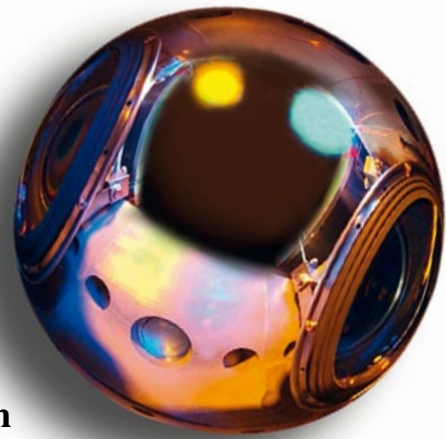


# Eine Kugel bricht alle Rekorde



**Wir befinden uns im Jahr 2013. Alle SI-Basiseinheiten sind über Naturkonstanten oder die Eigenschaften von Atomen oder Molekülen definiert... Alle Basiseinheiten? Nein! Als einzige durch einen Vergleichsgegenstand festgelegte Einheit hört das Kilogramm nicht auf, den Metrologen Widerstand zu leisten. Doch die Wissenschaftler der PTB haben mehr Erfolg als die um das berühmte gallische Dorf stationierten römischen Legionäre: Auf ihrem Feldzug für eine Neudefinition des Kilogramms ist ihnen ein entscheidender Durchbruch gelungen. Die Tage des Urkilogramms sind gezählt.**

Seit 1889 dient das Urkilogramm – ein kleiner Platin-Iridium-Zylinder, der in einem Tresor des Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) bei Paris aufbewahrt wird – als Maß für alle Kilogramms der Welt. Alle Mitgliedsstaaten der Meterkonvention verfügen über Kopien dieses Zylinders, die in regelmäßigen Abständen mit ihrem internationalen Gegenstück verglichen werden. Aus diesen Kopien werden wiederum Kopien hergestellt, die als Masse-Normale für den praktischen Gebrauch dienen – und so weiter und so fort.

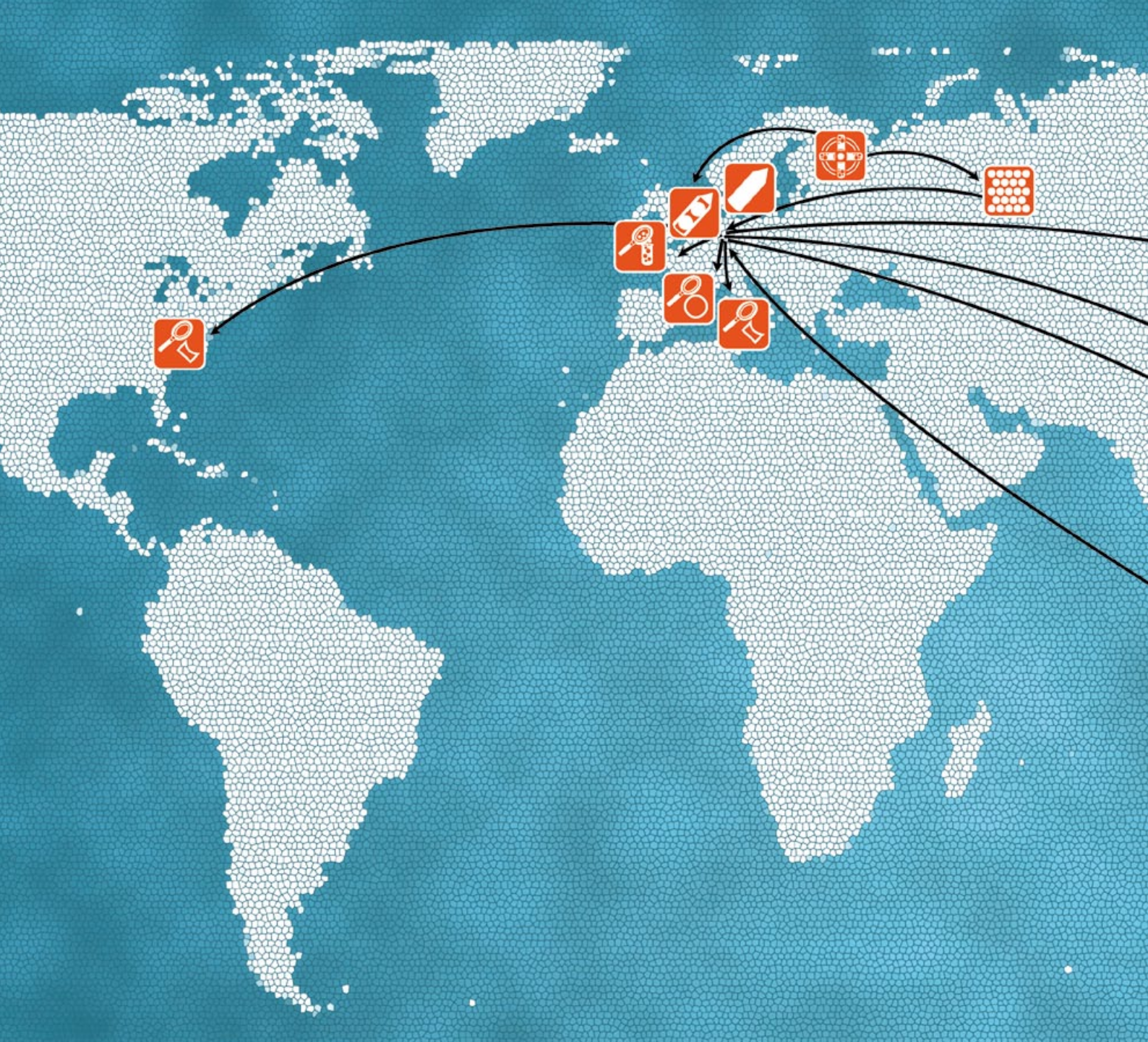
Über 50 Jahre ist es her, dass der Meter neu definiert und seine Maßverkörperung, der Urmeter, überflüssig wurde. Damit ist das Kilogramm seit 1960 die einzige Basiseinheit des Internationalen Einheitensystems (SI), die noch über einen Vergleichsgegenstand (Prototyp) dargestellt wird – in unserer Hightech-Welt ein wahrer Anachronismus. Denn jede Basiseinheit sollte so definiert sein, dass sie immer gleich bleibt und überall messbar ist. Das Urkilogramm dagegen ist nur am BIPM zugänglich und könnte beschädigt oder zerstört werden. Hinzu kommt, dass die verschiedenen Kilogramm-Prototypen zunehmend voneinander abweichen. Relativ zu den meisten Kopien ist das Urkilogramm in 100 Jahren um etwa 50 Mikrogramm leichter geworden – warum, ist bisher nicht bekannt.

Für die Metrologie ist dieser Zustand unhaltbar. Seit Jahrzehnten arbeiten deshalb Wissenschaftler weltweit daran, das Kilogramm so neu zu definieren, dass es aus einer unveränderlichen Naturkonstante abgeleitet werden kann. Welche das sein soll, daran scheiden sich die Geister. Forscher am US-amerikanischen Metrologieinstitut NIST zum Beispiel favorisieren das Planck'sche Wirkungsquantum aus der Quantenphysik. Mit ihrer Wattwaage lassen sie eine Masse von einem Kilogramm schweben, indem sie deren Gewichtskraft durch eine elektromagnetische Kraft kompensieren. Aus den Messungen von Strom und Spannung lässt sich das Kilogramm bei festgelegtem Wert des Planck'schen Wirkungsquantums „elektrisch“ definieren.

In der PTB setzen die Forscher auf einen bodenständigeren, aber nicht minder anspruchsvollen Ansatz: Sie zählen Atome. Genauer gesagt: Sie zählen, wie viele Atome eines bestimmten Isotops genau ein Kilogramm ergeben. Die Naturkonstante, aus der sie die Definition des Kilogramms damit ableiten wollen, ist die Avogadro-Konstante. Sie gibt an, wie viele Teilchen in einer Stoffmenge von einem Mol des jeweiligen Materials enthalten sind. Ein Mol wiederum enthält so viele Teilchen, wie Atome in 12 Gramm des Isotops Kohlenstoff-12 ( $^{12}\text{C}$ ) vorhanden sind. Ziel des internationalen, von der PTB koordinierten Avogadro-Projekts ist es nun, diese Konstante mit deutlich größerer Genauigkeit zu bestimmen als bisher. Dann ist nämlich die Umkehrung möglich: Durch eine exakte Festlegung der Avogadro-Konstante auf den neuen Messwert ließe sich das Kilogramm ebenfalls mit höchster Genauigkeit definieren – unabhängig von jedem störanfälligen Vergleichskörper.

Was sich auf dem Papier so einfach anhört, entpuppt sich technisch als enorme Herausforderung. Ein Mol enthält etwa  $6,022 \cdot 10^{23}$  Atome – das sind rund 602 Trilliarden. Eine solch große Zahl von Teilchen zum Beispiel mit Hilfe eines Massenspektrometers abzuzählen ist praktisch unmöglich. Hinzu kommt, dass das Beratende Komitee für die Masse (CCM) als Bedingung für eine Neudefinition des Kilogramms eine relative Messunsicherheit von höchstens  $2 \cdot 10^{-8}$  fordert. Die Forscher dürfen sich also um höchstens zwei Atome pro einhundert Millionen verzählen!

Um sich die Aufgabe zu erleichtern, greifen sie zu einem Trick: Sie nutzen die regelmäßige Struktur eines Kristallgitters. Doch herkömmliche Kristalle sind alles andere als perfekt. Sie bestehen aus verschiedenen Isotopen des kristallisierten Stoffes, enthalten Bereiche mit unterschiedlicher Gitterorientierung, Fremdatome, Leerstellen und andere Kristallbaufehler, die die Regelmäßigkeit des Gitters zunichtemachen. So konnten die PTB-Forscher

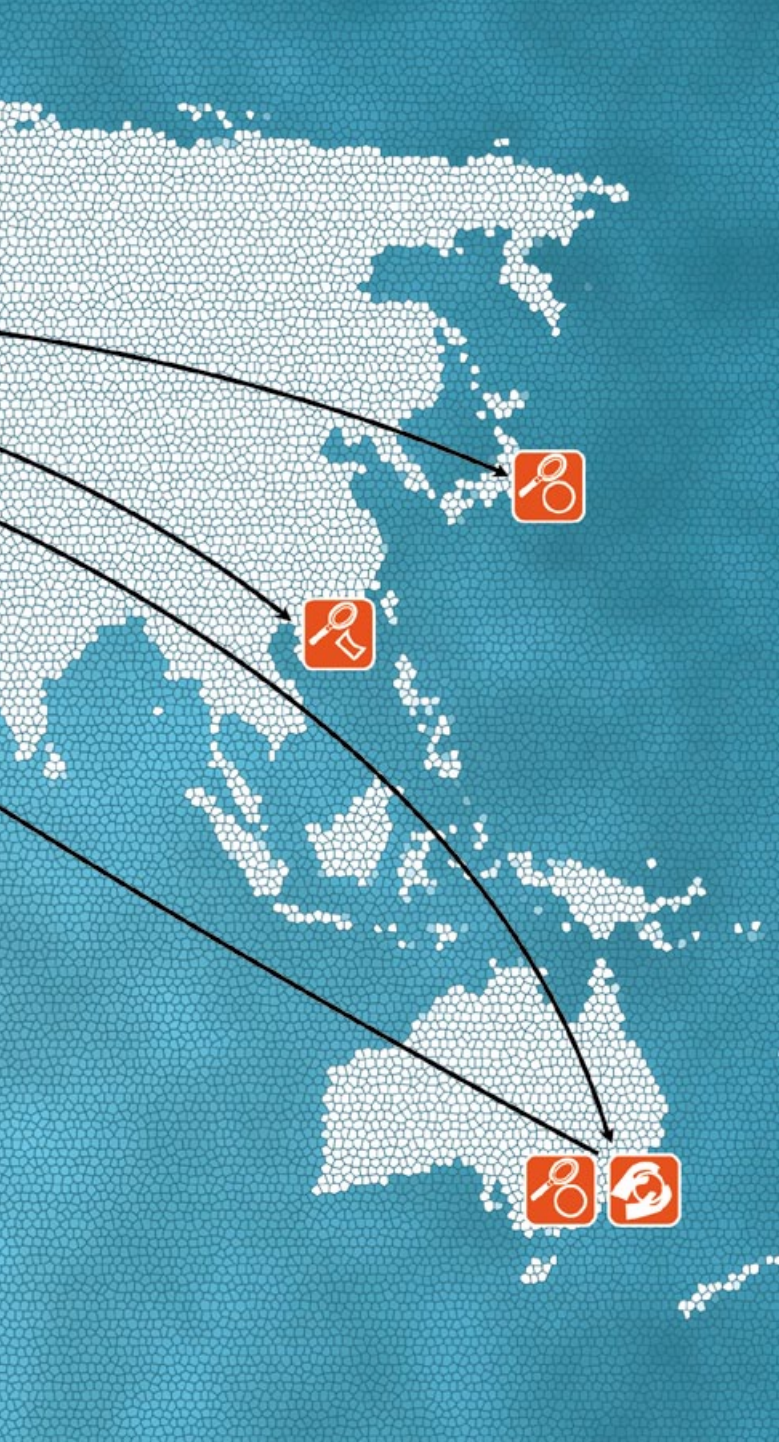


anhand von Messungen an natürlichem Silizium zwar die Avogadro-Konstante mit der bis dato erreichten Präzision bestätigen, aufgrund der natürlichen Kristallzusammensetzung aus drei Isotopen ( $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$  und  $^{30}\text{Si}$ ) ließ sich die Messgenauigkeit jedoch nicht weiter erhöhen.

Damit war klar: Ein möglichst perfekter Kristall musste her. Im Jahr 2003 geben die Avogadro-Forscher deshalb die zwei wohl vollkommensten Siliziumkugeln der Welt in Auftrag. Fünf Jahre dauert es, bis sie sie in Händen halten: Eineinhalb Jahre lang schleudern Zentrifugen in Sankt Petersburg – wo früher russische Atomwissenschaftler das Uran für Atomraketen anreicherten – das Gas Siliziumtetrafluorid. Dabei werden die massereichen Isotope immer wieder abgetrennt, bis mit 99,996 Prozent fast ausschließlich  $^{28}\text{Si}$  übrig bleibt. Das angereicherte Gas wird in Nischni Nowgorod in Silan ( $\text{SiH}_4$ ) umgewandelt, weiter gereinigt und ein Vierteljahr lang kristallisiert. Von Sep-

tember 2006 bis Frühjahr 2007 schaffen Wissenschaftler in Berlin daraus einen einzigen, sehr reinen und überaus gleichmäßigen Einkristall. Er wird in Teile zersägt: Die kleineren bekommen die Projektpartner weltweit, um alle wichtigen Eigenschaften des Materials zu messen. Die beiden größten werden in Sydney in Australien ein halbes Jahr lang – zum Teil per Hand – zu zwei nahezu perfekten Kugeln von je einem Kilogramm Masse poliert.

Im April 2008 können die Messungen an den Kristallkugeln beginnen. Unter höchsten Reinheitsbedingungen im Vakuum bei genau festgelegter Temperatur – denn schließlich geht es um Genauigkeiten von millionstel Millimetern. Allein bei der PTB sind zehn Arbeitsgruppen beteiligt, hinzu kommen Projektpartner in Australien, Belgien, Frankreich, Italien, Japan und den USA. Die Avogadro-Forscher prüfen die Kristallperfektion und schätzen den Einfluss der Kristallbaufehler ab. Das italienische



## Entstehungsgeschichte zweier Siliziumkugeln



**St. Petersburg:** Zentrifugen schleudern gasförmiges Siliziumtetrafluorid. Ziel: 99,99-prozentiges  $^{28}\text{Si}$ .



**Geel:** Die Reinheit des Gases wird geprüft.



**Nischni Nowgorod:** Herstellung eines Polykristalls.



**Berlin:** Aus dem Polykristall wird ein Einkristall gefertigt.



**Braunschweig:** Der Einkristall wird in zwei Kugeln und mehrere kleine Teile zerlegt.



**Sydney:** Polieren der Kugeln bis zur nahezu perfekten Kugelform.



**Braunschweig, Bern, Paris (Sèvres), Tokio, Sydney:** Prüfung von Masse und Oberfläche der Kugeln.



**Turin, Peking, Washington (Gaithersburg)** sowie mehrere europäische Institute: Prüfung von Gitterabstand, Isotopenverhältnis und molarer Masse des  $^{28}\text{Si}$ -Kristalls anhand kleiner Bruchstücke.

Grafik: Alberto Parra del Riego/PTB

Metrologieinstitut INRIM misst den Gitterabstand im Kristall, den Vergleichsmessungen am amerikanischen NIST bestätigen. Die Massen der Kugeln werden am BIPM, am japanischen NMIJ und in der PTB durch Vergleich mit den dortigen Masse-Normalen bestimmt. Arbeitsgruppen von NMIJ, dem australischen NMI-A und der PTB vermessen das Kugelvolumen – mit ausgezeichneter Übereinstimmung. An der PTB kommt dazu ein neuentwickeltes Kugelinterferometer zum Einsatz, das Messunsicherheiten von unter einem Nanometer ermöglicht.

Die Oxidschicht auf der Kugeloberfläche wird mit Elektronen-, Röntgen- und Synchrotronstrahlung untersucht und bei der Bestimmung der Siliziumdichte berücksichtigt. Wie sich herausstellt, entstand beim Polierprozess eine unerwartet hohe Metallkontamination der Kugeloberflächen. Auch diese wird gemessen und ihr Einfluss auf Kugelvolumen und -masse abgeschätzt – sie führt zu einer

höheren Messunsicherheit. Zur Bestimmung der Masse, die genau ein Mol ergibt, entwickelt die PTB ein neues Messverfahren, das letztlich den Ausschlag für den Erfolg gibt: Im Januar 2011 veröffentlichen die Forscher den bisher genauesten Wert der Avogadro-Konstante, mit einer relativen Messunsicherheit von  $3 \cdot 10^{-8}$ .

$3 \cdot 10^{-8}$  – das liegt noch knapp über der für eine Neudefinition geforderten Unsicherheit von  $2 \cdot 10^{-8}$ . Zudem kommen Wattwaage und Avogadro-Projekt zu leicht unterschiedlichen Ergebnissen. Doch die Avogadro-Forscher sind sicher, dass sie in naher Zukunft dank neuer Messungen mit verbesserten Kugelinterferometern an kontaminationsfreien Kugeln die verlangte Genauigkeit erreichen werden – und damit den Weg frei machen werden für die endgültige Abschaffung des Urkilogramms. ■

ILKA FLEGEL