

SI-Einheiten

Früher waren Längeneinheiten wie Fuß oder Elle willkürlich definiert. Dies wollte der französische Nationalkonvent im Jahr 1793 ändern und setzte ein neues Längenmaß fest: Der Meter sollte den 10-millionsten Teil des Erdquadranten auf dem Meridian von Paris betragen – also den zehnmillionsten Teil der Entfernung vom Nordpol über Paris zum Äquator. Ein Prototyp dieses Meters wurde 1795 in Messing gegossen.

Im 19. Jahrhundert kamen allerdings genauere Vermessungen der Erde zum Ergebnis, dass das Urmeter etwa 0,02 % zu kurz geraten war. Dennoch wurde an dem 1795 definierten Meter festgehalten – mit dem Ergebnis, dass der Erdmeridianquadrant nicht 10.000 km, sondern 10.001,966 km lang ist. Diese Länge gilt für den Meridian von Paris, andere Meridiane können andere Längen haben. Dies führte zu der Erkenntnis, dass die Erde kein exaktes Rotationsellipsoid ist, sondern eine unregelmäßige Form hat. Die Erde hatte sich damit als ungeeignet zur Definition des Meters erwiesen.

Am 20. Mai 1875 haben 17 Unterzeichnerstaaten einen Vertrag geschlossen, der als Internationale Meterkonvention bezeichnet wird. Gleichzeitig wurde das Internationale Büro für Maß und Gewicht (BIPM) gegründet, das seinen Sitz in Sèvres bei Paris hat; es führt alle vier Jahre die Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) durch, bei der die zentralen Angelegenheiten entschieden werden.

Zunächst war der Meter als die Länge eines konkreten Gegenstands festgesetzt – zuerst des Urmeters, seit 1889 dann des Internationalen Meterprototyps, der vom Internationalen Büro für Maß und Gewicht (BIPM) als Prototyp für die Einheit Meter eingeführt wurde. Dabei handelte es sich um einen Stab mit kreuzförmigem Querschnitt. Als Material wurde eine Platin-Iridium-Legierung im Verhältnis 90:10 gewählt. Die Länge des Meters wurde festgelegt als der Abstand der Mittelstriche zweier Strichgruppen auf dem auf einer konstanten Temperatur von 0 °C gehaltenen Stab. Es wurden 30 Kopien dieses Prototyps hergestellt und an nationale Eichinstitute übergeben.

Obgleich bei der Herstellung der Meterprototypen größter Wert auf Haltbarkeit und Unveränderbarkeit gelegt wurde, war doch klar, dass diese grundsätzlich vergänglich sind. Die Anfertigung von Kopien führte zwangsläufig zu Abweichungen und – ebenso wie regelmäßige Vergleiche der Kopien untereinander und mit dem Original – zum Risiko von Beschädigungen.



Detail eines Meter-Prototyps



Kilogramm-Prototyp

Bei der Internationalen Meterkonvention wurde 1875 auch die Einheit für die Masse festgelegt. Ursprünglich sollte ein Kilogramm der Masse von einem Liter Wasser entsprechen. Da sich eine solche Definition nicht für genaue Messungen eignet, wurde ein Prototyp hergestellt und im Sinne einer Maßverkörperung als Definition gewählt. Er wird in einem Tresor des Internationalen Büros für Maß und Gewicht (BIPM) in Sèvres bei Paris aufbewahrt. Es handelt sich um einen Zylinder von 39 Millimeter Höhe und 39 Millimeter Durchmesser, der aus einer Legierung von 90 % Platin und 10 % Iridium besteht. Vergleichsmessungen zwischen dem Prototypen und seinen Kopien über die letzten 100 Jahre haben gezeigt, dass in diesem Zeitraum zwischen dem Urkilogramm und seinen Kopien eine Masseveränderung von 50 μg aufgetreten ist, deren Ursache unbekannt ist.

Zusammen mit der Zeiteinheit Astronomische Sekunde bildeten die Einheiten Meter und Kilogramm ein dreidimensionales Einheitensystem, das als MKS-System bezeichnet wurde.

Was aber ist eine Astronomische Sekunde? Bis in die 1950er Jahre war die Sekunde als $1/86400$ eines mittleren Sonnentages definiert. Eine vom Sonnenstand und damit letztlich von der Erdrotation abgeleitete Zeitskala verläuft jedoch nicht streng gleichförmig, da die Rotationsgeschwindigkeit der Erde unregelmäßigen Schwankungen und einer langfristigen Verlangsamung unterliegt. Eine solche ungleichförmige Zeitskala ist für viele technische und wissenschaftliche Zwecke nicht brauchbar.

Die Tageslänge ist nicht konstant, weil die Geschwindigkeit der Erdrotation allmählich abnimmt. Dies veranlasste die Wissenschaft, im 20. Jahrhundert spezielle Zeitmaße einzuführen, von denen vier kurz erwähnt seien:

- Die **Weltzeit** wurde für das praktische Zusammenleben der Menschen auf der Welt koordiniert als UTC (**universal time co-ordinated**). Sie richtet sich nach der Erdrotation; ihr wird alle 1...3 Jahre eine Schaltsekunde nachgestellt.
- Die **Ephemeridenzeit** ET bezieht sich auf die sehr gleichmäßige Jahresbahn der Erde um die Sonne; sie wurde 1960 für Berechnungen im Sonnensystem eingeführt.
- Die international koordinierte **Atomzeit** basiert auf der SI-Sekunde und wird in Physik und Technik verwendet.
- Die **GPS-Zeit** läuft seit 1980 ohne jede Schaltsekunde, sodass sie heute (Stand Januar 2020) der UTC um 18 Sekunden voraus ist.

Der italienische Physiker GIOVANNI GIORGI zeigte 1901, dass man die mechanischen und elektrischen Einheiten zu einem kohärenten System mit ganzzahligen Exponenten zusammenführen kann, indem man das MKS-System um eine vierte Einheit erweitert. Die Internationale elektrotechnische Kommission (IEC) nimmt 1935 das GIORGI-System an, wobei die Frage nach der vierten Basiseinheit noch unbeantwortet bleibt; erst 1948 wird das Ampere in der bis 2019 gültigen Form definiert.

Die 10. CGPM erweitert 1954 das MKS-System um drei Basiseinheiten: das Ampere, das Kelvin (K) – bis 1968 noch als Grad Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) bezeichnet – sowie die Candela (cd). Auf der 11. CGPM 1960 erhält dieses erweiterte MKS-System die französische Bezeichnung **Système International d'Unités SI** („Internationales Einheitensystem“).

Auf der 14. CGPM kommt 1971 das Mol (mol) als siebte und bislang letzte Basiseinheit hinzu; es wird an die 6. Stelle zwischen Kelvin und Candela eingeordnet.

Auf der 16. CGPM erhält 1979 die Candela ihre heute gültige Definition und wird dabei mit dem Watt verknüpft. Dadurch werden die photometrischen Einheiten an das MKS-System angebunden. Die 17. CGPM definiert 1983 das Meter neu, indem der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ein fester Wert zugewiesen wird.

Im November 2018 beschließt die 26. CGPM mit Wirkung zum 20. Mai 2019 eine grundlegende Reform: Alle Basiseinheiten und damit alle Einheiten überhaupt werden nun auf sieben physikalische Konstanten zurückgeführt, denen feste Werte zugewiesen werden (s. Seite 365 des Lehrbuches). Dadurch werden die Einheiten von der Realisierung und deren begrenzter Genauigkeit unabhängig.

Zur Zeit (Januar 2020) sind 62 Staaten Vertragspartei der Meterkonvention. Daneben hat die CGPM noch 41 „assoziierte Mitgliedsstaaten“, die sich nicht in vollem Umfang an der Finanzierung beteiligen und nicht stimmberechtigt sind.

Da die Vorschläge der CGPM keinen bindenden Charakter haben, ist es Aufgabe der Staaten, entsprechende Gesetze zu erlassen, welche die Verwendung der zulässigen Einheiten vorschreiben. Die Bundesrepublik Deutschland hat am 2. Juli 1969 das Gesetz über Einheiten im Messwesen beschlossen, das seitdem mehrfach aktualisiert wurde.



GIOVANNI GIORGI
(1871 - 1950) schlug 1901 die Ergänzung des MKS-Systems vor. Er zeigte, dass es möglich war, die drei Grundeinheiten der Mechanik (Meter, Kilogramm, Sekunde) mit einer vierten aus dem Bereich des Elektromagnetismus – beispielsweise Ampere oder Ohm – zu kombinieren.

Die USA, Myanmar und Liberia haben das SI noch nicht verbindlich eingeführt.