

Auf dem Weg zu einer Neu

Jedes Einheitensystem ist parallel zu den Entwicklungen in Wissenschaft und Technik einem steten Wandel unterworfen. So vermag etwa die bestehende Definition des Kilogramms den heutigen Anforderungen an eine Definition einer Basiseinheit nicht mehr zu genügen. Mit der Watt-Waage des METAS und anderen Experimenten wird es aber wohl schon bald möglich sein, eine neue Definition zu liefern.

Beat Jeckelmann, Jürg Niederhauser

Wer mit einer Messung den Wert einer Grösse bestimmt hat, kann seit 1960 auf das Internationale Einheitensystem SI (Système International d'Unités) zurückgreifen. Mit Hilfe des SI-Systems lassen sich weltweit verständliche und vergleichbare Masse angeben. Das SI-System ist aufgebaut auf den sieben Basiseinheiten Meter (m), Kilogramm (kg), Sekunde (s), Ampère (A), Kelvin (K), Mol (mol) und Candela (cd) und einer Anzahl abgeleiteter Einheiten.

Ein angemessenes Einheitensystem muss sowohl den Bedürfnissen aus Industrie und Gewerbe als auch denjenigen der Wissenschaft genügen. Es sollte so beschaffen sein, dass alle bekannten physikalischen Grössen mit Hilfe seiner Einheiten widerspruchsfrei und mit der benötigten Genauigkeit gemessen werden können. Aus diesen Anforderungen ergibt sich, dass ein Einheitensystem nicht einfach einmal für alle Zeiten festgelegt werden kann. Vielmehr ist es parallel zu den Entwicklungen in Wissenschaft und Technik einem ständigen Wandel unterworfen.

Im Lauf der Zeit wurden mehrere der SI-Basiseinheiten entsprechend dem Stand der wissenschaftlichen Entwicklung neu definiert. Bei den Neudefinitionen der Basiseinheiten wurde Wert darauf gelegt, diese Einheiten orts- und zeitunabhängig zu definieren. Man stützte sich für die Neudefinitionen auf Naturkonstanten, die als unveränderlich betrachtet werden können, oder auf atomare Prozesse ab. So ist etwa der Meter folgendermassen festgelegt: «Der Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von $1/299\,792\,458$ Sekunde zurücklegt.»

Eine derartige Definition ist natürlich nicht für den Gebrauch im Alltag ausserhalb der Wissenschaft gedacht. Eine so definierte Masseinheit lässt sich aber über Naturkonstanten experimentell realisieren. Jedes Metrologielabor irgendwo auf der Welt kann jederzeit eine bestimmte Basiseinheit realisieren.

Neue Definition der Masseneinheit notwendig

Bei einer der Basiseinheiten, der Einheit der Masse, liegt zurzeit noch keine orts- und zeitunabhängige Definition vor. Ihre Definition lautet: «Das Kilogramm ist die Einheit der Masse, es ist gleich der Masse des Internationalen Kilogrammprototyps.» Der erwähnte Prototyp, das Urkilogramm, ist ein aus Pt-Ir gefertigter Zylinder, der im Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) in Sèvres bei Paris aufbewahrt wird. Alle Mitgliedstaaten der Meterkonvention haben bei der Einführung des Urkilogramms 1889 eine Kopie erhalten. Die Schweiz erhielt den Prototyp Nr. 38. Die nationalen Prototypen wurden seit ihrer Herstellung offiziell nur dreimal mit dem Urkilogramm verglichen. Die bestehende Definition des Kilogramms vermag den heutigen Anforderungen an eine Definition einer Basiseinheit nicht mehr zu genügen. Problematisch sind unter anderem die folgenden Punkte:

- Definition und Darstellung der Einheit sind an einen bestimmten Körper gebunden. Die Masseneinheit kann somit nicht genauer wiedergegeben werden, als es der Massenvergleich mit dem Prototyp erlaubt.
- Der Prototyp ist nur an einem Ort verfügbar.

- Um den Prototyp vor Beschädigung oder Abnutzung zu schützen, werden Vergleiche mit dem Urkilogramm nur sehr selten durchgeführt.

- Wegen der instabilen Oberfläche des Prototyps ist eine zeitliche Veränderung des Urkilogramms wahrscheinlich. Bei den letzten internationalen Vergleichen (1946, 1989) hat sich gezeigt, dass die Urkilogramm-Kopien, die in den nationalen Metrologieinstituten als Normale zur Darstellung der Masseneinheit eingesetzt werden, im Mittel gegenüber dem Urkilogramm um $0,5\ \mu\text{g}/\text{Jahr}$ an Masse zunehmen. Der Prototyp Nr. 38, das nationale Normal der Schweiz, wies 1989 eine Differenz von $(0,2420 \pm 0,0023)$ mg auf. Dieser Wert liegt um $28\ \mu\text{g}$ über demjenigen aus dem Jahre 1946. Dies lässt zwar



Ein Einheitensystem kann nicht einmal für alle Zeiten festgelegt werden»

Rückschlüsse auf die Stabilität des Urkilogramms zu, eine sichere Aussage über seine absolute Änderung im Verlauf der Zeit ist jedoch nicht möglich.

Möglichkeiten für eine Neudefinition des Kilogramms

Eine auf Naturkonstanten beruhende Neudefinition der Masseneinheit drängt sich deshalb auf. Die Generalkonferenz für Mass und Gewicht hat denn auch 1995 die nationalen Metrologielabors aufgefordert, die nötigen Experimente in die Wege zu leiten, um innert nützlicher Frist eine Neudefini-

definition des Kilogramms

tion der Masseneinheit zu erlangen. Ansätze zu einer Neudefinition des Kilogramms werden auf unterschiedlichen Wegen verfolgt.

Eine Idee besteht darin, die Masseneinheit auf eine atomare Masse oder die Masse eines Elementarteilchens (Proton oder Elektron) zurückzuführen. Das Kilogramm liesse sich dann neu fassen als eine festgelegte Anzahl dieser Elementarmassen. Um auf diese Weise die alte Masseneinheit in die neue überführen zu können, ist es einerseits notwendig, die Masse des gewählten Atoms in der heutigen Masseneinheit hinreichend genau zu kennen. Andererseits muss die Anzahl der Atome in einem makroskopischen Körper bestimmt werden können. Dieser Weg zu einer neuen Massendefinition führt also über die Avogadrokonstante. Einer der Versuche, diesen Weg zu gehen, stützt sich auf Silizium-Einkristalle. Diese lassen sich nahezu perfekt mit einer Masse von einem Kilogramm oder mehr herstellen, wobei der Si-Kristall zu einer Kugel verarbeitet wird, um das Bestimmen des Volumens zu erleichtern.

Eine andere Möglichkeit ist der Versuch, mit Hilfe einer Ionenquelle einen intensiven Strahl von Gold-Ionen zu erzeugen und die Ionen in einem Auffangbehälter zu einer wägbaren Masse zu akkumulieren. Die molare Masse von Gold ist sehr genau bekannt und kann leicht mit der Masse eines beliebigen Atoms oder der Elektronenmasse ins Verhältnis gesetzt werden. Eine besondere Herausforderung stellen hier Erzeugung und Akkumulation der Ionen dar: Die Ionenquelle muss einen sehr hohen Gold-Ionen-Strom mit vernachlässigbarer Verschmutzung durch fremde Partikel erzeugen.

Mechanische und elektrische Leistung vergleichen

Neben den Experimenten, die versuchen, das Kilogramm auf eine atomare Masseneinheit zurückzuführen, finden sich auch Ansätze, die über den Weg eines präzisen Vergleichs mechanischer und elektrischer Leistung das

Kilogramm an Naturkonstanten anbinden wollen.

Die bekannteste Methode stellt die Watt-Waage dar, auch «Moving Coil»-Experiment genannt. Sie funktioniert nach folgendem Prinzip: Im ersten Teil des Experiments (vgl. Abb. 2) wird mit Hilfe einer hoch auflösenden Waage das Gewicht einer Testmasse der Masse m im Schwerfeld der Erde mit der elektromagnetischen Kraft F verglichen, die auf eine stromdurchflossene Spule der Stromstärke I in einem konstanten Magnetfeld B wirkt.

Weil die Grösse und Gestalt von Spule und Magnetfeld nicht mit genügender

Genauigkeit bekannt sind, müssen sie aus der Gleichung des Kräftevergleichs eliminiert werden. Das geschieht im zweiten Teil des Experiments, in dem die Spule mit konstanter Geschwindigkeit v vertikal durch das Magnetfeld bewegt wird (vgl. Abb. 3). Durch die Bewegung wird in der Spule eine Spannung U induziert, die das gleiche Produkt von Magnetfeld und Spulengeometrie enthält, wie es in der elektromagnetischen Kraft im ersten Teil des Experiments auftritt. Durch die Kombination der beiden Experimente ergibt sich am Ort der Spule der im ersten Schritt gemachten Messung



Die Schweizer Kopie des Urkilogramms, der Prototyp Nr. 38

$U \cdot I = m \cdot g \cdot v$, das heisst die Gleichheit von elektrischer und mechanischer Leistung.

Die Naturkonstante, auf die man sich bei der Bestimmung der Masse mit der Watt-Waage abstützt, ist die Plank'sche Konstante h . Und zwar ist dies möglich, wenn die elektrische Leistung mit Hilfe der quantenmechanischen Phänomene Josephson- und Quanten-Hall-Effekt bestimmt wird.

Watt-Waage des METAS

Watt-Waagen-Experimente werden in Grossbritannien (National Physical Laboratory, NPL) und in den USA (National Institute of Standards and Technology, NIST) seit Jahren betrieben. Dennoch hat METAS eine eigene Watt-Waage aufgebaut. Das ist dadurch

gerechtfertigt, dass sich der Messaufbau deutlich von demjenigen der am NPL wie auch am NIST laufenden Experimente unterscheidet und so Schwachpunkte dieser Experimente vermeidet.

Bei diesen beiden Projekten wird eine Testmasse von 1 kg verwendet. Das hat zur Folge, dass der Aufbau zur Erzeugung der elektromagnetischen Kraft, die benötigt wird, um die Gewichtskraft dieser Masse auszuwiegen, entsprechend umfangreich ist. So wiegt etwa der am NPL zur Erzeugung des magnetischen Flusses verwendete Permanentmagnet mehrere Tonnen. Die in das Magnetfeld eingetauchte Spule hängt an einer Waage, die für die vertikale Bewegung der Spule im zweiten Teil des Experiments um ihre Ruhelage bewegt werden muss.

METAS hat sich für eine Testmasse von 100 g entschieden. Das erlaubt eine drastische Reduktion der Grösse des Experiments. Nicht zuletzt kann dadurch die Masse des Magneten auf ein paar kg reduziert werden. Die Spule wird durch einen von der Waage getrennten Wippen-Mechanismus exakt vertikal im Magnetfeld des Permanentmagneten bewegt. Bewegungs- und Wägeteil des Experimentes sind dadurch vollständig getrennt, die Waage kann immer in ihrem Gleichgewichtszustand betrieben werden. Auf diese Weise werden die durch eine Rotation des Wägebalkens

verursachten Hysterese-Effekte vermieden.

An den Grenzen des Machbaren

Bei diesem Experiment erfolgen beinahe alle Messungen an der Grenze des Machbaren. Aus diesem Grund ist die Kontrolle der Umgebungsbedingungen von höchster Bedeutung. So muss am Ort und zur Zeit des Experiments die Erdbeschleunigung g mit hoher Genauigkeit bestimmt werden, denn selbst geringste Schwankungen der Gravitationskraft könnten die Messung beeinflussen. Mit einem modernen Absolutgravimeter ist diese Messung mit einer relativen Genauigkeit von $<10^{-8}$ möglich. Durch die im Vergleich zu den anderen Watt-Waagen-Experimenten reduzierte Grösse des Aufbaus ist es einfacher, die Temperatur in der Anlage konstant zu halten, Temperaturgradienten zu vermeiden und den Einfluss von Vibrationen minimal zu halten.

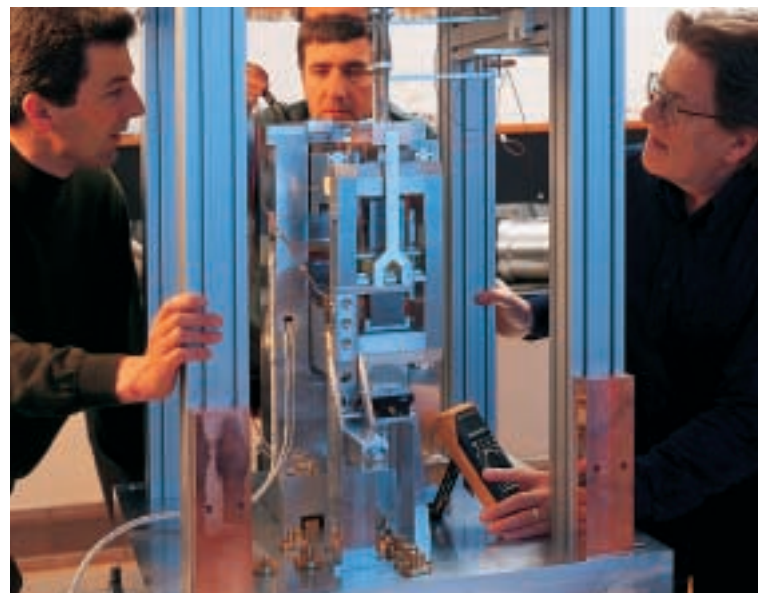
Zum Stand der Watt-Waage

METAS hat sich Anfang 1997 für den Bau einer Watt-Waage entschieden. Seit Herbst 2001 ist die Watt-Waage operationell. Im Herbst 2002 wurde das Experiment in ein Labor der 2001 fertiggestellten Erweiterungsbauten von METAS transferiert. Es wurde dort neu aufgebaut und in Betrieb genommen. Die gegenüber dem alten Standort stark verbesserten Umwelt-

Genau Masse für Wirtschaft und Gesellschaft

Messen ist für den Einzelnen, aber auch für Gesellschaft und Wirtschaft von grundlegender Bedeutung. Nur was gemessen werden kann, kann auch verbessert werden! Im Handel, bei der öffentlichen Sicherheit, im Gesundheitswesen und beim Umweltschutz ist richtiges Messen derart wichtig, dass staatliche Vorschriften erlassen und ihre Einhaltung überwacht werden müssen. In der Schweiz ist das Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS) für die Bereiche Messen und Akkreditieren zuständig. METAS realisiert international abgestimmte Masseinheiten und stellt sie der Wirtschaft und Gesellschaft mit der erforderlichen Genauigkeit zur Verfügung. Es beteiligt sich mit Forschungsarbeiten auf höchstem internationalem Niveau an der Weiterentwicklung der Metrologie. Auch die Akkreditierung erfüllt im heutigen Wirtschaftsleben eine wichtige Funktion: Mit der Akkreditierung wird einer Stelle bestätigt, dass sie in der Lage ist, eine festgelegte Tätigkeit mit der geforderten Fachkompetenz und Qualität zu erbringen. Dies trägt dazu bei, dass schweizerische Prüfberichte und Zertifikate international anerkannt und technische Handelshemmnisse abgebaut werden. Seit ihrer Gründung 1991 hat die Schweizerische Akkreditierungsstelle (SAS) 600 Stellen akkreditiert. METAS betreibt 144 Messlabors in allen Fachgebieten, die für die Schweiz von Bedeutung sind, und beschäftigt 150 Personen. 1862 als Eidgenössische Eichstätte gegründet, wird METAS seit 1999 mit Leistungsauftrag und Globalbudget geführt. Es weist ein Jahresbudget von rund 40 Millionen Franken auf und erzielt mit seinen Dienstleistungen einen Kostendeckungsgrad von rund 30 Prozent.

Die Watt-Waage



bedingungen erlauben eine deutliche Reduktion der durch Temperatur und Gebäudeschwingungen verursachten Effekte.

In letzter Zeit lag der Schwerpunkt der Arbeit bei der Evaluation der systematischen Fehler des Instruments. Dabei hat sich gezeigt, dass sich mit dem verwendeten Magnetsystem die angestrebte Unsicherheit nicht realisieren lässt. Zurzeit werden neue Magnetsysteme mit stark reduzierten systematischen Effekten eingerichtet und evaluiert.

Noch hat das Urkilogramm nicht ausgedient. Das Ziel, eine Neudefinition der Masseneinheit basierend auf Naturkonstanten mit der geforderten relativen Unsicherheit von $<10^{-8}$ zu erreichen, stellt für alle Projekte eine grosse Herausforderung dar. Es sind noch etliche schwierige experimentelle Probleme zu lösen. Es ist aber nur noch eine Frage der Zeit, bis wir dank der Watt-Waage des METAS und der anderen Experimente der nationalen Metrologieinstitute über eine neue Definition der Masseneinheit Kilogramm verfügen werden können.

Dr. Beat Jeckelmann
 Chef der Sektion Elektrizität, Akustik und Zeit, Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS), 3003 Bern-Wabern
 E-Mail: beat.jeckelmann@metas.ch
 Dr. Jürg Niederhauser
 Direktionsadjunkt, Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS), 3003 Bern-Wabern
 E-Mail: juerg.niederhauser@metas.ch

Abb. 1: Der schematische Aufbau der Watt-Waage des METAS

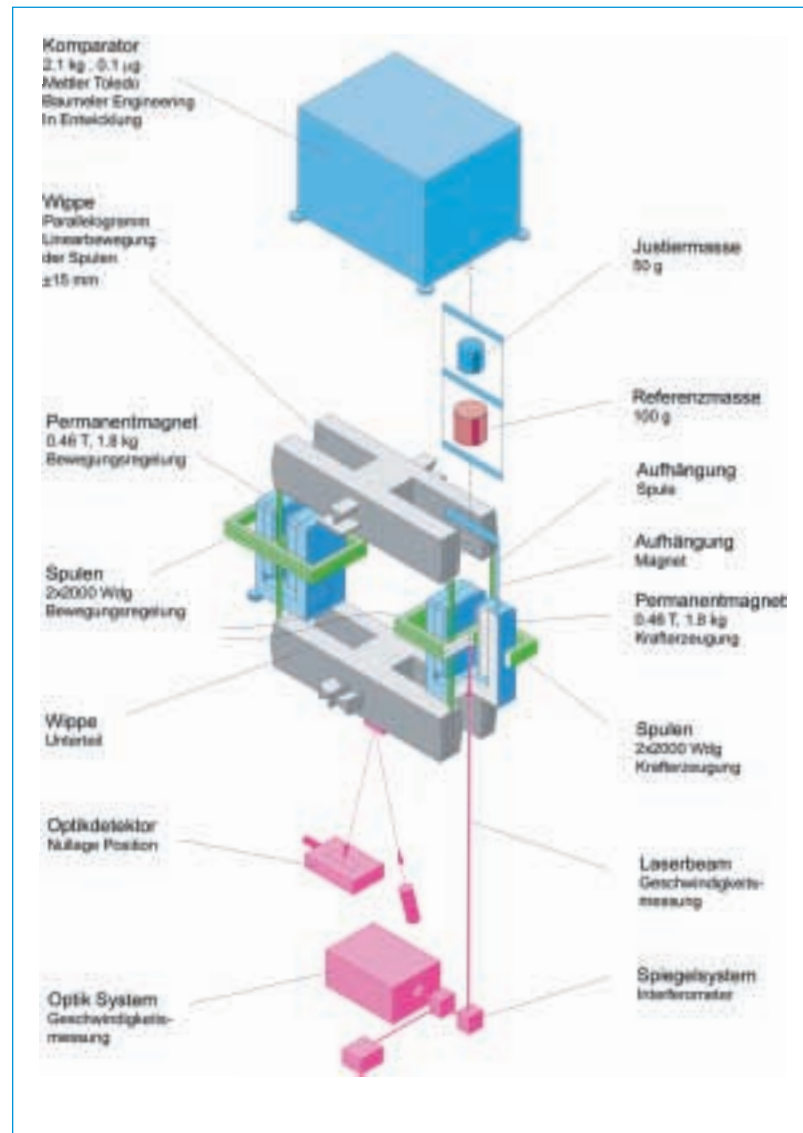


Abb. 2: Vergleich von Gewicht- mit elektromagnet. Kraft

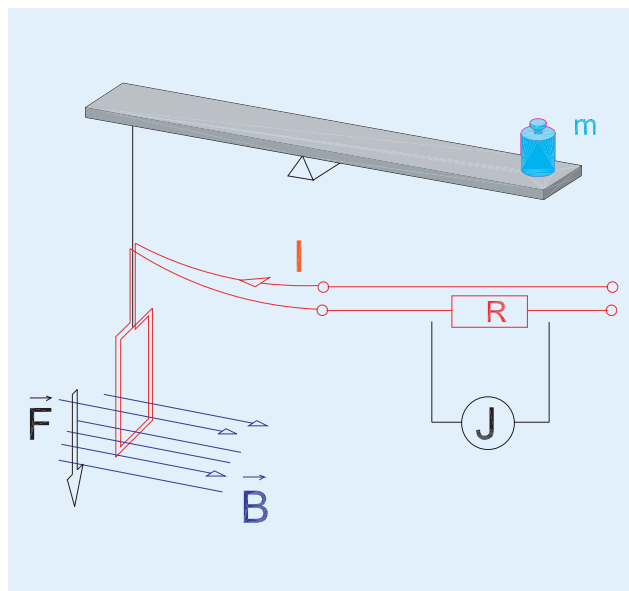


Abb. 3: Messung der induzierten Spannung

