

Eine gewichtige Sache

Seit über einhundert Jahren definiert das Urkilogramm die Grundeinheit der Masse. Nun soll es durch einen genaueren Standard ersetzt werden, der auf einer unveränderlichen Eigenschaft der Natur beruht.

Von Ian Robinson

Heutzutage sind technische Geräte oft schon nach wenigen Jahren hoffnungslos überholt. Da erscheint es geradezu aberwitzig, dass fast alle Messungen von Massen – und damit zusammenhängender Phänomene wie der Energie – von einem Gegenstand abhängen, der seit 117 Jahre in den Gewölben eines kleinen Labors außerhalb von Paris aufbewahrt wird, dem »Internationalen Büro für Gewichte und Maße« (*Bureau International des Poids et Mesures*). Im Internationalen Einheitensystem SI (*Système International d'Unités*), oft auch metrisches System genannt, definiert der »Internationale Prototyp des Kilogramms« (IPK) die Grundeinheit der Masse. Dabei handelt es sich um ein zylinderförmiges Objekt aus einer Platin-Iridium-Legierung mit einem Durchmesser und einer Höhe von jeweils 39 Millimetern.

Die SI-Einheiten werden von der »Allgemeinen Konferenz über Gewichte und Maße« (*Conférence Générale des Poids et Mesures*) und dem »Internationale Komitee für Gewichte und Maße« (*Comité International des Poids et Mesures*) verwaltet. In den vergangenen Jahrzehnten hat die Konferenz bereits mehrere der SI-Basiseinheiten neu definiert, also jene Einheiten, die durch Konventionen festgelegt sind und von denen sich alle anderen ableiten. Ziel ist es, ein konsistentes System zu schaffen, das dem wissenschaftlichen und technischen Fortschritt nützt.

Der Meter und die Sekunde sind bereits über Naturphänomene definiert.

Der Meter wurde über die Geschwindigkeit des Lichts festgelegt, die Sekunde durch die Frequenz von Mikrowellen, die ein Atom des Elements Cäsium abstrahlt, wenn es zwischen zwei spezifischen Energiezuständen wechselt.

Das Kilogramm ist heute die einzige verbliebene SI-Grundeinheit, die noch auf einem von Menschen hergestellten Bezugsobjekt basiert. Von einem solchen Artefakt abhängig zu sein, ist für Wissenschaftler problematisch. Da ihre Instrumente immer präziser werden, kann es passieren, dass ihre Messungen genauer sind als die Definition der Grundeinheit. Metrologen – die Fachleute auf dem Gebiet des Messwesens – bemühen sich deshalb, auch die Einheit der Masse auf Naturkonstanten zurückzuführen. Zwei Wege versprechen dabei den größten Erfolg: Einer basiert auf der so genannten Avogadro-Konstante, also der Zahl der Atome, die in zwölf Gramm des Kohlenstoffisotops ^{12}C enthalten sind. Der andere bezieht sich auf das Planck'sche Wirkungsquantum, einer Naturkonstante, die den Zusammenhang zwischen der Frequenz eines Photons und seiner Energie herstellt.

Umständlicher Eichprozess

Um den Prototyp des Kilogramms zur Eichung von Massenangaben heranzuziehen, wird bis heute ein aufwändiges Verfahren praktiziert. Etwa alle dreißig Jahre entnehmen die Metrologen den IPK aus seinem Behältnis, um damit Kopien zu eichen, die ihnen von den 51 Unterzeichnerstaaten der so genannten Meter-Konvention zugeschickt werden, einem Vertrag, der die Arbeit der SI-Organisation regelt. Sobald das gelungen

ist, werden diese Kopien verwendet, um Massenstandards in den Mitgliedsstaaten zu kalibrieren. In weiteren Schritten werden auf diese Weise schließlich weltweit Messinstrumente in Laboren und Fabriken geeicht.

Es ist sinnvoll, sich auf einen stabilen, unveränderlichen Standard für Massenmessungen zu beziehen. Doch leider ändert sich die Masse des IPK offenbar mit der Zeit. Vergleicht man die Masse des IPK mit anderen, zur gleichen Zeit angefertigten Massenstandards und zieht alte und neuere Messungen von Naturkonstanten heran, so ergibt sich, dass sich die Masse des IPK in den letzten 100 Jahren um mehr als 50 Mikrogramm verändert haben muss. Durch die Akkumulation von Luftverunreinigungen könnte seine Masse zugenommen, durch Abnutzung jedoch abgenommen haben. Für einen Standard, auf dem Forschung und Industrie in aller Welt aufbauen, ist das nicht akzeptabel.

Ähnliche Schwankungen plagten früher auch die Maßeinheiten von Zeit und Länge. So wurde die Sekunde ursprünglich von der Rotationsgeschwindigkeit der Erde abgeleitet. Diese nimmt jedoch langfristig ab und weist zudem kurzzeitige Veränderungen auf. Um davon unabhängig zu sein, wurde die Sekunde 1967 als »die Dauer von 9 192 631 770 Schwingungen der Strahlung des Übergangs zwischen zwei Hyperfeinstrukturniveaus eines Cäsium-133-Atoms« neu definiert. Sie ändert sich nicht mit der Zeit und kann jederzeit und überall auf der Welt im Labor gemessen werden.

Obwohl die Definition der Sekunde nun nicht mehr auf einem Artefakt beruht, könnte sie sich immer noch als un- ▷

▶ Einer der zahlreichen, weltweit genutzten »Nationalen Kilogramm-Standards«. Diese werden gegen das Urkilogramm in Paris kalibriert, einem Präzisions-Zylinder aus einer Platin-Iridium-Legierung.



ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA (INRIM), TORINO

EINE SILIZIUMKUGEL ALS PROTOTYP

BEI DIESEM VERFAHREN zur Neudefinition des Kilogramms wird die Anzahl der Atome in einer Siliziumkugel bestimmt.

1 Zunächst wird natürliches Silizium gewonnen, das sich aus den drei Isotopen ^{28}Si , ^{29}Si und ^{30}Si zusammensetzt. Mit Fluor reagiert es zu gasförmigem Siliziumfluorid (SiF_4).

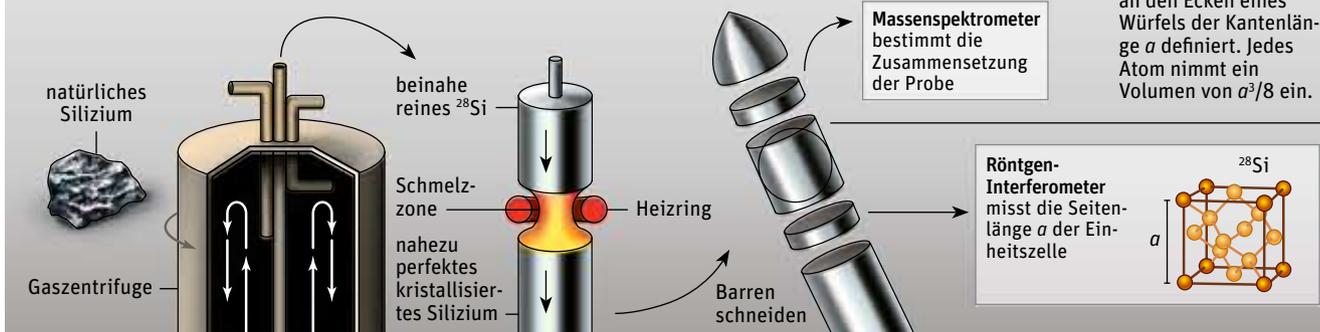
2 Mit Hilfe einer Zentrifuge trennen die Forscher das Silizium-28 von den anderen Isotopen, die geringfügig massereicher sind.

3 Daraus ergibt sich ein festes Material, das zu etwa 99,99 Prozent aus Silizium-28 besteht. Mit einem Verfahren, das in der Industrie genutzt wird, um Halbleiterscheiben für Computerchips herzustellen, produzieren die Forscher einen zylindrischen Barren aus nahezu perfekt kristallisiertem Silizium.

4 Dieser Barren wird anschließend in mehrere Teile zerschnitten, die für unterschiedliche Analysen benötigt werden.

5 Eine dieser Proben untersuchen die Forscher mit einem Massenspektrometer, um die Reinheit des Materials zu prüfen und die Molmasse des Stoffs zu bestimmen.

6 Eine weitere Probe des Materials wird mit einem Röntgen- und einem optischen Interferometer untersucht, um den Abstand der Atome im Kristallgitter zu messen. Daraus folgt die Ausdehnung der Einheitszelle als kleinster regelmäßiger Grundeinheit des Kristalls. Diese wird durch die acht Atome an den Ecken eines Würfels der Kantenlänge a definiert. Jedes Atom nimmt ein Volumen von $a^3/8$ ein.



▷ zureichend erweisen, denn sie hängt von einem quantenphysikalischen Prozess ab, auf den elektromagnetische Felder spürbar einwirken. Forscher entwickeln mit den optischen Uhren gegenwärtig einen Typ neuartiger, präziser Atomuhren, der schon bald eine weitere Neudefinition der Sekunde erfordern könnte.

Demgegenüber ist der Längenstandard recht stabil. Ursprünglich beruhte die SI-Definition des Meters ebenfalls auf einem Artefakt: einem extrem stabilen Platin-Iridium-Barren, in den zwei

Linien in wohldefiniertem Abstand eingritz wurden. Im Jahr 1983 wurde der Meter dann als »die Länge des Wegs, den das Licht im Vakuum im Zeitintervall von $1/299\,792\,458$ Sekunden zurücklegt« neu definiert. Diese Definition sollte auch dem künftigen technischen Fortschritt standhalten, denn sie ist mit einer der wichtigsten Naturkonstanten verknüpft, der Geschwindigkeit des Lichts, das im Vakuum genau $299\,792\,458$ Meter in der Sekunde zurücklegt. Gelingt es, die Frequenz elektromagnetischer

Strahlung genauer zu messen, wird man auch die Länge des Meters präziser bestimmen können, ohne ihn neu definieren zu müssen.

Welche Schritte zu unternehmen sind, um das Kilogramm auf der Basis einer physikalischen Konstante neu festzulegen, sodass es sich in den bestehenden Gebrauch einfügt, ist klar. Zunächst müssen Metrologen die betreffenden Konstanten messen und auf der Grundlage des gegenwärtigen Kilogrammstandards fixieren. Erst dann können sie in die Neudefinition eingehen, damit ein nahtloser Übergang zwischen alter und neuer Definition gewährleistet ist. Jedes hinreichend ausgestattete Labor sollte den neuen Massenstandard reproduzieren können.

Viel versprechend erscheint es, das Kilogramm mit der Masse eines Atoms zu verknüpfen. Dabei bietet es sich zunächst an, die Avogadro-Konstante zu fixieren. Diese ist definiert als die Anzahl der Atome in zwölf Gramm des Kohlenstoffisotops ^{12}C , einem so genannten Mol (»Grammatom«). Neuen Messungen zufolge beträgt ihr Wert ungefähr $6,02 \cdot 10^{23}$ oder 602 Trilliarden pro Mol. Daraus erkennt man, wo für Metrologen das Problem liegt: darin, eine

In Kürze

▶ Seit über hundert Jahren definiert ein kleiner, pflaumengroßer Metallzylinder das Kilogramm, im metrischen System die **Basiseinheit der Masse**. Der technische Fortschritt erfordert eine Neudefinition, die grundlegende Eigenschaften der Natur nutzt.

▶ Forscher verfolgen zwei Wege. Die eine Methode bezieht sich auf die Anzahl der Atome in einem Kilogramm **reinen Siliziums**. Die andere nutzt quantenmechanische Effekte, um äußerst genau die mechanische Kraft mit der elektrischen Kraft zu vergleichen, die jeweils nötig ist, um ein Kilogramm Masse anzuheben.

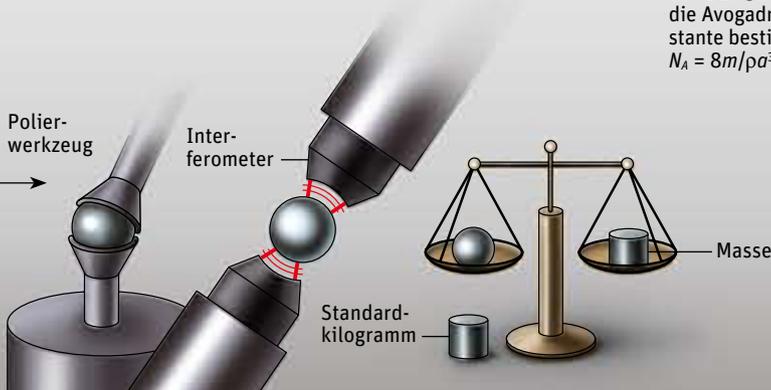
▶ Diese Verfahren sollen das Kilogramm mit einer Genauigkeit von zumindest 1 zu 50 Millionen definieren und präzise Messungen **fundamentaler physikalischer Konstanten** ermöglichen.

7 Unterdessen schleifen die Forscher mit äußerst präzisen Schleifwerkzeugen aus einem Zylinderteil eine nahezu perfekte Kugel.

8 Anschließend messen sie den Kugeldurchmesser.

9 Mit einem aufwändigen Verfahren wird die Kugel gewogen und ihre Masse mit derjenigen eines existierenden Kilogrammstandards verglichen.

10 Aus der Masse der Kugel und ihrem Durchmesser bestimmen die Forscher ihre Dichte (ρ). Kombiniert man diese mit dem von einzelnen Atomen eingenommenen Volumen sowie der Molmasse m des Siliziums, kann man mit einer Präzision von 1 zu 50 Millionen die Avogadro-Konstante bestimmen: $N_A = 8m/\rho a^3$.



ILLUSTRATIONEN: IEN CHRISTENSEN; FOTO: USIHO, AUSTRALIAN CENTER FOR PRECISION OPTICS

wägbare Menge von Atomen zu zählen. Selbst in den genauesten Waagen verhindern es »Schmutzeffekte«, Massen zu unterscheiden, die um weniger als 100 Nanogramm voneinander abweichen. Das Urkilogramm soll jedoch zumindest mit einer Präzision von 1 zu 50 Millionen definiert werden. Dafür müsste man die Atome zählen, die in 5 Gramm Kohlenstoff-12 (^{12}C) enthalten sind. Selbst wenn es gelänge, pro Sekunde eine Billion einzelner Atome zu zählen, würde man dafür etwa 7000 Jahre benötigen – ein aussichtsloses Unterfangen.

Wie man Atome zählt

Einfacher ist es, die Anzahl der Atome in einem Kristall zu ermitteln, indem man dessen Volumen durch dasjenige teilt, welches ein einzelnes Atom darin einnimmt. Wiegt man den Kristall, lässt sich aus der Masse eines Atoms dieses Kristalls relativ zu einem Kohlenstoff-12-Atom die Avogadro-Konstante bestimmen. Der Neudefinition des Kilogramms wäre man damit einen großen Schritt näher gekommen.

Um auf diese Weise das Kilogramm über die Atommasse zu eichen, muss man zunächst den Abstand der Atome in einem nahezu perfekten Kristall messen,

in dem die Atomzahl pro Einheitszelle bekannt ist. Daraus folgt das von einzelnen Atomen eingenommene Volumen. Weist der Kristall eine bekannte Masse auf, lässt sich daraus auf die Masse eines seiner Atome schließen. Aus dem Verhältnis der Molmasse des Isotops, aus dem der Kristall besteht, zur Masse des Atoms folgt die Avogadro-Konstante.

Dies zu tun ist schwieriger, als es klingt, denn dafür ist eine beträchtliche Genauigkeit erforderlich. Tatsächlich ist das Vorhaben so teuer und komplex, dass weltweit kein staatliches Eichlabor über die nötigen Mittel verfügt. Deshalb hat sich ein Konsortium von Forschungslabors in Australien, Belgien, Deutschland, Großbritannien, Italien, Japan und den USA zur »Internationalen Avogadro-Koordination« (*International Avogadro Coordination*) zusammengeschlossen.

Das Vorhaben kann nur gelingen, wenn der zu untersuchende Kristall eine nahezu perfekte Struktur aufweist, also äußerst wenige Gitterfehler und Unreinheiten enthält. Da die Halbleiterindustrie im Züchten großer, weitgehend perfekter Einkristalle aus Silizium inzwischen sehr erfahren ist, wurde dieses Element ausgewählt. Sind die Messungen

am Siliziumkristall geglückt, können Metrologen die Ergebnisse zur Definition des Mols, die auf Kohlenstoff-12-Atomen beruht, in Beziehung setzen, indem sie extrem genaue Messungen der Atommassen von Silizium und Kohlenstoff heranziehen, die mit einem Massenspektrometer bestimmt wurden.

Zunächst schnitten die Forscher der Avogadro-Koordination mehrere Stücke aus dem Rohkristall. Aus einem dieser Stücke wurde die ein Kilogramm schwere Kugel geschliffen (siehe Kasten oben). Die Kugelform ist vorteilhaft, weil sie keine Ecken aufweist, die leicht beschädigt werden könnten. Außerdem gibt es ausgereifte Techniken, um Silizium zu einer nahezu perfekten Kugel zu schleifen. Australischen Experten gelang die Produktion einer 93,6 Millimeter durchmessenden Kugel, die um weniger als 50 Nanometer von der Idealform abweicht. Zum Vergleich: Würde jedes Siliziumatom zwei Zentimeter durchmessen, wäre diese Kugel etwa so groß wie die Erde, die Höhenunterschiede würden jedoch maximal sieben Meter betragen!

Um das Volumen der Kugel genau genug zu bestimmen, mussten die Wissenschaftler ihren mittleren Durchmesser bis auf einen Atomdurchmesser genau ▶

▷ messen. Das gelang, indem sie die Kugel in ein Vakuum setzten und von gegenüberliegenden Seiten mit Laserstrahlen bekannter Frequenz beleuchteten. Aus der unterschiedlichen Länge der Lichtwege (in Einheiten der Wellenlänge) bei Messungen mit und ohne Kugel ergab sich deren Durchmesser in Metern, da die Wellenlänge des Laserlichts gleich der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum dividiert durch die Frequenz ist. Unter Berücksichtigung geringer Abweichungen von der Idealform konnten die Forscher das Kugelvolumen ermitteln.

Um das von einzelnen Atomen eingenommene Volumen zu bestimmen, schnitten die Forscher den Kristall entlang zweier Gitterebenen. Ein Kristallstück konnte so gegen das andere versetzt werden, ohne dass sich der Winkel zwischen ihren Kristallgittern änderte. In ein Vakuum gebracht und mit kurzwelliger Röntgenstrahlung beleuchtet, gelang es, während einer allmählichen Verschiebung der Proben zu zählen, wie viele Gitterschichten zurückgelegt wurden. Davon unabhängig maßen die Forscher den Absolutbetrag der vollzogenen Verschiebung mit einem optischen Interferometer, das Licht längerer Wellenlänge nutzt. Mit Hilfe der bekannten Kristallstruktur folgte daraus das von einem Atom eingenommene Volumen.

Präzise Mehrfachwägung

Um die Masse der kristallinen Kugel zu bestimmen, nutzten die Metrologen das Verfahren der »Substitutionswägung«. Diese bei präzisen Messungen übliche Methode ersetzt eine einzelne Wägung durch eine Wägereihe, bei der dieselben Massen mehrfach gewogen werden. Benötigt wird dafür insbesondere eine so genannte Leermasse. Diese braucht nicht genau bekannt zu sein, muss jedoch einen äußerst stabilen Massenwert aufweisen.

Zunächst wurde die Siliziumkugel auf dem einen Arm der Waage platziert, eine Leermasse von etwa einem Kilogramm auf dem anderen. Nachdem die Kugel durch eine Masse ersetzt wurde, die im Rahmen des IPK-Standards bekannt war, wiederholten die Forscher die Wägung. Wird der Austausch vorsichtig genug durchgeführt, liefert der auf der Skala der Waage ablesbare Unterschied unmittelbar die Massendifferenz zwischen der Kugel und dem Massenstandard und damit auch die Masse der Kugel selbst. Durch diese Methode lassen sich Wäge-

fehler stark reduzieren, die minimal unterschiedliche Armlängen der Waage herorrufen können.

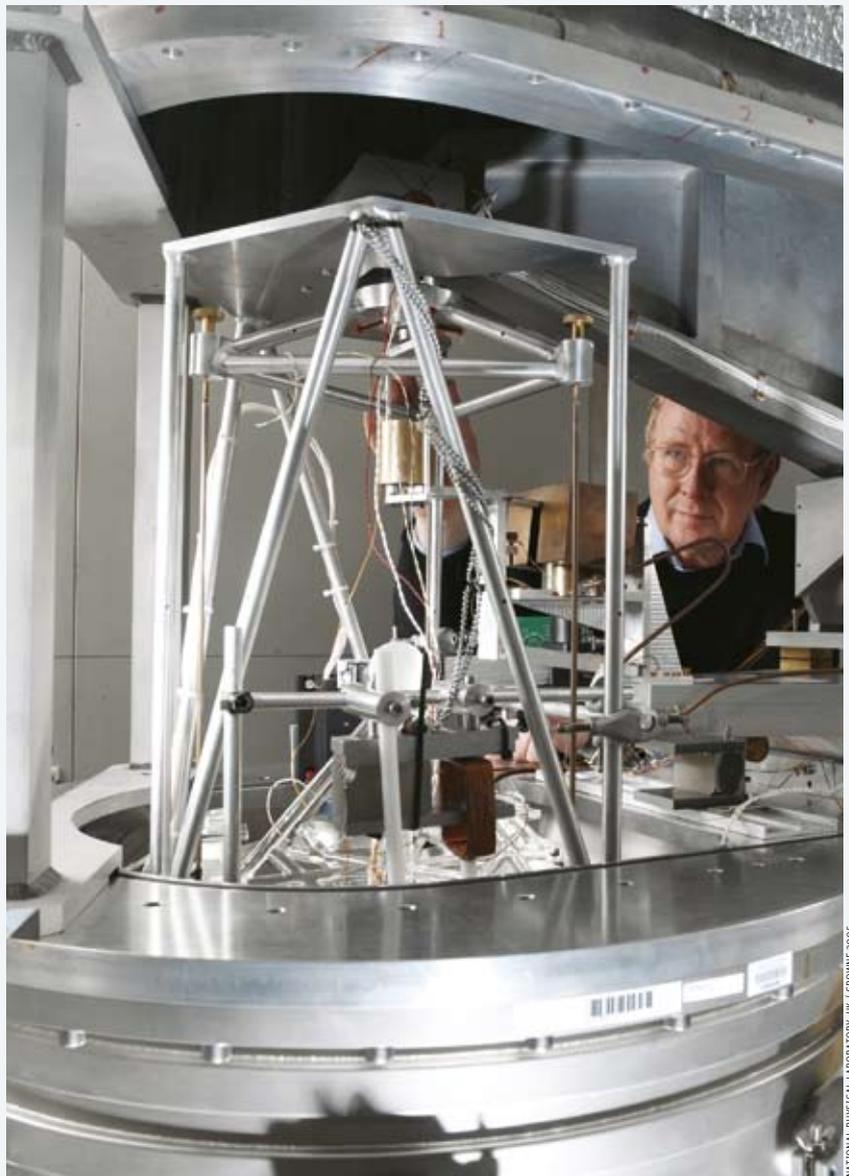
Aus weiteren Proben des Siliziums bestimmten die Forscher die relativen Häufigkeiten der Siliziumisotope ^{28}Si , ^{29}Si und ^{30}Si im Kristall, um deren Beiträge zur Kugelmasse zu berücksichtigen. Dazu benutzten sie ein Massenspektrometer, mit dem sich die elektrisch gela-

denen Isotope anhand ihres unterschiedlichen Masse-Ladungs-Verhältnisses trennen lassen.

Inzwischen hat die Internationale Avogadro-Koordination die Messungen an Kugeln aus natürlichem Silizium nahezu abgeschlossen. Zwar gelang es den Metrologen, die Anzahl der Atome in einer Ein-Kilogramm-Kugel mit einer Genauigkeit von 3 zu 10 Millionen zu be-

VON DER WATT-WAAGE ZUM KILOGRAMMSTANDARD

BEI DIESEM VERFAHREN zur Neudefinition des Kilogramms wird die Masse durch ihr Energie-Äquivalent gemessen. Die Kraft, die in einem Magnetfeld auf einen stromdurchflossenen Leiter wirkt, wird durch die Gewichtskraft einer Masse genau ausgeglichen. Dazu wird eine so genannte Watt-Waage benutzt. Am rechten Ende der Waage befindet sich ein Gegengewicht. An der linken Seite hängt ein Standard-Kilogramm, darunter eine horizontal liegende Spule. Die Gewichtskraft des Standard-Kilogramms (mg) ist das Produkt der Masse m mit der Schwerebeschleunigung g .



NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, UK / GROWNE 2005

stimmen. Für einen neuen Standard ist das jedoch zu unsicher. Um eine noch höhere Genauigkeit zu erreichen, arbeitet das Team derzeit an der Herstellung einer Kugel aus reinem Silizium-28. Diese wird voraussichtlich 1,25 bis 2,5 Millionen US-Dollar kosten. Mit russischen Gaszentrifugen, die ursprünglich der Produktion von waffenfähigem Uran dienten, trennen Mitarbeiter der Koordi-

nation gegenwärtig die Silizium-Isotope. Bis 2010 will das Konsortium eine Genauigkeit erreichen, die besser als 1 zu 50 Millionen ist.

Der zweite Weg zur Neudefinition des Kilogramms basiert auf der Idee, die Masse über ihr Energie-Äquivalent zu bestimmen. Genutzt wird dabei die Äquivalenz von Masse und Energie, die Einstein mit seiner berühmten Formel

$E = mc^2$ beschrieb. Ihr zufolge sollte man die Masse durch die Energie definieren können, in die sich eine bestimmte Materiemenge umwandeln lässt. Wie schon das Zählen einzelner Siliziumatome ist dies nicht einfach, denn schon bei der Umwandlung weniger Atome werden gewaltige Energiemengen frei.

Leichter ist es, auf vergleichsweise konventionelle Weise elektrische und

ERSTER SCHRITT: WÄGEN

Die Spule wird in ein radiales Magnetfeld mit einer gleichförmigen Flussdichte B gesenkt (siehe Bild 1). Fließt ein elektrischer Strom I hindurch, wirken elektromagnetische Kräfte auf sie ein – ähnlich wie in einem Elektromotor. Weist der Draht in der Spule die Länge L auf und ist dieser im rechten Winkel zu den Magnetfeldlinien orientiert, ergibt sich diese Kraft als das Produkt BLI . Gleicht die elektrische Kraft auf die Spule ihre Gewichtskraft aus, gilt: $mg = BLI$, woraus folgt: $m = BLI/g$.

Zwar misst die Apparatur eine Masse elektrisch, doch es ist nahezu unmöglich, so das Produkt BL mit ausreichender Genauigkeit zu eichen.

ZWEITER SCHRITT: BEWEGUNG

Bewegt man die Spule (siehe Bild 2) mit einer konstanten Geschwindigkeit v im rechten Winkel zu den Magnetfeldlinien, so wird darin eine Spannung $U = BLv$ induziert. Dies ist der gleiche Vorgang, der in einem elektrischen Generator genutzt wird.

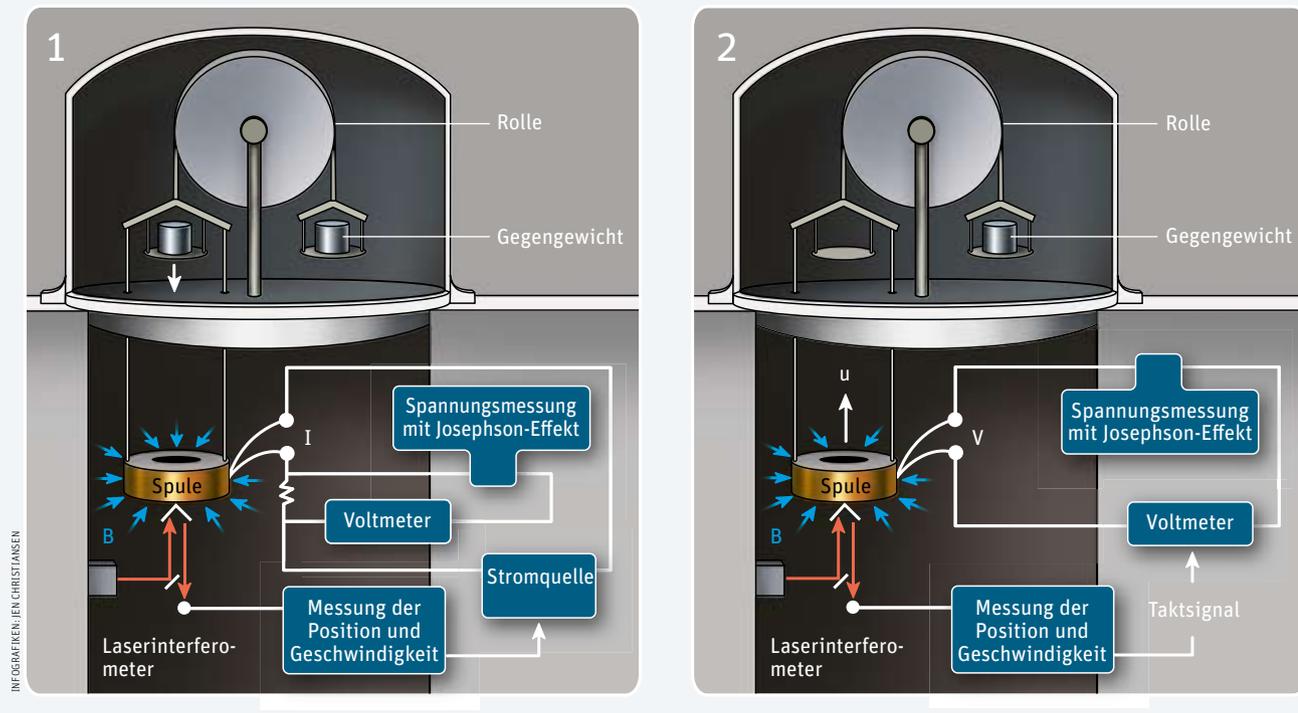
Dieser Teil des Experiments ermöglicht es den Forschern, das im ersten Schritt nur grob bestimmbare Produkt BL aus den Gleichungen zu eliminieren. Ist die elektrische Leistung UI (das Produkt von Spannung und Stromstärke) gleich der mechanischen

Leistung mgv (das Produkt von Gewichtskraft und Geschwindigkeit), so folgt aus $UI = mgv$ die Beziehung $m = UI/gv$.

Da die beiden Messungen zeitversetzt durchgeführt werden, wird tatsächlich gar keine Leistung ermittelt – das Konzept der »virtuellen« Leistung erlaubt es den Wissenschaftlern, unvermeidbare Energieverluste durch Reibung und die Erwärmung der Spule zu ignorieren und dadurch eine deutlich höhere Präzision zu erzielen.

WÄHREND DES EXPERIMENTS überwachen mehrere hochpräzise metrologische Systeme die Watt-Waage. Ein Laser-Interferometer misst die Bewegung der Spule, wobei die Zeit mit einem genau definierten Referenzsignal bestimmt wird. Ein empfindliches Gravimeter überwacht zugleich den lokalen Zug des irdischen Gravitationsfeldes.

Mit speziellen Instrumente, die auf dem Josephson-Effekt sowie dem Quanten-Hall-Effekt basieren (siehe Kasten S. 82), messen die Metrologen die Spannung und den Strom mit außergewöhnlicher Genauigkeit. Weil diese Größen über quantenmechanische Phänomene gemessen werden, können sie die Beziehung zwischen Kilogramm und Planck'schem Wirkungsquantum äußerst genau ermitteln.





▷ magnetische Energien zu vergleichen. Dabei müssen die Metrologen allerdings die auftretenden Energieverluste in den Griff bekommen. Welche Hindernisse dabei zu überwinden sind, zeigt sich, wenn wir uns einen Elektromotor vorstellen, der eine Masse gegen die Schwerkraft anhebt. Unter idealen Bedingungen würde die gesamte dem Motor zugeführte elektrische Energie E die potenzielle Energie des um die Strecke h angehobenen Objekts vergrößern. Es gilt demzufolge $E = mgh$, woraus die Masse $m = E/gh$ folgt. Dabei ist g die Schwerebeschleunigung, die mit einem Präzisionsgravimeter bestimmt werden kann. In der Praxis ist diese Art der Massenbe-

stimmung auf Grund von Energieverlusten im Motor und anderen Teilen des Experiments nahezu unmöglich. Zwar versuchten Wissenschaftler, ähnliche Experimente an Objekten durchzuführen, die auf Grund des so genannten Meißner-Ochsenfeld-Effekts der Supraleitung zum Schweben gebracht wurden. Über eine Genauigkeiten von 1 zu 1 Million kamen sie jedoch nicht hinaus.

Eine größere Hoffnung bietet die so genannte Watt-Waage, die Bryan Kibble vom britischen Nationalen Physikalischen Laboratorium (NPL) vor 30 Jahren ersann und die das Problem des Energieverlusts durch die Messung einer »virtuellen Kraft« vermeidet (siehe Kasten S.

80/81). Diese Methode setzt das Kilogramm mit dem Meter, der Sekunde, dem elektrischen Widerstand (in Ohm) sowie der elektrischen Spannung (in Volt) in Bezug, was zwei Prozesse der Quantenmechanik ermöglichen: der Josephson-Effekt und der Quanten-Hall-Effekt (siehe Kasten unten). Daraus folgt ein sehr präziser Wert des Planck'schen Wirkungsquantums.

Die Watt-Waage ist eine konventionelle Balkenwaage, an deren einem Arm das zu messende Objekt der Masse m hängt, während sich am anderen Arm eine Spule der Gesamtlänge L in einem starken magnetischen Feld B befindet. Im Experiment wird zunächst ein Strom I durch die Spule geschickt und so eine Kraft erzeugt (das Produkt BLI), welche die Gewichtskraft des Objekts (das Produkt mg) ausgleicht. Danach wird das Objekt entfernt und der Strom abgeschaltet.

Anschließend wird die Spule mit einer Geschwindigkeit v durch das Magnetfeld bewegt und dabei die induzierte Spannung $U = BLv$ gemessen. Dadurch lässt sich das Produkt BL bestimmen, das auf anderem Weg kaum ausreichend genau zu bestimmen ist. Sind das Magnetfeld und die Spule stabil genug, damit das Produkt BL in beiden Teilen des Experiments den gleichen Wert besitzt, lassen sich beide Messungen zur Beziehung $mgv = UI$ kombinieren. Diese be- ▷

QUANTENEFFEKTE TREFFEN AUF KLASSISCHE PHYSIK

DIE GRUNDPRINZIPIEN DER WATT-WAAGE waren zwar schon den Physikern des 19. Jahrhunderts vertraut. Dass man damit auf der Grundlage von Naturkonstanten Massen wägen kann, verdanken wir jedoch zwei Effekten der Quantenphysik, die erst in den vergangenen 40 Jahren entdeckt wurden: dem Quanten-Hall-Effekt sowie dem Josephson-Effekt. Beide Phänomene tauchen bei Temperaturen unterhalb von 4,2 Kelvin auf, wenn Helium flüssig ist.

JOSEPHSON-EFFEKT

Ein Josephson-Kontakt besteht aus zwei Supraleitern, die durch eine kleine isolierende Barriere getrennt sind. Elektronenpaare können diese durch den quantenmechanischen Tunneleffekt überqueren. Wird ein solcher Kontakt mit Mikrowellen bestrahlt, absorbieren die Elektronenpaare im Supraleiter Photonen und können die Lücke überwinden. Unter diesen Bedingungen muss die Spannung über der Lücke stets ein kleines Vielfaches von $hf/2e$ betragen, wobei h das Planck'sche Wirkungsquantum, f die Frequenz der Mikrowellen und e die Elementarladung ist. Diese Beziehung gilt exakt und liefert deshalb einen unübertroffenen genauen Standard für die Spannungsmessung.

QUANTEN-HALL-EFFEKT

Der Hall-Effekt tritt in allen Leitern und Halbleitern auf, wenn ein elektrischer Strom durch ein Material fließt, das sich in einem Magnetfeld befindet. Das Magnetfeld übt eine Kraft auf die Ladungsträger aus, die senkrecht zu den Feldlinien und der Richtung des elektrischen Stroms gerichtet ist. Dadurch sammeln sich elektrische Ladungen an den Kanten des Geräts, die sowohl eine Spannung als auch ein elektrisches Feld erzeugen, die der magnetischen Kraft auf die Ladungsträger entgegenwirken. Diese Spannung ist proportional zum angelegten Strom und zur Stärke des Magnetfelds. Deshalb kann der Effekt als Widerstand gegen den elektrischen Strom (»Hall-Widerstand«) beschrieben werden, der proportional zur magnetischen Feldstärke ist.

In bestimmten Supraleitern kommt es bei tiefen Temperaturen (1,2 bis 0,03 Kelvin) und starken Magnetfeldern zu einer quantenmechanischen Variante des Hall-Effekts. Dabei ist der Quanten-Hall-Widerstand durch quantenmechanische Effekte sowohl vom Magnetfeld als auch vom Material des Halbleiters unabhängig und beträgt h/ne^2 , wobei n eine kleine natürliche Zahl ist. Deshalb eignet er sich als hochpräziser Standard zur Messung elektrischer Widerstände.

Atrium

WOHNEN GARTEN ARCHITEKTUR DESIGN



>> Jetzt gratis testen!

BESTELLEN
SIE JETZT
UNTER:

Telefon: 0 40 - 23 670 - 430

LASSEN SIE SICH INSPIRIEREN VON ...

... traumhaften Häusern, tollen Einrichtungen und aktuellen Marktneuheiten aus aller Welt. Wir berichten das ganze Jahr über die wichtigsten Messen und Ausstellungen, liefern in jeder Ausgabe intelligente Antworten zu Einrichtung und Ausstattung im Haus und in der Wohnung.

>> GARANTIERT OHNE KOSTEN!

Sie erhalten Ihr ATRIUM-Probeheft garantiert gratis.

>> GARANTIERT PORTOFREI!

Keine Portokosten, denn das übernimmt ATRIUM für Sie.

>> GARANTIERT MIT SPARVORTEIL!

Möchten Sie ATRIUM weiterlesen, brauchen Sie nichts zu unternehmen. ATRIUM wird Ihnen dann pünktlich jeden zweiten Monat für z. Zt. nur € 6,30 statt € 7,- im Einzelkauf nach Hause geliefert. Sie sparen also 10%!

>> GARANTIERT FAIR!

Sie lesen nur solange Sie möchten und können Ihr Abo nach Ablauf der Bezugsdauer jederzeit kündigen. Eine kurze Mitteilung genügt. Das Geld für bereits bezahlte, aber noch nicht gelieferte Ausgaben erhalten Sie natürlich umgehend zurück.

>> GARANTIERT OHNE RISIKO!

Ihr Widerrufsrecht: Diese Anforderung können Sie innerhalb einer Woche nach Absenden der Karte beim ATRIUM-Leserservice schriftlich widerrufen. Rechtzeitiges Absenden genügt.

Fax: 040-23 670-105 | E-Mail: abo@archithema.com | Internet: www.archithema.com
oder senden Sie den Coupon an: ATRIUM Abo-Service Postfach 103245 20022 Hamburg

JA, ICH WILL ATRIUM AUSFÜHRLICH KENNENLERNEN.

Senden Sie mir bitte die nächste Ausgabe kostenlos an meine nachstehende Adresse. Wenn mich ATRIUM überzeugt und ich nicht 10 Tage nach Erhalt des Kennenlern-Heftes schriftlich abbestelle, erhalte ich **6 Hefte von ATRIUM für nur Euro 37,80 anstatt Euro 42,-**. Die Zustellgebühren übernimmt der Verlag. Mein Abo kann ich nach Ablauf der Bezugsdauer jederzeit schriftlich kündigen.

Name, Vorname

Straße u. Hausnummer

PLZ u. Ort

Telefon

Datum

E-Mail

Bitte informieren Sie mich über interessante Angebote per E-Mail (ggf. streichen)

Ich möchte wie folgt zahlen: Bequem und bargeldlos durch Bankeinzug Gegen Rechnung (Bitte keine Vorauszahlung, Rechnung abwarten)

Geldinstitut

Konto-Nr.

Bankleitzahl

X Unterschrift

00061/00084

▷ schreibt das Gleichgewicht zwischen der mechanischen Leistung (das Produkt von Kraft und Geschwindigkeit, mgv) und der elektrischen Leistung (das Produkt von Spannung und Stromstärke, UI). Da die Messungen von Spannung und Stromstärke auf der einen Seite sowie Gewicht und Geschwindigkeit auf der anderen Seite jeweils getrennt ausgeführt werden, hängt das Ergebnis nicht davon ab, dass die Leistung tatsächlich in irgendeinem Teil des Experiments verloren geht, was sich durch die Erwärmung der Spule oder Reibung bei der Bewegung nicht gänzlich vermeiden lässt. Demzufolge können die Forscher mit der Anordnung eine »virtuelle Leistung« ermitteln.

Neubestimmte Naturkonstanten

Die Metrologen messen den Strom während der Wägung, indem sie ihn durch einen Widerstand leiten, der zuvor mit Hilfe des Quanten-Hall-Effekts geeicht wurde. Die am Widerstand anliegende Spannung sowie die in die Spule induzierte Spannung werden mit Hilfe des Josephson-Effekts gemessen, der ebenfalls quantenmechanischer Natur ist (siehe Kasten auf S. 82). Die Forscher können deshalb die elektrische Leistung in Einheiten des Planck'schen Wirkungsquantums ausdrücken. Da die anderen Terme in der Gleichung nur von der Zeit und der Länge abhängen, kann letztlich die Masse in Einheiten des Planck'schen Wirkungsquantums, des Meters und der Sekunde bestimmt werden – also ausschließlich auf der Grundlage von Naturkonstanten.

Zwar scheint sich diese Methode recht direkt zur Eichung des Kilogramms zu eignen, um jedoch die angestrebte Genauigkeit von 1 zu 100 Millionen zu erreichen, müssen die wichtigsten Größen in dem Experiment mit einer Genauigkeit gemessen werden, die an die Grenzen heutiger Möglichkeiten stoßen. Zunächst ist die Schwerebeschleunigung extrem genau zu bestimmen. Dann muss das gesamte Verfahren in einem Vakuum durchgeführt werden, damit weder der Auftrieb in der Luft noch die Strahlenbrechung die Geschwindigkeitsmessung beeinflussen, die mit einem Laser-Interferometer vorzunehmen ist. Die Metrologen müssen außerdem dafür sorgen, dass die Richtung der auf die Spule wirkenden Kraft exakt vertikal verläuft; dafür müssen sie Teile der Apparatur auf

▷ Die Farben dieser dreidimensionalen digitalen Darstellung einer Siliziumkugel zeigen die Abweichungen von der perfekten Kugelform, wie sie mittels eines Röntgen-Interferometers gemessen wurden.

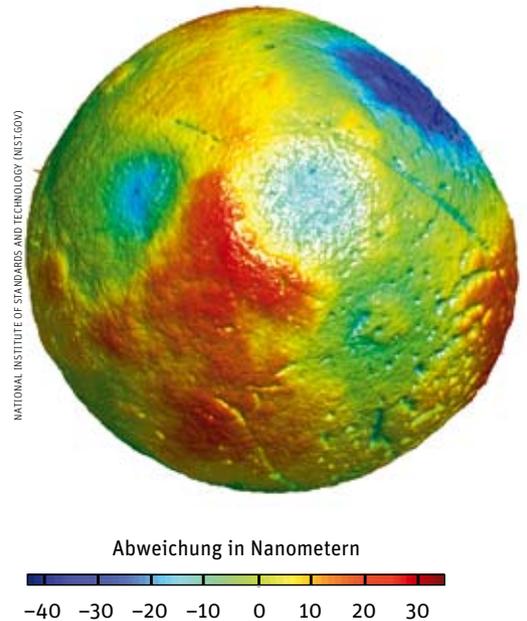
mindestens 10 Bogensekunden und 10 Mikrometer exakt ausrichten. Schließlich müssen sie genau verstehen, wie sich das Magnetfeld zwischen den beiden Teilen des Experiments verhält. Das erfordert, dass sich die Temperatur des Permanentmagneten höchstens im Mikrokkelvinbereich langsam und gleichmäßig ändern darf.

Drei Institute haben inzwischen solche Watt-Waagen entwickelt: das Schweizer Bundesamt für Metrologie (Metas), das Nationale Institut für Standards und Technologie (Nist) in den USA und das NPL in Großbritannien. Auch die Forscher des Institut National de Métrologie (INM) sowie am eingangs erwähnten BIPM in Frankreich entwickeln entsprechende Apparaturen. Gelingen diese Anstrengungen, so wird es schließlich fünf voneinander unabhängige Instrumente geben, die unterschiedlich aufgebaut sind. Das ist nützlich, um systematische Fehler zu erkennen und auszuschließen. Am Ziel soll eine Messung des Planck'schen Wirkungsquantums mit einer Genauigkeit 1 zu 100 Millionen stehen, vielleicht sogar mit 1 zu 200 Millionen.

Leider führen bisherige Messungen der Siliziumkristalle sowie der Watt-Waagen zu Massenangaben des Kilogramms, die um mehr als 1 zu 1 Million voneinander abweichen. Forscher müssen die Abweichungen auf ein Hundertstel dieser Differenz reduzieren, bevor sie das Kilogramm neu definieren können.

Gelingt diese Anstrengung, sind die Konsequenzen weit reichend. Zum einen werden die Avogadro-Konstante und das Planck'sche Wirkungsquantum genauer bestimmt sein. Sobald Letzteres auf diese Weise fixiert ist und die Wissenschaftler auch das Ampere – dessen Unsicherheit damit gekoppelt ist – neu definiert haben, lassen sich auch die Elementarladung und andere wichtige Größen sehr genau angeben.

Das Internationale Komitee für Gewichte und Maße treibt die nationalen Eichenstellen an, bis zum Jahr 2011 nicht nur das Kilogramm neu zu definieren, sondern auch das Ampere, das Kel-



vin und das Mol. Anschließend werden einige Länder die notwendigen Geräte bauen, um diese Definitionen praktisch zu nutzen.

Andere Länder werden ihre Kilogrammstandards vermutlich auf die Messungen und Apparaturen derjenigen Labore beziehen, welche die Neudefinition erarbeiteten. Damit ist die Gefahr weitgehend gebannt, dass das einzige Objekt, auf dem die Definition beruht, beschädigt oder kontaminiert werden könnte. Das neue System wäre robust und stabil. Es würde dem wissenschaftlichen und technischen Fortschritt erlauben, mit unvermindertem Tempo voranzuschreiten. ◁



Ian Robinson leitet die Arbeitsgruppe für elektrische Methoden zur Überwachung der Stabilität des Kilogramms des »Consultative Committee on Electricity and Magnetism« am Nationalen Physikalischen Laboratorium Großbritanniens in Teddington.

Replacing the kilogram. Von B. P. Kibble und I. A. Robinson in: Measurement Science and Technology, Bd. 14, S. 1229, 2003

Tracing Planck's constant to the kilogram by electromechanical methods. Von A. Eichenberger et al. in: Metrologia, Bd. 40, S. 356, 2003

History and progress in the accurate determination of the Avogadro constant. Von P. Becker in: Reports on Progress in Physics, Bd. 64, S. 1945, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/872688.