Proben eines Kristalls und aus unterschiedlichen Kristallen lieferten immer das gleiche Ergebnis. „Das zeigt, dass alles passt“, freut sich Pramann. Damit sei das Thema allerdings auch ausgereizt. Noch genauer gehe es kaum. Auch deshalb arbeiten Rienitz und Pramann schon am nächsten Projekt. Sie wollen die molare Masse aus einem natürlichen Siliziumkristall genauso genau bestimmen wie aus dem angereicherten Material. Das wäre kostengünstiger und würde die Methode auch für andere Metrologieinstitute attraktiver machen.

„Allerdings funktioniert es mit unserem bisherigen Ansatz nicht, und wir haben noch nicht verstanden, warum“, sagt Rienitz. Deshalb müsse ein neues Verfahren her. Zwei Ideen dafür hat der Chemiker schon. Davon zeugt nicht zuletzt ein Haufen Zettel auf seinem Schreibtisch, vollgeschrieben mit mathematischen Gleichungen. Wann er sich wieder zum Rechnen einschließt und möglicherweise den nächsten Durchbruch einleitet, ist aber zurzeit noch nicht absehbar. ■

ANDREA HOFERICHTER

Illustration Seiten 20 und 22: PTB  
Foto Seite 23: PTB



Die handschriftlichen Notizen und Rechnungen von Olaf Rienitz füllen zahlreiche Seiten, gespickt mit teils saftigen Ausdrücken, wenn sich wieder einmal ein Rechenweg als Sackgasse entpuppte.



Kugeln für Groß und Klein: eine Mol- und eine Kilogramm-Kugel aus Silizium



# Das „revolutionäre“ Ampere

**Für den Endverbraucher ändert sich nichts. Für die Experten aber ist es eine Revolution. Vielleicht. Die Neudefinition der elektrischen Einheiten im SI ist ein Quantensprung – und holt das Volt und das Ohm aus der „Quasi-Illegalität“. Von Dreiecken und dem Schäfchenzählen ...**

Physiker mögen es am liebsten ganz einfach. Je schlichter ein Prinzip ist, desto schöner. Das ist zwar manchmal schwer vorzustellen, betrachtet man hochkomplizierte Laboraufbauten. Oder Berechnungen. Doch für Forscher ist es ein ganz besonderer Glanzpunkt, wenn das Zurückführen auf etwas ganz Simples gelingt – theoretisch oder praktisch.

Wie die Sache mit den Elektronen und dem Ampere: Will man Kindern den elektrischen Strom erklären, dann meist

mit dem Bild, dass Elektronen in der Leitung entlang fließen wie Wassertropfen. Und wie viel Strom fließt dann pro Sekunde? Kann man da nicht einfach die Elektronen zählen?

Schön wäre es, dachten sich die Forscher lange Jahre. Aber wer kann schon einzelne Elektronen zählen? So winzig sind sie, dass  $10^{20}$  von ihnen, das sind zehnmal 1 Milliarde mal 1 Milliarde, im Volumen eines Stecknadelkopfs enthalten sind. Sehen kann man sie sowieso nicht,

dazu sind sie viel zu winzig. Über ihre Auswirkungen kann man ihnen schon eher beikommen, aber dafür braucht man sehr, sehr viele von ihnen. Die aber einzeln zu zählen war lange Zeit schlicht unmöglich – und der „einfache“, gut erklärbare Weg war verbaut.

In der Praxis war also die Elektrizität nie direkt fassbar. Die ersten Forscher auf dem Gebiet schienen gar zu zaubern – ließen sie doch mit „unsichtbarer Kraft“ Haare zu Berge stehen, Metallspäne wandern oder kleine Blitze entstehen. Letztendlich maß man einfach die Auswirkungen der Elektronen, entweder beim Stromfluss oder wenn viele von ihnen auf einer Oberfläche angesammelt waren.

Die Zersetzung chemischer Substanzen durch Strom war ein weiterer dieser „Zaubereffekte“, und so lautete die gängige Definition des 19. Jahrhunderts: Ein Ampere ist die nötige Stromstärke, um aus einer wässrigen Silbernitratlösung 1,118 Milligramm Silber abzuscheiden.

Doch ab 1948 wurde genauer und allgemeingültig definiert – und richtig komplex. Die neue Formulierung steht bis heute weltweit in den Schulbüchern: eine halbe Kurzgeschichte, ein Satz mit 43 Wörtern und sechs Kommas: 1 Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes, der, durch zwei im Abstand 1 Meter voneinander angeordnete, geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je 1 Meter Leiterlänge die Kraft  $2 \cdot 10^{-7}$  Newton hervorrufen würde.

Natürlich strebten Physiker immer danach, die Definition mit hochkomplexen Laboraufbauten möglichst nachzustellen. Doch unendlich lange, quasi unendlich dünne Leiterdrähte... Da ist ein korrekter Wert de facto immer nur näherungsweise herauszufinden.

## Schafe zählen, nur genauer

„Mit der kommenden Definition werden – insbesondere mit Blick auf die elektrischen Einheiten – bislang bestehende Unzulänglichkeiten des Einheitensystems repariert“, sagt Hansjörg Scherer, Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Stromstärke und Quanten-Widerstand“.

Ab 2019 soll es schlicht heißen: Ein Ampere wird gemessen als Elektronen pro Zeiteinheit. Man darf „einfach nur“ die Elektronen zählen, die da als elektrischer Strom durch einen Leiter flitzen.

Damit ankert die elektrische Stromstärke ganz offiziell an der Naturkonstante  $e$ , der Elementarladung eines Elektrons (die physikalisch korrekt  $-e$  beträgt). Und

das Internationale Einheitensystem SI hat wieder eine Ampere-Definition, die sich in der Realität tatsächlich durchführen lässt.

„Es ist zwar schwierig, Elektronen einzeln abzuzählen, aber inzwischen, dank der Fortschritte der Nanotechnologie, machbar“, erklärt Franz Josef Ahlers, Leiter des PTB-Fachbereiches „Elektrische Quantenmetrologie“. Das Werkzeug dazu nennt sich Einzelelektronenpumpe, und das Zählen übernimmt ein „Single Electron Transistor“ (SET). Schnelle Spannungswechsel sorgen in dem komplexen Bauelement dafür, dass immer nur ein Ladungsträger durch eine Engstelle geschoben wird – in sehr rascher Folge.

Per definitionem müssen dann für ein Ampere 6 241 509 629 152 650 000 Elektronen pro Sekunde durch eine Leitung wandern. „Wir lassen sie sozusagen von Stelle zu Stelle hüpfen“, so Ahlers, „ähnlich wie beim Schafzählgatter auf einer großen australischen Schaf-farm.“ Gegen das Verzählen oder technische Schnitzer konstruiert man Aufbauten aus mehreren SETs samt automatischer Fehlerkorrektur. „Ein Ampere schafft man zwar auch nicht, aber 1 milliardstel Ampere könnte durchaus drin sein, und das würde erstmal reichen“.

## Im metrologischen Dreieck

Solange so etwas technisch noch nicht möglich war, erhielten Physiker das Ampere zuletzt sehr genau auf eine quasi „illegale“ Art: indem sie Spannung und elektrischen Widerstand maßen und dann rechneten, und zwar mit der alten Schulformel  $U = R \cdot I$ , also Spannung (Volt) ist gleich Widerstand (Ohm) mal Stromstärke (Ampere). Wer in diesem Dreiecksverhältnis also  $U$  und  $R$  kennt, erhält ganz leicht das  $I$ .

Die praktische Finesse lag darin, dass sich sowohl Spannung als auch Widerstand schon seit mehreren Jahrzehnten sehr stabil und einfach messen lassen – aufgrund von quantenmechanischen Effekten, deren Entdeckung sogar Nobelpreise wert waren.

Die Hauptrolle in beiden Entdeckungen spielen die Fundamentalkonstanten  $e$  (die Elementarladung) sowie  $h$  (das Planck'sche Wirkungsquantum): Für die Spannung hatte Brian D. Josephson schon 1962 theoretisch erkannt, dass in speziellen Supraleiter-Magnetfeld-Anordnungen konstante Stufen auftreten und exakt das Verhältnis  $2e/h$  widerspiegeln. Es wurde Josephson-Konstante genannt,  $K_J$ .

Und für den elektrischen Widerstand gelang Ähnliches, nachdem Klaus von Klitzing 1980 den Quanten-Hall-

Effekt entdeckt hatte: Die Widerstandswerte eines extrem flachen Halbleiters sind bei Kälte und starken Magnetfeldern immer ganzzahlige Bruchteile von  $h/e^2$  – seither die Von-Klitzing-Konstante,  $R_K$ .

## Arbeiten in der Parallelwelt

Schnell gelang es, immer kleinere Messvorrichtungen zu konstruieren, erklärt Ralf Behr, Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Josephson-Effekt, Spannung“. Er zeigt einen elektronischen Chip, auf dem bis zu 70 000 Josephson-Kontakte – die sorgen für 70 000-mal höhere Spannungsstufen – hintereinander verbaut sind. Solche Bauelemente (beim Widerstand waren es sogenannte Quanten-Hall-Elemente) halfen im ersten Schritt beim möglichst genauen Vermessen der beiden neuen Konstanten. Im zweiten Schritt, als diese Ergebnisse weltweit immer besser übereinstimmten, wurden daraus 1990 feste Werte definiert ( $K_{J-90}$  und  $R_{K-90}$ ), auf die man seither bauen kann.

Und das drehte die Arbeitsweise der Elektronik-Forschung auf den Kopf: „Man hat schlagartig die beiden Einheiten für Spannung und Widerstand aus der klassischen SI-Definition herausgenommen und auf Quantenfüße gestellt“, sagt Scherer. Jetzt konnte man die Messelemente als Messnormale nutzen – quasi als „Urmeter“ für die elektrischen Einheiten.

Und die praktische Folge: Über das Ohm'sche Gesetz ließ sich so ganz einfach auch die Stromstärke ausrechnen. Schlicht, genau, gerne genutzt – und offiziell „illegal“. Zumindest bewegte sich die übliche Arbeitsweise außerhalb der gültigen SI-Welt, legt diese doch das Ampere als Basiseinheit fest, von der sich Volt und Ohm ableiten. Nicht umgekehrt.

## Revolution? Vielleicht

Insofern holt die Neudefinition des Ampere die Elektronik-Forscher wieder zurück ins offizielle Boot. „Im neuen Einheitensystem werden jetzt die Werte für  $e$  und  $h$  verbindlich festgelegt“, erklärt Scherer, „daraus kann man sich die Josephson- und die Von-Klitzing-Konstante berechnen.“ Querrechnungen innerhalb des Dreiecks sind dann erlaubt. Und „eigentlich sind ja alle drei Einheiten gleichberechtigt.“

Also ist es denn nun eine Revolution? Es ist jedenfalls ein Paradigmenwechsel, weil jetzt natürliche Konstanten das Maß aller Dinge sind – wie in Max Plancks viel zitiert Vision. „Für alle Zeiten und Culturen“. Im ganzen

Weltraum. Doch eigentlich spiegelt es nur die Weiterentwicklung der physikalischen Forschung, so Ahlers: „Wir machen keine neue Physik, aber wir haben endlich anwendbare Methoden, um auch das letzte Artefakt, das Urmeter in Paris, loszuwerden“.

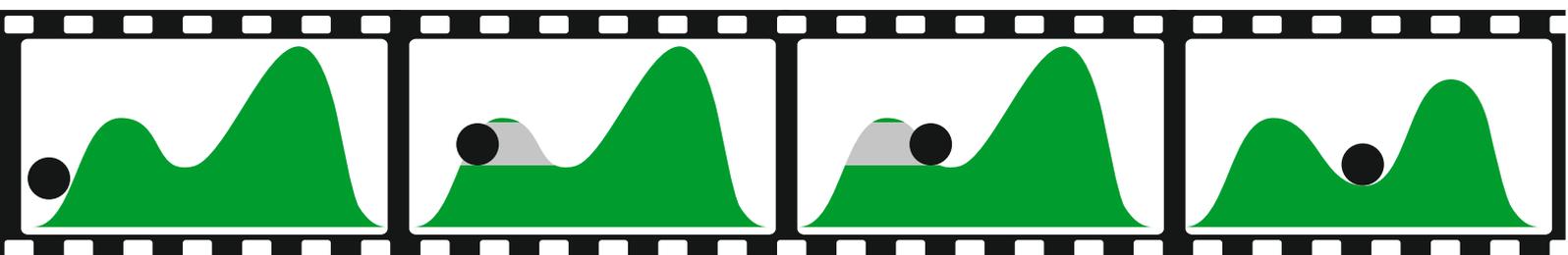
So sind die Einheiten Ampere und Kilogramm viel enger verbunden, als es zunächst den Anschein hat: nämlich über die Naturkonstante  $h$ . Sie findet sich in beiden elektrischen Naturkonstanten, die bis jetzt „illegal“ verwendet wurden; Josephson- und Von-Klitzing-Konstante. Ins System kommt sie aber über das „neue“ Kilogramm. Es wird im revidierten SI auf  $h$  beruhen – und nicht auf der ebenso möglichen Avogadro-Konstante. Die Bedürfnisse bei den elektrischen Einheiten waren der Grund, warum man nun beim Kilogramm nicht einfach Atome zählt, sondern mit einer Wirkung ( $h$ ) argumentieren muss, die sich viel schlechter erklären lässt (siehe Kilogramm-Artikel auf den Seiten 12–19). Physikalische und politische Winkelzüge – aber stets ganz akkurat und auf sehr viele Stellen hinterm Komma genau.

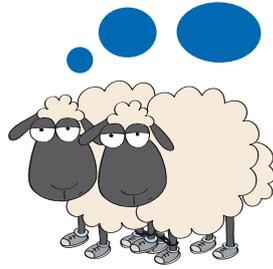
Und die Auswirkungen auf die Praxis, also auf jene Labore, in denen elektrische Messgeräte kalibriert werden? Sie können in Zukunft genau das tun, was sie eh schon tun, nur auf offiziell legaler Grundlage – nicht dass ihre jetzige Tätigkeit allerdings strafrechtlich illegal wäre. Trotzdem: Offiziell auf Konstanten beruhende Quantennormale werden vielleicht in Zukunft in mehr Laboren gebaut als jetzt. „Vielleicht wird das neue SI Innovationen beschleunigen – man wird sehen!“, sagt Franz Josef Ahlers. Auf jeden Fall arbeitet sein Fachbereich bereits daran, die Bedienung solcher Quantennormale einfacher und auch außerhalb von Hightech-Laboren möglich zu machen.

Und dann würden die obersten „Hüter der Maße“, die PTB und andere nationale Institute, nur noch gelegentlich mit mobilen Mess-Normalen zum Abgleich vorbeikommen (oder die Kollegen aus der Industrie nach Braunschweig kommen lassen) und im Übrigen an weiteren Grundlagen forschen. Ebenso werden sich die internationalen Gremien mit der Umstellung 2019 nicht abgeschafft haben, sondern sich verstärkt anderen Projekten zuwenden.

„Es ist auch deshalb keine Revolution, weil die Umstellung möglichst nahtlos an das alte System anschließt, ohne Sprünge im Alltag“, meint Scherer. „Aber man hat dann ein wunderschönes, konsistentes, auf Fundamentalkonstanten beruhendes System.“ Und Kollege Behr ergänzt: „Das ist dann einfach alles sehr smart, wie es definiert sein wird.“ Einfach eben. ■

DÖRTE SASSE

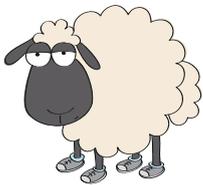
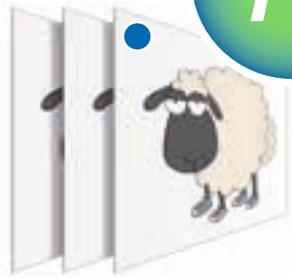
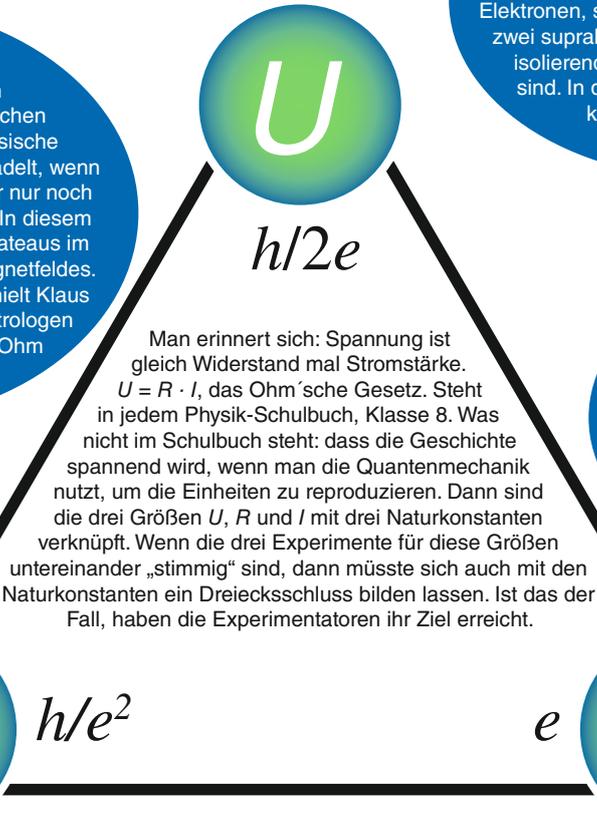




Wer ein sehr präzises Volt, die Einheit der elektrischen Spannung, möchte, sollte dazu den Josephson-Effekt nutzen (benannt nach und entdeckt von Brian D. Josephson). Bei diesem Effekt tunneln Pärchen von Elektronen, sogenannte Cooper-Paare, zwischen zwei supraleitenden Kontakten, die durch eine isolierende Barriere voneinander getrennt sind. In den Kennlinien bilden sich Stufen konstanter Spannung aus.

Die Welt verändert sich drastisch, wenn man ihr eine Dimension wegnimmt. Der in jedem studentischen Physikpraktikum abgehandelte klassische Hall-Effekt wird quantenmechanisch geadelt, wenn man den Elektronen in einem Halbleiter nur noch Bewegungen in einer Ebene einräumt. In diesem zweidimensionalen Fall zeigen sich Plateaus im Hall-Widerstand – als Funktion des Magnetfeldes. Für die Entdeckung dieses Effektes erhielt Klaus v. Klitzing den Physik-Nobelpreis. Metrologen nutzen den Effekt, um die Einheit Ohm zu reproduzieren.

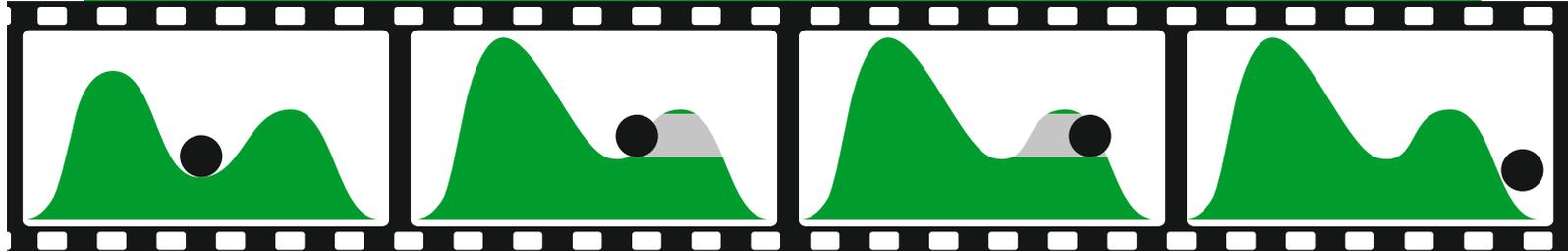
Will man das Ampere, die Einheit der Stromstärke, auf die Naturkonstante „Elementarladung“ zurückführen, dann stellt sich die Aufgabe, die Elektronen zu zählen, die für den Strom verantwortlich sind. Denn die elektrische Stromstärke ist ja nichts anderes als „fließende Ladung“, also „Ladung pro Zeit“. Der experimentelle Aufbau dazu sind nanotechnologische Einzelelektronenpumpen.



**Eine Insel mit zwei Bergen**

Wer Elektronen zählen möchte, muss sich etwas einfallen lassen. Denn diese kleinen Objekte entziehen sich gewöhnlich der Einzelmessung. Die Idee: Man konstruiere eine Insel, auf die genau ein Elektron passt. Einem zweiten Elektron, das auch auf die Insel wollte, wäre der Zutritt verboten, denn gleiche Ladungen stoßen sich bekanntlich ab. Wenn man nun noch einen Mechanismus konstruiert, mit dem man ein Elektron, sagen wir, auf die Südseite einer leeren Insel bringen kann, es nach kurzer Zeit auf der Nordseite wieder von der Insel verbannt und damit Platz für ein neues Südseiten-Elektron macht, dann ließen sich diese Transportvorgänge und also einzelne Elektronen zählen. Genau dieses Prinzip hat man in Einzelelektronenpumpen, hergestellt mittels Halbleiter-Nanotechnologie, verwirklicht, was in den Einzelbildern in der Fußzeile angedeutet ist. Die „Insel“ ist der Bereich zwischen den beiden Potentialbergen. Und die Höhen dieser Berge, d. h. die Potentialbarrieren, sind steuerbar. Zunächst wird der linke Berg soweit abgesenkt, dass ein Elektron auf die Insel schlüpfen kann (ein quantenmechanischer Tunnelprozess). Dann hebt man diesen Berg wieder an, sodass das Elektron kurzzeitig lokalisiert ist. Dann senkt man den rechten Berg so weit ab, dass das Elektron den dann nur noch kleinen rechten Hügel durchtunneln kann. Nun beginnt das Spiel von vorn. Wiederholt man eben dies mit der Rate  $f$ , dann erzeugt man so einen Strom der Stärke  $I = e \cdot f$

jes



# Von der Kunst,

Zehn Jahre lang hat ein PTB-Team daran gearbeitet, die Boltzmann-Konstante so genau zu vermessen wie irgend möglich. Es war ein steiniger Weg – mit einigen wenigen Glücksmomenten.

Wenn es um wohltemperierten grünen Tee geht, kann Christof Gaiser schon mal ein Auge zudrücken. „Das sind jetzt wohl eher keine 90 Grad“, bemerkt der promovierte Experimentalphysiker entschuldigend, während er heißes Wasser undefinierter Temperatur in eine schwarze Teekanne in seinem Büro gießt.

Es ist ein nüchterner Raum in einem schmucklosen Gebäude, dem Emil-Warburg-Bau auf dem PTB-Campus in Berlin-Charlottenburg. Kein Vergleich zu dem eindrucksvoll restaurierten Observatorium ein paar Meter weiter, in dem schon Hermann von Helmholtz tätig war, Max Planck und Albert Einstein ein und aus gingen und das 2013 von der Europäischen Physikalischen Gesellschaft als „Historic Site“ ausgezeichnet wurde. Wenig deutet darauf hin, dass auch im grauen Emil-Warburg-Bau Geschichte geschrieben wurde. Doch tatsächlich haben Gaiser und acht Kolleginnen und Kollegen von der PTB hier nichts Geringeres als die Neudefinition der Einheit Kelvin in Angriff genommen. Und vollendet.

Aus diesem Grund hat sich Gaiser, Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Rauschthermometrie“, in den vergangenen zehn Jahren kaum etwas anderem so intensiv gewidmet wie der präzisen Messung von Temperaturen. Grüner Tee blieb dabei freilich außen vor, und das Gerät, mit dem Gaiser hantierte, würde man landläufig nicht als Thermometer erkennen. Seine Kollegen und er verwendeten ein sogenanntes Primärthermometer. Solche Messvorrichtungen bestimmen Temperaturen direkt aus fundamentalen physikalischen Gesetzen. Es sind komplizierte,

Foto: Dadrot / Wikipedia

# sich durchzubeißen

schwer zu handhabende Experimente, die Tage oder sogar Monate betrieben werden müssen, um einen einzigen Wert zu liefern.

Die PTB-Forscher trugen zusammen mit anderen Teams weltweit dazu bei, Temperaturmessungen auf eine neue Grundlage zu stellen: Die Temperatur soll nicht mehr von Materialeigenschaften eines Stoffes abhängen, sondern nur noch von unveränderlichen Naturkonstanten. „Bislang wird die Einheit Kelvin über den Tripelpunkt von Wasser definiert“, erläutert Gaiser. Bei einer Temperatur von exakt 273,16 Kelvin (oder 0,01 Grad Celsius) kommen Wasserdampf, flüssiges Wasser und Eis gleichzeitig vor.

Das Problem dabei: Der Tripelpunkt ist zwar auch eine Art Naturkonstante, aber jede Wasserprobe besteht aus verschiedenen Anteilen schwerer und leichter Wasserstoff- und Sauerstoff-Atome, sogenannter Isotope. Je nachdem, ob das Wasser aus dem Meer, aus dem Untergrund, aus Schnee, Eis oder Süßwasser gewonnen wurde, schwanken das Isotopenverhältnis und infolgedessen auch der Tripelpunkt. „Damit ist das Kelvin genauso von einem veränderlichen Material abhängig, wie es derzeit noch beim Kilogramm mit dem Prototyp in Paris der Fall ist“, erläutert Gaiser.

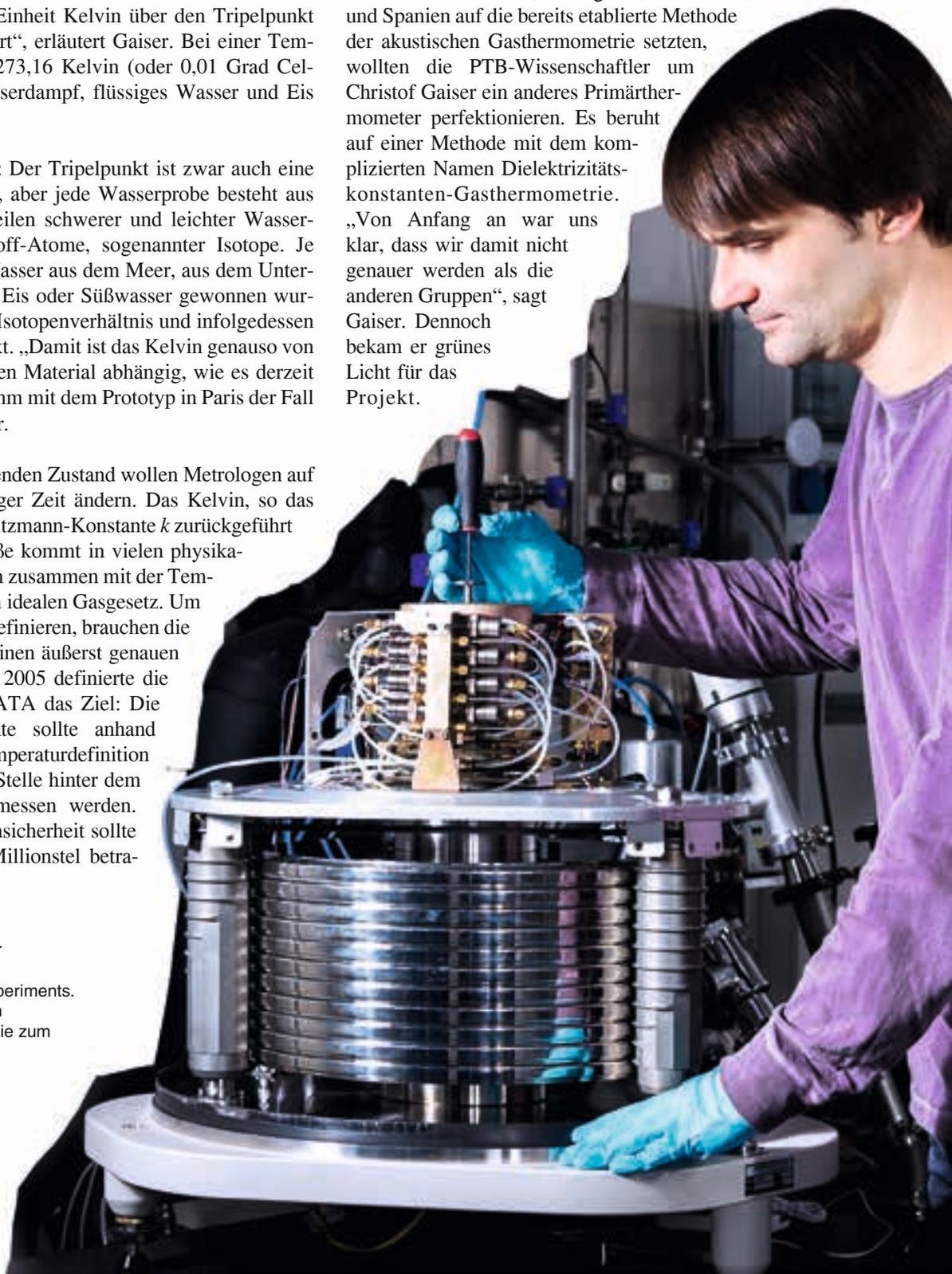
Diesen unbefriedigenden Zustand wollen Metrologen auf aller Welt seit einiger Zeit ändern. Das Kelvin, so das Ziel, soll auf die Boltzmann-Konstante  $k$  zurückgeführt werden. Diese Größe kommt in vielen physikalischen Gleichungen zusammen mit der Temperatur vor, etwa im idealen Gasgesetz. Um das Kelvin neu zu definieren, brauchen die Metrologen daher einen äußerst genauen Wert für  $k$ . Bereits 2005 definierte die Kommission CODATA das Ziel: Die Boltzmann-Konstante sollte anhand der bisherigen Temperaturdefinition bis auf die sechste Stelle hinter dem Komma genau gemessen werden. Die relative Messunsicherheit sollte weniger als zwei Millionstel betra-

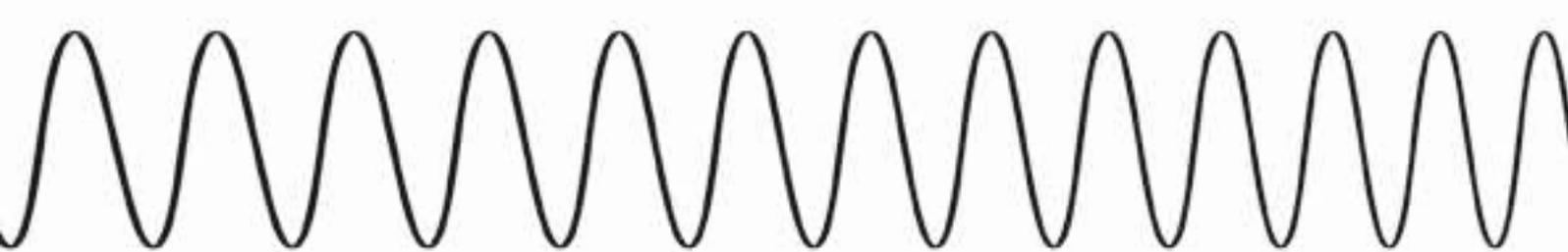
gen, in der Sprache der Metrologen: weniger als 2 ppm (Abkürzung für „parts per million“). Anschließend sollte der Wert der Konstante ein für allemal festgelegt werden – damit alle Temperaturen von da an anhand der neuen Definition bestimmt werden können.

Sechs Gruppen machten sich daran, diese Aufgabe zu vollbringen – darunter auch ein PTB-Team. Während Forscher in den USA, in England, Frankreich, Italien und Spanien auf die bereits etablierte Methode der akustischen Gasthermometrie setzten, wollten die PTB-Wissenschaftler um Christof Gaiser ein anderes Primärthermometer perfektionieren. Es beruht auf einer Methode mit dem komplizierten Namen Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie.

„Von Anfang an war uns klar, dass wir damit nicht genauer werden als die anderen Gruppen“, sagt Gaiser. Dennoch bekam er grünes Licht für das Projekt.

Christof Gaiser mit der Druckwaage, einem Nebenprodukt des Experiments. Sie wurde auf anderen Gebieten der Metrologie zum Hauptdarsteller. (Foto: PTB)





„In der Metrologie ist es üblich, dass ein Wert mit mindestens zwei Methoden unabhängig voneinander gemessen wird, damit keine systematischen Fehler übersehen werden“, erläutert der Physiker. Es entspreche außerdem der Philosophie der PTB, manchmal einen alternativen Weg zu wählen – auch weil dabei häufig Neues herauskommt.

Gaisers Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer füllt ein fensterloses Labor im Erdgeschoss des Emil-Warburg-Baus, in dem es wegen der Klimatisierung ständig rauscht. „Das hier sind jetzt zehn Jahre Arbeit“, sagt der Physiker mit verlegenem Stolz und legt seine Hand auf ein massives blaues Metallgestell, an dem eine Plattform mit vier silbern glänzenden Zylindern und allerlei Kabeln und Leitungen befestigt ist: das eigentliche Thermometer. Darum herum befinden sich noch weitere Geräte, etwa ein großer, mit Salzkrusten bedeckter Metallkessel, in dem ein Kubikmeter Wasser für die finalen Messungen ein Jahr lang auf Messtemperatur gehalten wurde – mit Schwankungen von maximal einem tausendstel Grad Celsius. Auf einem Tisch ist ein Apparat unter einem metallischen Deckel verborgen, der an eine Servierglocke aus vornehmen Restaurants erinnert – ein Druckmessgerät. Christof Gaiser streift Schutzhandschuhe über, um das Herzstück seines Thermometers vorzuführen. Mit äußerster Vorsicht holt er einen glänzenden Metallkolben aus einer Vitrine und offenbart dessen Innenleben: zwei ineinandersteckende Metallzylinder aus dem extrem druckbeständigen Metall Wolframkarbid.

Die beiden Zylinder bilden die Elektroden eines Kondensators. Bei den Messungen füllte Helium mit einem Druck von bis zu 70 Bar den gesamten Kolben und insbesondere den Zwischenraum zwischen den Elektroden aus – als sogenanntes Dielektrikum. „Das Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer beruht darauf, dass sich die Kapazität des Kondensators ändert, wenn der Druck steigt“, erläutert Christof Gaiser. Misst man die Kapazität also mit steigendem Druck bei konstanter Temperatur, erhält man die Boltzmann-Konstante.

Die vielen Mühen, die in diesem Versuchsaufbau stecken, sieht man nicht auf den ersten Blick. Erst wenn Christof Gaiser erzählt, wird sichtbar, welchen Aufwand er und seine Kollegen betreiben mussten, um die Messunsicherheit von anfangs 15 ppm auf weniger als 2 ppm zu senken. Um sicherzustellen, dass ihr Heliumgas rein genug war, schaffte sich die Gruppe ein Massenspektrometer an. Die Erdbeschleunigung musste direkt im Labor bestimmt werden, weil relative Messungen

nicht präzise genug waren. „Und allein fünf Jahre hat es gedauert, die Unsicherheit der Druckmessung von 4 ppm auf 1 ppm zu verringern“, sagt Christof Gaiser. „Der Kampf um das letzte ppm hat sehr lange gedauert.“ Dafür ist die PTB jetzt allerdings weltweit führend, was die Genauigkeit von Druckmessungen angeht – eine Errungenschaft, die auch anderen Projekten zugutekommt.

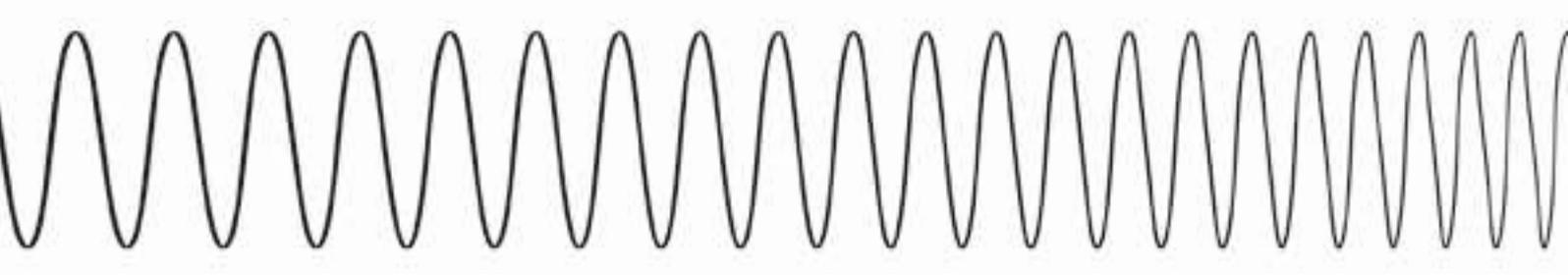
Die Messung der Kapazität war ebenfalls eine Herausforderung. Dabei konnte das Team auf Vorarbeiten im Berliner PTB-Institut zurückgreifen, die dort in den 1980er und 1990er Jahren stattgefunden hatten. „Die Anforderungen an die Genauigkeit waren beim Boltzmann-Projekt allerdings deutlich höher“, berichtet Gaiser. Als Knackpunkt erwies sich zum Schluss ein Problem, das die Forscher am Anfang gar nicht für so gravierend erachtet hatten: die Verformung der Elektroden durch den hohen Gasdruck. Gaiser und seine Kollegen probierten verschiedene Materialien und unterschiedliche Typen von Kondensatoren aus, um das beste Design zu finden. Sie führten Simulationsrechnungen durch und bestimmten elastische Parameter anhand von Probestücken, die aus der gleichen Charge stammten wie die später verwendeten Messelektroden. „Schließlich sind wir bei der einfachen Form geblieben und haben versucht, sie so gut wie möglich zu verstehen“, sagt er.

Ganz am Anfang, als der damalige Arbeitsgruppenleiter Bernd Fellmuth das Projekt in die Wege leitete, war man sich noch sicher, bis 2008 oder 2009 fertig zu werden. Doch schließlich wurde es März 2017, bis Gaiser, Fellmuth und sieben weitere PTB-Forscher ihren Wert für die Boltzmann-Konstante in der Zeitschrift *Metrologia* veröffentlichten. „Noch 2016 war ich nicht sicher, ob wir die geforderte Genauigkeit erreichen können“, sagt Gaiser. Für ihn war es einer der größten Glücksmomente des Projektes, als der Kampf mit den Wolframkarbid-Elektroden endlich gewonnen war.

Das Ergebnis der zehnjährigen Arbeit ist nun eine unvorstellbar kleine Zahl:  $1,3806482 \cdot 10^{-23}$  – der von der Berliner Gruppe gemessene Wert der Boltzmann-Konstante  $k$ , gemessen in der Einheit Joule pro Kelvin. Die relative Messunsicherheit: 1,9 ppm. Der neue offizielle Wert weicht kaum davon ab, er liegt bei  $1,380649 \cdot 10^{-23}$  J/K.

Häufig wird Christof Gaiser danach gefragt, was man mit dieser Zahl nun anfangen kann. Die Zubereitung von grünem Tee wird sie nicht revolutionieren, soviel ist klar. „Es ist vielleicht auch ein bisschen eine philosophische





Frage, dass man unveränderliche Einheiten haben will“, sagt Gaiser dann. Für ihn selbst war, auch wenn es etwas abgedroschen klingen mag, der Weg zu dem neuen Wert der eigentliche Gewinn. „Zu sehen, dass man alles immer besser versteht und immer weiter vorankommt, das war für mich das Wichtigste daran“, sagt er. Neben den verbesserten Druckmessungen fielen noch weitere Spin-offs ab; die Gruppe schaffte es beispielsweise, die Polarisierbarkeit von Gasen genauer zu messen als je zuvor. Über die Jagd nach der Boltzmann-Konstante haben sich die PTB-Forscher zudem mit ihren Kollegen an den anderen metrologischen Instituten stärker vernetzt. „Die Gemeinschaft ist gut zusammengewachsen, wir arbeiten weiterhin in EU-Projekten zusammen“, berichtet der PTB-Forscher.

Das Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer wird er vermutlich nur noch eine Weile nutzen, um nun tatsächlich Temperaturen damit zu messen. Einige offizielle Fixpunkte der Temperaturskala müssen neu bestimmt werden. Das Berliner Primärthermometer ist besonders für den Bereich unterhalb des Gefrierpunktes von Wasser geeignet, wo die Tripelpunkte weiterer Gase wie Argon, Sauerstoff oder Neon liegen.

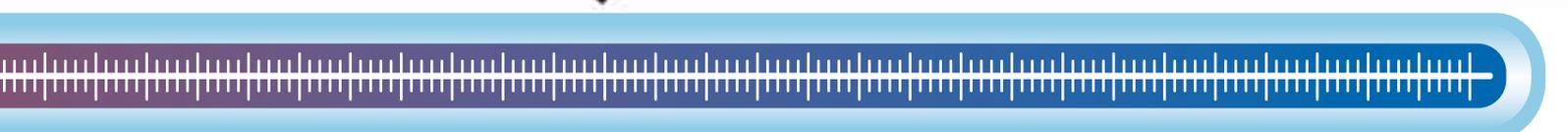
Alle Messungen der Boltzmann-Konstante hingegen sind am 30. Juni 2017 schlagartig eingestellt worden. An diesem Tag endete die Deadline, bis zu der gemessene Werte bei CODATA eingereicht werden konnten. „Wenn die Konstante erst einmal festgelegt ist, kann man sie nicht mehr messen“, erläutert Christof Gaiser. Dann könnte man wieder die Temperatur des Wassertripelpunktes messen. Ein wesentlich interessanteres Einsatzgebiet für das Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer wird allerdings in Zukunft die präzise Bestimmung von Gaseigenschaften sein – ein Motor für vielfältige metrologische Anwendungen. ■

UTE KEHSE

Viele Naturkonstanten stehen im Zentrum physikalischer Theorien. Sie sind dann sozusagen ihr Markenzeichen. So wie die Lichtgeschwindigkeit  $c$  für Einsteins Relativitätstheorie steht oder „Big G“ für die Newton'sche Gravitationstheorie, so steht die Boltzmann-Konstante  $k$  für die Thermodynamik. Liest man die Thermodynamik wie eine statistische Theorie und führt das große Ganze auf die Anordnungsmöglichkeiten im Kleinen zurück (die Theorie spricht von Makro- und Mikrozuständen), dann erscheint  $k$ , so wie auf Boltzmanns Grabstein, als Verknüpfung zwischen der Entropie  $S$  und der Zahl möglicher Mikrozustände  $W$ . Liest man die Thermodynamik dagegen eher als phänomenologische Wärmelehre, dann schafft das kleine  $k$  den proportionalen Zusammenhang zwischen der thermischen Energie eines Systems (hier in der Kopfzeile der Seite symbolisiert) und dessen Temperatur  $T$  (symbolisiert in der Fußzeile). Ist das System, von dem man spricht, etwa ein ideales Gas, dann ist die thermische Energie pro Gasteilchen gleich  $\frac{3}{2} k T$ .

jes

Illustrationen in diesem Artikel: PTB



# Ein Wimpernschlag in der Geschichte des Universums

Es ist ein sehr ambitioniertes Unterfangen, das sich Ekkehard Peik und seine Mitarbeiter in der PTB vorgenommen haben. Sie versuchen, eine Veränderung von Naturkonstanten nachzuweisen, die – wenn sie überhaupt stattfindet – nur in Milliarden Jahren spürbar würde, weil sie so langsam vor sich geht. Damit wollen sie die grundsätzliche Frage klären: Sind unsere Naturkonstanten seit dem Urknall gleich geblieben? Wurden sie damals „festgenagelt“, wie Peik das nennt? Oder haben sie sich ganz allmählich eingeschwungen und oszillieren auch heute, 14 Milliarden Jahre später, noch immer? Oder driften sie auf einen endgültigen Wert zu, ähnlich wie das die Temperatur des Weltalls tut, die stetig, wenn auch langsam, niedriger wird? „Ich persönlich finde dieses Bild ganz plausibel“, sagt der Forscher. „Ich kann es mir intuitiv sehr gut vorstellen, dass die Werte langsam abklingen. Aber wir sprechen über eine riesige Zeitspanne. Die wirklich dramatischen Dinge sind in den ersten  $10^{-20}$  Sekunden nach dem Urknall passiert. Und jetzt leben wir – auf einer kosmischen Uhr gerechnet – bei  $10^{18}$  Sekunden.“

Dennoch, die Fragestellung ist so interessant und hätte für unser physikalisches Weltbild so große Auswirkungen, dass es sich lohnt, genauer hinzusehen. Das Objekt der Untersuchungen in Peiks Labor ist die geheimnisvolle Feinstrukturkonstante Alpha. Alle Einheiten kürzen sich bei Alpha heraus, sodass sie einheitenlos wird. Als Formel ausgedrückt, lässt sie sich zurückführen auf die Elementarladung  $e$ , die Lichtgeschwindigkeit  $c$  und das Planck'sche Wirkungsquantum  $h$ . Berechnet man ihren numerischen Wert, ergibt sich ungefähr  $1/137$ . Der deutsche Physiker Arnold Sommerfeld hat sie 1916 eingeführt. Er hatte erkannt, dass das pseudoklassische Bohr'sche Atommodell, bei dem die Elektronen auf bestimmten Bahnen den Kern umkreisen, nicht exakt ist. Deshalb nahm er Einsteins Relativitätstheorie zu Hilfe und konnte damit die Energieniveaus der Elektronen in ihren verschiedenen Umlaufbahnen sehr viel genauer berechnen. Er konnte damit auch erklären, warum die Spektrallinien, die man bei allen Elementen beobachtet, manchmal aufgespalten sind, also eine feine Struktur aufweisen. So bekam die Konstante den Namen „Sommerfeldkonstante“ oder „Sommerfeld'sche Feinstrukturkonstante“, kurz Alpha.

Moderne Physiker wissen inzwischen, dass sie als Kopplungskonstante ein Maß für die Intensität der elektromagnetischen Kraft ist. Damit bestimmt Alpha über die Stärke der abstoßenden oder anziehenden Kräfte zwischen elektrisch geladenen Teilchen und beeinflusst auch die Emission von Licht, das aus den Atomen kommt. Manchmal mehr, manchmal weniger, je nachdem, welche Verhältnisse in einem Atom herrschen.

Und genau diese Tatsache wollen sich Ekkehard Peik und sein Team bei ihrer Detektivarbeit zunutze machen. Die Physiker arbeiten im PTB-Fachbereich „Zeit und Frequenz“ und sind in der Hauptsache dafür zuständig, möglichst genaue Uhren zu entwickeln. Die amtlich beste Uhr in der PTB ist heute immer noch die Cäsium-Uhr mit einer Ganggenauigkeit von  $10^{-16}$ . Das heißt, dass sie von einer idealen Uhr nur um 20 Pikosekunden pro Tag abweicht oder, anders ausgedrückt, um eine Sekunde in 130 Millionen Jahren. Als Maß benutzt sie einen Quantensprung im Cäsiumatom, dessen Frequenz im Mikrowellenbereich liegt.

Seit etwa 20 Jahren entwickeln Wissenschaftler ein noch besseres Konzept, die optische Uhr. Sie beruht darauf, dass man nur ein einziges, extrem kaltes Ion – also ein Atom mit einer positiven Ladung – beobachtet, das man

im luftleeren Raum in einer Falle gefangen hat. Auch die Elektronen solcher Ionen zeigen Quantensprünge, bei Frequenzen, die man besonders genau messen kann, wenn man alle Störungen von außen eliminiert. Forscher auf der ganzen Welt machten sich auf die Suche nach Elementen, die besonders gut sichtbare Quantensprünge zeigen.

Als besonders geeignet hat sich nach vielen Experimenten ein Ytterbium (Yb)-Ion mit einem Atomgewicht von 171 herausgestellt, das einen ganz besonders langlebigen Elektronenübergang im blauen Bereich aufweist. „Anfangs hatten wir diesen Übergang noch gar nicht auf unserer Liste“, erzählt Ekkehard Peik. „Vor zehn Jahren hatte noch niemand diese Idee. Wir haben dann erst später experimentell herausgefunden, wie genau diese Yb-Uhr sein kann. Im Nachhinein erscheint zwar alles ganz klar, aber das Atom mit seinen 72 Elektronen ist eben so komplex, dass man es nicht im Voraus berechnen kann, deshalb konnte man das nicht vorhersagen.“ Und so steht nun im Uhrensaal der PTB eine optische Yb-Uhr, die so genau geht,

A white rectangular card is pinned to a red brick wall with a wooden clothespin. The card has the number '137' printed in a large, bold, black font in the center.

Illustration: PTB

dass sie seit der Entstehung des Universums erst etwa um eine Sekunde von der idealen Zeit abgewichen wäre.

Andere Gruppen arbeiten mit anderen Elementen. In der PTB und in Laboren in Europa und den USA gibt es weitere optische Uhren, die mit Aluminium, Kalzium, Strontium oder Quecksilber funktionieren. Und genau dieser Umstand macht es nun möglich, die optischen Uhren für die hochgenaue Messung von Alpha zu verwenden. Der Trick dabei ist, dass die Frequenzen der Elektronenübergänge unterschiedlicher Atome unterschiedlich stark von Alpha abhängen. Bei Ytterbium ist die Abhängigkeit extrem hoch, bei Strontium (Sr) zum Beispiel relativ gering. „Wenn sich nun Alpha ändern würde, hätte das auf die Yb-Frequenz einen viel größeren Einfluss als auf die Sr-Frequenz“, sagt Peik. „Setzt man deshalb die beiden Frequenzen zueinander ins Verhältnis, würde sich diese Zahl im Lauf der Zeit ändern. Und das ist genau das Experiment, das wir machen.“

Es ist kaum vorstellbar, dass man eine eventuelle Veränderung, die in Milliarden Jahren kaum spürbar wurde, nun innerhalb weniger Jahre messen will, also in nur einem Wimpernschlag in der Geschichte des Universums. Aber die PTB-Forscher haben bei ihren Uhren inzwischen eine so hohe Genauigkeit erreicht, dass das tatsächlich möglich ist. In bisher drei Messkampagnen von jeweils etwa einem Jahr haben sie die Werte verglichen. Und bisher konnten sie bis auf 18 Stellen Genauigkeit keine Veränderung von Alpha feststellen.

Mit diesem Befund mischen sich die PTB-Wissenschaftler nun in die internationale Diskussion ein. Dort gibt es andere Forschergruppen, die mit völlig anderen Methoden arbeiten: Kernphysiker haben beispielsweise den Oklo-Reaktor im afrikanischen Gabun untersucht, einen vor zwei Milliarden Jahren natürlich entstandenen Kernreaktor. Aus der Verteilung der Elemente, die durch die Kernprozesse entstanden sind, versuchte man, Rückschlüsse auf die damals herrschende Größe von Alpha zu ziehen, da diese Konstante auch bei Kernreaktionen eine Rolle spielt. Die Auswertung ist allerdings extrem schwierig, und bisher fand man keinen belastbaren Hinweis auf eine Änderung von Alpha.

Andere Teams haben die Strahlung von Quasaren untersucht, von Objekten also, die vor Milliarden von Jahren im Weltall entstanden sind. Das von ihnen ausgesandte Licht durchquert auf seinem Weg zu uns kosmische Wolken und wird dort in bestimmten Spektrallinien von Ionen von Eisen, Nickel oder Magnesium absorbiert. Aus der Analyse dieser Linien lassen sich – ähnlich wie von den optischen Uhren im Labor – Rückschlüsse darauf ziehen, wie groß Alpha zu jener Zeit war. Die bisher bekannten Ergebnisse sind nicht eindeutig: „Es gibt zwei Schulen, die letztlich keinen Konsens erzielen konnten“, so Peik. „Die eine Gruppe hat eine Änderung von  $10^{-6}$  über 10 Milliarden Jahre gesehen. Das wäre signifikant. Die andere Gruppe hat aber mit ähnlichen Daten keine signifikante Änderung gefunden. Das Problem ist, dass die Daten enorm schwierig auszuwerten sind.“ Immerhin hat die Kontroverse neue, aufregende Fragestellungen aufgeworfen, etwa die, ob

neben der Zeit vielleicht auch die Richtung im Raum oder die Konzentration der Masse für die Größe von Alpha verantwortlich ist.

Ekkehard Peik findet derartige Fragen sehr spannend. Aber er ist gleichzeitig sicher, dass die Messverfahren seiner Gruppe die genauesten sind. „Die Kernphysik, wie sie beim Oklo-Reaktor zum Tragen kam, ist kein Feld der Präzisionsmessungen“, betont er. „Man würde dort zwar größere Änderungen erwarten, aber es fehlt die gute Diagnosemöglichkeit. Wir hingegen haben den Vorteil, dass elektrische Wechselwirkungen besonders genau zu messen sind. Man kann exakt die Übergangsfrequenzen in der Elektronenhülle messen und genau analysieren, wie das von Alpha abhängt.“

Es sieht also momentan nicht danach aus, dass Alpha nicht konstant ist. Sollte es sich aber dennoch irgendwann herausstellen, dass sich die Feinstrukturkonstante im Lauf der Zeit ändert, müsste sich niemand Sorgen machen, dass unser Maßsystem deswegen zusammenbricht. „In der Praxis hätte das keine Auswirkungen, denn die Zeitmaßstäbe sind zu lang“, beruhigt Peik. „Das SI-System ist ja etwas für die praktische Nutzung. Und wenn sich da etwas ab der 17. Kommastelle pro Jahr ändert, fällt mir auf Anhieb keine praktische Anwendung ein, die sich ändern würde. Aber für die Grundlagenphysik wäre das revolutionär. Denn es würde ja bedeuten, dass eine fundamentale Kraft nicht konstant ist. Und Alpha ist direkt verknüpft mit  $h$ ,  $e$  und  $c$ , deshalb wäre dann die nächste große Frage: Welche dieser Konstanten ändert sich, ist es  $h$ ,  $e$  oder  $c$ ? Das wäre wirklich aufregend, aber es beträfe unser Alltagsleben nicht.“ ■

BRIGITTE RÖTHLEIN

## Die geheimnisvolle 137

Arnold Sommerfeld fand für die Feinstrukturkonstante den Wert 0,00729 – eine Zahl, die als solche kein besonderes Aufsehen erregte. Erst als der englische Astrophysiker Arthur Eddington 1929 auf die Idee kam, ihren Kehrwert zu nehmen, erkannte er, dass dieser bis auf zwei Dezimalstellen genau dem Wert  $1/137$  entspricht. Seit dieser Zeit machen sich viele Forscher darüber Gedanken, was es mit dieser 137 auf sich hat. „Sie ist eines der größten verdammt Geheimnisse der Physik: eine magische Zahl, die zu uns gekommen ist, und kein Mensch versteht warum. Man könnte sagen, ‚Gottes Hand‘ habe diese Zahl geschrieben, und wir wissen nicht, wie er seinen Bleistift führte“, schrieb der berühmte Physiker Richard Feynman in seinem Buch QED. Und Max Born – ebenfalls Nobelpreisträger – glaubte, die 137 sei der heilige Gral der Wissenschaft, weil sie die Verbindung herstellt zwischen Relativitätstheorie und Quantenphysik.

Sie ist nicht nur eine Primzahl, sondern lässt sich auch – mehr oder weniger überzeugend – aus Kombinationen anderer magischer Zahlen errechnen. Der deutsche

Physiker Werner Heisenberg berichtete beispielsweise, er habe herausgefunden, dass  $\pi/2^{43}$  ebenfalls  $1/137$  ergebe. Auch in der jüdischen Mystik hat die Zahl 137 eine wichtige Bedeutung: Im hebräischen Alphabet besitzt jeder Buchstabe einen Zahlenwert. Summiert man die vier hebräischen Buchstaben für „Kabbala“ auf, erhält man 137.

Neben der Feinstrukturkonstante, die darüber bestimmt, wie unsere Atome aufgebaut sind, finden sich in der Natur weitere Beispiele, bei denen die 137 eine Rolle spielt: Sie bezeichnet die Anzahl der Atome im Chlorophyll-Molekül, und es kann kein Element geben, das eine höhere Ordnungszahl als 137 hat, denn dann müsste das innerste

Elektron schneller als mit Lichtgeschwindigkeit um den Kern kreisen.

Den österreichischen Physik-Nobelpreisträger Wolfgang Pauli verfolgte die ominöse Zahl sein ganzes Leben lang. Am Ende starb er im Krankenhaus vom Roten Kreuz in Zürich – in Zimmer 137. Als Pauli dort am 5. Dezember 1958 mit starken Magenschmerzen eingeliefert wurde, stöhnte er: „Es ist die 137! Hier komme ich nicht mehr lebend heraus.“

br

Für Normalbeobachter ein Wimmelbild. Für die Wissenschaftler im Zeitlabor ein typischer Arbeitsplatz für Atomuhren der nächsten Generation.

Foto: PTB





# innovativ

Wenn sich eine Schranke öffnet, hat sich manchmal schon eine ansehnliche Reihe von Wartenden versammelt. Geht die Schranke endlich auf, kommen die Menschen zur täglichen Arbeit – oder auch in neues, unbekannteres Terrain, wer weiß?

Die Schranken, die sich mit dem neuen SI öffnen, sind symbolische Schranken – und obwohl sie sehr lange geschlossen waren, ist die Zahl der ungeduldig Wartenden vermutlich gar nicht so groß. Nicht mal die Experten aus der messtechnischen Industrie sind im Moment allzu stark betroffen. Auf den ersten Metern werden wohl nur diejenigen etwas merken, die sehr genaue elektrische Messgeräte kalibrieren. Denn die elektrischen Einheiten werden schon seit Langem auf der Grundlage von zwei Naturkonstanten kalibriert: der Von-Klitzing- und der Josephson-Konstante. Jetzt werden die beiden sozusagen offiziell ins SI aufgenommen. Dafür müssen am Stichtag der SI-Einführung, dem 20. Mai 2019, einige Werte umgestellt, einige kleine Rädchen im Kalibrierprozess neu justiert werden.

Alle anderen können ganz freimütig unter der Schranke hindurchschreiten. Denn erstens passiert zunächst meist: gar nichts. Zweitens könnte sich dahinter auf lange Sicht durchaus interessantes Neuland auftun. Denn generell ist das neue SI offener für Innovationen als das bisherige. Legt doch bisher das Urkilogramm genau einen einzigen Punkt auf einer Skala fest, genauso der Tripelpunkt für die Temperaturskala. Das führt dazu, dass es links und rechts dieses Punktes im Prinzip stets unsicherer wird.

In Zukunft gilt für jede Einheit eine Art Rezept: Basierend auf (mindestens) einer Naturkonstante, lassen sich dann im Prinzip beliebig viele Punkte auf der jeweiligen Skala neu realisieren. Das könnte der Start sein für neue Entwicklungen rund ums Messen und Kalibrieren. Man darf gespannt sein, was schließlich hinter der Schranke zum Vorschein kommen wird!

es

# Unsicherheit abwägen

**„Sartorius beherrscht die Technologie des Wägens wie kein anderer“, behauptet der Göttinger Konzern selbstbewusst von sich. Wie blicken die Experten des Unternehmens auf das Vorhaben, das Urkilogramm außer Dienst zu stellen?**

Wer einen neuen Kühlschrank kauft, erwartet normalerweise, dass er nicht mehr Strom verbraucht als der alte. Ähnlich klingt die Erwartung, die Thomas Fehling von Sartorius an die Neudefinition des Kilogramms hat. Der Leiter der „Mechatronic Solutions Group“: „Man darf danach nicht schlechter dastehen als vorher.

Das heißt, die Unsicherheiten in der

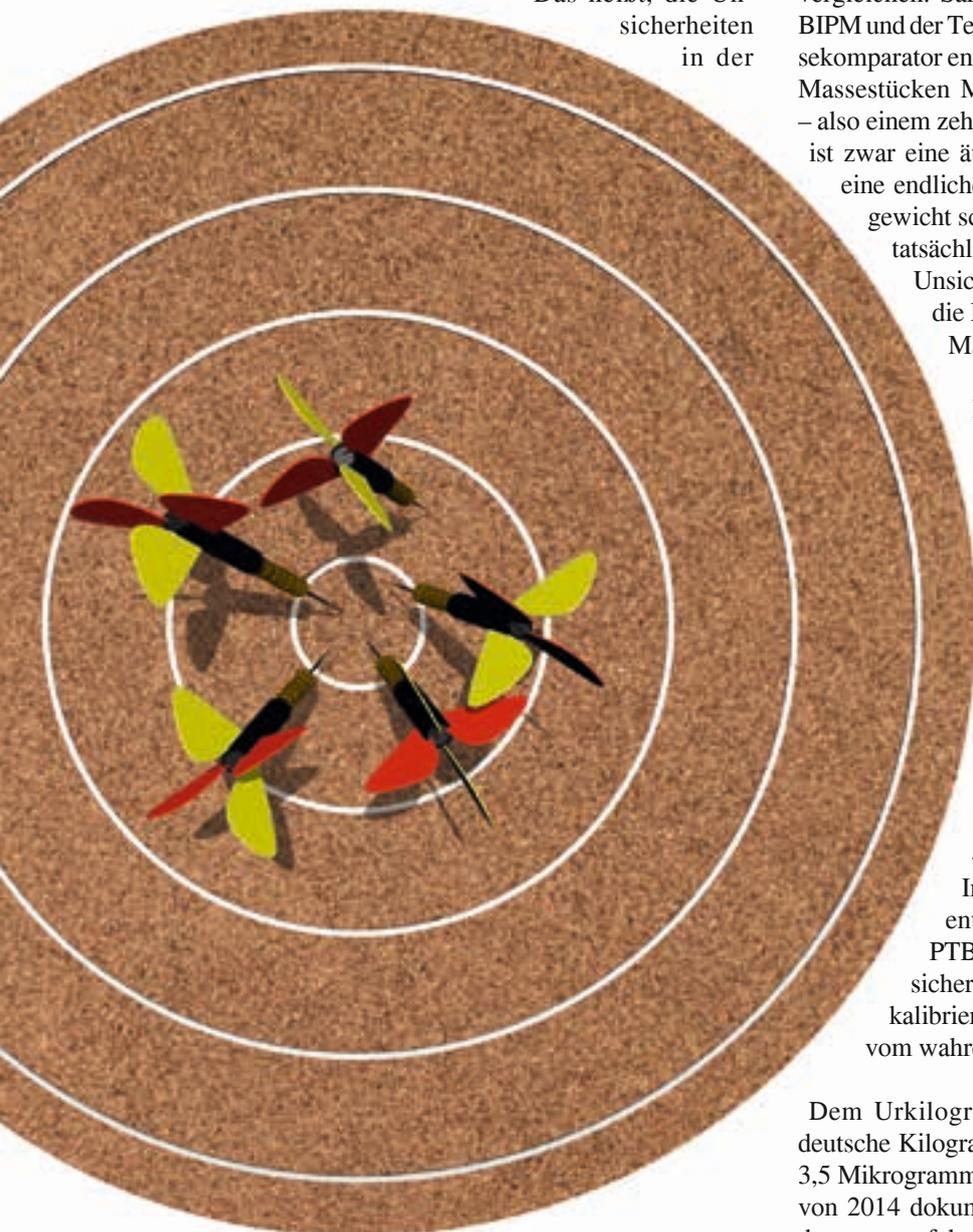
Messkette dürfen sich nicht erhöhen, wenn das Urkilogramm abgeschafft wird.“ Das erscheint, als ob er nicht viel verlangt. Und doch hat es seine Forderung in sich.

Zunächst einmal gilt es zu verstehen, was genau die Unsicherheiten sind, von denen Fehling spricht. Da bislang ein Kilogramm gleich der Masse des internationalen Kilogrammprototyps ist, gibt es bei diesem Urkilogramm per Definition keine Unsicherheit: Der Platin-Iridium-Zylinder, der vom Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) gehütet wird und in einem Tresor in Paris lagert, wiegt ein Kilogramm – und damit basta.

Mit Komparatorwaagen, auch Massekomparatoren genannt, lassen sich Gewichte mit diesem Urkilogramm vergleichen. Sartorius hat in Zusammenarbeit mit dem BIPM und der Technischen Universität Ilmenau einen Massekomparator entwickelt, mit dem man bei 1-Kilogramm-Massestücken Massedifferenzen von 0,1 Mikrogramm – also einem zehnmillionstel Gramm – ablesen kann. Das ist zwar eine äußerst hohe Auflösung, aber eben doch eine endliche, sodass man sich bei dem Vergleichsgewicht schon nicht mehr sicher sein kann, dass es tatsächlich exakt ein Kilogramm wiegt. Weitere Unsicherheiten entstehen beispielsweise durch die Reinigung der Gewichte, bei der kleinste Masseänderungen auftreten können.

Das Urkilogramm wurde üblicherweise wegen seiner definitionsgemäßen Einzigartigkeit und der immensen Bedeutung eines einheitlichen Massemaßes für den internationalen Handel seit 1889 nur vier Mal aus seinem gut gesicherten Tresorraum geholt. Durch Vergleichsmessungen mit ihm kalibrierte das BIPM die Gewichte, die ihm als sogenannte Arbeitsnormale dienen. Mit denen kalibrierte es dann wiederum durch weitere Vergleichsmessungen in mehrjährigen Abständen die nationalen Kilogrammprototypen – so auch das deutsche Normal aus Platin-Iridium in der PTB. Mit jeder Kalibrierung entlang der Weitergabekette – in der die PTB ein Zwischenglied ist – nimmt die Unsicherheit zu: Der Messwert für die Masse des kalibrierten Gegenstands kann sich immer stärker vom wahren Wert unterscheiden.

Dem Urkilogramm mit null Unsicherheit steht der deutsche Kilogrammprototyp mit einer Unsicherheit von 3,5 Mikrogramm gegenüber, die auf dem Kalibrierschein von 2014 dokumentiert ist. „Formal gesehen, also nach dem, was auf dem Kalibrierschein steht, werden sich nach



der Neudefinition des Kilogramms die Messunsicherheiten für die PTB und andere metrologische Institute vermutlich vergrößern“, sagt PTB-Experte Horst Bettin voraus. Widerspricht aber nicht genau das den Forderungen des Handels und der Industrie, die Sartorius-Fachmann Fehling sozusagen stellvertretend formuliert hat?

Nicht unbedingt. Denn die Masse des Urkilogramms ist in der Praxis nicht so sicher und die auf ihm beruhende Weitergabekette nicht ganz so fehlerfrei, wie gemeinhin angenommen wird. Das Sicherheitsproblem im herkömmlichen Sinn – das Urkilogramm kann ent-

wendet oder zerstört werden – ist dabei weniger gemeint. Sondern beispielsweise die Tatsache, dass das Urkilogramm gegenüber seinen sechs offiziellen Kopien (témoins, französisch: Zeugen), die in demselben Tresorraum lagern, zwischen 1889 und 1991 anscheinend immer mehr Masse verloren hat – bis zu 50 Mikrogramm. Was die bis heute unbeantwortete Frage aufwirft, ob das Urkilogramm leichter wurde oder gleich alle sechs témoins schwerer.

2014 verglichen Wissenschaftler des BIPM das Urkilogramm erneut mit den témoins und stellten fest, dass die Differenz zwischen ihnen nicht größer geworden war, sich also der Trend nicht fortgesetzt hatte. Soweit die beruhigende Nachricht. Doch es folgte eine böse Überraschung. Die Arbeitsnormale des BIPM waren in 22 Jahren gegen-

über dem Urkilogramm und den Zeugen 35 Mikrogramm leichter geworden – und damit waren das deutsche und andere nationale Kilogrammprototypen falsch kalibriert worden. Das BIPM fand mithilfe eines mathematischen Modells im Laufe weniger Monate eine Erklärung für das Phänomen. Daraufhin stellte es für die nationalen Metrologieinstitute korrigierte Kalbrierscheine aus. Fazit: Es ist unsicher, wie sich die Masse des Urkilogramms mit der Zeit verändert – und wenn das BIPM einen Fehler in der Weitergabe der Masse macht, so kann er sich mangels Kontrollmöglichkeiten weltweit auswirken.

„Für Sartorius hat die Korrektur von 2014 keine größeren Auswirkungen gehabt“, sagt Thomas Fehling.

„Allerdings“, so Fehlings Kollege Karlheinz Banholzer,

„könnten künftig ähnliche Sprünge, zum Beispiel nach erneuten

Vergleichsmessungen mit dem Urkilogramm in einigen Jahren, problematisch werden.“

Der Direktor der Metrologie-Abteilung bei Sartorius weiter:

„Unsere Waagenkunden aus der Biotechnologie- und Pharmabranche verarbeiten im Zeitalter der individualisierten Medizin sehr kleine Mengen sehr teurer Substanzen – und zwar überall auf der Welt. Dafür werden sichere und richtige Messwerte benötigt.“

Klar ist für die Sartorius-Experten daher sowohl, dass der Wert für das Kilogramm nicht nach einem gewissen Zeitraum schon wieder korrekturbedürftig werden sollte, als auch, dass künftig insbesondere für kleinere Massen geringere Unsicherheiten als bisher vonnöten sein werden. Mit einem optimistischen, aber auch kritischen Blick sehen sie daher auf den derzeitigen Stand der Experimente, mit denen künftig das Massennormal über einen festgelegten Wert für die Planck-Konstante bestimmt werden soll. Möglich ist das, weil die Planck-Konstante direkt mit dem Kilogramm verknüpft ist, das ansonsten nach seiner Neudefinition nur noch von ebenfalls definierten Naturkonstanten abhängt. Prinzipiell ist damit in der Tat zu erwarten, dass Unsicherheiten für kleinere Massen geringer werden. Nach dem derzeitigen Stand weicht das Messergebnis

des Avogadro-Projekts, an dem die PTB wesentlich beteiligt ist, allerdings noch vom Ergebnis der sogenannten Wattwaage am US-amerikanischen Metrologieinstitut NIST um 71 Mikrogramm und von dem der Wattwaage am kanadischen Institut NRC um 41 Mikrogramm ab.

„Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann man noch nicht sagen, ob eines der Experimente einen systematischen Fehler macht oder ob der wahre Wert sozusagen in der Mitte liegt“, kommentiert Falko Hilbrunner, Sartorius-Mitarbeiter an der Technischen Universität Ilmenau.

Horst Bettin, bei der PTB Leiter des Fachbereichs „Masse – Darstellung der Einheit“, kann die Bedenken von Sartorius nachvollziehen, verweist aber auf den nunmehr entschleunigten Fahrplan: „Danach wird das Kilogramm voraussichtlich im November 2018\* zwar neu definiert, aber sein Wert noch nicht festgelegt. Das wird erst passieren, nachdem fünf bis zehn Institute auf Basis der Planck-Konstante das Kilogramm dargestellt haben. Die Ergebnisse werden dann miteinander verglichen, beurteilt und im Konsens ein Wert festgelegt.“ Der PTB-Experte ist überzeugt, dass auf diese Weise höchstens eine Unsicherheit unter 20 Mikrogramm in Kauf zu nehmen ist. Es spricht einiges dafür, dass seine Prognose seriös und kein Schnellschuss ist. Als 2005 schon einige internationale Experten auf eine Neudefinition drängten, bremste er und mit ihm die PTB. Mit Recht: Gegenüber damals hätte der Wert für das Kilogramm nach den aktuellen Messergebnissen bereits um 200 Mikrogramm korrigiert werden müssen. ■

FRANK FRICK



## Die Wattwaage für jedermann?

Wattwaagen (auch Planck- oder Kibble-Waagen genannt) können Massen allein über die Messung elektrischer Größen bestimmen, sobald die Planck-Konstante im Zuge der Neudefinition des Kilogramms festgelegt wird. Was den Gedanken nahelegt, dass die Industrie solche Wattwaagen überall auf der Welt direkt für Messungen einsetzen könnte. Doch Messungen mit Wattwaagen sind bislang so aufwendig, dass das Wissenschaftsmagazin „Nature“ sie noch 2012 zu den fünf schwierigsten Vorhaben in der Physik zählte. Die PTB arbeitet in Kooperation mit der Technischen Universität Ilmenau daran, vereinfachte und industrietaugliche Versionen der Wattwaage zu entwickeln. Bei Sartorius als einem der weltweit renommiertesten Waagenhersteller sieht man diese Entwicklung gelassen: „Unser Geschäft wird sich dadurch die nächsten Jahre wohl nicht verändern“, erklären die Experten Thomas Fehling und Karlheinz Banholzer unisono. Denn, so ihr Kollege Falko Hilbrunner, es gebe bei Wattwaagen sehr viele Größen – Spannung, Länge, Erdbeschleunigung, Zeit, Strom –, die beim Wägevorgang zu bestimmen sind. Hilbrunner weiter: „Das bringt momentan sehr hohe Kosten mit sich.“ Den Daumen über der neuen Waagen-Technologie senken möchten sie jedoch nicht: „Sag niemals nie“, schmunzelt Banholzer.

ff

Hundertmal dasselbe messen heißt nicht, hundertmal dasselbe Ergebnis zu bekommen. Die Ergebnisse streuen vielmehr – immer. Wenn die Werte alle dicht beieinander liegen, ist die Messung zwar präzise. Aber erst wenn sich alles, symbolisch gesprochen, um das Zentrum der Zielscheibe gruppiert, ist die Messung auch genau (siehe Zielscheibe Seite 38).

Illustrationen: PTB

\*Dieses Gespräch fand vor dem November 2018 statt.



Wer etwas auf die Goldwaage legt, nimmt etwas sehr genau. Wirklich genau wird es aber erst in einem Massekomparator. In solchen Hightech-Geräten (wie hier in der PTB) werden Massevergleiche durchgeführt, z. B. zwischen einer Siliziumkugel und anderen Massennormalen. Bestehen diese Gewichtsstücke aus verschiedenen Materialien, müssen je nach umgebendem Medium (Luft oder Vakuum) auch Auftriebs- und Sorptionseffekte berücksichtigt werden. (Das Bild zeigt den Drehteller mit verschiedenen Massekörpern und Sensoren. Die eigentliche Wägezelle ist im Bild nicht zu sehen.)

Foto: PTB

# Joseph und seine Kollegen

**Wie ein Messgerät, das sogar einen Namen bekommen hat, jetzt schon mithilfe einer Naturkonstante andere Messgeräte kalibriert. Eine Geschichte von vielen grauen Kästen und dem Warten auf Josephs zukünftige Brüder, die in der Industrie (statt wie bisher nur in der PTB) das Ohm und das Ampere „machen“ werden.**

Wer wissen will, wie viel Volt ein Volt ist, muss Joseph fragen. Der kantige Kerl, der etwas teilnahmslos im Eck herumsteht, ist zwar weder geschwätzig noch sonderlich sozial. Dafür kann er Spannungen messen wie kein anderer – auf die neunte Stelle hinterm Komma genau.

„Joseph“, so nennen die Mitarbeiter der esz AG calibration & metrology, eines der führenden Kalibrierlabore Europas, scherzhaft ihren neuesten Kollegen: Der mannshohe Kasten, der am Firmensitz in Eichenau westlich von München stur vor sich hin rattert, ist ein sogenannter Josephson-Quantenkalibrator. Mithilfe eines unverrückbaren Effekts auf atomarer Ebene produziert er eine äußerst stabile Spannung mit genau bekanntem Wert. Die optimale Voraussetzung, um andere Messgeräte mit höchster Präzision zu kalibrieren.

„Mit dem neuen System sind wir im Praxiseinsatz etwa 500-mal besser als zuvor“, sagt Philip M. Fleischmann, Technischer Vorstand bei der esz AG. Sechs Jahre lang haben die Eichenauer Forscher zusammen mit der PTB und der Jenaer Supracon AG die neue Anlage entwickelt, verbessert und Ideen aus der Praxis eingebracht. Nun steht Joseph im Eichenauer Labor – zwar noch in der Erprobungsphase, aber bereits voll unter Spannung. Derweil denken die esz-Experten bereits darüber nach, wie sie auch die anderen elektrischen Einheiten deutlich genauer und deutlich einfacher umsetzen können.

Das ist auch nötig: Von all den Definitionen der Basiseinheiten im Internationalen Einheitensystem, kurz SI genannt, ist diejenige des elektrischen Stroms die wohl am meisten verkopfte. Vor allem aber erscheint sie äußerst unpraktisch: Das Ampere, die Einheit der Stromstärke, ist definiert über die Anziehungskraft, die zwischen zwei unendlich langen, vernachlässigbar dicken und von Strom durchflossenen Leitern im luftleeren Raum wirkt. „Einen unendlich langen Raum mit Vakuum haben wir hier leider nicht“, sagt der stellvertretende Laborleiter Andreas C. Böck und schmunzelt.

In der Praxis konzentrieren sich die Kalibrierexperten daher auf die Spannung – eine abgeleitete elektrische Einheit, die proportional zur Stromstärke ist und lediglich vom Widerstand abhängt. Das Schöne daran: Die Spannung lässt

sich – wie künftig alle anderen SI-Einheiten auch – allein mit Naturkonstanten definieren. Und mit Josephs Hilfe realisieren.

Verantwortlich dafür sind die Erkenntnisse des Physikers und späteren Nobelpreisträgers Brian David Josephson. Im Jahr 1962 entdeckte der Brite in Cambridge einen überraschenden Quanteneffekt, der alsbald seinen Namen tragen sollte: Werden zwei Supraleiter, in denen kein Widerstand den Stromfluss bremsen, von einem dünnen Isolator oder einem normalen Leiter getrennt und setzt man dieses Konstrukt einer Mikrowellenstrahlung aus, passiert etwas Ungewöhnliches: Es bildet sich eine konstante, genau bekannte Spannung, die weitgehend unabhängig ist vom angelegten Strom.

Größte Herausforderung bei all dem: Die heute verwendeten Supraleiter funktionieren nur bei extrem tiefen Temperaturen, drei Grad über dem absoluten Nullpunkt. „Das ist leider noch ein Riesenaufwand“, sagt Technikvorstand Fleischmann. Ununterbrochen muss in Eichenau daher eine Pumpe flüssiges Helium in die Anlage drücken, was auch für deren charakteristisches Klackern verantwortlich ist.

Zum Kalibrieren ist das System allerdings optimal. Die Spannung, die für den Vergleich mit anderen Geräten abgegriffen werden kann, hängt lediglich von der sogenannten Josephson-Konstante ab, die exakt festgelegt worden ist. Zudem spielt die Frequenz der benutzten Mikrowellen eine Rolle. „Frequenzen können wir aber sehr genau realisieren, da ist die Messunsicherheit extrem klein“, sagt Applikationsingenieur Ludwig Schaidhammer.

Die Frequenz für Joseph kommt aus der Wand. Ein dünnes schwarzes Kabel verbindet die Anlage mit dem Hausnetz, das im gesamten esz-Gebäude den Takt vorgibt: zehn Megahertz, exakt zehn Millionen Schwingungen pro Sekunde. Über eine Antenne wird die Hausfrequenz mit den Signalen des globalen Navigationssystems GPS abgeglichen. Dessen Satelliten haben Atomuhren an Bord, die die Zeit mit einer Genauigkeit von mehr als zehn Stellen hinterm Komma angeben können. Das spart die eigene Atomuhr im Haus.

Schaidhammer verbindet die beiden Litzen eines Kabels, das aus dem Josephson-System kommt, mit den Anschlüssen eines langen grauen Kastens. „1 Volt“ steht zwischen den Buchsen. Grüne Kontrollleuchten flackern, direkt daneben lassen sich „10 Volt“ abgreifen. Die unscheinbaren grauen Boxen waren bislang das Nonplusultra in Eichenau. Sie gaben die Spannung vor, um unter anderem die sogenannten Kalibra-

toren zu kalibrieren – Kisten von der Größe eines Videorekorders, die ihrerseits dazu benutzt werden, um die Messgeräte der Kunden zu kalibrieren. Sauber etikettiert stapeln die sich – groß und klein, alt und neu – im genau organisierten Lagersystem vor den Messlabors.

Das Problem: Die grauen Kästen, im Grunde große Batterien, die mithilfe einer Diode eine konstante Spannung liefern, müssen selbst regelmäßig kalibriert werden. „Bislang mussten wir sie dazu an ein externes Labor schicken, das über ein Josephson-System verfügte“, sagt Andreas Böck. Jetzt kann Joseph diese Aufgabe übernehmen. Langsam bauen sich auf Schaidhammers Monitor Wolken aus blauen Punkten auf. Fortwährend vergleicht das Josephson-System die Spannung aus der grauen Box mit dem eigenen, ganz genau bekannten Spannungswert. Die Differenz wird an Schaidhammers Computer übermittelt. Dann variiert das System die Stromstärke, die Stromrichtung wird umgekehrt, und es geht wieder von vorne los. „All das läuft vollautomatisch ab und ist daher relativ unspektakulär“, sagt Böck. „Letztlich sehen wir nur das Ergebnis auf dem Bildschirm.“

0,999 999 63 Volt steht dort mittlerweile – 370 Milliardstel weniger als die „1 Volt“ auf dem Typenschild und fast genau der Wert, den die Kalibrierexperten für die graue Box, deren Verhalten sie seit 20 Jahren kennen, prognostiziert haben. „Dank des Josephson-Systems, mit dem wir wieder und wieder messen können, wissen wir nun, dass unsere Vorhersagen schon sehr gut waren“, sagt Böck. „Trotzdem können wir sie nun noch einmal deutlich verfeinern.“

Es ist nicht Josephs einziger Vorteil: Mit den bisherigen Referenzkästen konnten nur Messwerte bei einem und bei zehn Volt abgeglichen werden. Mit dem neuen System lassen sich hingegen weite Bereiche eines Messgeräts, zum Beispiel zwischen 0,8 Volt und 1,2 Volt, Schritt für Schritt überprüfen. Zudem kann die Anlage erstmals auch Wechselspannungsgeräte kalibrieren. Dazu passt sie ihre Ausgangsspannung treppenförmig an die Wellenform einer Wechselspannung an und vergleicht anschließend die Werte. „Allein durch diese Flexibilität, durch die Verfügbarkeit und die Grundgenauigkeit liegen Welten zwischen dem neuen und den traditionellen Systemen“, sagt Fleischmann.

Ein Schönheitsfehler bleibt. Um Stromstärken zu kalibrieren, sind die esz-Experten nach wie vor auf Referenzwiderstände angewiesen. Sauber aufgereiht stehen die kleinen Kästen in einem Regal über Schaidhammers Computer. Besonders empfindliche Referenzgeräte verbergen sich sogar hinter der schweren Tür eines Klimaschranks. Exakt 23 Grad Celsius vermeldet dessen Digitalanzeige – tagein, tagaus. „Unsere Referenzwiderstände sind zwar sehr gut charakterisiert und haben kleine Messunsicherheiten“, sagt Ludwig Schaidhammer, „trotzdem müssen wir sie regelmäßig in der PTB kalibrieren lassen.“

Forschungslabore sind bereits einen Schritt weiter: Bei tiefen Temperaturen und hohen Magnetfeldern liefert der sogenannte Quanten-Hall-Effekt, entdeckt vom deutschen Physiker und Nobelpreisträger Klaus von Klitzing, einen konstanten elektrischen Widerstand. Dessen Wert hängt lediglich vom Verhältnis zweier Naturkonstanten ab. „Wenn man das auch im industriellen Umfeld, außerhalb von Instituten wie der PTB, verfügbar machen könnte, wäre das der nächste riesige Meilenstein für die Messtechnik im Kalibrierwesen“, sagt Fleischmann.

Lediglich bei der Stromstärke, der eigentlichen Basisgröße für die Elektrizität, ist das nicht so einfach. Als Fluss von mehr als sechs Trillionen Elektronen pro Sekunde wird das Ampere im künftigen SI-Einheitensystem definiert sein. Um diese Vorgaben umzusetzen, tüfteln Forscher an Quantenpumpen, die Elektronen nach und nach durch einen Leiter schieben. Für den Praxiseinsatz sind die dabei erreichten Stromstärken allerdings noch viel zu klein.

„Wie der Strom im SI-System definiert sein wird, ist für uns daher gar nicht so relevant“, sagt Fleischmann. „Wir freuen uns aber, wenn dadurch eine Entwicklung angestoßen wird, die auch im industriellen Umfeld Schule machen könnte.“ Das dürfte allerdings noch etwas auf sich warten lassen, bestimmt zehn Jahre, schätzt Andreas Böck. Wenn sich dann allerdings auch die elektrische Basisgröße im eigenen Kalibrierlabor – ganz ohne Hilfe von außen – allein mit Naturkonstanten umsetzen ließe, wäre das, so Fleischmann, „auf jeden Fall sehr, sehr interessant“.

ALEXANDER STIRN

5. September

Li Shi  
2018  
Goetheholzweg 10  
22765 Hamburg

Dr. Armin Sperling  
Fachbereich 4.1  
Physikalisch und Spektroradiometrie  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)  
Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

Sehr geehrter Herr Dr. Sperling,

vielen Dank für Ihre ausführliche Antwort! Es ist nett, dass Sie das Anliegen einer 70-jährigen so ernst nehmen. Ich hatte ja geschrieben, dass ich als ehemalige Physiklaborantin und Großmutter eines physikbegeisterten Jungen immer noch sehr an dem Thema Physik und insbesondere der Photometrie interessiert bin und dass ich gerade den physiologischen Aspekt bei diesem Gebiet besonders spannend finde. Da habe ich vielleicht einen Wunden Punkt getroffen. Denn Sie betonen in Ihrer Antwort, die Candela sei eine physikalische und keine physiologische Einheit. Menschliche Bezüge gebe es auch bei anderen Einheiten, etwa bei der Länge des Meters, die als eine reine Konvention so festgesetzt wurde, dass wir Menschen mit der Größenordnung umgehen können. Da gebe ich Ihnen Recht. Aber ich finde schon, dass die Candela ein bisschen anders ist. Als Einheit der Lichtstärke ist sie ein Maß für einen speziellen Ausschnitt der elektromagnetischen Strahlung der Sonne - nämlich den für das menschliche Auge sichtbaren Teil (360 nm bis 830 nm). Zudem nehmen wir ja auch noch verschiedene Farben verschieden hell wahr; besonders hell wirkt für uns gelbgrünes Licht. Das ist für mich schon ein starker physiologischer Bezug.

Und wenn ich das richtig verstehe, ist diese Tatsache ja auch in die Definition der Einheit Candela eingegangen. Da taucht die Frequenz von 540 Terahertz auf, was gerade derjenigen Wellenlänge entspricht, bei der sich die Hell-, die Dunkel- und die Dämmerungsempfindlichkeitskurven schneiden. Und auch beim Kalibrieren von photometrischen Messgeräten stellen Sie sich auf dieses „menschliche Element“ ein, indem Sie über geeignete Filter (oder Algorithmen) für ein Maximum im grünen Bereich sorgen.

Ich hatte in meinem letzten Brief die Frage gestellt, ob die Berechnungsgrundlage dieser Anpassungen heute noch zeitgemäß ist. Die zugrundeliegende Hellempfindlichkeitskurve der Internationalen Beleuchtungskommission CIE stammt ja immerhin aus dem Jahr 1924. Man befragte damals eine ziemlich große

Zahl junger europäischer Männer, als wie hell sie welche Farbe empfinden. Meine Frage dazu haben Sie, glaube ich, ein bisschen missverstanden. Ich hatte nicht fordern wollen, als chinesische ältere Frau quasi meine eigene Kurve zu bekommen. Nein, ich verstehe, dass man eine einzige allgemeingültige Grundlage braucht, wenn man Messwerte weltweit vergleichen will. Genau das ist ja der gute und unstrittige Sinn des gesamten SI!

Ich wollte nur fragen, ob man nicht nach so vielen Jahren die Berechnungsgrundlage dahinter an die heutigen Gegebenheiten anpassen könnte. Immerhin ist die Weltbevölkerung seitdem im Durchschnitt älter geworden, und der Anteil an Europäern nimmt auch stetig ab. Ich hatte gedacht, eine statistische Grundlage anzupassen müsse doch möglich sein.

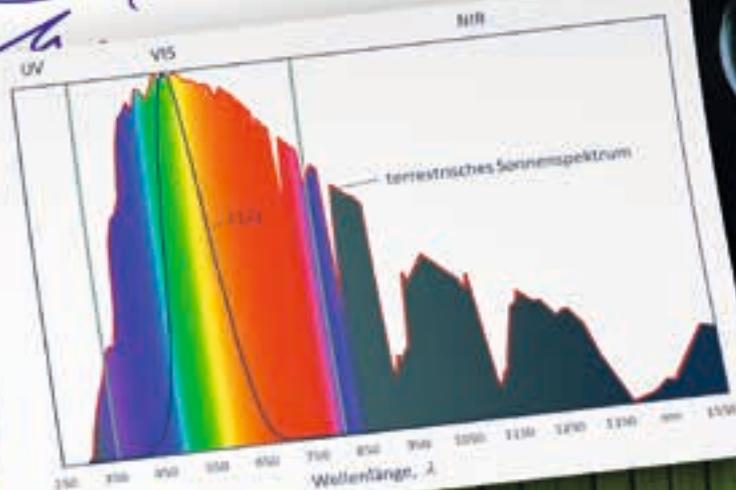
Aber Sie haben in Ihrem Antwortbrief ein Gegenargument gebracht, das ich absolut schlüssig finde: Man habe den definierten CIE-Normalbeobachter genau deshalb „festgeschrieben“, um die Konsistenz der Messergebnisse zu gewährleisten. Eine Lampe aus dem Jahr 1950 solle, heute gemessen, die gleichen Messwerte liefern wie im Jahr 1950. Die verschiedenen Bedürfnisse müsse man über Zusatz-Applikationen berücksichtigen. Die vorhandenen Abweichungen einer Bevölkerungsgruppe müsse man in Zukunft durch eine geeignete spektrale Zusammensetzung des Lichtes (der Qualität des Lichts) berücksichtigen. Das sei insbesondere bei modernen LED-Lichtquellen möglich.

Das kommt mir sehr pragmatisch und vernünftig vor. Ich schließe daraus, dass es sinnvoll und gut durchdacht ist, den scheinbar veralteten Normalbeobachter nicht zu verändern. Und ich werde die Augen offenhalten. Ich bin sehr gespannt, wann die ersten Lampen bzw. LED in den Regalen liegen werden, auf denen zu lesen sein wird: „speziell empfohlen für ältere Menschen asiatischer Abstammung“.

Und ich danke Ihnen für die ausführliche Berücksichtigung meines Anliegens!

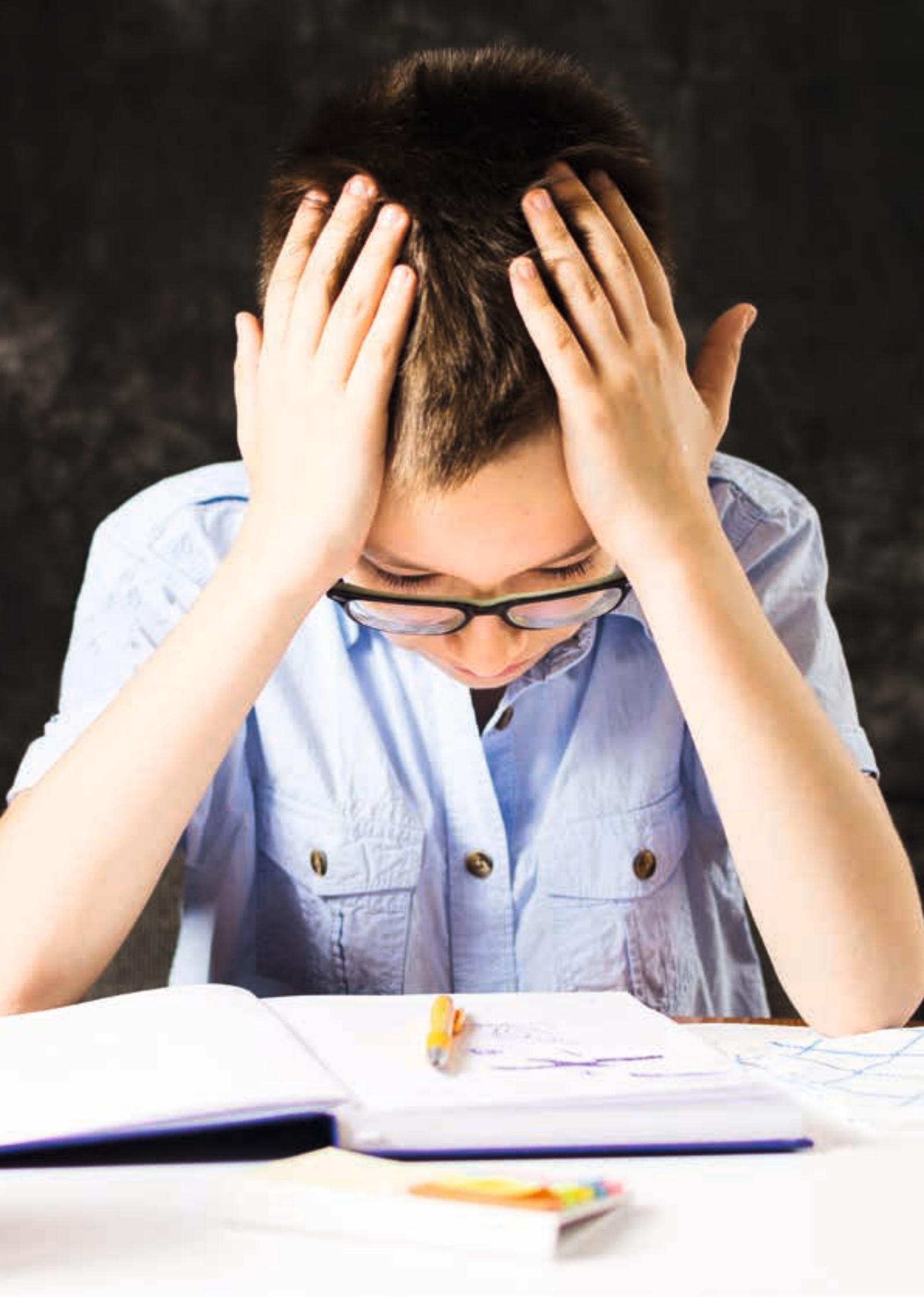
Mit freundlichen Grüßen

*Li-Shi*



Eine der über 20 Normallampen, mit denen die PTB (neben anderen, radiometrischen Verfahren) die Einheit Candela bewahrt.

„Wär nicht das Auge sonnenhaft, die Sonne könnt es nie erblicken“, sinniert Goethe in einem Gedicht. Da ist etwas dran: Diese Abbildung zeigt den gesamten Teil des Spektrums elektromagnetischer Strahlung, den uns die Sonne auf die Erde liefert (schwarz), und darin den Anteil sichtbaren Lichts (farbig). Die schwarze Kurve, die sogenannte Hellempfindlichkeitskurve  $V(\lambda)$  zeigt uns, dass bei derjenigen Wellenlänge, die uns die Sonne am großzügigsten liefert, nämlich der von hellgrünem Licht, das menschliche Auge auch am empfindlichsten ist. Bei der Dunkelempfindlichkeitskurve  $V'(\lambda)$  ist dieser Punkt etwas in Richtung Blau verschoben.



# abstrakt

Jetzt aber schnell. Ich nehme bei jedem Schritt zwei oder drei Stufen auf einmal. Der Walkman leiert. Es klingt, als wenn Nena lallt. Als ich die Klassenraumtür aufreiße, sind schon fast alle Plätze besetzt. Die Tische stehen einzeln, wie bei Klassenarbeiten üblich. Thorsten begrüßt mich mit der Becker-Faust und grinst, genau wie mir scheint ihm die Wimbledon-Sensation noch in den Knochen zu stecken. Dann wird es ernst. Ich kann mir gerade noch einen freien Platz schnappen, da verteilt der fiese Brakmann schon die Physikaufgaben. „Erläutern Sie die bisherige Definition der Einheit Kilogramm...“. Astrein, kann ich: Französische Revolution, Urkilogramm im Safe, Kopien in aller Welt. „... und die neue. Vergleichen Sie beide miteinander.“ Was? Bitte nicht! Mir wird heiß. Los, streng dich an! „Planck!“, schreit eine schrille Stimme in mir, „Konstante!“. Dann herrscht Stille im Kopf. Mehr kommt nicht. Ich gucke zu Thorsten rüber. Er starrt blank auf das Aufgabenblatt. Vor mir sitzt Sabine, ihre Schultern zucken. Vielleicht weint sie. „Los, sei eiskalt, wie der Boris, denk nach!“, ermahne ich mich. Doch die Antwort kommt schnell und hysterisch: „Das ist gemein, ich kann das nicht! Das habe ich noch nie verstanden!“ Panik. Der Füller rutscht aus meiner schwitzigen Hand und macht einen hässlichen Klecks auf dem Papier. Ich bin wie erstarrt, als es endlich klingelt.

Schweißgebadet liege ich im Dunkeln neben der zerknüllten Bettdecke. Morgenlicht sickert unter dem Rollo durch. Erleichtert schalte ich den Wecker aus und atme tief ein und aus. Das war alles nur ein böser Traum. Die 80er und meine Schulzeit sind schon lange Geschichte. Da fällt mein Blick auf meinen Schreibtisch, und die Erkenntnis trifft mich wie ein Schlag: Alles ist sogar noch viel schlimmer! Ich bin Lehrer.

if

Foto: creativfamily / Fotolia

# DOPPELSCHULSTUNDE

## „EINFÜHRUNG IN DAS INTERNATIONALE SYSTEM DER EINHEITEN“

Als normale Verbraucher werden wir von den Veränderungen beim SI gar nichts spüren. Aber im Physikunterricht wird Schülerinnen und Schülern beim Thema „Maßeinheiten“ nun einiges abverlangt. Die maßstäbe-Redaktion hat gemeinsam mit einem Physik-Grundkurs der Klasse 11 am Braunschweiger Gymnasium Martino-Katharineum ausprobiert, wie man sich dem Thema „Internationales Einheitensystem“ annähern könnte. (Herzlichen Dank an alle Schüler und den Lehrer Michael Spieler!) Manches hat gut funktioniert, anderes weniger, und zu dem einen oder anderen fehlte dann doch die Zeit. Unsere Doppelstunde haben wir hier dokumentiert. Wohlgermerkt: Hier waren gut gelaunte Laien am Werk. Dennoch ist bestimmt etwas dabei, das die Profis unter unseren Lesern

– also Lehrer und Schüler – sinnvoll für den Unterricht nutzen können. Weitere Hintergrundinfos und Materialien gibt es auf [www.ptb.de](http://www.ptb.de) unter Presse/Aktuelles/Lehrermaterialien zum neuen SI und unter [www.youtube.ptb.de](http://www.youtube.ptb.de).



### Verlaufsplan

**Dauer:** 5 min

**Inhalt:** Einstiegsfrage: „Welche physikalischen Einheiten kennt ihr?“ Antworten an der Tafel sammeln.

**Methode:** Plenum

**Material:** Tafel

**Bemerkung:**

*Zu banal für Klasse 11!*

Nm g Sekunde  
Kilogramm Gramm  
Hektar  $\frac{m}{s^2}$



**Dauer:** 5 min

**Inhalt:** Kurzvortrag zu Längenmaßen: Vom Durcheinander an Ellen und Füßen im Mittelalter bis zur Geburtsstunde des Meters zur Zeit der Französischen Revolution (Vermessung des Erdmeridians ->  $\frac{1}{40\,000\,000}$  Meridianlänge = 1 Meter).

**Lernziel:** Individuelle Maße des jeweiligen Herrschers werden ersetzt durch ein überall gültiges „Naturmaß“ (einen Teil des Umfangs der Erde).

**Methode:** Vortrag

**Material:** PowerPoint-Folien: z. B. Urmeter, lokale Elle oder ägyptische Königselle, Vermessung des Erdmeridians



**Dauer:** 5 min

**Inhalt:** Frage in die Klasse: „Hätte man den Meter auch halb so lang machen können?“

**Lernziel:** Obwohl der Meter auf dem Umfang der Erde fußt, ist seine tatsächliche Länge eine kulturelle Verabredung / Konvention. Man hat eine für Menschen praktisch handhabbare Länge gewählt.

**Methode:** Diskussion



**Dauer:** 15 min

**Inhalt:** Da Maßeinheiten lediglich Konventionen sind, können wir auch eigene Einheiten definieren.

**Aufgabe 1:** Definiert mithilfe des Metronoms eine Zeiteinheit und benennt sie.

**Aufgabe 2:** Definiert mit eurer Zeiteinheit und der Lokomotive eine Längeneinheit und benennt sie.

**Aufgabe 3:** Definiert eine Masseinheit und benennt sie.

**Methode:** Gruppenarbeit

**Material:** Metronom, elektrische Spielzeug-Lokomotive, Murmeln



**Dauer:** 5 min

**Inhalt:** Dokumentation der Ergebnisse

**Methode:** Plenum

**Material:** Tafel

	Rot	Blau	Bunt
- Meter	10	10	7
- Kilogramm	40	30	55
RBB-T. Schlänge	218	218	218



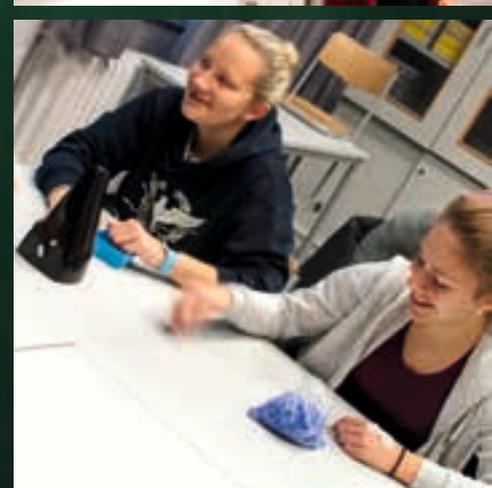
**Dauer:** 10 min

**Inhalt:** **Aufgabe:** Wie lang ist der Tisch, ausgedrückt in eurer Längeneinheit? Vergleicht eure Ergebnisse. Was bedeuten unterschiedliche Einheiten für eure Kommunikation?

**Lernziel:** Man kann Einheiten willkürlich festlegen. Jedoch sind einheitliche Einheiten praktischer, wenn man überregional oder gar weltweit kommuniziert und produziert.

**Methode:** Gruppenarbeit, Diskussion

**Material:** Metronom, elektrische Spielzeug-Lokomotive, Murmeln



PAUSE



**Dauer:** 5 min

**Inhalt:** Frage an die Klasse: Was könnte man statt Metronom, Lok oder Murmeln nehmen, um Einheiten zu definieren? (Gibt es Periodisches in der Natur? Unveränderliche Geschwindigkeiten oder Massen?) Antworten an der Tafel notieren.

**Lernziel:** Es ist zweckmäßig, Einheiten mithilfe unveränderlicher Eigenschaften zu definieren, damit die Einheit konstant bleibt.

**Methode:** Plenum

**Material:** Tafel

*Tag / Nacht  
Ebbe / Flut  
Lichtgeschwindigkeit*



**Dauer:** 10 min

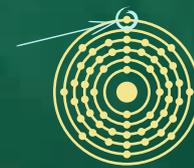
**Inhalt:** Kurzvortrag: Heutige Definitionen von Sekunde und Meter vorstellen. Prinzip der Atomuhr erklären. Prinzip der Laserentfernungsmessung erklären.

**Lernziel:** Zwei Basiseinheiten sind bereits mithilfe von Naturkonstanten definiert.

**Methode:** Vortrag

**Material:** Modell eines Cäsium-Atoms, Laser-Entfernungsmessgerät.

Zur Vorbereitung oder zum Vorführen im Unterricht:  
Video-Sammlung „Zur Zeit“ auf [www.youtube.ptb.de](http://www.youtube.ptb.de)



**Dauer:** 10 min

**Inhalt:** Die Frequenz des Hyperfeinstrukturübergangs des Grundzustands im  $^{133}\text{Cs}$ -Atom ( $\Delta\nu$ ) und die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ( $c$ ) sind festgelegt:  
 $\Delta\nu = 9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$  (Gl 1) und  $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$  (Gl 2)

**Aufgabe:** Gleichung 1 nach Sekunde umformen. Gleichung 2 nach Meter umformen. Dann Gleichung 1 in 2 einsetzen.  
Ergebnis:  $1\text{ m} = 30,663\,318\,99\text{ c}/\Delta\nu$

**Lernziel:** Hat man Konstanten erst einmal festgelegt, lassen sich physikalische Einheiten von ihnen ableiten.

*optional, je nach Klassenstufe*

**Dauer:** 10 min

**Inhalt:** Kilogramm damals: Kurze Lesung aus „Das Haupt der Welt“ (Autorin: Rebecca Gablé) über alltäglichen Streit um verschiedene Maße im Mittelalter.

Kilogramm heute: Video-Trailer „1001 Gramm“ (norwegisch-deutsch-französischer Spielfilm, 2014), insbesondere erste 4 Sekunden

**Lernziel:** Anschaulichkeit herstellen für Probleme mit verschiedenen Gewichtsmaßen in der Vergangenheit und dem „heiligen“ Umgang mit dem Urkilogramm heute.

**Methode:** Lesung, Film

**Material:** Buch, Filmtrailer

**Bemerkung:**



*Optional! Gewählte Textstelle zu langweilig,  
Klasse 11 nicht angemessen*

**Dauer:** 5 min

**Inhalt: Kurzinfo zum Kilogramm:** Abgeleitet von der Meterdefinition (wassergefüllter Würfel mit der Kantenlänge 10 cm). Seit der Französischen Revolution über einen Prototyp (Urkilogramm in einem Pariser Tresor) verkörpert -> Welche Probleme kann solch eine Definition mit sich bringen?

**Lernziel:** Materielles ist veränderlich (Beschädigung, Verformung, Verfall, Verlust)

**Methode:** Diskussion

**Material:** Kilogrammprototyp-Kopie, PowerPoint-Folien



**Dauer:** 5 min

**Inhalt: Vortrag:** aktuelle Forschung zur Neudefinition des Kilogramms am Beispiel der Si-Kugel-Experimente: Rückführung des Kilogramm auf eine elementare Masse (z. B. Masse eines Atoms bzw. eines Mols). Strategie: Atome „zählen“. Hilfsmittel: nahezu perfekter Silizium-Kristall.

**Lernziel:** Auch beim Kilogramm sollen in Zukunft Konstanten die Definition bestimmen.

**Methode:** Vortrag

**Material:** PowerPoint-Folien z. B. Si-Kugel, Siliziumgitter

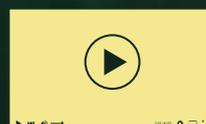


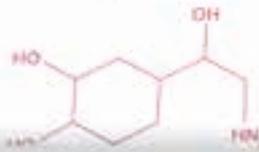
**Dauer:** 5 min

**Inhalt:** Abschluss und Ausblick: Humorvolle Animation zur Geschichte der Einheiten.

**Methode:** YouTube-Video

**Material:** „Internationales Einheitensystem“ auf [www.youtube.ptb.de](http://www.youtube.ptb.de)





$$\frac{a+c+1}{2} = \Omega$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{T}{\sqrt{2}}$$

Alina Messmeister  
Delambre-Allee 92  
14169 Berlin

19.9.2018

An alle Schulbuchredakteure/-innen in Deutschland

Sehr geehrte Damen und Herren,

die maßstäbe-Redaktion hat mir freundlicherweise erlaubt, meinen Brief hier zu veröffentlichen, weil mir als Schülerin die Mittel fehlen, all die komplizierten Wege zu finden, um auf dem unübersichtlichen Markt der Schulbuchredaktionen jeden von Ihnen zu erreichen. Aber wer weiß, vielleicht sind Sie ja eine(r) der rund 40 000 maßstäbe-Leser/-innen!

Ich bin eine Schülerin der 10. Klasse und sehr an Physik interessiert. Und ich finde, dass den Physikbüchern etwas fehlt. Jetzt habe ich ein paar Physikbücher gezielt durchgesehen. Sie haben sich ja Mühe gegeben, uns Schüler(innen) mit interessanten Experimenten in die Welt der Physik einzuführen. Ganz oft wird dabei natürlich etwas gemessen. Aber das grundlegende Thema „Messen“ wird allenfalls nur angekratzt. Mit ein bisschen Glück findet man eine kleine Einführung zu Größen und Einheiten, ganz selten fällt der Begriff „Internationales Einheitensystem“, ab und zu ein Bild vom Urmeter (das allerdings schon fast 60 Jahre lang nicht mehr im Dienst ist) oder vom Urkilogramm. Weil das jetzt gewissermaßen in den Ruhestand geht und überhaupt ein ganz neues SI kommt, das Sie ja dazu zwingt, Ihre Texte ohnehin zu überarbeiten, schicke ich Ihnen hier meinen Vorschlag: Bitte schreiben Sie doch etwas mehr zu den Einheiten in Ihre Bücher! Wir benutzen die Einheiten schließlich tagtäglich. Und sie eignen sich sehr gut, um klarzumachen, dass die Welt der Physik gar nicht so abstrakt ist, wie viele glauben.

Ich habe auch zwei konkrete Beispiele für Sie. Sie betreffen die Einheit Meter. Wenn man überhaupt etwas zu den Einheiten sagt, muss man mit dem Meter anfangen, finde ich. Es war die erste Einheit, die „vereinheitlicht“ wurde, damals in der Französischen Revolution, als all die Ellen und Füße abgeschafft wurden. Der internationale Vertrag, der hundert Jahre später von allen wichtigen Industrienationen unterzeichnet wurde, die Meterkonvention, war die Voraussetzung dafür, dass wir heute ein Internationales Einheitensystem haben, das SI. Darin war der Meter die erste Einheit, die auf die Grundlage einer Naturkonstanten, der Lichtgeschwindigkeit, gestellt wurde. Das war 1983. Man stelle sich das mal vor, so früh! Und erst heute, 2018, folgen die anderen Einheiten! Das darf doch nicht verschwiegen werden.

Und es gibt so schöne Beispiele aus dem Alltag und der Hightech-Welt, die Sie uns Schüler/innen dazu erzählen können. (Übrigens glaube ich, dass zumindest Schülerinnen mithilfe von Alltags- und Hightech-Beispielen viel besser an Physik herangeführt werden können als über die klassischen Versuchsaufbauten.)

Hier das Beispiel aus dem Alltag: Zeigen Sie die Abbildung eines Laser-Entfernungsmessgeräts, wie es sie in Baumärkten (oder bei Vätern im Hobbykeller) gibt, und erklären Sie, dass es die perfekte Umsetzung der aktuellen (und auch zukünftigen) Meter-Definition ist: Zumindest viele dieser Geräte sind Stoppuhren. Sie messen die Zeit, die der Laserstrahl vom Gerät bis zur Wand (oder zu einem anderen Objekt) und zurück zum Gerät brauchen. Mithilfe dieser Zeitmessung und der bekannten (festen) Lichtgeschwindigkeit errechnet es die Strecke. Fertig.

Und jetzt das Beispiel aus der Hightech-Welt. Da muss man ein paar Jahrzehnte zurückgehen - aber noch heute erzeugt die erste Mondlandung 1969 einen Wow-Effekt. Als Neil Armstrong und sein Kollege Buzz Aldrin den Mond betreten hatten, stellten sie unter anderem einen Laser-Reflektor auf. In den Jahren danach folgten noch einige weitere. Und alle diese Dinge, die man als so eine Art Katzenauge oder Spiegel bezeichnen kann, lassen sich bis heute mit starken Laserstrahlen von der Erde aus anpeilen. Oft kommt von  $10^{19}$  ausgesandten Photonen ein einziges am Ursprungsort auf der Erde wieder an. Und dann kann man mit genau derselben Zeitmessmethode wie beim Baumarktgerät die aktuelle Entfernung Erde-Mond bestimmen - auf wenige Zentimeter genau. Wenn das nicht perfekt illustriert, dass eine Einheitsdefinition kein trockenes Thema ist! Am besten schlagen Sie den Schülern noch einen Exkurs vor, nämlich im Internet zu dem Thema zu recherchieren, ob die erste Mondlandung nur ein Fake war (Stichwort: Verschwörungstheorie), und Sie haben das Interesse jedes Schülers und jeder Schülerin entfacht. Allein der Wikipedia-Artikel zum Thema ist sehr spannend. Als Ergebnis könnten Sie die Schüler diskutieren lassen, ob dieser erste Laserreflektor von 1969 auch ein Beweis dafür ist, dass Menschen damals wirklich den Mond betreten haben. Danach kommen Sie elegant zur Physik zurück und halten als Ergebnis fest, dass dieser Reflektor ein Sinnbild für eine Revolution war, die zwar nicht so spektakuläre Bilder wie die Mondlandung geliefert hat, aber für die Menschheit mindestens ebenso wichtig war: eine Revolution des Messens, die in der Französischen Revolution begann und gerade jetzt, 2018, ein neues Kapitel aufschlägt.

Als erfahrene Physikbuchredakteure/-innen können Sie all dies bestimmt lesenswert aufbereiten.

Mit freundlichen Grüßen

Alma Messweiser



Laser-Entfernungsmessgerät  
Foto: PTB

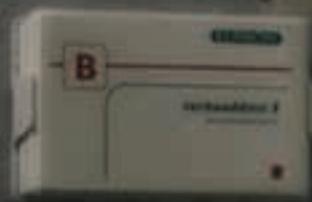




Foto: Jordi Huisman/fotolia

# universell

Dafür, dass die Welt ein Dorf sein soll, geht es in ihr ganz schön vielsprachig zu. Wer in den Weltatlas der Sprachstrukturen schaut, wird Augen machen angesichts des bunten Sprach-Flickenteppichs, der den Globus überzieht. Die Anthropologen schätzen, dass derzeit noch bis zu 7000 verschiedene Sprachen aktiv gesprochen werden. In der Vergangenheit waren es deutlich mehr. In Zukunft werden es deutlich weniger sein. Denn viele dieser Sprachen sind tatsächlich „dörflich“ – mit weniger als 1000 Menschen, die sie sprechen. Auf der anderen Seite spricht etwa die Hälfte der Weltbevölkerung eine der zehn meistgesprochenen Sprachen (Platz 1: Mandarin-Chinesisch, Platz 10: Deutsch).

Was uns das sagt? Dass die Welt insgesamt schon ein bunter Haufen und Kommunikation grundsätzlich schwierig ist. Grundsätzlich? Eine Weltsprache gibt es nämlich durchaus: die Sprache der Metrologie. Rund um den Globus meinen alle dasselbe, wenn etwa vom Nanometer, dem Pikoampere oder der Femtosekunde die Rede ist. Und dieses „weltsprachliche Projekt“ ging bereits im Jahr 1875 an den Start. Damals verständigten sich die ersten 17 Staaten darauf, nicht mehr mit einem Sammelurium von Füßen, Ellen und Pfunden zu messen, sondern mit einem Meter und einem Kilogramm für alle. Bis heute ist dieses Projekt weit gediehen. Rund 100 Staaten sind der Meterkonvention beigetreten oder ihr assoziiert. Alle sprechen eine Sprache: die des Internationalen Einheitensystems. Und ab dem 20. Mai 2019 geht dieses globale System noch einen Schritt weiter. Es wird ... Oh, warten Sie bitte kurz. Eben erscheint eine holografische Botschaft im Raum: „Hallo Erdlinge. Was hören wir da? Ihr habt die Planck-Konstante festgelegt? Schön, dass ihr das mittlerweile auch geschafft habt. Wollt ihr uns was verkaufen? Mal sehen. Aber beachtet unsere AGBs – hinterlegt bei unserem Juristen Fred vom Jupiter. Euer Lars vom Mars.“

jes

# „Die größte Umwälzung im Einheitensystem seit der Französischen Revolution“

## Ein Gespräch mit Klaus von Klitzing kurz von der Einführung des neuen SI

An einem sonnigen Herbsttag treffe ich Professor Klaus von Klitzing, den Physik-Nobelpreisträger von 1985, zu einem Gespräch über das geplante „neue“ Internationale Einheitensystem und die faszinierende Physik dahinter. Wir sitzen in seinem geräumigen Büro im fünften Stock des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung in Stuttgart, wo er noch bis zu seiner Pensionierung einer von neun Direktoren ist. Auf dem Tisch stehen zwei Tassen mit dampfendem Tee und eine Funkuhr, die ihre Zeit sekundengenau von den Atomuhren der PTB bezieht.

Zunächst sprechen wir über das bewährte – und in dieser Form nur noch einige Monate gültige – „alte“ SI. Es definiert sieben Basiseinheiten: die Sekunde (s), den Meter (m), das Kilogramm (kg), das Ampere (A), das Kelvin (K), das Mol (mol) und die (auf der zweiten Silbe betonte) Candela (cd). „Ein einheitliches Einheitensystem hat große praktische Bedeutung. Würde jeder nach eigenem Gutdünken seine Maßeinheiten festlegen, bräche der Welthandel zusammen“, gibt Klaus von Klitzing zu Bedenken.

Die Idee der universell gültigen „metrischen“ Einheiten Meter und Kilogramm geht auf die Französische Revolution zurück und wurde 1875 in der Meterkonvention festgeschrieben. „Man wollte etwas zeitlich und örtlich Unabhängiges, Stabiles formen, wobei die Erde im Mittelpunkt stand. Praktisch hat man den Meter auf den Erdumfang und die Sekunde auf die Umdrehungszeit der Erde bezogen.“ Das Kilogramm wurde aus dem Meter abgeleitet, als Masse eines Kubikdezimeters Wasser. „Im Prinzip konnte jeder in jedem Land diese Einheiten durch Vermessung der Erde wieder gewinnen und so realisieren.“

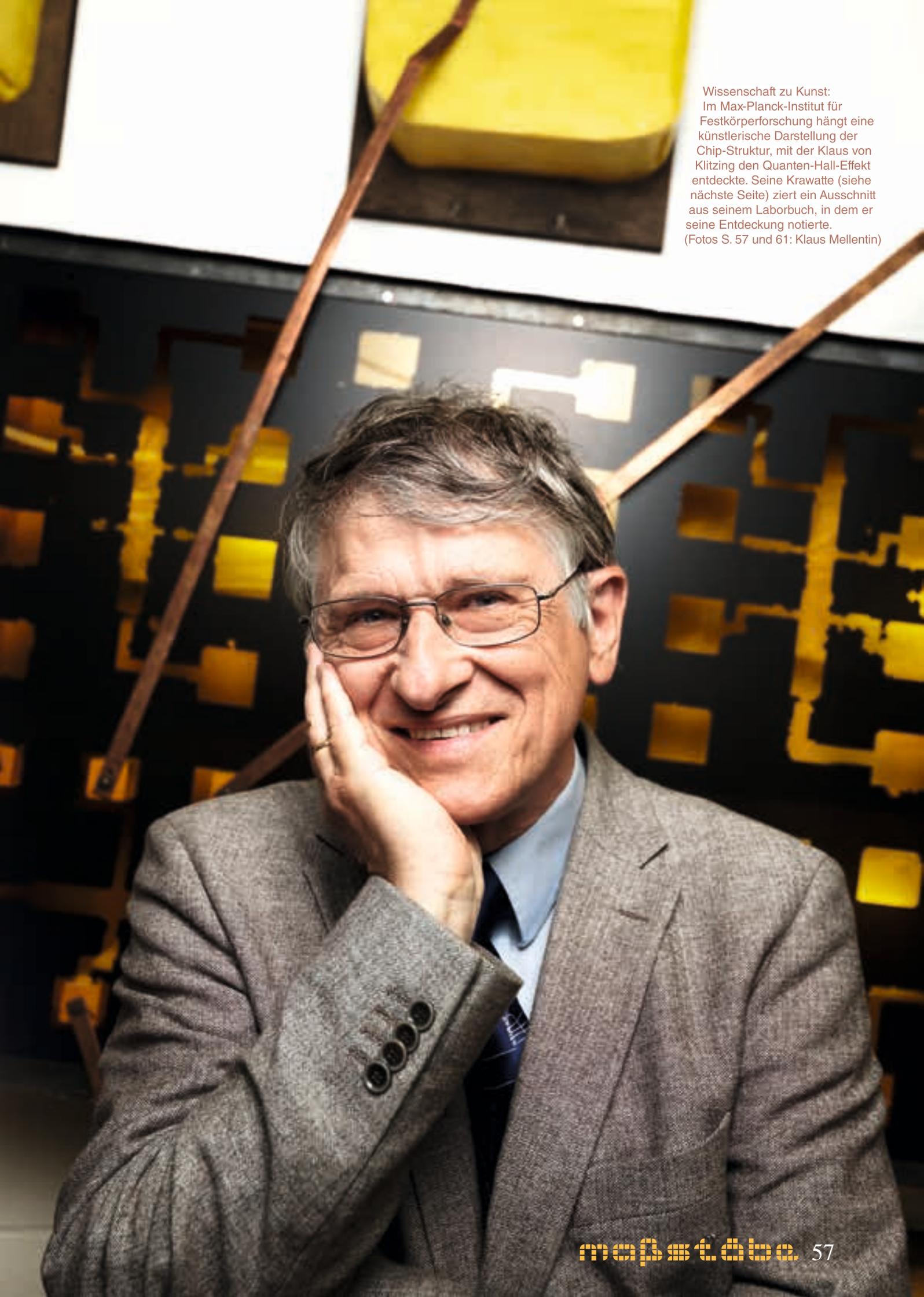
In der Praxis war das natürlich kaum möglich. „Deswegen hat man die Prototypen, den Urmeter und das Urkilo-

gramm, etabliert, die seit 1889 in Paris beim Internationalen Büro für Maß und Gewicht (BIPM) aufbewahrt werden.“ Während man Meter und Sekunde inzwischen „erdunabhängig“ definiert, hat das Urkilogramm bis heute überlebt. Doch mit der Einführung des neuen SI, die im November 2018 in Versailles beschlossen werden soll, schlägt auch für das Urkilogramm die letzte Stunde. Klaus von Klitzing: „Das neue SI ist die größte Umwälzung im Einheitensystem seit der Französischen Revolution.“

## Konstanten: ein letztes Mal gemessen

Statt der sieben Basiseinheiten rücken jetzt Natur- oder Fundamentalkonstanten ins Zentrum des Interesses. Im zukünftigen SI definiert man deren Werte und gibt davon ausgehend Verfahren an, wie man die Einheiten realisieren kann. Beim Meter und der Sekunde ist das bereits geschehen. Klaus von Klitzing erläutert: „Schon 1983 hat man der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum einen festgelegten Wert gegeben, nämlich exakt 299 792 458 Meter pro Sekunde.“ Damit war der Meter die Strecke, die das Licht in einer 299 792 458-tel Sekunde zurücklegt. Dies bleibt auch im neuen SI so.

„Damit werden Längenmessungen auf Zeitmessungen zurückgeführt; und mit einer Atomuhr kann man ja die Zeit sehr genau messen“, betont Klaus von Klitzing. Die Sekunde ist laut Definition

A portrait of Klaus von Klitzing, an older man with grey hair and glasses, smiling and resting his chin on his hand. He is wearing a grey suit jacket, a light blue shirt, and a dark tie. The background is a dark wall with a grid of yellow squares and lines, resembling a circuit board or a scientific diagram. A large yellow square is visible in the upper left corner.

Wissenschaft zu Kunst:  
Im Max-Planck-Institut für  
Festkörperforschung hängt eine  
künstlerische Darstellung der  
Chip-Struktur, mit der Klaus von  
Klitzing den Quanten-Hall-Effekt  
entdeckte. Seine Krawatte (siehe  
nächste Seite) ziert ein Ausschnitt  
aus seinem Laborbuch, in dem er  
seine Entdeckung notierte.  
(Fotos S. 57 und 61: Klaus Mellentin)

das 9 192 631 770-fache der Periodendauer einer bestimmten Art von Mikrowellenstrahlung, mit der in einer Atomuhr Cäsiumatome angeregt werden. Die Anregungsfrequenz des Cäsiums ist zwar keine Naturkonstante, da sie im Prinzip von Umwelteinflüssen wie elektrischen oder magnetischen Feldern abhängt. Schaltet man diese Einflüsse aber aus, so ist die Anregungsfrequenz letztlich eine konstante Größe.

## Zufällig entdeckt

Zwei weitere Naturkonstanten – die elektrische Elementarladung  $e$  und die Planck-Konstante  $h$  – kommen durch den Josephson-Effekt und den von Klaus von Klitzing entdeckten Quanten-Hall-Effekt ins Spiel. Beim Josephson-Effekt tritt zwischen zwei Supraleitern, die durch eine normalleitende oder auch isolierende Schicht getrennt sind und mit Mikrowellen der Frequenz  $f$  bestrahlt werden, eine elektrische Spannung  $U$  von sehr genau definierter Größe auf. Der Proportionalitätsfaktor zwischen  $f$  und  $U$ , die Josephson-Konstante, beträgt exakt  $2e/h$  und hängt somit nur von Naturkonstanten ab. Für die Vorhersage dieses Effekts erhielt der Brite Brian Josephson 1973 den Physik-Nobelpreis.

„Den Quanten-Hall-Effekt habe ich am 5. Februar 1980 um zwei Uhr morgens rein zufällig entdeckt“, erinnert sich Klaus von Klitzing. „Dass ich daraus irgendwelche Fundamentalkonstanten ziehen kann, hätte ich bei meinen damaligen Forschungsarbeiten vorher nie gedacht!“ Von Klitzing forschte an Siliziumfeldtransistoren. Das sind elektronische Bauelemente, in denen sich die Leitungselektronen in einer zweidimensionalen Schicht bewegen. Lässt man durch den Transistor in einem starken Magnetfeld einen elektrischen Strom fließen, so tritt senkrecht zum Magnetfeld und zur Stromrichtung eine „Hall-Spannung“ auf. Dieser „klassische“ Hall-Effekt war schon lange bekannt. Doch Klaus von Klitzing entdeckte, dass unter bestimmten Bedingungen Strom und Spannung in einem Verhältnis zueinander stehen, das durch einen universellen elektrischen Widerstandswert  $h/e^2$  bestimmt ist – später Von-Klitzing-Konstante genannt.

„Gleich am nächsten Morgen habe ich in der PTB denjenigen angerufen, der für den Josephson-Effekt verantwortlich war, und gefragt, ob er an einem Widerstand Interesse hat, der mit  $h/e^2$  zusammenhängt.“ Und ob man bei der PTB daran interessiert war! Die Entdeckung elektrisierte die Physiker und Metrologen weltweit. Bei zahllosen Versuchen in vielen Laboratorien hat man von Klitzings Experiment mit Transistoren unterschiedlicher Form und Zusammensetzung wiederholt. Dabei wurden für den Von-Klitzing-Widerstand Werte gemessen, die auf mindestens 10 Dezimalstellen identisch sind. Auch beim Josephson-Effekt hat man durch Vergleichsmessungen mit unterschiedlichen Proben bewiesen, dass die eindeutige Beziehung zwischen Mikrowellenfrequenz  $f$

und Spannung  $U$ , die durch die Josephson-Konstante hergestellt wird, auf mindestens 16 Dezimalstellen Gültigkeit besitzt.



## Wie bekommt man $e$ und $h$ ins SI?

Doch es gab ein Problem. „Mittels Quantennormalen, basierend auf dem Quanten-Hall-Effekt und dem Josephson-Effekt, können Bezugswerte für die elektrischen Größen Widerstand und Spannung, also die Josephson-Spannung und den Von-Klitzing-Widerstand, extrem stabil und genau reproduziert werden. Sie können aber im bestehenden SI nicht hinreichend präzise gemessen werden, da die SI-Einheiten nicht genau genug hergestellt werden können“, beschreibt Klaus von Klitzing das Dilemma.

„Deswegen erschien es naheliegend, die beiden Quantennormale als feste, universelle Bezugsgrößen zu nehmen. Aber man hatte Schwierigkeiten, sie in das SI-Einheitensystem einzubauen. Widerstand und Volt als Basiseinheiten aufzunehmen, wäre eine zu radikale Veränderung in dem historisch gewachsenen Maßsystem.“ Man trennt sich halt ungern von Vertrautem. (Das gilt auch für das Mol und die Candela, die Einheiten der Stoffmenge und der Lichtstärke, die man ebenso gut durch eine direkte Angabe der Teilchenzahl und der Strahlungsenergie ersetzen könnte.)

Man wählte einen anderen Weg. „Die Größen, die den Quanten-Hall-Effekt und den Josephson-Effekt bestimmen, sind ja die Planck-Konstante und die Elementarladung. Man beschloss, diese beiden Konstanten ins neue SI zu integrieren, indem man das Ampere der Elementarladung und das Kilogramm der Planck-Konstante zuordnet“, erläutert von Klitzing. Auf dieser Grundlage die entsprechenden Einheiten zu realisieren, erscheint beim Ampere auf den ersten Blick einfach: Man könnte die Elektronen (die jeweils eine negative Elementarladung tragen) zählen, die pro Sekunde bewegt werden, wenn ein Strom von 1 Ampere fließt. Das versucht man mit sogenannten Einzelelektronenpumpen, die im Takt einer Gigahertz-Frequenz die Elektronen einzeln passieren lassen. Doch so erreicht man bisher nur sehr schwache Stromstärken von weniger als 1 Nanoampere.

Eine praktikablere Alternative bieten gemeinsam der Josephson- und der Quanten-Hall-Effekt. Mit ihnen kann



Kibble-Waagen in insgesamt 13 Ländern und dem völlig anders gearteten Avogadro-Projekt – können durchaus kleine Unstimmigkeiten auftreten. „Es gab Differenzen von bis zu 70 Mikrogramm. Aber man ist optimistisch, dass man die Fehler experimentell besser eingrenzen und reduzieren kann.“ Gegenwärtig sei es noch vertrauenserweckender, nach Paris zu gehen und sich von dort direkt eine Kopie des Urkilogramms zu holen, meint Klaus von Klitzing lachend.

„Auch in Zukunft wird es immer wieder Kontrollmessungen geben, um letztlich das Vertrauen zu haben, dass man bei der Definition des Kilogramms mit Wattwaage und Avogadro-Projekt nicht doch einen Fehler übersehen hat“, gibt Klitzing zu bedenken. „Beim Avogadro-Projekt ist die PTB jetzt weltführend. Sie kann die verschiedenen nötigen Messungen fast alle selber durchführen.“ Deswegen hat die PTB auch bessere Möglichkeiten zu erkennen, wo eventuell noch Fehler auftreten können.

## Und die Zukunft?

Das neue SI scheint solide gegründet, da es auf den Naturkonstanten  $c$ ,  $e$  und  $h$  sowie auf der Cäsiumübergangsfrequenz aufbaut. Doch sind diese Größen wirklich konstant? „Die Naturkonstanten sind das Stabilste, was wir haben. Es wird diskutiert, ob sie vielleicht doch zeitabhängig sind. Immerhin können wir mit dem Quanten-Hall-Effekt und dem Josephson-Effekt experimentell zeigen, dass  $e$  und  $h$  auf mindestens zehn Dezimalstellen universell sind.“ Andere Messungen haben ergeben, dass die Feinstrukturkonstante (die u. a. von  $c$ ,  $e$  und  $h$  abhängt und eine reine Zahl ist) sich pro Jahr höchstens in der 18. Dezimalstelle ändern kann. Klaus von Klitzing: „Für die Metrologie hätte so eine winzige Änderung keine praktische Bedeutung. Doch natürlich wäre eine Zeitabhängigkeit der Naturkonstanten fundamental von sehr großem Interesse.“

Und wie steht es mit dem technischen Fortschritt, der es ermöglicht, viele physikalische Größen immer genauer zu messen? Von Klitzing sieht ihn positiv: „In Zukunft könnte es noch bessere Wege geben, einen Zusammenhang zwischen den Fundamentalkonstanten und messbaren Größen herzustellen.“ Am jeweiligen Wert der Naturkonstanten wird das nichts ändern, aber die Realisierung etwa des Kilogramms würde sich dadurch verbessern.

Und was ist mit den neuen, optischen Atomuhren, die auch an der PTB entwickelt werden? Da sie 10 000-mal schneller „ticken“ als die Cäsiumatomuhren, können sie die Zeit prinzipiell wesentlich genauer messen. Werden diese Uhren eine Neudefinition der Sekunde erforderlich machen? „Ja“, ist sich von Klitzing sicher. „Die neuen Gitteruhren und Einzelionenuhren, die mit sichtbarem Licht statt mit Mikrowellen arbeiten, sind wesentlich besser.

Jetzt werden sie noch nicht berücksichtigt. Aber in Zukunft wird es Neudefinitionen geben.“ Das müsse man aber so anpassen, dass es keinen Bruch mit der heutigen Zeitmessung gibt. „Die Sekunde wird auch in Zukunft die Sekunde bleiben“, betont er.

Und die praktischen Konsequenzen des neuen SI? „Wegen der festgelegten Werte der Fundamentalkonstanten hat jeder in jedem Land unabhängig von Paris die Möglichkeiten, sich die Einheiten im Hause zu realisieren. Er muss einfach nur gute Experimente aufbauen“, erläutert von Klitzing. Eine weitere Konsequenz: Schul- und Lehrbücher für die Physik müssen umgeschrieben werden. Während Naturkonstanten wie  $e$  und  $h$  sowie die Boltzmann-Konstante  $k$  (mit der man von einer Temperatur auf eine Energie umrechnen kann) nun keine Messgrößen mehr sind, sondern exakte Werte haben, ist es bei anderen physikalischen Größen genau umgekehrt: Die magnetische und die elektrische Feldkonstante  $\mu_0$  bzw.  $\epsilon_0$  sowie die Tripelpunkttemperatur des Wassers, die bisher auf exakte Werte festgelegt waren, können nun mit zunehmender Genauigkeit gemessen werden. „Die Physiklehrer müssen umlernen“, stellt Klaus von Klitzing schmunzelnd fest.

## Innere Widersprüche unerwünscht

Schließlich spricht er noch einige grundlegende Fragen und spekulative Überlegungen an. „Im Prinzip könnten wir den Fundamentalkonstanten in gewissen Grenzen beliebige Werte geben, solange wir dann nicht im täglichen Leben bei Messungen nach dem alten und dem neuen SI einen Sprung haben. Der genaue Wert einer Naturkonstanten, den man jetzt festlegt, ist eigentlich vollkommen unbedeutend, da sich die neuen Einheiten nach den Fundamentalkonstanten zu richten haben.“ Es scheint somit, als wäre man weitgehend frei bei der Festlegung der für das SI wichtigen Naturkonstanten. „Gibt es aber auch andere Fundamentalkonstanten, die wir nicht festlegen dürfen, weil wir sonst das System überbestimmen würden?“ Die unerwünschte Folge wären innere Widersprüche im Einheitensystem.

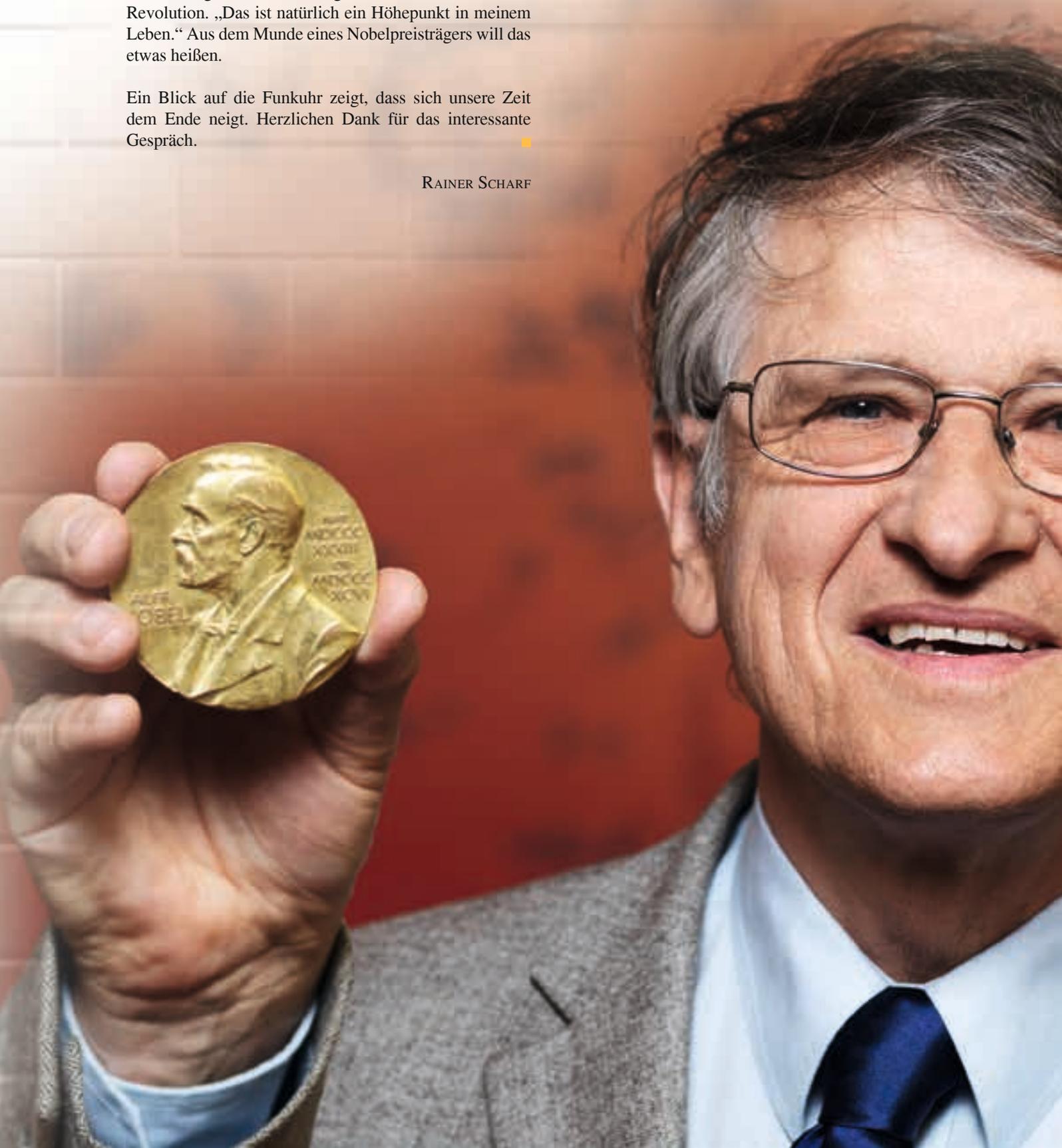
Und wo bleibt die Gravitationskonstante, die die Schwerkraft zwischen zwei Massen bestimmt? „Das ist auch eine ganz fundamentale Konstante, für die eine Präzisionsmessung aber nahezu hoffnungslos ist. Doch eigentlich hat auch diese Konstante das Recht, festgelegt zu werden“, gibt Klaus von Klitzing zu bedenken. „Wenn ich den Wert der Gravitationskonstanten festlege, habe ich einen direkten Zugang zur Masse. Wäre dann das Einheitensystem überbestimmt?“ Vermutlich führe dann die jetzige Definition der Sekunde, die ja nicht auf einer Fundamentalkonstanten beruht, zu einer Überbestimmung des SI-Einheitensystems. „Max Planck hat ja schon ein Einheitensystem eingeführt, dem Fundamen-

talkonstanten zugrunde lagen. Dazu gehörte allerdings auch die Gravitationskonstante.“ Doch die Planck-Einheiten für die Länge und die Zeit sind viel zu klein für eine praktische Nutzung.

Abschließend erzählt Klaus von Klitzing, dass er am 16. November 2018 in Versailles auf der Generalkonferenz für Maß und Gewicht zu einem Plenarvortrag eingeladen ist. An diesem historischen Tag soll dort die Annahme des neuen SI beschlossen werden – die größte Umwälzung in der Metrologie seit der Französischen Revolution. „Das ist natürlich ein Höhepunkt in meinem Leben.“ Aus dem Munde eines Nobelpreisträgers will das etwas heißen.

Ein Blick auf die Funkuhr zeigt, dass sich unsere Zeit dem Ende neigt. Herzlichen Dank für das interessante Gespräch.

RAINER SCHARF



## Leserbriefe zu Heft 13, Alltag in Maßen

Sehr tolle Hefte für interessierte Laien.

*Michael Kark, Darmstadt,  
13.11.2017*

Ich bin ein sehr interessierter und begeisterter Leser der Zeitschrift *maßstäbe*. Leider habe ich schon länger keine Zeitschrift mehr erhalten. Bin ich übersehen worden? Dann bitte ich höflich um Zusendung der neuen Ausgabe und füge gleichzeitig gute Wünsche für die Redaktion bei. Gutes Gelingen weiterhin. Großartiges wurde bisher geleistet.

*Franz-Arnold Cöllen,  
Bad Fallingbostal, 1.8.2017*

Das Angebot ist wunderbar, und ich kann meine Kinder hoffentlich dank der hochinteressanten Zeitschriften noch mehr für Technik interessieren.

*Dr. Klaus Hofbeck, Neumarkt,  
6.5.2017*

Hallo! Habe Ausgabe Nr. 13 vorliegen und bin begeistert. Tolle Kombi aus Wissenschaft und Journalismus. Werden die früheren Ausgaben zu einem späteren Zeitpunkt wieder als Druckvariante erhältlich sein?

*Carsten Wiesner, Rockenberg,  
11.4.2017*

Habe diese Information vom Lehrer meiner Tochter und finde es toll, diese Zeitschrift kostenlos abonnieren zu können.

*Sandra Öztig, Kaufungen,  
15.11.2016*

Mit Interesse lese ich ihre *maßstäbe*. Messtechnik ist ein lebenswichtiger Teil unserer Gesellschaftsordnung. Eigentlich gilt das nicht nur für die Technik im engeren Sinne, sondern im erweiterten Sinne für alle Lebensbereiche. Ich pflege gern zu sagen: „All problems in our world are ‚only‘ measurement problems.“

*Hans-Jürgen Brockmann,  
Muurla (Finnland)*

Werte Damen und Herren, Ihre Publikationen sind hervorragend. Gerne würde ich immer wieder aufs Neue informiert sein. Aus diesem

Grund würde ich gerne ihr *maßstäbe*-Abonnement beziehen. Machen Sie weiter so.

*Andreas Räuber, Goslar, 16.9.2016*

Ein großes Lob für die *maßstäbe*. Einfach ein hervorragendes Heft.

*Wolfgang Büscher, Haar,  
10.9.2016*

Hiermit bestelle ich Ihre Zeitschrift *maßstäbe* ab. Der Grund hierfür ist der meiner Meinung nach für ein wissenschaftliches Magazin indiskutable Beitrag der Seiten 64 und 65 in der aktuellen Ausgabe.

*Prof. Dr. Annabella Rauscher-Scheibe, Hamburg, 30.8.2016*

Ich als Schüler freue mich über die Möglichkeit eines Abonnements einer so informativen Zeitschrift. Machen Sie weiter so!

*Florentine Friedrich, Frauensee,  
26.8.2016*

Als ich nun den Umschlag mit Heft 13 in der Post fand, erteilte mich die helle Freude. „Es gibt sie immer noch, die *maßstäbe*.“ Wie ein guter Freund (ich meine einen wirklich guten), der nicht zu aufdringlich ist, von dem man selten hört, sich aber umso mehr darüber freut und der einen tatsächlich über Jahre und Jahrzehnte begleitet. Und dieser Freund ist so etwas wie ein unsichtbares Band in die Welt der Wissenschaft für mich als Kaufmann. [...] Die *maßstäbe* scheinen mit viel Lust und Empathie geschrieben, und das überträgt sich auf den Leser. Langweilige, uninteressante Themen? Fehlanzeige. [...] Ich weiß nicht, ob Sie irgendeine Art von Feedback-Statistik führen, schließlich ist das die einzige Währung, in der Sie und Ihr Team für Ihre Arbeit an den *maßstäben* entlohnt werden. Aber wenn es so etwas gibt, dann buchen Sie diese Mail bitte in die höchste verfügbare Kategorie ein. Mit den allerbesten Grüßen und in freudiger Erwartung von Heft Nr. 14 ... wann auch immer!“

*Wolfgang Schenke, Speyer,  
28.8.2018*

Vielen Dank für das neue Heft. Das Warten hat sich gelohnt. Wieder ist Ihnen eine faszinierende Darstellung mir sonst wohl kaum zugäng-

licher Informationen gelungen. Weiter so und viel Erfolg.

*Drs. Doris und Hansjörg Flick,  
Offenburg, 26.8.2016*

Ich hätte quieken können, als ich Ihren Umschlag mit der langersehnten *maßstäbe*-Zeitschrift im Briefkasten gefunden habe – ich bin entzückt. Endlich gibt es eine neue Ausgabe dieses kurzweiligen, spannenden und horizontweiternden Magazins – und das nach drei langen ungewissen Jahren! Danke an Sie alle, die Sie mit Pfiff und Perspektivwechseln vermeintlich Banales sowie – für mich – tatsächlich Kompliziertes verständlich erläutern und somit meine Wahrnehmung erhellen ☺.

*Moni Schneider-Mild, 26.8.2016*

Herzlichen Dank für das neue Magazin. Toll, dass es wieder „aufgelebt“ ist (man soll nie im Leben die Hoffnung auf das Gute aufgeben!). Ich freue mich schon darauf, die vor mir liegenden Seiten „zu verschlingen“. Weiterhin alles Gute für alle Macher(-innen) des Heftes.

*Peter Pfaffelberger, Hamburg,  
25.8.2016*

Eben in der Redaktion bin ich – mal wieder – über die *maßstäbe* und ihr Rocker-Sofa gestolpert. Großartig! Und zwar das gesamte Magazin. Ich würde es gerne abonnieren, wenn ich darf, und zwar für meinen kleinen Bruder (ein großer PTB-Fan) und mich. Außerdem würde ich gerne die aktuelle Ausgabe auch an eine Layouterin und Kollegin schicken. Sie wird vom Layout begeistert sein.

*Peter Jagla, Braunschweig,  
24.8.2016*

Gerade flattert das Heft Nr. 13 von *maßstäbe* ins Haus, was mich natürlich sehr, sehr freut ☺. Ich habe alle Ausgaben von Nr. 1 bis Nr. 12 von der ersten bis zur letzten Seite gelesen und freue mich nun auf eine abwechslungsreiche und vor allem informative Zeit mit dem neuen Heft. Meinen ganz herzlichen Dank dafür! Kompliment für Qualität und Inhalt sowie für die Ausdauer der Autoren und Redaktion!

*Dr. Alexander Bernreuther,  
Geel (Belgien), 23.8.2016*



# JungforscherInnen publizieren

online | peer reviewed | original



## Offener Brief an meine alte „peer group“ der Theoretischen Physik

oder

Ein Lob auf 6.626 070 15 · 10<sup>-34</sup>

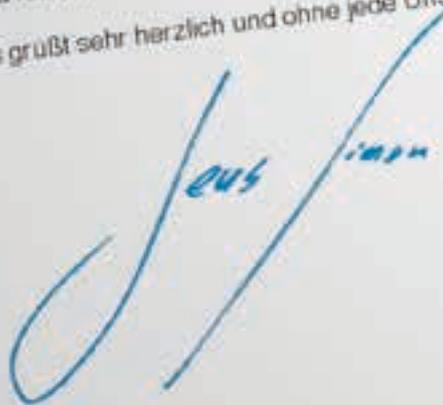
Liebe Theoretiker,

ach, was soll ich sagen. Ich liebe Euch und Euer Denken ja nach wie vor. Nichts hat mir die Welt besser erklärt als die fundamentalen Theorien des Großen und des Kleinen, des Mechanischen und des Elektrischen, des Geordneten und des Chaotischen. All das formuliert in Gleichungen, die für die meisten unnahbar, aber für einige wenige schön sind. Und was macht Gleichungen schön? Wenn sie tiefe Wahrheiten formulieren und wenn sie dies ohne viel Schnörkel und Klambim tun. Lastigen Ballast schlankheitskuren, etwa mit abstrakten Symbolen wie Dreiecken, Quadraten und Ameisenstraßen, die nur dem Kenner verraten, welche umfangreiche Operationen sich dahinter verbergen. Und noch etwas macht eure Gleichungen schlank: der Verzicht auf alleinstehende Buchstaben wie  $\epsilon$  und  $h$  und Epsilon, die nur die Abkürzung sind für die Lichtgeschwindigkeit, die Planckkonstante, die Feldkonstante und anderes Unveränderliche in der Welt da draußen oder da drinnen. Da es in der Theorie, darum ist sie ja Theorie, nicht darauf ankommt, eine Tapetenbahn gerade an die Wand zu bringen oder ein elektrisches Gerät zu reparieren, könnt Ihr es Euch leisten, den Dingen und Phänomenen sehr spezielle Maße zu verpassen. Einfach den lästigen Naturkonstanten, die in den Gleichungen wie unliebsame und unerklärte Geister auftauchen, den Zahlenwert 1 verpassen. Lichtgeschwindigkeit? Gleich 1. Ladung des Elektrons? Gleich 1. Was damit getan ist? Die verschwundenen Zahlenwerte der Konstanten sind jetzt in die Einheiten „transformiert“, sodass der Theoretiker-Meter und das Theoretiker-Kilogramm sehr anders als in der normalen Welt gewohnt daherkommen. Aber wie gesagt: Man lässt ja auch keinen Theoretiker das Wohnzimmer tapezieren, und auf den Wochenmarkt schickt man ihn besser auch nicht.

Aber eines muss ich Euch sagen, meine lieben Freunde der Theorie, die Ihr gelegentlich etwas abfällig auf die Welt des Praktischen schaut und den Metrologen schon mal ein „So what?“ zuruft. Was Ihr mit Naturkonstanten anstellt, das können Metrologen schon auch. Allerdings geht es hier nicht um Schönheit von Gleichungen, sondern um Nützlichkeit im praktischen Gebrauch. Und damit alltagstauglich wird, was alltagstauglich sein muss, haben die Metrologen sich das sprichwörtliche Bein ausgerissen, um die Naturkonstanten ein letztes Mal nach allen Regeln der Kunst zu messen. Ein echtes Bessermessen. Und dann mussten sich auch noch alle diesseits und jenseits von Atlantik und Pazifik einig werden. Eben das ist mehr oder minder gelungen! Die Werte werden jetzt ganz krumm und schief sein, mit vielen Nachkommastellen. Schon ist das vielleicht nicht. Aber praktisch.

In diesem Sinne, lasst es Euch in Schönheit wohlergehen, meine lieben Theoretiker, und rümpft nicht die Nase darüber, dass die Praktiker auch und gerade die Nachkommastellen feiern.

Es grüßt sehr herzlich und ohne jede Unsicherheit



P.S.: Nur mal so: Ein Sack Reis (50 Liter), der in China umfällt, wiegt übrigens zwischen 32,5 und 37,5 kg.

Sollten Sie hier keine Karte mehr vorfinden, können Sie die *maßstäbe* als kostenloses Abonnement bei der Redaktion direkt bestellen. Ein Abo-Formular finden Sie auf der *maßstäbe*-Webseite der PTB ([www.ptb.de/cms/presseaktuelles/zeitschriften-magazine/massstaebe.html](http://www.ptb.de/cms/presseaktuelles/zeitschriften-magazine/massstaebe.html)).

Ich möchte bei den *maßstäben* auf dem Laufenden bleiben.

- Bitte schicken Sie mir
- die aktuelle Ausgabe (Heft 14, „Maße für alle“)
  - mögliche kommende *maßstäbe*-Ausgaben an die umseitig angegebene Adresse.

Alle bisherigen Ausgaben der *maßstäbe* sind vergriffen. Sie finden die einzelnen Ausgaben im pdf-Format auf der Homepage der PTB ([www.ptb.de](http://www.ptb.de)) in der Rubrik Presse & Aktuelles > Zeitschriften & Magazine.

- Einverständniserklärung:
- Ich bin damit einverstanden, dass die PTB meine angegebenen Daten für Informationen und Zusendungen an mich verwendet, wenn diese die *maßstäbe* betreffen.

Unsere aktuelle Datenschutzerklärung finden Sie unter <https://www.ptb.de/cms/de/service-seiten/datenschutz.html>



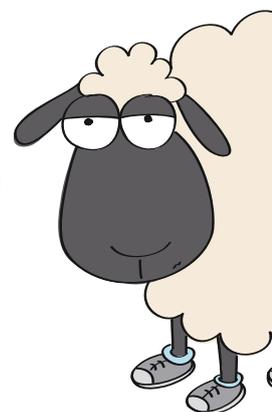
Ich möchte bei den *maßstäben* auf dem Laufenden bleiben.

- Bitte schicken Sie mir
- die aktuelle Ausgabe (Heft 14, „Maße für alle“)
  - mögliche kommende *maßstäbe*-Ausgaben an die umseitig angegebene Adresse.

Alle bisherigen Ausgaben der *maßstäbe* sind vergriffen. Sie finden die einzelnen Ausgaben im pdf-Format auf der Homepage der PTB ([www.ptb.de](http://www.ptb.de)) in der Rubrik Presse & Aktuelles > Zeitschriften & Magazine.

- Einverständniserklärung:
- Ich bin damit einverstanden, dass die PTB meine angegebenen Daten für Informationen und Zusendungen an mich verwendet, wenn diese die *maßstäbe* betreffen.

Unsere aktuelle Datenschutzerklärung finden Sie unter <https://www.ptb.de/cms/de/service-seiten/datenschutz.html>



Ich möchte bei den *maßstäben* auf dem Laufenden bleiben.

- Bitte schicken Sie mir
- die aktuelle Ausgabe (Heft 14, „Maße für alle“)
  - mögliche kommende *maßstäbe*-Ausgaben an die umseitig angegebene Adresse.

Alle bisherigen Ausgaben der *maßstäbe* sind vergriffen. Sie finden die einzelnen Ausgaben im pdf-Format auf der Homepage der PTB ([www.ptb.de](http://www.ptb.de)) in der Rubrik Presse & Aktuelles > Zeitschriften & Magazine.

- Einverständniserklärung:
- Ich bin damit einverstanden, dass die PTB meine angegebenen Daten für Informationen und Zusendungen an mich verwendet, wenn diese die *maßstäbe* betreffen.

Unsere aktuelle Datenschutzerklärung finden Sie unter <https://www.ptb.de/cms/de/service-seiten/datenschutz.html>



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

Sollten Sie hier keine Karte mehr vorfinden, können Sie die *maßstäbe* als kostenloses Abonnement bei der Redaktion direkt bestellen. Ein Abo-Formular finden Sie auf der *maßstäbe*-Webseite der PTB ([www.ptb.de/cms/presseaktuelles/zeitschriften-magazine/masstaebe.html](http://www.ptb.de/cms/presseaktuelles/zeitschriften-magazine/masstaebe.html)).

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

**S. 20–23:** Die Erbsenzähler

Dr.-Ing. Olaf Rienitz, Dr. Axel Pramann  
Arbeitsgruppe „Anorganische Analytik“  
Dr. Horst Bettin

Fachbereich „Masse – Darstellung der Einheit“ und Leiter des Avogadro-Projektes

**S. 24–27:** Das „revolutionäre“ Ampere

Dr. Hansjörg Scherer,  
Arbeitsgruppe „Stromstärke und Quanten-Widerstand“  
Dr. Franz Josef Ahlers  
Fachbereich „Elektrische Quantenmetrologie“  
Dr. Ralf Behr  
Arbeitsgruppe „Josephson-Effekt, Spannung“

**S. 28–31:** Von der Kunst, sich durchzubeißen

Dr. Christof Gaiser, Dr. Bernd Fellmuth  
Arbeitsgruppe „Rauschthermometrie“

**S. 32–35:** Ein Wimperschlag in der Geschichte des Universums

PD Dr. Ekkehard Peik  
Fachbereich „Zeit und Frequenz“

**S. 38–41:** Unsicherheit abwägen

Dr. Horst Bettin  
Fachbereich „Masse – Darstellung der Einheit“ und Leiter des Avogadro-Projektes

**S. 44–45:** (Candela-Brief)

Dr. Armin Sperling  
Fachbereich „Photometrie und Spektroradiometrie“  
Dr. Katharina Salfner  
ehemals Fachbereich „Photometrie und Spektroradiometrie“,  
heute Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Für das kritische Lesen des gesamten Heftes bedanken wir uns im Besonderen bei:

Dr. Hansjörg Scherer  
Arbeitsgruppe „Stromstärke und Quanten-Widerstand“

**Fotos Umschlag**

Tafel, Siliziumkugel, optische Uhr: alle PTB  
Schäfchen: © Andrea Wilhelm - Fotolia.com  
Rasen: © K.-U. Häßler - Fotolia.com  
Wolken: © Stefanie - Fotolia.com

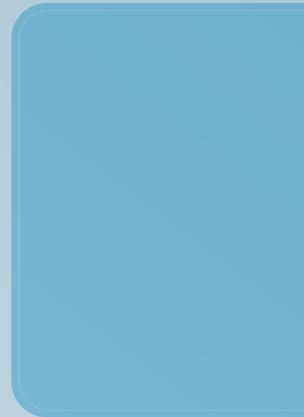
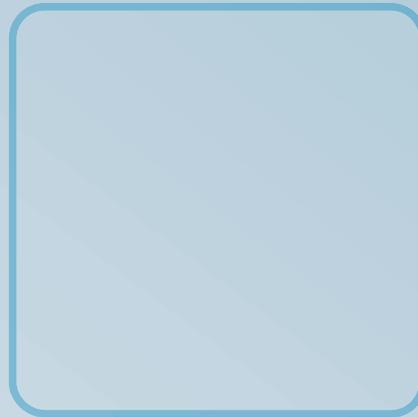
**Illustration Umschlag**

Dartscheibe: PTB

**Illustration Inhaltsverzeichnis**

PTB, unter Verwendung von:  
Brandenburger Tor (stabil): © andyvi - Fotolia.com  
Schule (abstrakt): © Tartila - Fotolia.com  
Institut (genau): © robu\_s Fotolia.com  
Industrie (innovativ): © angkritth - Fotolia.com  
Astrologie-Zentrum (universell): © Vectorstocker - Fotolia.com  
Boden: © bluringmedia - Fotolia.com  
Hintergrund Stadt: © JiSign - Fotolia.com  
Weltraum: © Christos Georgiou - Fotolia.com  
Hintergrund Himmel: © corocota - Fotolia.com  
Fossil: © bluringmedia - Fotolia.com  
Bäume im Hintergrund: © Gluiki - Fotolia.com  
Ufo: © brgfx - Fotolia.com

Alle übrigen Bildnachweise finden sich bei den einzelnen Beiträgen.



## Impressum

**Herausgeber**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin

**Redaktion**

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB  
Postfach 3345, 38023 Braunschweig  
Telefon: (0531) 592-3006  
Fax: (0531) 592-3008  
E-Mail: presse@ptb.de, massstaebe@ptb.de  
Redakteure: Imke Frischmuth (if), Erika Schow (es),  
Jens Simon (jes, verantwortlich)  
Grafik und Layout: Alberto Parra del Riego (alb)  
Autoren: Frank Frick (ff), Imke Frischmuth (if), Andrea Hoferichter,  
Ute Kehse, Brigitte Röthlein (br), Dörte Saße, Rainer Scharf,  
Erika Schow (es), Jens Simon (jes), Alexander Stirn  
Redaktionsassistentz: Cornelia Land

**Druck**

Quedlinburg Druck GmbH  
Die *maßstäbe* finden Sie auch im Internet unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de).

© PTB. Alle Rechte vorbehalten.

Bitte geben Sie bei einem auszugsweisen Nachdruck Quelle und Autor an und benachrichtigen Sie die Redaktion.  
Braunschweig, November 2018

**Falls Sie die *maßstäbe* unterstützen möchten:**

Die *maßstäbe* bleiben weiterhin kostenfrei. Wir freuen uns aber über jede finanzielle Hilfe. Für alle, die etwas für die *maßstäbe* übrig haben, folgt hier die Bankverbindung. Wenn Sie bei Ihrer Überweisung die *maßstäbe* als Verwendungszweck (s. u.) eintragen, kommen die Gelder auch einzig und allein der Redaktionsarbeit und der Produktion des Magazins zugute.

Kontoinhaber: Bundeskasse Halle  
Bank: Deutsche Bundesbank, Filiale Leipzig  
IBAN: DE38 8600 0000 0086 0010 40  
BIC: MARKDEF 1860

Verwendungszweck: PTB-Maßstäbe, Nr. 14 (2018)

