

Eine Revolution im metrischen System

David Auerbach

*«Le Système métrique
A tous les temps
A tous les peuples»
(Für alle Zeiten, für alle Völker!)*

Einführung

In wissenschaftlichen und populären Zeitschriften auf der ganzen Welt wurde die Ankündigung einer Gruppe von Wissenschaftlern aus dem BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) am 16. November 2018 im französischen Versailles als grösste Revolution in der Metrologie – der Messkunst – seit ihrer Gründung nach der Französischen Revolution gefeiert. Was war das für ein Beschluss, auf den sich Delegierte aus rund hundert Staaten einstimmig geeinigt haben und der am 20. Mai 2019 in Kraft trat? Wir beginnen mit der Frage: Was sind die Aufgaben und Ziele des BIPM?

- Qualitäten festlegen (im metrologischen Jargon: «Dimensionen», z.B. Geschwindigkeit), die zur Beschreibung und Messung der physikalischen Welt verwendet werden;

Dies ist ein laufendes Projekt, das uns in diesem Artikel nicht beschäftigt.

- Sich auf eine einzige minimale kohärente (ohne Widersprüche) Untergruppe (SI statt z.B. Cgs, Gauss oder FPS-System) von Dimensionen («Basisdimensionen», z.B. Länge) zu einigen, in Bezug auf die alle anderen («abgeleitete Dimensionen», z.B. Geschwindigkeit) ausgedrückt werden können;

Dies geschah 1971 mit der Einführung des SI (Système International d'Unités, populär als metrisches System bekannt) bei der 14. CGPM (Internationale Generalkonferenz für Mass und Gewicht).

- Das SI «zu harmonisieren». Dieser völkerrechtliche Begriff bedeutet: zu vergleichen, zu diskutieren, vereinbaren, koordinieren, verbreiten – d.h. Kapazitäten aufzubauen, um Wissenschaft und Handel für alle Zeiten und Orte zu globalisieren.
- die Genauigkeit dieser Einheiten bei der Messung stets zu verbessern (bzw. Messfehler zu reduzieren).

Beides sind laufende Projekte, die hier ebenfalls nicht behandelt werden.

- eine zufriedenstellende Definition für jede Einheit der sieben Basisdimensionen: Masse (Einheit: Kilogramm), Stoffmenge (Mol), Länge

(Meter), Zeit (Sekunde), Licht (Candela), Wärme (Kelvin) und elektrische Stromstärke (Ampere) zu finden.

Dies ist ein seit 1971 laufendes Projekt und wird das Hauptthema dieses Artikels sein.

Es handelt sich hier nicht um eine systematische Studie zur Verwendung des neuen Systems, sondern wir wollen den Weg schildern, der begangen wurde, um den Wunsch nach immer präziseren Definitionen zu erfüllen. Beginnen wir mit der Geschichte des Meters, da dort fast alle Probleme auftreten, die sich auch bei den anderen Einheiten stellen.

Länge und das neue Meter

Das historische Verfahren verwendete die Längen menschlicher Glieder als Standard (da war es Pech, wenn der Stoffverkäufer klein war). Eine Vereinheitlichung erfolgte, indem man die Masse des Herrschers als Standard festlegte, z.B. die Elle des Pharos (Ellenbogen + Hand): Diese primäre Elle wurde in Granit geschnitten, und Maurer hatten hölzerne sekundäre Ellen, die jeden Monat neu kalibriert werden mussten, ansonsten drohte die Todesstrafe. Solche Masse waren offensichtlich von Ort zu Ort verschieden. Im Geiste der Gleichheit und Brüderlichkeit kam dann der Ruf der französischen Revolution: «A tous les temps à tous les Peuples» (Für alle Zeiten, für alle Völker). So wurde 1793 anstelle eines menschlichen Masses ein Zehnmillionstel des Meridians als Meter definiert, der zwischen dem Nordpol und dem Äquator durch Paris verläuft. Grössere / kleinere Längen sollten Vielfache / Bruchteile von Tausend sein (Kilo / Milli etc. – heute bis zur 24. Potenz). Da dieses terrestrische Mass nicht besonders praktisch war, wurden Prototypen hergestellt, und 1799 wurde der internationale Meter als die Länge zwischen zwei Kratzern auf einer Platinstange in einem Safe in Paris vereinbart. Mit der Massenproduktion ging die Forderung nach immer grösserer Genauigkeit einher. So wurde 1875–1889 mit 17 teilnehmenden Ländern die sogenannte Meter-Konvention einberufen. Diese Gruppe, die Vorgängerin des BIPM, unseres aktuellen obersten Herrschers über Gewichte und Masse, verbesserte die Genauigkeit und stellte allmählich fest, dass optische Masse genauer waren. 1960 wurde das Meter auf die Wellenlänge des Lichts bezogen, und 1983 wurde es erneut knapp definiert:

Das Meter ist die Länge des Wegs, den das Licht im Vakuum während eines Zeitintervalls von $1/299792458$ Sekunden zurücklegt.

Es lohnt sich, diese vorletzte Definition genauer anzuschauen, denn sie ist eine Vorlage für die Neu-Definition aller Basiseinheiten:

- Sie hängt nicht von einem künstlich hergestellten Prototyp ab.

- Vielmehr gründet sie auf eine einfache, momentan allgemein akzeptierte Beziehung, bei der eine konstante Grösse verwendet wird, in diesem Fall die Lichtgeschwindigkeit $c = 299792458 \text{ m/s}$.
- Die Definition bezieht sich auf eine andere Basiseinheit, die Sekunde.
- Folgt man dem mit der Definition vorgeschlagenen Gedankengang, ist eine Formel erforderlich, die das Verhältnis von Geschwindigkeit, Zeit und Länge angibt – auch wenn sie nicht explizit erwähnt wird.
- Es wird keine direkte Methode vorgeschlagen, mit der diese kurze Zeit gemessen werden kann und mit welcher Vorrichtung der Lichtstrahl im Vakuum erzeugt werden soll.
- Die Definition gibt jedoch durchaus eine Denkrichtung für die Messung der Einheit vor.

Wie kommen wir auf die Formel, mit der die Länge eines Meters zu ermitteln ist? Schon Kinder zählen Sekunden zwischen Blitz- und Donnerschlag, um die Entfernung des Blitzes zu berechnen: Die Anzahl Sekunden geteilt durch 3 ergibt die Entfernung. Es wird die Formel $\text{Entfernung} = \text{Schallgeschwindigkeit} \times \text{Zeit}$ verwendet – die Schallgeschwindigkeit entspricht ungefähr $1/3 \text{ km/s}$. Für unseren Meter wenden wir dieselbe Formel an, jedoch mit $c = 299.792.458 \text{ m/s}$, der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Durch die Festlegung einer bestimmten «Flugzeit» (eines winzigen Bruchteils – des Kehrwerts – der Lichtgeschwindigkeit: $1/299792458 \text{ s}$) können wir die Entfernung messen, die in dieser Zeit zurückgelegt wird. Diese Entfernung wird als ein Meter definiert: $\text{Lichtgeschwindigkeit} \times 1/299792458 \text{ s}$. Obwohl diese Formel zuerst tautologisch erscheint, muss sie als implizite Anweisung gelesen werden, um die Strecke zu messen, die das Licht in $1/299792458 \text{ s}$ «durchläuft».

Vergleichen wir nun die obige Definition mit der, die aller Voraussicht nach im Mai 2019 in Kraft treten wird.

Der Meter ist die SI-Einheit der Länge. Er ist definiert, indem der numerische Wert der Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum festgelegt wird auf 299 792 458, ausgedrückt in der Einheit m/s , wobei die Sekunde über die Cäsiumfrequenz $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ definiert ist.

- Die Lichtgeschwindigkeit wird in der ersten Definition nicht explizit erwähnt, wohingegen in der neuen Definition die Lichtgeschwindigkeit auf einen exakten Wert (unendlich viele Dezimalstellen sind Null) festgelegt wird.
- Weder «die Länge des Weges, den das Licht im Vakuum zurücklegt», noch «die Zeit» werden erwähnt: Definition und sogenannte «Realisierung» – die experimentelle Bestimmung – sind voneinander unabhängig.

- Wie zuvor hängt die Meter-Definition von einer anderen Basiseinheit ab, der Sekunde.
- In der Tat sind nur *Sekunde* und *Mol* unabhängig von anderen Basiseinheiten.
- *Meter*, *Kilogramm*, *Kelvin*, *Ampere* und *Candela* hängen von der *Sekunde* ab.
- *Kelvin* und *Candela* hängen auch von Meter und Kilogramm ab.

Das offizielle neue SI (Internationales Einheitensystem)

Im neuen internationalen Einheitensystem wird von folgenden Konstanten ausgegangen:

- die Übergangsfrequenz zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des ungestörten Grundzustands des Cäsium-133-Atoms die Übergangsfrequenz zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des ungestörten Grundzustands des Cäsium-133-Atoms Δf_{Cs} ist 9 192 631 770 Hz
- die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c beträgt 299 792 458 ms^{-1}
- die Planck-Konstante h ist $6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- die Elementarladung e ist $1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$
- die Boltzmann-Konstante k ist $1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
- die Avogadro-Konstante N_{A} ist $6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- die Lichtausbeute der monochromatischen Strahlung der Frequenz $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ beträgt 683 lm/W (SI-Einheit: $\text{m}^{-2}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^3\cdot\text{cd}\cdot\text{sr}$, oder $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{W}^{-1}$)

Die Idee, die den neuen Definitionen zugrunde liegt, wurde vielleicht am besten von *Max-Planck* (1900) ausgedrückt:

Solche Konstanten ermöglichen es,

«[...] Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Temperatur aufzustellen, welche, unabhängig von speziellen Körpern und Substanzen, ihre Bedeutung für alle Zeiten und für alle, auch ausserirdische und aussermenschliche Kulturen notwendig behalten und welche daher als »natürliche Masseinheiten« bezeichnet werden können.»

Meine persönliche Reaktion

Zunächst allgemein:

- Mein Bauchgefühl: Das ist es? Sonst nichts? Keine einzige direkte Definition einer Einheit; kein Hinweis darauf, wie man sie messen («realisieren») kann? Nur eine Reihe von Aussagen der Art: $\pi = 3$ (weil das das Beste ist, was wir tun können)?

- Die neuen Definitionen sind kurz und für Physiker sehr befriedigend. Sie sind aber so abstrakt geworden, dass sie für Laien unverständlich sind. Es entstehen pädagogische Probleme. Lohnt es sich wirklich, die Einfachheit der Prototypen zu opfern, angesichts des unwillkürlichen Bauchgefühls: «wissenschaftlicher Jargon ist eine Waffe gegen Laien»?
- Die Aussage, dass die aktuellen numerischen Definitionen der verschiedenen Konstanten nicht sakrosankt sein müssen, wirkt sowohl tröstlich als auch beunruhigend. Die Aussage, z.B. in FAQ (Frage 15) *«Wir können den Wert einer Konstante, mit der wir eine Einheit definieren, nicht festlegen oder ändern. Die Werte der fundamentalen Konstanten sind Naturkonstanten, und wir legen den numerischen Wert jeder Konstante nur fest, wenn sie in ihrer SI-Einheit ausgedrückt werden»* fordert die Frage: Welchen Wert hat eine Konstante ausser der numerischen?
- Die gegenseitige Abhängigkeit der Einheiten gibt den konservativ Gestimmten das Gefühl, auf unsicheren Boden zu treten: Sollte sich die (tatsächliche, nicht numerische) Dauer der Sekunde ändern, würden auch alle anderen Einheiten (ausser dem Mol) «mittanzen». Andererseits ist die Frequenz der Korrekturen zur Genauigkeit der Sekunde – bisher eine Grössenordnung in zehn Jahren! – eine gute Nachricht bezüglich der Stabilität der anderen Einheiten.

Und im Speziellen:

- Die Candela ist die einzige Einheit, die die menschliche Wahrnehmung direkt berücksichtigt. Unsere Augen reagieren unterschiedlich auf verschiedene Farben.
- Die Tatsache, dass die Sekunde eine *lokale* Sekunde ist, deren Dauer sowohl vom Ort (allgemeine Relativitätstheorie) als auch von der Bewegung (Bewegung: spezielle Relativitätstheorie) abhängt, ist gewöhnungsbedürftig (*Dimarcq* 2018). Zwangsläufig gilt dasselbe für alle anderen Einheiten (vielleicht mit Ausnahme des Mols) aufgrund der oben erwähnten Abhängigkeit von der Sekunde.
- Die Sekunde auf koordinierten UTC-Funkuhren unterscheidet sich stark von der oben definierten: Sie hängt von der Laune des lokalen (Landes-) Zeithüters ab, dem empfohlen wird, ihre Dauer jeden Monat nach Veröffentlichung des neuen statistisch bestimmten (nicht vorhersagbaren) Wertes zu ändern (*Auerbach* 1995)¹.
- Wir alle lernen, dass jede Messung einzigartig ist und einen charakte-

¹ siehe BIPM Circular T.: <https://www.bipm.org/en/bipm-services/timescales/time-ftp/Circular-T.html>

ristischen Fehler aufweist. Dies ist nicht der Fall, wenn Sie der Zeithüter sind, der eine Basiseinheit misst. Soweit ich es verstehe, gibt es nur eine Ausnahme. Für das Kilogramm wird ein Konsenswert gesucht (SI-FAQ, Frage 7).

- Bei der Rechtfertigung für die Abschaffung des Ur-Kilogramms spielt wissenschaftliche Präzision plötzlich keine Rolle mehr: Es wird ein «mysteriöser unerklärlicher Gewichtsverlust im Laufe der Jahre» angeführt. Es ist zu hoffen, dass diese Ungereimtheit zu unserer Zufriedenheit geklärt werden kann.

Was ich spontan gut finde:

- Das Maximum an Kontinuität zwischen alten und neuen Definitionen, das aufrechterhalten wurde, ist bewundernswert. Drei von sieben Einheiten bleiben im Wesentlichen gleich und die übrigen Änderungen sind auch für traditionsorientierte Menschen verständlich.
- Wenn wir das neue System mit älteren Definitionen vergleichen, können wir jubeln: keine versteckten Zahlen und unmotivierten Richtlinien mehr. Zur Präzision: Die Genauigkeit bleibt für einige Einheiten gleich, während sie für andere steigt. Beispielsweise wirkt sich der oben genannte relativistische Effekt nur auf die sechzehnte Dezimalstelle der Sekunde aus.

Obwohl einige der obigen Kommentare gegenüber dem SI-Unternehmen abschreckend klingen mögen, werden Wissenschaftler bemerken, dass einige Argumente etwas pingelig sind, während andere sich auch auf ältere Definitionen beziehen könnten. Das köstliche Relativitätsschlupfloch in den ansonsten verlatteten Zäunen des Globalisierungs-Glaubensbekenntnisses der SI (und seine oft negativen sozio-politischen Konsequenzen) kann uns aber auf eine klare Botschaft aufmerksam machen: Alle Qualitäten (vielleicht mit Ausnahme des Mols) atmen wirklich mit den unnachahmlichen Rhythmen des Kosmos (Tag und Nacht, Jahreszeiten) und der Erde (Berge, Täler, Tiefen der Ozeane).

Ich verfolge in der Tat neue Entwicklungen mit Freude, und fand diese letzte Runde anregender als alle anderen: Es war die bedeutendste Umwälzung seit der Französischen Revolution!

Literatur

The International System of Units (SI) 9th edition 2019: <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/si-brochure/SI-Brochure-9-EN.pdf>

Auerbach, D. (1995): Leap-times and the fall of the second. Eur. J. Phys. 18, 42–44.

Davis, E., de Mirandés, E., Milton, M. (2019): The revision of the SI – the result of three decades of progress in metrology. Metrologia, 56 (2): 1–14.

Dimarcq, N. (2018): On the importance of a reference time-scale for metrology: <https://www.bipm.org/utils/common/pdf/CGPM-2018/Presentation-CGPM26-Dimarcq.pdf>

SI FAQ (21 questions and answers): <https://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/faqs.html>.

Für detaillierte Infos auf deutsch: <https://www.ptb.de/cms/forschung-entwicklung/forschung-zum-neuen-si/countdown-zum-neuen-si.html>

Planck, M. (1900): Über irreversible Strahlungsvorgänge, *Ann. Physik* 1, 69–122.

David Auerbach
auerbach@noxon.net