



© courtesy of the BIPM

# Die Revolution der Einheiten

## Wovon künftig die Genauigkeit der Messergebnisse abhängt

Den grundlegenden Wandel im Internationalen Einheitensystem (SI) bezeichnet Physik-Nobelpreisträger Klaus von Klitzing als „größten Umschwung im Messwesen seit der Französischen Revolution“. Am 20. Mai 2019 tritt das neue SI in Kraft und wird das Messwesen revolutionieren. Nur wer elektronische Spannung oder Widerstand präzise messen kann, muss an diesem Tag ein paar Stellschrauben drehen.

Das **S**ystème International d'Unités (SI) ist das metrische Einheitensystem, das physikalische Einheiten zu ausgewählten Größen festlegt und auf sieben Basiseinheiten beruht: Meter, Kilo-

gramm, Sekunde, Stromstärke, Ampere, Kelvin, Mol und Candela.

Im November 2018 beschloss die 26. Allgemeine Konferenz über Gewichte und Maße, dieses System zu reformieren.

Der Schritt war notwendig geworden, da das Ur-Kilogramm, ein menschengemachtes physisches Objekt, auf das sich jedes Kilogrammstück der Welt bezog, an Masse verliert. Dazu kam, dass die Einheit „Kilo-

gramm“ auch in die Definition der Basiseinheiten Ampere, Candela und Mol eingeflossen ist. Nach knapp 150 Jahren gibt es nun eine neue Definitionsgrundlage, die für alle Zeiten konstant bleibt.

Bis zur Französischen Revolution herrschte eine bunte Vielfalt an Maßeinheiten, die sich von Region zu Region unterschieden. Mit der Meterkonvention im Jahr 1875 wurden der Meter sowie das Kilogramm für alle beitretenden Staaten festgelegt und erhielten damit weltweite Gültigkeit. Ein enormer Fortschritt in der Wissenschafts- und Kulturgeschichte, der den globalen Handel bedeutend veränderte.

### Weshalb hat das Ur-Kilogramm ausgedient?

Die bestehenden Definitionen von Kilogramm, Ampere, Mol und Kelvin unterlagen bislang komplizierten Messverfahren. Das ist jetzt hinfällig, denn ab dem kommenden Weltmetrologietag im Mai werden Naturkonstanten eine neue Ära im Einheitensystem einleiten. Denn die Zahlenwerte der unveränderlichen und allgemeingültigen Naturkonstanten werden dann im Rahmen der bisherigen Definitionen exakt festgelegt und die Einheiten danach aus diesen Konstanten abgeleitet. Zeit, Länge und Lichtstärke werden schon seit Jahrzehnten über Naturkonstanten definiert, wie übrigens auch die bisher abgeleiteten Einheiten für elektrische Spannung und Widerstand.

Der entscheidende Vorteil von Naturkonstanten ist, dass sie – wie der Name schon sagt – konstant, also unveränderlich sind. Haben bislang schon minimale Temperaturschwankungen die von Menschen geschaffenen Artefakte wie Ur-Kilogramm und Ur-Meter verändert, so bleiben Naturkonstanten immer gleich. Das ist von immenser Bedeutung, da in unserer modernen Hightech-Welt schon kleinste Änderungen erhebliche Auswirkungen haben. Dank der Naturkonstanten lassen sich jetzt solche Schwankungen vermeiden.

Konkret bedeutet das, dass sich in Zukunft „jede beliebige Geschwindigkeit relativ zur Lichtgeschwindigkeit ausdrücken wie auch jede elektrische Ladung relativ zur Elementarladung des Elektrons darstellen lässt“, wie es im PTB-Infoblatt „Das neue Internationale Einheitensystem (SI)“, 11/2017, heißt. Damit werden anhand von vorgegebenen Naturkonstanten die Einheiten im neuen System nicht mehr gesetzt, sondern errechnet. Die Unterscheidung zwischen Basiseinheiten und abgeleiteten Einheiten gibt es dann nicht mehr.

### Wer kümmert sich um die Umsetzung?

Für die weltweite Einführung des neuen SI sind das Internationale Büro für Maße und Gewichte (BIPM) und dessen Generalkonferenz (CGPM) zuständig. Auf nationaler Ebene sind es meist die metrologischen Staatseinrichtungen wie die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Deutschland, »»



**Bild 1. Josephson-Quantenkalibrator:** Derzeit kann man Gleichspannung nicht präziser messen. (© esz AG, [www.esz-ag.de](http://www.esz-ag.de))

das Eidgenössische Institut für Metrologie (METAS) in der Schweiz oder das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) in Österreich.

Die PTB hat beispielsweise für Anwender elektrischer Messtechnik Handlungsempfehlungen herausgegeben, die bei der Umstellung auf das neue SI zu beachten sind. Eine Prüfung, ob die neuen Regelungen normkonform umgesetzt werden, findet im Rahmen der Akkreditierungsbegutachtung der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) statt.

### Was ändert sich im Alltag für uns?

Was passiert am 20. Mai 2019 faktisch? Die gute Nachricht: Im Alltag, beim Blick auf die Waage, den Zollstock oder die Uhr ändert sich nichts. Gewichte und Maße bleiben bestehen wie bisher. Niemand muss umdenken – schließlich war der reibungslose und für die meisten Menschen unkomplizierte Übergang eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Revision des SI. Oberstes Ziel war es, eine praxistaugliche Regelung einzuführen, die unserer global vernetzten, hoch technisierten Welt gerecht wird.

### Was ändert sich für Wissenschaft und Technik?

Wissenschaftliche Entdeckungen profitieren unmittelbar vom Inkrafttreten des revidierten SI. Denn ein großer Vorteil ist die Rückwärtskompatibilität des neuen Sys-

tems. Das heißt, dass Messergebnisse wie zum Beispiel Klimaaufzeichnungen über einen langen Zeitraum vergleichbar sind. Außerdem werden mit dem neuen SI zuverlässigere, konsistentere und genauere Messergebnisse möglich.

In der Technik werden sich die Vorteile langfristig bemerkbar machen. Eine Besonderheit des neuen Einheitensystems ist, dass es keine technischen Beschränkungen mehr enthält, wie z. B. unendlich lange und unendlich dünne Stromleitungen im Vakuum bei der Definition des Ampere. Außerdem ist die erzielbare Genauigkeit nicht mehr durch zeitliche Veränderungen wie die des Ur-Kilogramms und seiner veränderlichen Duplikate beschränkt. Dies ist insbesondere von Bedeutung, wenn Grundeinheiten wie das Kilogramm auch in die Definition anderer Einheiten einfließen.

Alle elektrischen Einheiten inklusive des Ampere werden künftig ebenfalls als Realisierungen von quantenphysikalischen Effekten (Josephson- und Quanten-Hall-Effekt) Teil des SI. Die Genauigkeit der Messergebnisse der Zukunft ist daher nicht mehr von der Definition der Einheiten abhängig, sondern nur noch vom Stand der Technik: Denn sobald genauer gemessen werden kann, wird die Einheitendefinition ebenfalls genauer. So ist zum Beispiel das Mol künftig über die exakte Anzahl von Teilchen (die Avogadro-Konstante) definiert. Je genauer diese Konstante bestimmt wird, desto genauer ist das Mol.

Die Definition aber ändert sich nicht. Die technische Festlegung auf unveränderliche Werte ist damit ein großer Gewinn der Wissenschaft. Die Messungen von Zeit, Länge oder Masse jenseits von Femtosekunde, Nanometer oder Mikrogramm werden also in einer hoch technisierten Zukunft auf derselben Skala wie bisher möglich sein, selbst wenn die Dimensionen der Messgenauigkeit unsere heutige Vorstellungskraft noch übersteigen.

### Warum ist der Umsturz eine kleine Revolution?

Wer es ganz genau nimmt – nämlich Wissenschaftler, Metrologen, Kalibrierlabore und Prüfmittelverwalter –, wird aber doch etwas vom Umsturz der kleinen Revoluzzer merken. Nämlich bei der Kalibrierung von hochpräzisen elektrischen Messgeräten. Schon lange basieren die elektrischen Ein-

heiten Widerstand und Spannung auf den beiden Naturkonstanten Von-Klitzing- und Josephson-Konstante. Nun werden diese beiden also „offiziell“ in das neue SI integriert. Am 20. Mai müssen beim Kalibrieren dazu ein paar Stellschrauben geändert werden.

So muss beispielsweise bei allen Josephson-Quantenvoltmetern am Tag der Umstellung der Wert der Konstante  $K_{J-90}$  um ca. 0,1 ppm (parts per million), also um 0,00001 Prozent oder 100 Milliardstel manuell geändert werden. Zum Vergleich: Ein durchschnittlicher Vier-Personen-Haushalt würde erst nach 2500 Jahren eine Veränderung auf der Stromabrechnung sehen. Die Änderung entspricht aber bereits der Größenordnung der elektrischen Spannung, mit der Milliarden kleinster Nervenzellen im Gehirn miteinander kommunizieren.

### Wie viel Volt ist ein Volt?

Bis auf die neunte Stelle hinter dem Komma genau misst beispielsweise der Josephson-Quantenkalibrator Spannungen. Im Rahmen eines Forschungsprojekts des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie entwickelte ein Expertenteam der esz AG calibration & metrology, der Supracon AG und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) das weltweit erste industriell genutzte AC/DC-Josephson-Quantenvoltmeter.

Ein Exemplar davon steht nun in Eichenau bei München im Labor von esz zur quantengenauen Kalibrierung von Gleich- und Wechselstromspannungsquellen. Der unscheinbare graue Kasten, der auch auf den Namen „Joseph“ hört, ist perfekt für die Kalibrierung von hochpräzisen Messgeräten geeignet. Er übertrifft in seiner Genauigkeit den Stand traditioneller Messtechnik um ein Vielfaches. Möglich macht das der inverse Josephson-Effekt, durch den elektrische Spannung direkt über die Josephson-(Natur-)Konstante  $K_{J-90}$  definiert wird. Mit dem „Joseph“ hat man quasi die Rückführung im Haus, das Gerät muss nicht – wie andere Kalibratoren – kalibriert werden.

Derzeit kann man Gleichspannung nicht präziser messen als mit dem „Joseph“. Im Hause esz ist man daher gespannt, ob die Revolution der SI-Einheiten für immer und ewig hält oder ob es in 150 Jahren einen neuen Umsturz geben wird. ■

## INFORMATION & SERVICE

### UR-KILOGRAMM

Das Ur-Kilogramm ist ein im Jahr 1889 aus Platin und Iridium gegossener Zylinder, der im BIPM (Internationales Büro für Gewichte und Maße) in Paris verwahrt wird. Mit diesem wurde jede Waage der Welt über eine lange Kette von Vergleichsmessungen eingemessen.

### LITERATUR

Schrader, Christopher: Das Perfekte Kilogramm, in Süddeutsche Zeitung Nr. 264, S. 14, 16.11.2018

### KONTAKT

esz AG calibration & metrology  
T 08141 88887-187  
marketing@esz-ag.de  
www.esz-ag.de