

VAND, PLATIN OG NATURKONSTANTER:

Kilogrammet har været svært at få styr på

I handel og videnskab skal man ofte veje ting, og det kræver enighed om måleenheden. Til det har vi enheden kilogram, som dog har ændret definition gennem historien. I 2018 lykkedes det endelig at frigøre kilogrammet fra afhængigheden af en metalklump i Paris.

Om forfatteren
Henrik Bendix er
videnskabsjournalist.
bendix@vidmere.dk

Det var ikke nemt af være handelsrejsende i 1700-tallet, og da slet ikke, hvis man ville købe eller sælge efter vægt. De fleste steder i Europa havde hver købstad sin egen, lokale vægtenhed. Der kunne endda være forskellige vægtsystemer på samme markedsplads, alt efter varekategori og hvordan den skulle beskattes.

For eksempel var vægtenheden et pund, på fransk *livre*, ikke det samme i Paris og i Lyon. Det betød, at hvis en købmand tog fra Paris med 100 livres tekstiler, så var der kun 87 livres, når han kom frem til Lyon. Gik turen videre til Marseilles, vejede tekstilerne kun 81 livres her. Alene i Frankrig var der cirka 250.000 forskellige enheder for mål og vægt i brug. Det var noget rod.

For både købere og sælgere var det nemt at snyde og føle sig snydt, og både nationalt og internationalt bremsede det kaotiske virvar af lokale vægtenheder handlen. De mange forskellige måleenheder gjorde heller ikke noget godt for



Foto: Shutterstock

videnskaben, for det var svært at sammenligne og reproducere forsøgsresultater.

Fra lokale traditioner til universelt system

I slutningen af 1700-tallet var der en stærk idé blandt naturforskere om, at måleenheder burde være baseret på naturen. De skulle være reproducerbare overalt og uafhængige af autoriteter. Videnskabsmændene ønskede sig et rationelt og universelt system, der kunne afløse lokale traditioner.

I 1790 blev ideen om et universelt enhedssystem præsenteret for den

franske nationalforsamling, der midt under den franske revolution pålagde det franske videnskabsakademi at nedsætte en kommission for mål og vægt. Nogle af tidens mest fremtrædende videnskabsmænd, heriblandt Lagrange og Laplace, fik til opgave at udvikle det nye enhedssystem. De kom frem til, at det skulle være baseret på 10-talssystemet, så det er nemt at regne med.

De besluttede også, at den nye længdeenhed meteren skulle defineres som en timilliontedel af en fjerdedel af Jordens meridian, altså $1/10.000.000$ af afstanden fra ækvator til nordpolen langs meridianen gennem Paris. Rummål og vægt skulle baseres på denne længde.

Nationalforsamlingen var med på idéen, der blev til lov 7. april 1795. Her blev et gram (*gramme*) defineret som den absolutte vægt (masse) af et rumfang rent vand svarende til en kube med en sidelængde på en hundrededel af en meter, ved den temperatur, som is smelter ved. Et kilogram er så 1.000 gram.

Vand var besværligt

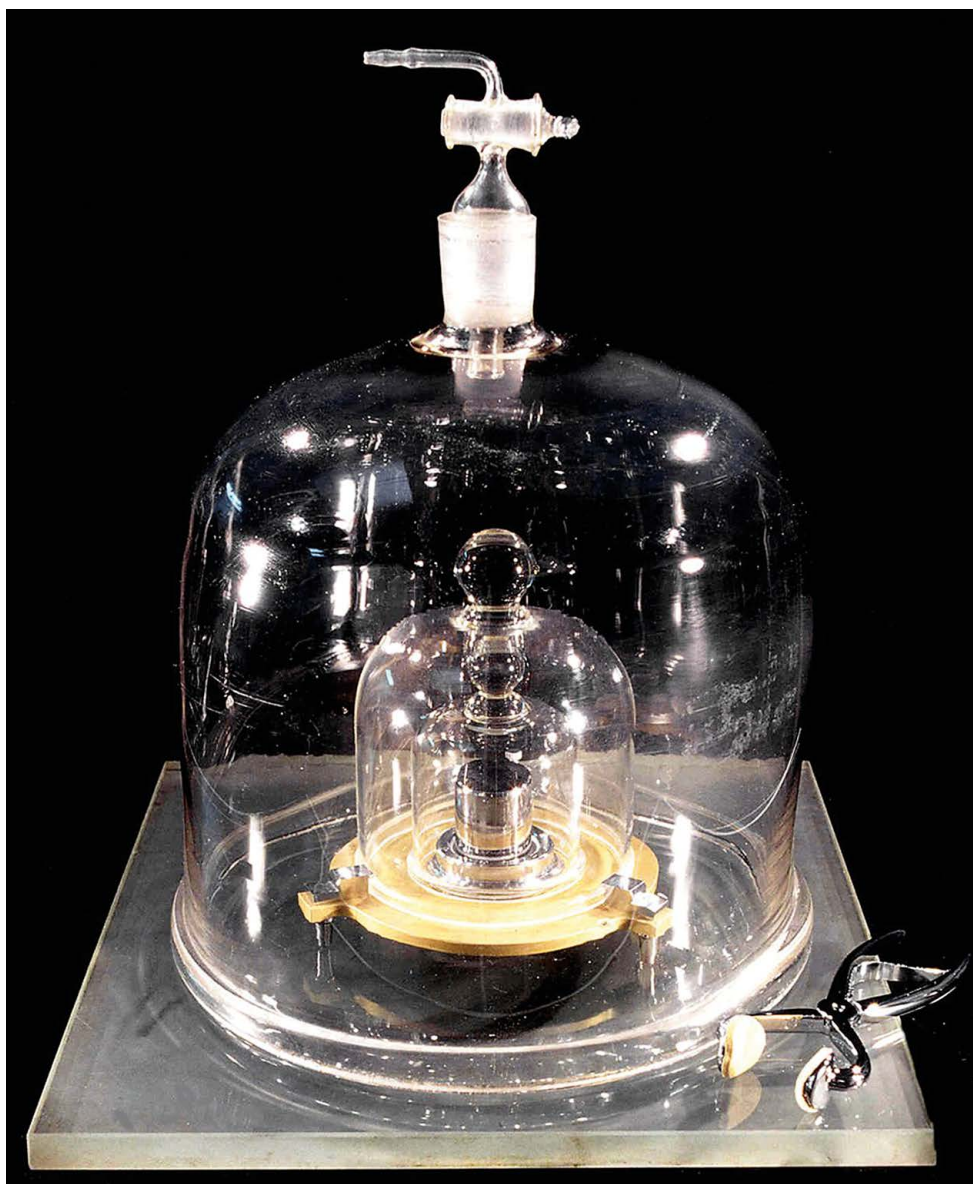
De nye enheder kom ikke ud af det blå. Tankerne bag dem havde floreret blandt europæiske videnskabsmænd i mere end hundrede år. Tilbage i 1668 argumenterede engelske John Wilkins for eksempel for et enhedssystem, hvor den fundamentale masseenhed skulle baseres på et bestemt rummål af regnvand.

Vand blev valgt som basis for masseenheden, fordi det er let tilgængeligt for alle, og vands smeltepunkt er nemt at finde. Man blander bare is med flydende vand og lader blandingen stå et øjeblik, mens man venter på ligevægt, så har man den rette temperatur. Det er ikke nødvendigt med et præcist termometer.

Men rent praktisk var vand svært at have med at gøre. Alene det at fremstille en beholder med det perfekte rumfang til vandet var en stor udfordring, og små luftbobler og opløste salte og gasser kunne ændre vandets massefylde, der også afhænger stærkt af temperaturen. Ganske små temperaturafvigelser kunne ødelægge målingerne.

Derfor blev det i 1799 besluttet at fremstille en mere håndgribelig og stabil reference i form af en lille cylinder af platin. Dette prototypekilogram fik samme masse som en kubikdecimeter rent vand ved den temperatur, hvor det har størst densitet (cirka 4 °C).

Sammen med en platinstang med en længde, som meteren nu blev defineret ud fra, blev normalkilogrammet placeret i det franske rigsarkiv i Paris. Dette "Kilogramme des Archives" kunne nu bruges som udgangspunkt for officielle kopier (og mindre værdifulde kopier af kopierne, for eksempel lodder af messing), som blev fragtet rundt i Frankrig og brugt til at fremstille lokale kopier og kalibrere vægte. Senere blev kopier også sendt til andre europæiske lande, der så småt begyndte at bruge meter og kilogram.



Den internationale prototype fra 1879 af kilogrammet, forkortet IPK og ind imellem kaldt Le Grand K. Det er en cylinder på ca. 39 mm i højde og diameter, som er lavet af en legering af 90 % platin og 10 % iridium (densitet ca. 21.500 kg/m³). Hele tre glasklokker beskytter Le Grand K.

Foto: BIPM/CC BY-SA 3.0 IGO

Kilogram kommer fra græsk

Ordet gram kommer oprindeligt fra det oldgræske *grámma* (γράμμα), der betyder noget skrevet. Vi kender ordet fra grammatik, men på latin kom ordet til at betyde en lille vægt eller et lille lod, og det er derfra, det franske gramme og det danske gram kommer. Kilo kommer fra det oldgræske khilioi (χίλιοι), der betyder tusind.

Meterkonventionen

I praksis tog det en del år at gå fra de lokale enheder, som folk var vant til, til de nye enheder for længde og masse. Folk foretrak de måleenheder, de kendte, og

i Danmark havde vi allerede et fornuftigt system for mål og vægt takket være astronomen Ole Rømers store indsats i slutningen af 1600-tallet. Her var et pund defineret som vægtigheden (dvs.

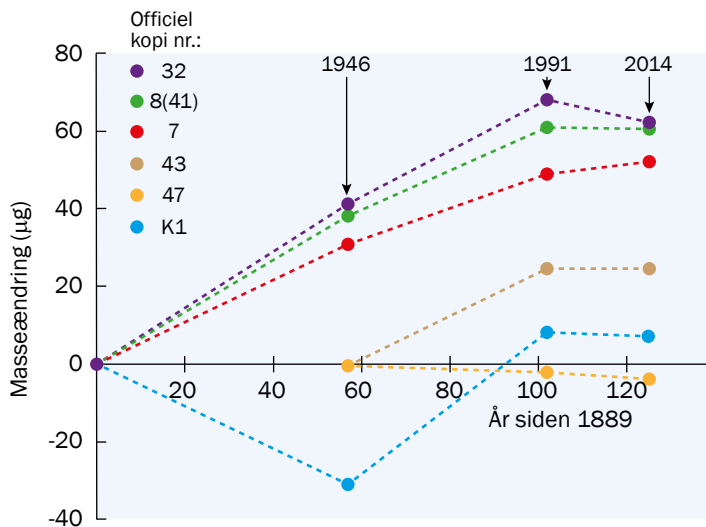
I et projekt kaldet *The International Avogadro Project* forsøgte en gruppe forskere at finde Avogadros konstant ved at tælle atomer i verdens mest perfekte og rundeste siliciumkugle. Her ses kuglen af silicium-28 i krystalform. Foto: NIST



Nyt kilolod blev standarden

Med traktaten blev der stiftet et internationalt bureau for mål og vægt, *Bureau international des Poids et Mesures*, forkortet BIPM, med hovedsæde i Paris. Det blev også besluttet, at der skulle fremstilles nye, internationale prototyper af meteren og kilogrammet.

Det nye kilogram blev støbt af en legering af 90 procent platin og 10 procent iridium. Legeringen gjorde cylinderen mekanisk hårdere og mere slidstærk end forgængeren af ren platin. Med en diameter og højde på cirka 39 millimeter er den omtrent på størrelse med en golfbold, og den dag i dag kan man stadig finde den placeret sikkert under tre glasklokker i en boks i kælderen hos BIPM.



Udviklingen af massen af de forskellige kopier af det officielle kilogram (IPK) siden den første kalibrering i 1889 (kopierne nr. 43 og 47 blev først kalibreret i 1946). Massen vises som afvigelsen i forhold til IPK. Efter Stock, M. et al, *Metrologia* 52 (2015) 310.

Den internationale prototype af kilogrammet, forkortet IPK og ind imellem kaldt Le Grand K, blev støbt af firmaet Johnson Matthey i London i 1879 og tilpasset og pudset i Paris i 1880. Faktisk blev der i første omgang fremstillet tre eksemplarer, hvoraf det ene blev valgt som international prototype. Der blev der også støbt 40 kopier (og senere flere) til brug i de lande, der tilsluttede sig metersystemet.

Den øverste myndighed for BIPM er generalkonferencen for mål og vægt, og den første af slagsen blev afholdt i september 1889. De delegerede hjembragte nationale kopier af meteren og kilogrammet, og Danmark fik kilogramprototype nr. 27, der blev anbragt i Nationalbankens kælder.

vægten) af 1/62 kubikfod vand, og der var fremstillet et mønsterpund som reference.

Et egentligt international enheds-system lod vente på sig. På internationale videnskabskonferencer blev behovet for sådan et system fremhævet igen og igen op igennem 1800-tallet. I 1869 blev der nedsat en international meterkommission

med deltagelse af den danske fysikprofessor Carl Holten. Kommissionens arbejde førte til en traktat kendt som meterkonventionen.

Den 20. maj 1875 blev konventionen skrevet under af 17 nationer, herunder Danmark (og i øvrigt også USA, hvilket måske er mere overraskende – her går det lidt trægt med at få indført metersystemet).

På den tredje generalkonference i 1901 blev det gjort helt klart, at kilogram er en enhed for masse, der ikke må forveksles med vægt. I fysikken er vægt en kraft, og vægten af et objekt er lig med massen af objektet gange tyngdeaccelerationen.

Kunne ikke holde vægten

Stadig flere nationer tilsluttede sig bestræbelserne på at indføre metersystemet, men politisk var

det lidt af en varm kartoffel. Derfor var det også først i 1907, at det nye enhedssystem blev indført ved lov i Danmark, og der var en lang overgangsperiode, så folk kunne vænne sig til de nye enheder.

I et kælderlokale på Polyteknisk Lærestanstalt (i dag Danmarks Tekniske Universitet, DTU) blev der bygget et brand- og tyverisikret skab til opbevaring af Danmarks prototyper af meteren og kilogrammet. I 1940'erne fik Danmark en ny, officiel kopi af den internationale prototype af kilogrammet (nr. 48), som i dag kan findes i Hørsholm hos det nationale metrologiinstitut Dansk Fundamental Metrologi, der ejes af DTU.

I 130 år var et kilogram lig med massen af den internationale kilogramprototype. Kilogrammet er en af de fundamentale enheder, der indgår i det internationale enhedssystem, SI-systemet, der blev vedtaget på den 11. generalkonference i 1960. Her gik meterprototypen på pension og blev afløst af en ny meterdefinition, og kun kilogrammet blev bestemt af en fysisk genstand i en kælder i Paris.

Men det fysiske kilogram havde svært ved at holde vægten. Tre gange er IPK blevet rengjort, hvorved det er blevet lettere – første gang forsvandt over 50 mikrogram, senere noget mindre. Imellem rengøringsseancerne tager kilogrammet tilsyneladende en smule på. Og så blev spørgsmålet, om et kilogram per definition altid er lig med den øjeblikkelige masse af IPK, af massen af IPK i 1889 eller massen lige efter en rengøring?

Forvirringen blev ikke mindre af, at IPK ikke blev ved med at have samme masse som kopierne. Der var en klar tendens til, at kopierne stille og roligt blev tungere, eller også blev den internationale prototype lettere. Ved den seneste sammenligning (kalibrering) i 2014 blev der målt udsving på op til 60 mikrogram. Forskellene blev umulig at ignorere.

Kibble-vægten sammenligner kræfterne fra strøm og masse

Vejemetoden:
Den opadrettete kraft på spolen er produktet af strømmen (I), styrken af magnetfeltet (B) og længden af tråden i spolen (L). Kraften er i balance med vægten (mg) af testlodet (massen).
 $mg = IBL$

Bevægelsesmetoden:
Spændingen (V) som induceres i spolen mens den bevæger sig er lig hastigheden (v) gange BL

Kraften/vægten af testlodet er lig med massen (m) gange den lokale tyngdeacc. (g)

Vejemetoden:
 $mg = IBL$
dvs. $mg/I = BL$

Bevægelsesmetoden:
 $V = vBL$
dvs. $V/v = BL$

BL er ens i begge tilfælde og derfor er $IV = mgv$
watt elektrisk = watt mekanisk

Princippet i en Kibble-vægt. Kilde: USA's National Bureau of Standards (NIST).

Fokus på naturkonstanter

Fysikere begyndte at komme med forslag til en ny og mere præcis definition af kilogrammet. I et mangeårigt projekt kaldet *The International Avogadro Project* forsøgte en gruppe forskere at finde Avogadros konstant (måske bedre kendt som Avogadros tal) ved at tælle atomer i verdens mest perfekte, rundeste siliciumkugle.

Idéen var at fremstille en kugle af silicium-28 i krystalform og bestemme dens volumen med nanometerpræcision ved hjælp af en laser. Silicium-atomerne danner et krystalgitter med en fast afstand

mellem atomerne, og den afstand kunne måles ved hjælp af røntgen-diffraktion. Dermed kunne antallet af atomer i kuglen beregnes.

Avogadros konstant er det tal, der kobler atomar masse til makroskopisk masse. Ud fra massen af kuglen, antallet af atomer i den og molarmassen af det anvendte silicium kunne forskerne beregne Avogadros konstant med meget stor præcision. Men så kunne man vende den om og bruge Avogadros konstant til at definere kilogrammet. Med andre ord kunne man sige, at et kilogram per definition var et bestemt antal atomer af en bestemt slags isotop.

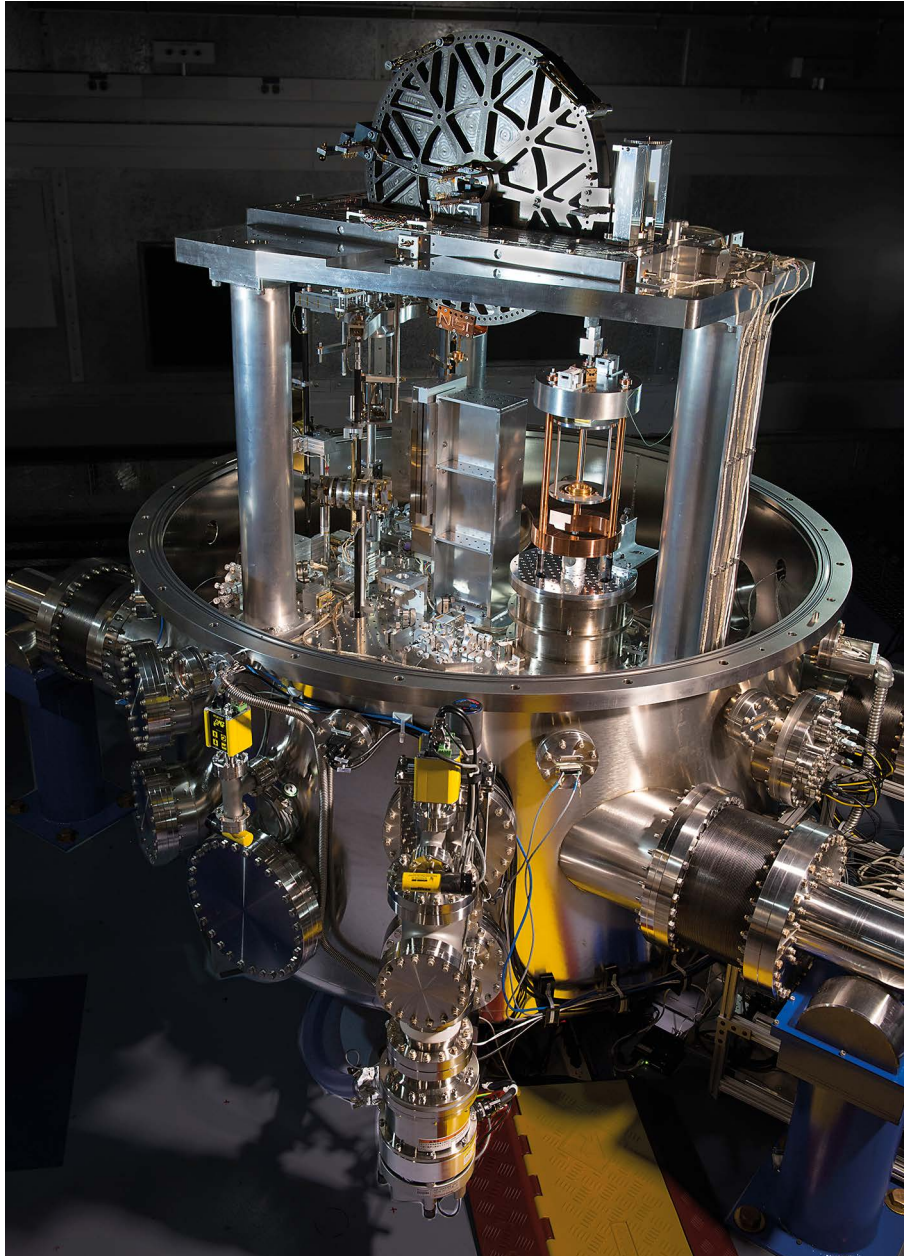
Videre læsning
BIPM.org

NIST.gov:
www.nist.gov/
si-redefinition/
kilogram-introduction

Terry Quinn: From artefacts to atoms. Oxford University Press, 2011.

Om den skiftende vægt af IPK:
Michael Stock et al 2015: Calibration campaign against the international prototype of the kilogram in anticipation of the redefinition of the kilogram part I. Metrologia 52 310 DOI: 10.1088/0026-1394/52/2/310

Om de danske forhold:
K. Prytz 1908: Metersystemet med en indledende Omtale af dansk Maal og Vægt. DOI: 10.48563/dtu-0000285



Kibble-vægten, som har målt Plancks konstant med en usikkerhed på mindre end 20 milliardtedele! Dvs. målingen var mere end præcis nok til at definere kilogrammet. Den nye definition trådte i kraft i 2019.

Foto: USA's National Bureau of Standards (NIST).

Kilogrammet knyttes til Plancks konstant

Men det endte i stedet med en ny definition af kilogrammet knyttet til Plancks konstant, der ellers bedst kendes fra kvantemekanikken. Plancks konstant måles i enheden joule gange sekund, der udtrykt i SI-enheder er kilogram gange kvadratmeter per sekund ($\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$). Størrelsen af meteren og sekundet kendes allerede, så hvis Plancks konstant kan måles med meget stor præcision, kan kilogrammet defineres ud fra denne størrelse.

Til det formål bruger man en Kibble-vægt (tidligere kaldt en watt-vægt),

der er et elektromekanisk måleinstrument, som måler vægten af et objekt ekstremt nøjagtigt ved at måle den strøm og spænding, der skal til for at producere en kompenserende kraft.

Det spændende ved Kibble-vægten er, at den er så præcis, at kvanteeffekter kommer i spil. Elektrisk spænding og modstand bliver koblet med Plancks konstant (og for den sags skyld også elektronens ladning), og derfor kan en Kibble-vægt bruges til at måle Plancks konstant uhyre præcist.

I 2011 blev det besluttet at basere

kilogrammet på Plancks konstant, hvis den kunne måles med en usikkerhed på mindre end 20 milliardtedele. Det lykkedes, og på den 26. generalkonference for mål og vægt i november 2018 blev det nye kilogram vedtaget.

Ud fra de præcise målinger blev Plancks konstant givet en fast værdi på $h = 6,62607015 \times 10^{-34}$ J-s, og kilogrammet er nu bundet op på denne værdi. Den nye definition trådte i kraft 20. maj 2019. På den måde fik vi et kilogram, der afhænger af fundamentale naturkonstanter i stedet for en metallklump i Paris. ■