

# Atome hinter Gittern

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

**N<sub>A</sub>**  
 $6,022\ 1415 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$   
**Avogadro-Konstante**

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

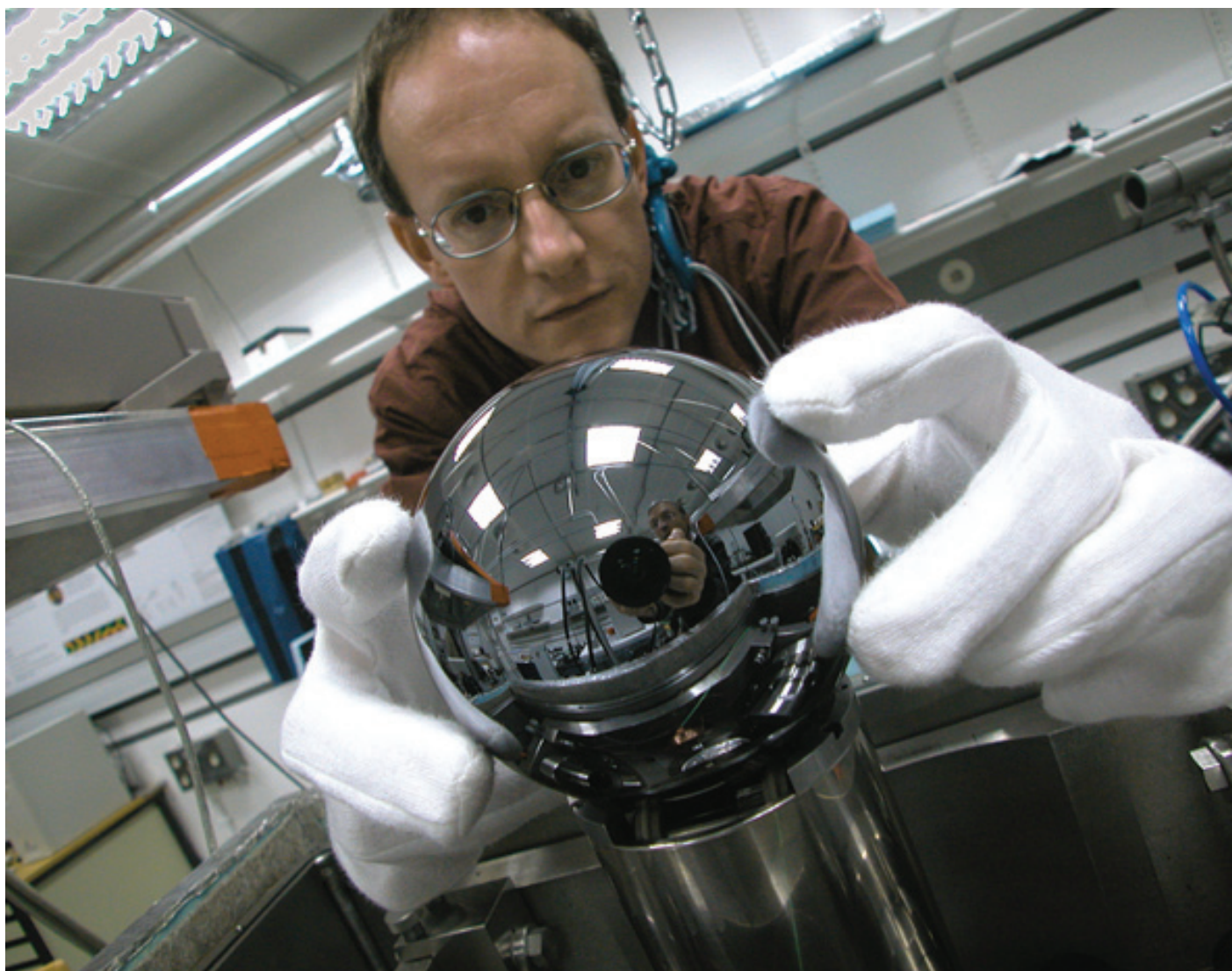


Foto: okerland-archiv



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

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

Natürlich sind das ziemlich viele, etwa  $6 \cdot 10^{23}$ , also ein paar hundert Trilliarden. Wer da anfangen möchte, die Teilchen einzeln abzuzählen, wäre lange beschäftigt. Selbst dann, wenn man sich als Hilfsmittel eine schnelle Zählmaschine vorstellt.

Vielleicht eine, die in der Lage ist, pro Sekunde eine Million Atome zu registrieren. Leider würde es dann immer noch 20 Milliarden Jahre dauern, die Atome in nur zwei Gramm Wasserstoff abzuzählen – länger, als das Universum bisher existiert.

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

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

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

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



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

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

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

natürlich möglichst ohne jede Verunreinigung, um das Ergebnis nicht zu verfälschen.

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

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

BRIGITTE RÖTHLEIN

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

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

Grafik: alb/PTB



## Ansprechpartner in der PTB

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

S. 28-29: Die „Liste“

Dr. Wolfgang Wöger (im Ruhestand)  
Dr. Winfried Michaelis (winfried.michaelis@ptb.de)  
Arbeitsgruppe: „Quantitative Mikroskopie“

S. 30-32: Die K&k-Connection

Dr. Bernd Fellmuth (bernd.fellmuth@ptb.de)  
Christof Gaiser (christof.gaiser@ptb.de)  
Arbeitsgruppe „Tiefemperaturmetrologie“

S. 33-35: Atome hinter Gittern

Dr. Peter Becker (peter.becker@ptb.de)  
Fachbereich „Quantenoptik und Längeneinheit“  
Dr. Arnold Nicolaus (arnold.nicolaus@ptb.de)  
Arbeitsgruppe „Interferometrie an Maßverkörperungen“

S. 36-39: Im Räderwerk der Quantennormale

Dr. Franz Josef Ahlers (franz.ahlers@ptb.de)  
Fachbereich „Elektrische Quantenmetrologie“

S. 51-53: Unser Wissen von der Welt ist vorläufig

Dr. Ekkehard Peik (ekkehard.peik@ptb.de)  
Arbeitsgruppe „Optische Uhren mit einzelnen Ionen“

## Impressum

### Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin

### Redaktion

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB  
Postfach 3345, 38023 Braunschweig  
Telefon: (05 31) 592-30 06  
E-Mail: presse@ptb.de

Redakteure: Jens Simon (jes, verantwortlich), Erika Schow  
Autoren: Birgit Ehlbeck, Julia Förster, Frank Frick,  
Anne Hardy, Andrea Hoferichter (ah), Ute Kehse,  
Jan Oliver Löffken, Brigitte Röhlein, Dörte Saße,  
Rainer Scharf, Axel Tillemans  
Layout: Jörn-Uwe Barz  
Grafik: Alberto Parra del Riego (alb),  
Björn Helge Wysfeld (wysi)  
Fact checker: Bernd Warnke  
Redaktionsassistentin: Cornelia Land

### Druck

Druckverlag Kettler, Bönen/Westf.

Auszüge der „maßstäbe“ 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, September 2006