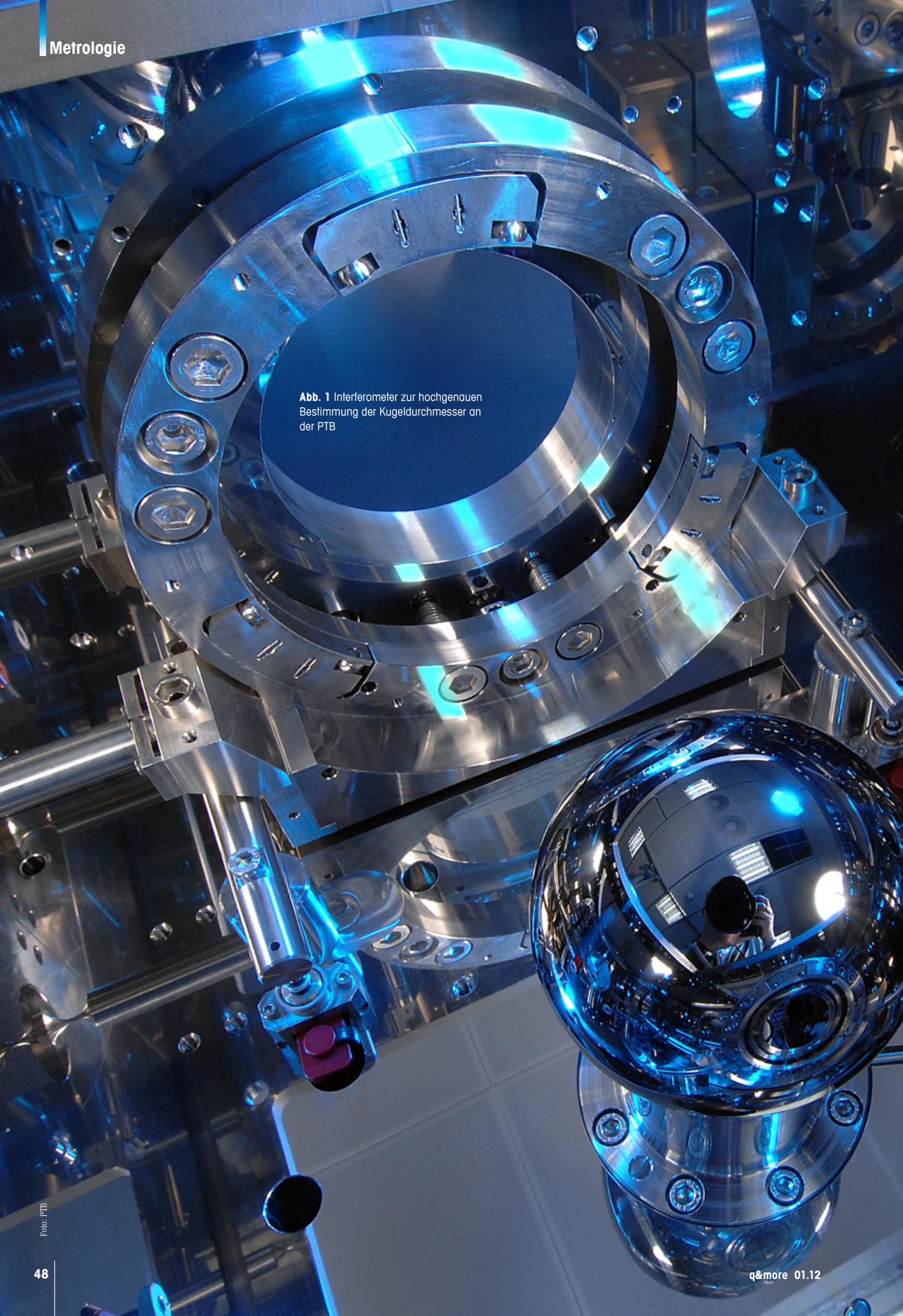


Abb. 1 Interferometer zur hochgenauen Bestimmung der Kugeldurchmesser an der PTB



Die beste Messung

Meilensteine auf dem Weg zu einer Neudefinition des Kilogramms

Dr. Peter Becker, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Seit über 30 Jahren sucht man nach Wegen, das Kilogramm über eine atomare Konstante oder eine physikalische Fundamentalkonstante zu definieren. Zwei Messmethoden sind inzwischen so weit fortgeschritten, dass eine Neudefinition in den kommenden Jahren wahrscheinlich ist: das Wattwaagen-Experiment zur Bestimmung der Planck-Konstanten h und das Avogadro-Experiment zur Bestimmung der Avogadro-Konstanten N_A . Über die molare Planck-Konstante $N_A h$, die sehr genau bekannt ist, sind beide Methoden und beide Zahlenwerte ineinander umrechenbar. Bislang waren jedoch die Differenzen zwischen den Ergebnissen von Wattwaage und Avogadro-Projekt mit den entsprechenden Unsicherheitsangaben statistisch nicht verträglich, was sich nun durch neue Ergebnisse positiv geändert hat.

Im Heft 4/2010 der Zeitschrift *chemie&more* berichteten wir über die erfolgreiche Neubestimmung der Avogadro-Konstanten. Inzwischen hat die Generalkonferenz der Meterkonvention im Herbst 2011 in Paris auf Vorschlag ihrer beratenden Gremien dem Konzept zugestimmt, alle Basiseinheiten auf Fundamentalkonstanten zurückzuführen und damit das Kilogramm mit der Planck-Konstante h zu verbinden. Der Zeitpunkt der Neudefinition ist aber erst erreicht, wenn die Messergebnisse sowohl aus dem Avogadro- als auch aus dem Wattwaagen-Experiment die notwendige Übereinstimmung in Zahlenwert und Messunsicherheit erreicht haben. Das heißt: Eines von mindestens drei unabhängigen Experimenten muss eine relative Messunsicherheit von 2×10^{-8} , die restlichen zwei mindestens 5×10^{-8} erreichen. Die Resultate müssen auch innerhalb eines Vertrauensbereichs von 95 % übereinstimmen, d. h., ihre „Fehlerbalken“ müssen sich überlappen. Aus diesen Resultaten wird dann ein genauer und für alle Anwender verbindlicher Wert für die Planck-Konstante und damit für die Definition der Masseinheit festgelegt – ohne Messunsicherheit.

Die Schwierigkeit, Atome zu zählen

Im Avogadro-Projekt wird die Zahl der Atome in einem Mol Silizium bestimmt. Da man nicht in der Lage ist, die Atome einzeln zu zählen, nutzt man die regelmäßige Anordnung der Atome in einem Kristallgitter aus. In einem Kristall aus Silizium kommt man dabei dem Idealfall eines perfekten Kristalls schon sehr nahe.

Zunächst bestimmt man die Zahl der Atome in einer etwa 1 kg schweren Siliziumkugel durch Bestimmung des Kugelvolumens mithilfe eines speziellen optischen Kugelinterferometers und durch eine – separate – Messung des Atomvolumens mittels eines speziellen Röntgeninterferometers. Das Verhältnis der beiden Ergebnisse ergibt die Atomanzahl in der Kugel. Die Zahl der Siliziumatome in einem Mol erhält man, indem man die Masse der Kugel – bestimmt durch Vergleich mit einem Massenormal – durch die molare Masse des Siliziums teilt. Eine Schwierigkeit hat man aber dabei: Silizium hat drei stabile Isotope mit der molaren Masse 28 g, 29 g und 30 g und man muss wissen, wie viele Atome jedes Isotopes sich in dem Kristall befinden, um eine mittlere Molmasse auszurechnen. Das geschieht mit einem Massenspektrometer. Für die neuesten Messungen haben die Forscher einen angereicherten Siliziumkristall hergestellt, mit dem konnte eine Messunsicherheit von 3×10^{-8} für die Avogadro-Konstante erreicht werden. Ein besseres Ergebnis war nicht zu erzielen, weil die auf den Siliziumkugeln befindliche Oxidschicht keine so einfache Struktur besaß wie angenommen: Durch den Polierprozess war sie mit Metallatomen kontaminiert. Diese kurze Darstellung der Messmethode soll nicht darüber hinwegtäuschen, wie aufwändig und technisch anspruchsvoll dieses Experiment sich gestaltet. Da die Avogadro-Konstante über einen genauen Satz von Fundamentalkonstanten mit der Planck-Konstante verbunden ist, ist sie eine wichtige Eingangsgröße bei der kg-Definition.

Jedes Messergebnis ist nichts wert, solange es nicht von unabhängiger Seite bestätigt wurde. Innerhalb des Avogadro-Projekts hat man sich daher bemüht, alle für das Ergebnis relevanten Messgrößen in verschiedenen Laboratorien möglichst unabhängig zu messen, die Ergebnisse miteinander zu vergleichen und zu bewerten, um eine möglichst große Redundanz zu erzielen. Für zwei Größen – Gitterparameter und molare Masse – gab es bislang nur jeweils ein Experiment weltweit. Während der Gitterparameter durch die PTB selbst ein zweites Mal bestimmt werden soll, bat man verschiedene Metrologieinstitute um Unterstützung, die molare Masse des benutzten angereicherten Kristalls nachzumessen. Inzwischen sind das kanadische Metrologieinstitut (NRC) und das entsprechende Laboratorium der USA (NIST) mit ersten Messergebnissen an die Öffentlichkeit getreten. Zwei Dinge dabei sind erfreulich: Erstens bestätigen die Ergebnisse im Wesentlichen die PTB-Werte. Zweitens: Im Hinblick auf die PTB-Ergebnisse wurden kleine Abweichungen gegenüber den PTB-Ergebnissen festgestellt, deren Ursachen nun untersucht werden können.



Abb. 2 Blick in den Wägeraum während der Massebestimmung der ^{28}Si -Kugel AVO28-S8 (1) mit Kilogrammprototyp Nr. 70 (2), Platin-Iridium-Sorptionskörpern (3, 5) sowie Auftriebskörpern zur Bestimmung der Luftdichte (4, 6)

Werte auf Annäherungskurs

Bislang wurden zwei Experimente mit Wattwaagen durchgeführt: In den USA wurde ein vergleichbarer Wert schon vor mehreren Jahren veröffentlicht (Messunsicherheit $3,6 \times 10^{-8}$). Leider sind dieser Wert und der Avogadro-Wert um etwa $1,6 \times 10^{-7}$ diskrepant zueinander. Inzwischen sind die Arbeiten an diesem „Forschungs“-Experiment weitgehend eingestellt worden, um eine kleine, robuste Wattwaage für Kalibrierzwecke zu errichten. Man wird also diese Diskrepanz kaum noch aufklären können. Eine weitere unabhängige Messung mit einer Wattwaage begann vor vielen Jahren desgleichen am britischen Metrologieinstitut (NPL). Auch dieser Zahlenwert war zum amerikanischen Wert diskrepant, aber er lag immerhin in Reichweite zu dem Avogadro-Wert. Da die Messunsicherheit aber relative groß war und nicht weiter reduziert werden sollte, nahm sich das NRC dieser Waage an, holte sie zu sich nach Hause und erzielte dort in kurzer Zeit nach Neuinstallation neue und genauere Ergebnisse (Messunsicherheit $6,5 \times 10^{-8}$). Im Herbst 2011 wurden sowohl neue Daten für dieses Wattwaagen-Experiment und auch unabhängige Messungen für das Isotopenverhältnis in den Avogadro-Kugeln veröffentlicht, wiederum erfreulich, dass die Ergebnisse beider Experimente sehr gut miteinander in Einklang gebracht werden konnten.

Endspurt zur Neudefinition

Nun ist man dabei, kleine Unstimmigkeiten noch zu korrigieren und die erforderliche Messunsicherheit von 2×10^{-8} zu erreichen. Das Avogadro-Projekt plant in den nächsten drei Jahren, seine Messunsicherheit von bislang 3×10^{-8} auf besser 2×10^{-8} zu verringern. Dazu sollen die beiden Siliziumkugeln neu poliert werden, um die Rundheit zu verbessern und um die Struktur der Oxidschicht zu vereinfachen. Um die Voraussetzungen für eine Neudefinition zu erfüllen, fehlt noch der erfolgreiche Abschluss eines dritten Experiments zur Bestimmung der Planck-Konstante. Seit vielen Jahren bemühen sich Metrologieinstitute in Europa, Wattwaagen aufzubauen. Um diesen Prozess zu beschleunigen, wird es in den kommenden drei Jahren ein gemeinsames Projekt dieser Institute mit dem Avogadro-Projekt geben, um mögliche Diskrepanzen zu bearbeiten und ein drittes unabhängiges h -Experiment erfolgreich zu betreiben.



Peter Becker studierte Physik an der Universität Münster und promovierte 1974 am Institut für Physik der Universität Dortmund. Von dort wechselte er zur Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig. Er beschäftigte sich zunächst mit metrologischen Anwendungen in der Röntgenoptik, bevor er 1995 die Leitung des internationalen Avogadro-Projekts übernahm. 2003 übertrug man ihm als Direktor und Professor die Leitung des Fachbereichs „Quantenoptik und Längeneinheit“ der PTB. Seit März 2011 ist er auch im Ruhestand mit dem Projekt weiter verbunden.

Erst wenn alle Daten in ihrer Zahl und Unsicherheit den Anforderungen der Meterkonvention genügen, kann eine Neugestaltung der SI-Einheiten und ihre Neudefinition beschlossen werden. Neben dem Kilogramm sollen dann auch das Kelvin, das Ampere und das Mol auf der Basis von Fundamentalkonstanten definiert werden. Ein nächster Anlauf ist schon für 2014 geplant, eine Herausforderung für die Metrologie. Somit sind die nächsten Jahre bis 2014 in der Metrologie geprägt von einem Zweikampf PTB-NRC um die beste Messung der Planckkonstanten, dabei hat das Avogadro-Experiment zurzeit die Nase vorn.

■ Peter.Becker@ptb.de