

Herdefinitie van de SI-basiseenheden

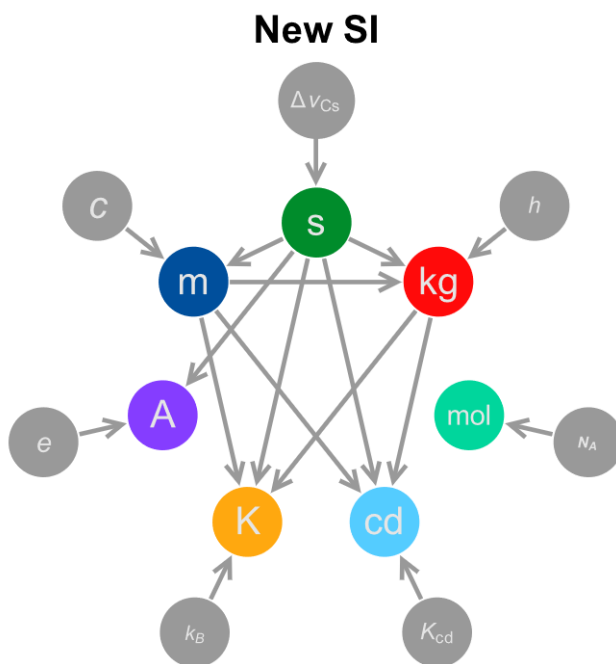
Simon van der Salm

In 2018 wordt een besluit genomen dat morrelt aan de grondslagen van ons bestaan: sommige definities van de basiseenheden van het SI, het internationale eenhedensysteem, veranderen. De kilogram, het enige overgebleven fysieke prototype van een eenheid, wordt definitief een museumstuk en sommige natuurconstanten – die we nu alleen nog bij benadering kennen - gaan als echte *fundamentele natuurconstanten* opgevat worden. Zie (1).



Het SI

Het internationale eenhedenstelsel SI (Système International d'unités) kunnen we opvatten als een uitgebreid metriek stelsel, dat zijn oorsprong heeft in het Frankrijk ten tijde van de Revolutie, eind achttiende eeuw. De meter, waarnaar het woord *metriek* verwijst, is afgeleid van de lengte van meridianen. Over het meten van de booglengte van de Parijse meridiaan, van Duinkerken naar Barcelona, door Delambre en Méchain zijn prachtige boeken geschreven. De huidige versie van het SI werd in 1960 geformuleerd.



Het SI kent zeven basiseenheden, waarin alle andere eenheden, via de factor 1, worden uitgedrukt. Zie de gekleurde cirkels in figuur 1. Grotere en kleinere maten van eenheden worden verkregen door vermenigvuldiging met een macht van 10, uitgedrukt in een decimaal *voorvoegsel*, bijvoorbeeld mega = 10^6 .

Naast deze zeven basiseenheden worden soms nog de radiaal (voor vlakke hoeken) en de steradiaal (voor ruimtehoeken) als *aanvullende basiseenheden* genoemd.

Fig. 1. De 7 basiseenheden (seconde, meter, ampère, kelvin, candela, mol en kg) van het 'nieuwe' SI, met hun 7 fundamentele natuurconstanten en onderlinge relaties.

Zie: https://en.wikipedia.org/wiki/International_System_of_Units.

Wie zich weleens verdiept heeft in het Engels/Amerikaanse eenhedenstelsel (voor het gemak maar even als één stelsel opgevat) realiseert zich de belangrijkheid van die *coherentie* van eenheden via de factor 1 en de consequent *decimale indeling* van eenheden, die ten tijde van de Franse Revolutie opvallende noviteiten waren, omdat decimaal rekenen toen nog nauwelijks werd toegepast. De foot bijvoorbeeld is verdeeld in 12 inches, 3 feet is een yard, 1760 yard een mijl, enzovoorts, wat aanleiding geeft tot een geweldige hoeveelheid omrekenwerk, met allerlei onhandige factoren. Vergeleken daarmee is het coherente en decimale SI een wonder van eenvoud.

Overigens gebruikt de Engelse en Amerikaanse natuurwetenschapper gewoon het SI, waardoor hij geregeld in schizofrene situaties terecht komt. In zijn vak gebruikt hij bijvoorbeeld de pascal (en de bar) als eenheid van druk; als hij de banden van zijn auto oppompt, moet hij ineens rekenen met pound per square inch; de energie die nodig is om zijn zwembad te verwarmen, wordt berekend in BTU's (British

Termal Units), maar de rekening van zijn elektriciteitsbedrijf vermeldt dollars per kWh. Enzovoorts. Ach...gelukkig zijn er handige hulpmiddelen. Zie figuur 2.

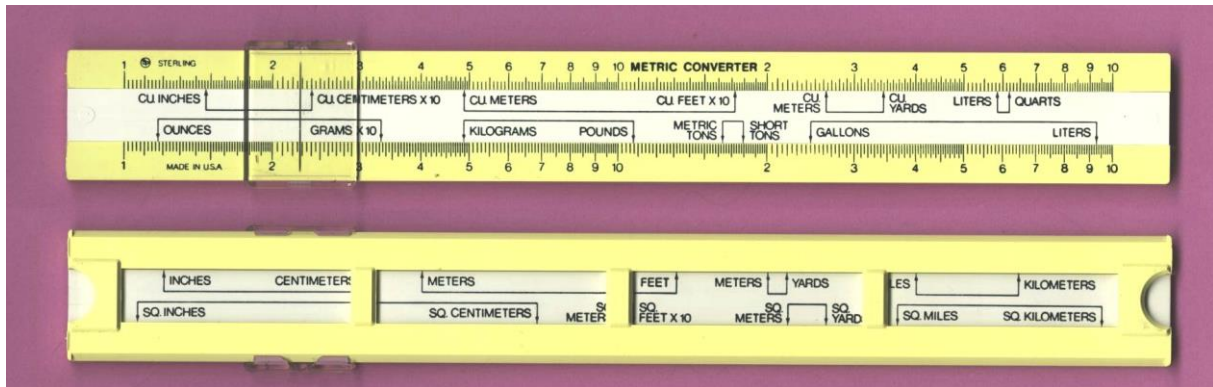


Fig. 2. De Sterling Metric Converter Slide Rule.
Bron: <http://www.sliderulemuseum.com/Sterling.htm>

De fysieke kilogram

In het huidige SI is de kg de massa (niet het gewicht!) van de fysieke kg, die onder zeer gecontroleerde omstandigheden wordt bewaard in Parijs. Het is tot nu toe nog de enige eenheid die door middel van een *artefact* wordt gedefinieerd, maar ondanks de extreem gecontroleerde omstandigheden blijkt de massa van het kg-prototype toch te veranderen en kan het niet meer als stabiele basiseenheid van het SI dienst blijven doen. De oplossing heeft men gevonden door de extreem kleine constante van Planck h als exacte waarde (met 8 significante cijfers) te definiëren, dus als waarde zonder meetonzekerheid, en de waarde van de kg daarvan af te leiden. Zie (1).

Maar er verandert meer.

Fundamentele natuurconstanten

In de Engels Wikipedia lezen we:

There will still be the same seven base units (second, metre, kilogram, ampere, kelvin, mole, and candela). Of these, the kilogram, ampere, kelvin and mole will be redefined by choosing exact numerical values for the Planck constant, the elementary electric charge, the Boltzmann constant, and the Avogadro constant, respectively.

The second, meter and candela are already defined by physical constants and it is only necessary to edit their present definitions.

The new definitions will improve the SI without changing the size of any units, thus ensuring continuity with present measurements.

Er verandert dus meer dan alleen de definitie van de kg. Zoals te zien is in figuur 1 wordt in het nieuwe SI elke basiseenheid door zijn eigen specifieke *fundamentele natuurconstante* gedefinieerd. Zie figuur 3 voor een lijst met deze constanten.

De constante van Avogadro

Als voorbeeld van een secundaire verandering die het nieuwe SI teweeg brengt, kijken we eens naar de *constante van Avogadro*, waarvan de nieuwste waarde door middel van het tellen van atomen, in een geavanceerd Avogadro-project, wordt vastgesteld. Zie (2). Zoals te zien is in figuur 1 refereert de nieuwe

definitie van de *mol* nog uitsluitend aan een fundamentele natuurconstante en niet meer aan de kg (of één van de andere basiseenheden).

$\Delta\nu_{\text{Cs}} = \Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}} = 9192631770 \text{ s}^{-1}$
$c = 299792458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
$e = 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ A}\cdot\text{s}$
$k = 1.380649 \times 10^{-23} \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$
$N_{\text{A}} = 6.02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
$K_{\text{cd}} = 683 \text{ cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{s}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$

Fig. 3. Lijst met 7 fundamentele natuurconstanten die de 7 basiseenheden van het SI definiëren.

In de scheikunde, maar ook in toegepaste wetenschappen, zoals de biomedische wetenschap en -technologie, speelt het begrip *mol* een belangrijke rol. Denk bijvoorbeeld aan de bloedsuikerconcentratie op metertjes die suikerpatiënten vaak gebruiken. Die concentratie wordt uitgedrukt in mmol per liter bloed. Of denk aan de zakjes met zoutoplossing die veel in ziekenhuizen worden gebruikt. De concentratie natrium in de zakjes met 0,9 m/v% NaCl-oplossing bedraagt 154 mmol per liter.

atomic mass constant	
m_{u}	
Value	1.660 539 040 x 10 ⁻²⁷ kg
Standard uncertainty	0.000 000 020 x 10 ⁻²⁷ kg
Relative standard uncertainty	1.2 x 10 ⁻⁸
Concise form	1.660 539 040 (20) x 10 ⁻²⁷ kg

Fig. 4. Waarde van de geüniformeerde massa-eenheid, inclusief standaard meetonzekerheid. Standaard meetonzekerheid, is meetonzekerheid uitgedrukt als standaardafwijking.
Bron: NIST, het National Institute for Standards in Technology.

Avogadro constant	
N_{A}, L	
Value	6.022 140 857 x 10 ²³ mol ⁻¹
Standard uncertainty	0.000 000 074 x 10 ²³ mol ⁻¹
Relative standard uncertainty	1.2 x 10 ⁻⁸
Concise form	6.022 140 857 (74) x 10 ²³ mol ⁻¹

Fig. 5. 'Oude' waarde van de constante van Avogadro, inclusief standaard meetonzekerheid. Standaard meetonzekerheid, is meetonzekerheid uitgedrukt als standaardafwijking.
Bron: NIST, het National Institute for Standards in Technology.

Tot nu werd de constante van Avogadro (het aantal deeltjes per mol) afgeleid uit de *geüniformeerde atomaire massa-eenheid* u , die weer wordt afgeleid van de kg, via de massa van het koolstof-12-atoom (onder specifieke voorwaarden): $1 u = 1 m_u = \frac{1}{12} m(C^{12}) \approx 1,661 \cdot 10^{-24}$ g. Zie figuur 4.

In de oude definitie was het *getal* van Avogadro (= constante van Avogadro minus de eenheid) het aantal koolstof-12-atomen in 12 gram. Oftewel, het *getal* van Avogadro was het aantal deeltjes met een massa van 1 u dat zich in 1 gram bevindt: $A \cdot u = 1$ g. ‘Per definitie’ is dat getal A het aantal deeltjes *per mol*, zodat: $N_A \cdot u = 1$ g \cdot mol⁻¹, of equivalent daarmee: $N_A \cdot x u = x$ g \cdot mol⁻¹. (De molaire massa van deeltjes met een atomaire massa van $x \cdot u$ is x g \cdot mol⁻¹). Zie figuur 5.

Omdat de atomaire massa-eenheid u niet oneindig nauwkeurig kan worden gemeten, bevatte ook de oude waarde van de constante van Avogadro N_A een bepaalde mate van meetonzekerheid. Zie figuur 5. (Met een *betrouwbaarheid* van 68,3% bedekt het interval $(6,022\ 140\ 857 \pm 0,000\ 000\ 74) \cdot 10^{23}$ de werkelijke waarde van de constante).

In de nieuwe definitie van het begrip *mol* wordt de nieuwe waarde van de constante van Avogadro, bepaald in het Avogadro-project, als fundamentele natuurconstante, dus als een constante zonder meetonzekerheid, opgevat, en zal de gelijkheid $N_A \cdot u = 1$ g \cdot mol⁻¹ in verreweg de meeste praktijkgevallen met zeer goede benadering nog steeds gelden, maar niet meer als er sprake is van extreem nauwkeurige metingen. Verdwenen is de gelijkheid ‘per definitie’.

Referenties

1. <https://www.nist.gov/news-events/news/2011/11/redefining-si-base-units>
2. <https://www.nist.gov/physical-measurement-laboratory/silicon-spheres-and-international-avogadro-project>