

Über die Entwicklung des Internationalen Einheitensystems

Die Wurzeln des heutigen Internationalen Einheitensystems (SI) gehen auf die Meterkonvention von 1875 zurück. Heute ist das SI in fast allen Industriestaaten verbindlich eingeführt. Es ermöglicht Messungen mit der nach dem aktuellen Stand der Technik erreichbaren Genauigkeit. Die im SI ausgedrückten Messresultate sind vergleichbar, auch wenn zwischen zwei Messungen lange Zeitabstände liegen. Die ständige Entwicklung des SI, ausgehend von den Urmassen der Meterkonvention bis zu den modernen Einheitsdefinitionen basierend auf Naturkonstanten, widerspiegelt die rasanten Fortschritte in Wissenschaft und Technik.

Beat Jeckelmann

Die Festlegung eines Masssystems, das in Wissenschaft, Technik, im Handel, im Umweltschutz und im Bevölkerungsschutz eingesetzt werden kann, ist für die moderne Gesellschaft von grösster Bedeutung. Die Wahl eines Einheitensystems ist nicht ein streng wissenschaftlicher Vorgang. Sie ist von historischen Kompatibilitätsbedingungen, praktischen Erwägungen, der Kenntnis von physikalischen Zusammenhängen, aber auch von Willkür gekennzeichnet. So ist auch das heute weltweit eingeführte Internationale Einheitensystem das Resultat einer langen historischen Entwicklung. Dabei wurde versucht, möglichst vielen Anwendergruppen und ihren Bedürfnissen gerecht zu werden und mit der Entwicklung von Wissenschaft und Technik Schritt zu halten.

Im Handel sind praktische, leicht anwendbare Einheiten gefragt. Im regionalen Handel genügten im Mittelalter lokal durch die Regierung festgesetzte Einheitsmasse für Länge, Gewicht und Volumen (z. B. Kornmasse). Später mit der Entwicklung des Welthandels mussten die Einheiten nicht nur regional, sondern weltweit einheitlich festgelegt werden.

In der industriellen Fertigung ist die Verfügbarkeit von international festgelegten und anerkannten Einheiten ein wichtiges Element, das zum Abbau



1: Am 23. September 1999 lenkt ein Navigationsfehler der Marsmission «Climate Orbiter» die Sonde 57 km anstatt 80 Meilen am Mars vorbei, so dass die Sonde im Marsorbit verglüht.

technischer Handelshemmnisse beiträgt. Damit ein in der Schweiz hergestelltes Bauteil z. B. in den USA in eine Maschine eingebaut werden kann, müssen die in den beiden Ländern verwendeten Längeneinheiten in einem exakt definierten Verhältnis stehen und mit der benötigten Genauigkeit realisiert werden. Ein Industrieller verlangt, dass die in seinem Land verfügbaren Einheiten weltweit anwendbar sind und anerkannt werden.

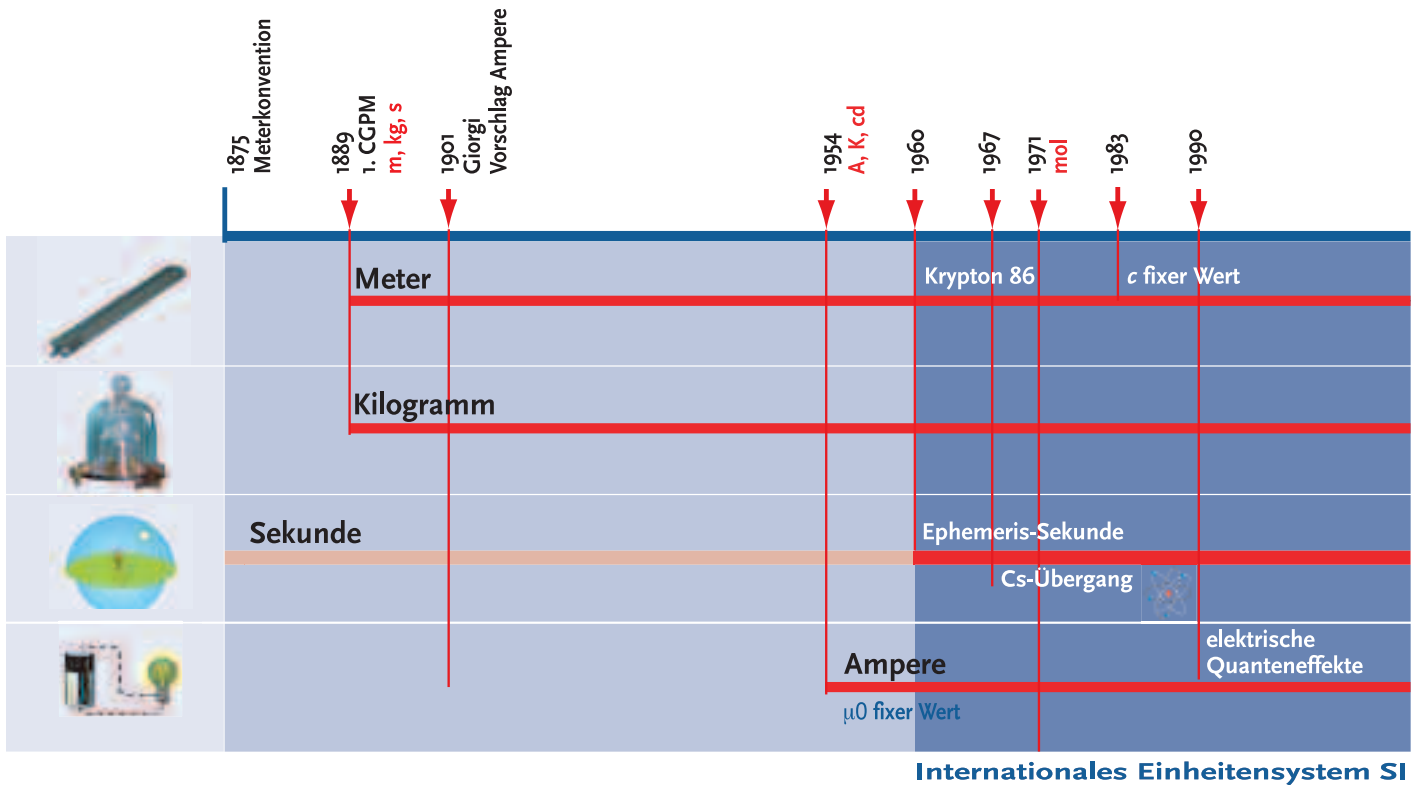
In der Wissenschaft ist ein widerspruchsfreies Einheitensystem gefragt, mit dem die untersuchten Grössen möglichst genau gemessen werden können. Die Resultate zweier Forschergruppen, die in voneinander entfernten Labors in ähnlichen Fachgebieten arbeiten, können nur verglichen und gegenseitig genutzt werden, wenn es klar ist, welche Einheiten für die Messungen benutzt wurden.

In vielen Fachgebieten müssen über lange Zeiträume durchgeführte Messungen miteinander verglichen werden können. Will man zum Beispiel Aussagen über die längerfristige Änderung des Ozongehalts in der oberen Atmosphäre machen, sind Messungen über mehrere Jahrzehnte notwendig. Klare Aussagen sind in einem solchen Fall nur möglich, wenn die zu Beginn der Studie gemachten Messungen mit denjenigen am Ende kompatibel sind. Die verwendeten Einheiten müssen deshalb über eine gute zeitliche Stabilität verfügen.

Kurze Geschichte des SI

Die Anfänge des metrischen Systems

Seit alters her braucht es für den redlichen Handel mit Gütern vom Staat oder von der Obrigkeit festgesetzte Masseinheiten für Länge, Gewicht und Volumen. Noch im 18. Jahrhundert herrschte jedoch bezüglich Masseinheiten ein grosses Chaos. Jede Gegend hatte ihre eigenen Einheiten. Dies erschwerte den Handel und begünstigte Missbrauch und Betrug. Die Impulse für die Verbesserung dieser Situation kamen aus Frankreich. Zur Zeit der französischen Revolution reifte die Idee, die Längeneinheit auf eine von der Natur vorgegebene Grösse zurückzuführen. So wurde der Meter 1794 als der 40-millionste Teil des Erdmeri-



Internationales Einheitensystem SI

2: Zeitliche Entwicklung des SI: Die senkrechten roten Pfeile markieren die Zeitpunkte der Einführung oder der Neudefinition der Basiseinheiten durch die Generalkonferenz für Mass und Gewicht (CGPM).

dians definiert. Zur Bestimmung der neuen Längeneinheit wurde die Distanz zwischen Dünkirchen und Barcelona geodätisch vermessen. Für die Masseneinheit, die zunächst mit Grave benannt wurde, wählte man die Masse eines Kubikdezimeters Wasser. Später änderte man den Namen zu Kilogramm und 1799 wurde schliesslich das Kilogramm durch die Masse eines Platinzylinders definiert, die einem Kubikdezimeter Wasser bei grösster Dichte (4 °C) entsprach. Der aus der Vermessung des Erdumfangs abgeleitete Meter wurde auf einen quaderförmigen Platinstab übertragen. Die neuen Urmasse wurden am 22. Juni 1799 in das Archiv der Republik in Paris überführt. Dieses Ereignis kann als erster Schritt in der Entwicklung des heutigen Internationalen Einheitensystems angesehen werden.

Einführung des CGS-Systems

1832 setzte sich Gauss stark für die Anwendung des metrischen Systems in der Physik ein. Er führte ein Einheitensystem, basierend auf dem Millimeter, dem Gramm und der in der Astronomie definierten Sekunde, ein. Gauss und Weber erweiterten das System später auf elektrische Einheiten. In den 1860er-Jahren entwickelten Maxwell

und Thomson das Konzept für ein kohärentes Einheitensystem mit Basiseinheiten und abgeleiteten Einheiten, das schliesslich 1874 zu einem System, basierend auf den drei mechanischen Einheiten Zentimeter, Gramm und Sekunde, dem sogenannten CGS-System, führte. Der Begriff «kohärent» bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die abgeleiteten Einheiten durch Multiplikation und Division von den Basiseinheiten abgeleitet werden ohne die Verwendung zusätzlicher Zahlenfaktoren. Für lange Zeit danach basierte die Entwicklung der experimentellen Physik auf diesem System.

In der Elektrizität fand das CGS-System zunächst jedoch noch nicht grossen Anklang, weil die kohärent abgeleiteten elektrischen CGS-Einheiten als unpraktisch empfunden wurden. Aus diesem Grund kam es in den 1880er-Jahren zur Definition von praktischen elektrischen Einheiten.

Vom MKS zum SI-Einheitensystem

Parallel zur Entwicklung in der Physik setzte sich in Frankreich das metrische System mit Kilogramm und Meter im Alltag erst ab 1840 richtig durch. Andere Länder, darunter auch die Schweiz, schlossen sich nach und nach dem französischen System an und verein-

barten schliesslich im Jahr 1875 in der Meterkonvention die Einführung der metrischen Masse. Es wurden neue Prototypen für den Meter und das Kilogramm aus einer Platin-Iridium-Legierung hergestellt. Diese neuen, als Internationale Prototypen bezeichneten Normale wurden 1889 von der 1. Generalkonferenz für Mass und Gewicht (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM) offiziell angenommen. Zusammen mit der Sekunde bildeten diese Einheiten ein System mit drei Basiseinheiten, das so genannte MKS-System.

1901 zeigte Giorgi eine Möglichkeit auf, das MKS-System mit den praktischen elektrischen Einheiten zu verbinden. Er schlug ein kohärentes System vor, das nebst den mechanischen Basiseinheiten m, kg und s eine zusätzliche Basiseinheit elektrischer Natur, das Ampere oder das Ohm, umfasste.

Es dauerte bis in die 1920er-Jahre, bis Giorgis Vorschlag auch in den Gremien der Meterkonvention und in anderen internationalen Organisationen diskutiert wurde. 1939 schlug das Konsultativkomitee für Elektrizität (CCE), ein Fachgremium unter der Meterkonvention, ein erweitertes Einheitensystem mit dem Ampere als zusätzlicher

Basiseinheit, das MKSA-System, vor. Erst 1954 wurde das Ampere schliesslich zusammen mit dem Kelvin als Basiseinheit für die thermodynamische Temperatur und der Candela für die Lichtstärke von der 10. CGPM offiziell eingeführt.

Den heute noch gültigen Name «Internationales Einheitensystem (SI)» führte die 11. CGPM im Jahr 1960 ein. 1971 schliesslich definierte die 14. CGPM das Mol als Einheit für die Stoffmenge und erhöhte damit die Zahl der Basiseinheiten im SI auf sieben.

Die wichtigsten Meilensteine bei der Entwicklung des SI sind in Illustration 2 dargestellt. Für weitere Informationen sei auf Referenz [1] verwiesen, die als Grundlage für die hier wiedergegebene Zusammenfassung diente.

Die Meterkonvention und das SI

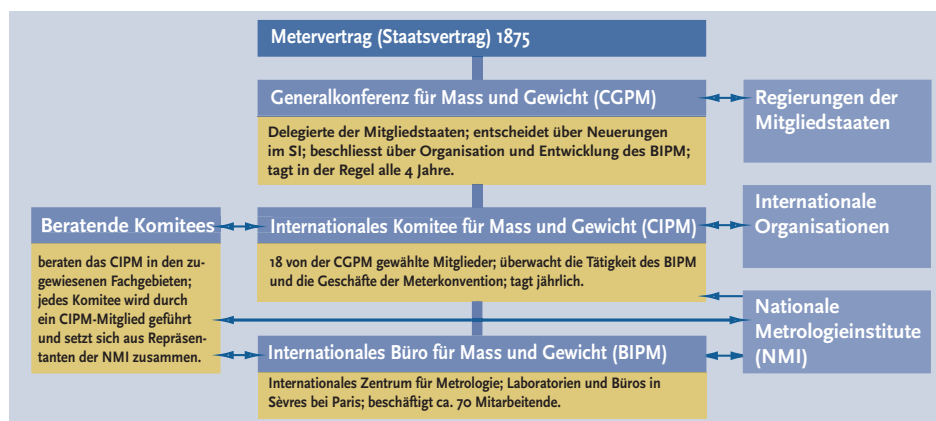
Die Meterkonvention ist ein Staatsvertrag [2], der 1875 in Paris von Vertretern aus 17 Staaten (darunter die Schweiz) unterzeichnet wurde. Mit dem Vertrag wurde das Internationale Büro für Mass und Gewicht (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) bei Sèvres in Paris gegründet und seine Mission und Finanzierung festgelegt. Mit der Meterkonvention wurde eine permanente organisatorische Struktur geschaffen, die es den Mitgliedstaaten erlaubt, in allen die Masseinheiten betreffenden Angelegenheiten gemeinsam zu handeln. Die Generalkonferenz für Mass und Gewicht, das oberste Organ unter der Konvention, beschliesst insbesondere auf Antrag des Internationalen Komitees für Mass und Gewicht und seiner beratenden Organe die Änderungen im Internationalen Einheitensystem und legt die Entwicklungsschwerpunkte fest. Heute umfasst die Meterkonvention 51 Mitgliedstaaten. Die Organe der Konvention und ihre Aufgaben sind in Illustration 4 dargestellt.

Aufbau des Internationalen Einheitensystems

Basiseinheiten und abgeleitete Einheiten
Messen heisst, den Wert einer Grösse durch Vergleich mit einem Massstab bzw. einer Einheit festlegen. Eine Mes-

Einheit	Symbol	Definition
Meter	m	Der Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer $1/299\,792\,458$ Sekunde durchläuft.
Kilogramm	kg	Das Kilogramm ist gleich der Masse des Internationalen Kilogramm-Prototyps.
Sekunde	s	Die Sekunde ist das $9\,192\,631\,770$ -fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung.
Ampere	A	Das Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes, der, durch zwei im Vakuum parallel im Abstand 1 Meter voneinander angeordnete, geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt fliessend, zwischen diesen Leitern je 1 Meter Leiterlänge die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde.
Kelvin	K	Das Kelvin ist der $273,16$ te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes von Wasser.
Mol	mol	Das Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das aus ebenso vielen Einzelteilchen besteht, wie Atome in $0,012$ Kilogramm des Nuklids ^{12}C enthalten sind. Bei Verwendung des Mols müssen die Einzelteilchen spezifiziert sein und können Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen sowie andere Teilchen oder Gruppen solcher Teilchen genau angegebener Zusammensetzung sein.
Candela	cd	Die Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz 540×10^{12} Hertz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung $1/683$ Watt pro Steradian beträgt.

3: Definition der Basiseinheiten im SI.



4: Organe der Meterkonvention und ihre Aufgaben.

sung kann demnach nicht genauer sein als die benutzte Einheit. Messresultate sind nur vergleichbar, wenn das Verhältnis der für die Messungen verwendeten Einheiten bekannt ist. Wir sind uns gewohnt, Resultate einer Messung z. B. in der folgenden Form aufzuschreiben: $L = 12 \text{ m}$; $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$, $m = 2 \text{ kg}$.

Die Symbole auf der linken Seite der Gleichungen bezeichnen die Messgrössen (Länge, Temperatur und Mas-

se in unserem Beispiel). Die Werte von Grössen werden als Produkt eines numerischen Wertes mit einer Einheit (Meter, Grad Celsius und Kilogramm im Beispiel) angegeben. Es gibt Konventionen für die Wahl der Symbole und ihre Schreibweise.

Physikalische Grössen sind abstrakte Begriffe, die eingeführt werden, um physikalische Sachverhalte zu beschreiben. Physikalische Theorien be-

schreiben die Eigenschaften von Grössen und ihre Beziehung untereinander. Ein Einheitensystem legt – unter Berücksichtigung der physikalischen Sachverhalte – einen Satz von Einheiten fest, damit alle in der Naturwissenschaft und Technik verwendeten Grössen widerspruchsfrei gemessen werden können. Eine Einführung in die Thematik der Grössen, Einheiten und Einheitensysteme ist z. B. in Referenz [3] zu finden.

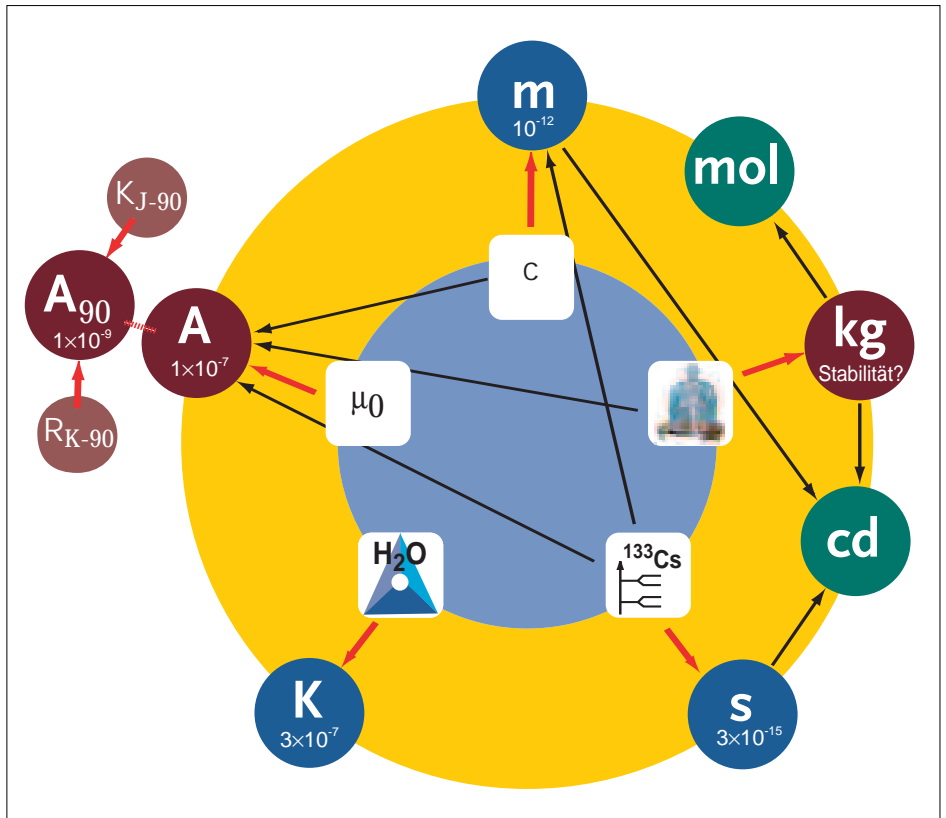
Im SI gibt es zwei Klassen von Einheiten: die Basiseinheiten und die abgeleiteten Einheiten. Die Unterscheidung geschieht eher nach praktischen Erwägungen und folgt nicht ausschliesslich physikalischen Gesetzmässigkeiten. Die Basiseinheiten haben die Eigenschaft, dass ihre Grösse willkürlich festgelegt wird. Im SI gibt es sieben Basiseinheiten:

- der Meter (Symbol m, Einheit der Länge),
- das Kilogramm (kg, Masse),
- die Sekunde (s, Zeitintervall),
- das Ampere (A, elektrische Stromstärke),
- das Kelvin (K, Temperatur),
- das Mol (mol, Stoffmenge),
- die Candela (cd, Lichtstärke).

Die abgeleiteten Einheiten werden entsprechend den algebraischen Beziehungen zwischen den betroffenen Grössen durch Kombinationen von Basiseinheiten definiert (z. B. Geschwindigkeit $v = L / t$; Einheit: m/s). Häufig verwendete abgeleitete Einheiten wurden mit eigenen Namen versehen. So wird z. B. die im SI die abgeleitete Kraft-Einheit = 1 kg m/s² mit Newton (Symbol N) bezeichnet. Eine wichtige Eigenschaft der abgeleiteten Einheiten ist ihre Kohärenz, das heisst, dass sämtliche abgeleiteten Einheiten durch eine Kombination von Basiseinheiten zu Stande kommen, in denen nur der Zahlenfaktor 1 vorkommt.

Definitionen der Basiseinheiten

In Tabelle 3 sind die heute aktuellen Definitionen der Basiseinheiten im SI aufgeführt. Bei einer näheren Betrachtung fällt auf, dass sich die Definitionen in drei verschiedene Klassen einteilen lassen:



5: Aufbau des SI: Im inneren Kreis sind die Festlegungen dargestellt, die den Einheitendefinitionen zu Grunde liegen (im Uhrzeigersinn: Kg-Artefakt, Frequenz eines Hyperfeinübergangs im Cs-Atom, Tripelpunkt von Wasser, magnetische Feldkonstante, Lichtgeschwindigkeit). Auf dem äusseren Kreis sind die sieben Basiseinheiten aufgeführt. Die Zahlenwerte bei den Basiseinheiten geben die relative Unsicherheit an, die bei der Realisierung der entsprechenden Basiseinheit erreicht wird. Die elektrischen Einheiten werden seit 1990 durch «praktische» elektrische Einheiten dargestellt. Sie sind gekennzeichnet durch den Index 90 und basieren auf den durch Konvention festgelegten Werten für die von-Klitzing-Konstante R_K und die Josephson-Konstante K_J (Kasten 6).

Ein geeignetes Artefakt wird als Einheitenrealisierung für die gewünschte Grösse ausgewählt. Im heutigen SI ist nur noch das Kilogramm auf diese Weise definiert: Das Kilogramm ist gleich der Masse des Internationalen Kilogramm-Prototyps, eines Zylinders aus einer Platin-Iridium-Legierung, der am BIPM in Paris aufbewahrt wird. Diese Definition hat offensichtlich einen lokalen Charakter. Die Einheit ist nur an einem Ort, dem BIPM, verfügbar. Die Weitergabe der Einheit geschieht durch Vergleich mit dem Urnormal, die Genauigkeit ist damit durch die Genauigkeit der Vergleichsmethode beschränkt. Da das Urkilogramm ein makroskopischer Körper mit einer instabilen Oberfläche ist, ist die zeitliche Entwicklung der Einheit nicht genau bekannt. Dies ist der grösste Nachteil dieser Definition.

Die Einheitenrealisierung kann auch auf der Basis eines geeigneten physikalischen Prozesses erfolgen. So ist die

Sekunde über die Periodendauer der Strahlung eines atomaren Übergangs im Cäsiumatom definiert. Für die Realisierung der Temperatureinheit Kelvin stützt man sich auf die Tatsache, dass die thermodynamische Temperatur des Wassers beim Tripelpunkt einen stabilen, von Umgebungseinflüssen unabhängigen Wert einnimmt. Der Tripelpunkt ist der Zustand, bei dem alle drei Phasen des Wassers (fest, flüssig und gasförmig) miteinander im Gleichgewicht sind. Die auf diese Weise abgestützten Einheitenrealisierungen haben einen universellen Charakter. Das heisst, die Einheiten sind überall und zu jeder Zeit realisierbar. Alle Cs-Atome haben die gleichen Eigenschaften, die sich in der Zeit nicht ändern. Die Genauigkeit der Einheitenrealisierung ist durch den gewählten physikalischen Prozess selbst beschränkt.

Einheiten können schliesslich auch auf Naturkonstanten abgestützt werden. Diese treten auch als Proportio-

Bemerkung zu den elektrischen Einheiten im SI

Seit einiger Zeit sind quantenmechanische Effekte bekannt, mit deren Hilfe hoch stabile elektrische Normale realisiert werden können. So können, basierend auf Josephson- und Quanten-Hall-Effekten, Spannungs- und Widerstandsmessungen mit einer Reproduzierbarkeit von 10^{-9} durchgeführt werden. Dabei ist die Spannung des Josephsonnormals umgekehrt proportional zur Josephson-Konstanten $K_J = 2e/h$. Der quantisierte Hall Widerstand ist proportional zu $R_K = h/e^2$. Josephson- und Quantennormal sind damit direkt auf die elektrische Elementarladung e und die Planck'sche Konstante h rückverfolgbar. K_J und R_K können im SI mit einer relativen Unsicherheit um 10^{-7} bestimmt werden. Das ist etwa 100 mal schlechter als die Reproduzierbarkeit der

Quanteneffekte im Labor. Dieser Umstand hat dazu geführt, dass das Internationale Komitee für Mass und Gewicht auf den 1.1.1990 durch Konvention festgelegte Werte K_{J-90} und R_{K-90} eingeführt hat:

$$K_{J-90} = 483\,597.9 \text{ GHz V}^{-1}$$

$$R_{K-90} = 25\,812.807 \text{ } \Omega$$

Aus der Analyse aller für die Festlegung benutzten Messresultate ergab sich ein Wert von 2×10^{-7} für die relative Unsicherheit R_K im SI und von 4×10^{-7} für K_J . Die durch Konvention festgelegten Werte haben zu einer weltweiten Vereinheitlichung und Verbesserung der elektrischen Kalibrierresultate geführt. Die im Vergleich zur Reproduzierbarkeit grosse Unsicherheit der Konstanten im SI fällt nur dort ins Gewicht, wo elektrische Einheiten mit mechanischen verknüpft werden.

eher unpraktisch und seine Einführung hätte daher kaum Chancen.

Umgekehrt lässt sich auch die Zahl der Basiseinheiten erhöhen. Betrachten wir dazu als Beispiel die Messung des Volumens eines Würfels mit der Seitenlänge l . Es gilt: $V = l^3$.

Die Seitenlänge wird in Metern gemessen und die abgeleitete Einheit des Volumens ist m^3 . Allgemeiner können wir unsere Beziehung zwischen Seitenlänge des Würfels und Volumen auch darstellen als $V = k \cdot l^3$.

Im SI ist die neu eingeführte Proportionalitätskonstante $k = 1$. Wir könnten uns jetzt aus praktischen Gründen entscheiden, eine neue Basiseinheit für das Volumen einzuführen, die wir mit «Fass» (Formelzeichen f) bezeichnen. Die Definition der Einheit könnte lauten: «Ein Fass ist das Volumen, das dem eines Würfels mit der Seitenlänge 0.54 m entspricht». Damit gilt:

$$k = \frac{1}{0.54^3} \frac{f}{\text{m}^3}$$

Mit einer solchen Festlegung der Proportionalitätskonstanten k ordnen wir der neuen Volumeneinheit eine eigene Dimension zu. Eine solche Erweiterung macht natürlich nur Sinn, wenn dazu eine praktische Notwendigkeit besteht. Dies ist für das vorliegende Beispiel kaum der Fall, es soll nur das Prinzip erläutern. Wir könnten als weitere Alternative ein ausgewähltes Volumenartefakt für die Definition der neuen Basiseinheit beziehen (analog kg-Definition). In diesem Fall müsste die Konstante k experimentell ermittelt werden und wäre mit einer Unsicherheit behaftet. Dies zeigt auch, dass bei der Definition einer Basiseinheit, wenn immer möglich, eine Proportionalitätskonstante festgelegt werden sollte, die physikalische Grössen in einer Gleichung miteinander in Beziehung setzt. Genau dies geschieht, wie im letzten Abschnitt erläutert, bei der Abstützung einer Einheit auf eine Naturkonstante.

Künftige Entwicklungen

Wie in den letzten hundert Jahren wird sich das SI auch in Zukunft entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik und gemäss den Bedürfnissen der Gesellschaft weiter entwi-

6. Elektrische Einheiten.

nalitätskonstanten bzw. quantitative Verknüpfungspunkte in den physikalischen Theorien auf. Es handelt sich hier um «natürliche» Einheiten; sie bieten sich in idealer Weise auch als Grundlage für die Festlegung von SI-Einheiten an. Zur Zeit sind der Meter und das Ampere Beispiele für diese Einheitenklasse. Die Meterdefinition ordnet der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum einen festen Wert zu. Im Fall der Amperedefinition wird die magnetische Permeabilität des Vakuums festgelegt. Basiseinheiten dieses Typs haben universellen Charakter wie die des Typs 2. Sie sind jedoch nicht an bestimmte physikalische Systeme gebunden, was eine steige Verbesserung der Realisierung mit dem Fortschritt der Physik erlaubt.

Im heutigen SI sind noch alle drei Einheitentypen vorhanden (Illustration 5). Der Trend in Richtung eines Systems, in dem alle Basiseinheiten auf Naturkonstanten abstützen, ist jedoch klar ersichtlich.

Wie viele Basiseinheiten braucht es?

Die Wahl und die Anzahl der Basiseinheiten in einem Einheitensystem sind willkürlich. Im Prinzip könnten wir ein System aufbauen, das mit einer einzigen dimensionsbehafteten Basiseinheit auskommt. Umgekehrt könnten wir

den sieben Basiseinheiten des SI weitere hinzufügen. Diese Aussagen sollen an zwei einfachen Beispielen erläutert werden.

Elektromagnetische Strahlung pflanzt sich im Vakuum mit der konstanten Lichtgeschwindigkeit c fort. Dabei steht jede durch die Strahlung zurückgelegte Strecke mit einem Zeitintervall t durch folgende einfache Gleichung in Beziehung: $l = c \cdot t$.

Im SI basiert die Meterdefinition auf dieser Gesetzmässigkeit. In der Definition wird der Lichtgeschwindigkeit ein fixer Wert von 299 792 458 m/s zugeordnet. Damit werden der Meter als Längeneinheit und die Dimension Länge definiert und eingeführt. Genau so gut könnten wir uns entscheiden, der Lichtgeschwindigkeit den fixen dimensionslosen Wert $c = 1$ zuzuordnen. Damit hätten Länge und Zeit dieselbe Dimension. Unser geändertes System kommt damit mit einer Basiseinheit weniger aus als das SI. Länge wird in Sekunden gemessen, d. h. in Anzahl Zeiteinheiten, die das Licht im Vakuum braucht, um die zu messende Strecke zurückzulegen. Diese Betrachtungsweise ist für Astronomen nicht aussergewöhnlich, messen sie doch häufig Distanzen im Universum in Lichtjahren. Für den Gebrauch im täglichen Leben wäre das reduzierte System jedoch

ckeln. Neue Entdeckungen und Fortschritte in der Wissenschaft werden verbesserte Einheitendefinitionen und -realisierungen möglich machen. Andererseits sind es oft auch die Verbesserungen im Einheitensystem, die zu einer verbesserten Messtechnik und damit zu Fortschritten in Technik und Wissenschaft führen.

Ein Thema, das die Metrologen gegenwärtig stark beschäftigt, ist die Suche nach einer verbesserten Definition des Kilogramms. Die Einheit der Masse ist die letzte Basiseinheit im SI, die immer noch auf einem Artefakt, dem Kilogramm-Prototyp, beruht. Die Hauptprobleme dieser Definition sind die begrenzte Stabilität dieses Artefakts und seine eingeschränkte Verfügbarkeit. Das kg hat sich aber bis heute allen Bemühungen nach einer Definition auf der Ba-

sis von Naturkonstanten widersetzt, weil die dazu notwendigen Experimente extrem schwierig sind. Als Vorbereitung für eine künftige Neudefinition sind Experimente notwendig, die das kg mit einer relativen Genauigkeit von besser als 10^{-8} mit einer Naturkonstanten in Beziehung setzen. Zurzeit sind mehrere Experimente, darunter eines am METAS, im Gang, die das Potential haben, dieses Genauigkeitsziel in absehbarer Zukunft erreichen zu können.

Daneben ist auch eine Neudefinition der Temperatureinheit, basierend auf einer Naturkonstante, in Reichweite. Und auch auf dem Gebiet der Frequenzmessung machen neuste Entwicklungen der bestehenden Sekundenrealisierung Konkurrenz, obwohl die Sekunde heute die mit Abstand am genauesten realisierte Einheit des SI ist.

Développement du Système international d'unités

Les origines de l'actuel Système international d'unités (SI) remontent à la Convention du mètre de 1875. Le SI est aujourd'hui obligatoire dans presque tous les pays industrialisés. Il permet de mesurer avec l'exactitude atteignable dans l'état actuel de la technique. Les résultats de mesure exprimés en unités SI sont comparables, même si de longs intervalles séparent deux mesures. Des étalons prototypes de la Convention du mètre aux définitions modernes des unités basées sur des constantes naturelles, le développement continu du SI reflète les progrès fulgurants de la science et de la technique.

Sviluppo del sistema unitario internazionale

L'attuale sistema unitario internazionale (SI), oggi introdotto con effetto vincolante in tutti i Paesi industrializzati, affonda le sue radici nella Convenzione del Metro del 1875. Il SI permette di effettuare misurazioni con l'accuratezza raggiungibile secondo l'attuale stato della tecnica. I risultati di misurazione espressi in unità SI sono comparabili, anche se tra una misurazione e l'altra intercorre un lungo lasso di tempo. Il costante sviluppo del SI, che va dai prototipi campioni della Convenzione del Metro fino alle moderne definizioni unitarie basate su costanti naturali, riflette i rapidi progressi conseguiti nel campo della scienza e della tecnica.

Referenzen

- [1] The International System of Units, BIPM, 7th edition, 1998.
- [2] Systematische Sammlung des Bundesrechts, SR 0.941.291, (www.admin.ch/ch/d/sr/co_941_291.html).
- [3] U. Feller, Über Grössen, Einheiten und Einheitensysteme, OFMETInfo, Vol. 5, Nr. 1 und Nr. 3, 1998.



Dr. Beat Jeckelmann, Sektionschef Elektrizität, Akustik und Zeit, Telefon +41 31 32 33 297, beat.jeckelmann@metas.ch

Development of the International System of Units

The roots of today's International System of Units (SI) date back to the Meter Convention of 1875. The SI has now been introduced legally in most industrial nations. It enables measurements to an accuracy corresponding to the current level of technology. Measurement results issued in SI are comparable, even if longer periods of time lie between the two measurements. The continuous development of the SI, starting with the standard prototypes of the Meter Convention to the modern definitions of units based on universal constants, reflects the rapid progress in science and technology.