

AMPÈRE

SATTE MÅL PÅ DEN ELEKTRISKE STRØM



Ampere er SI-enheden

til måling af elektrisk strømstyrke.

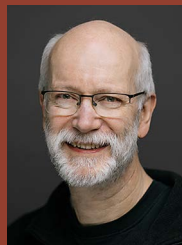
Enheden spiller derfor en central rolle i vores gennemelektrificerede hverdag.

Samtidig er den en vedvarende hyldest til den franske matematiker og fysiker

André-Marie Ampère, som skabte det teoretiske grundlag for begrebet elektrisk strøm.

Præcisionsampere-
meter fra Steno
Museets samling.
Foto: Kim Frost,
AU Foto

Forfatteren



Hans Buhl er
samlingsleder og
museumsinspektør for
videnskabshistorie på
Steno Museet/Science
Museerne ved Aarhus
Universitet. Han er bl.a.
optaget af samspillet
mellem den videnska-
belige og den teknolo-
giske udvikling.
hans.buhl@sm.au.dk

Flere af de fundamentale enheder i SI-systemet (Système International d'Unités) sætter mål på størrelser, som vi umiddelbart kan sanse, og som derfor har været kendt – og målt – siden oldtiden: for eksempel længde, masse og tid. Men sådan er det ikke med den elektriske strøm. Den er usynlig, og selvom mange nok har prøvet at få et mindre stød, har vi ikke på samme måde kropslig erfaring med strømstyrke. Det er givetvis medvirkende til, at den elektriske strøm kun har været kendt i godt 200 år.

Fra statisk elektricitet til elektrisk strøm

Man begyndte først for alvor at studere elektriske fænomener i 1700-tallet. Der var udelukkende tale om statisk elektricitet, som blev frembragt ved hjælp af såkaldte elektrisermaskiner. Der blev lavet lange gnister, og man undersøgte blandt andet elektrostatisk tiltrækning og frastødning. Det viste sig, at elektriciteten kunne ledes over korte afstande gennem tråde og kæder af metal. Det førte til forskellige teorier om, at elektricitet kunne forstås som et eller flere "fluida", altså en slags usynlige og

altgennemtrængende "væsker", der flød i lederen.

Denne ide blev væsentlig styrket, da den italienske fysiker Alessandro Volta i 1800 opfandt batteriet. Batteriet gjorde det nemlig muligt at frembringe en vedvarende strøm i modsætningen til elektrisermaskinernes kortvarige udladninger. Volta talte selv om, at der var en kontinuerlig "strøm af det elektriske fluidum" mellem batteriets poler, så længe de var forbundet af et ledende materiale. Det kunne være en ledning – eller dele af kroppen. Han registrerede nemlig

den "elektriske strøm", som han kaldte den, ved at lade forskellige dele af kroppen indgå i forbindelsen og mærke den smerte eller sitren, det fremkaldte.

Muligheden for at frembringe en nogenlunde konstant jævnstrøm var en vigtig forudsætning for H.C. Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen i 1820. Opdagelsen inspirerede blandt mange andre den franske matematiker og fysiker André-Marie Ampère til videre undersøgelser, som snart gav en meget dybere forståelse af den elektriske strøm.

Ampères bedrift

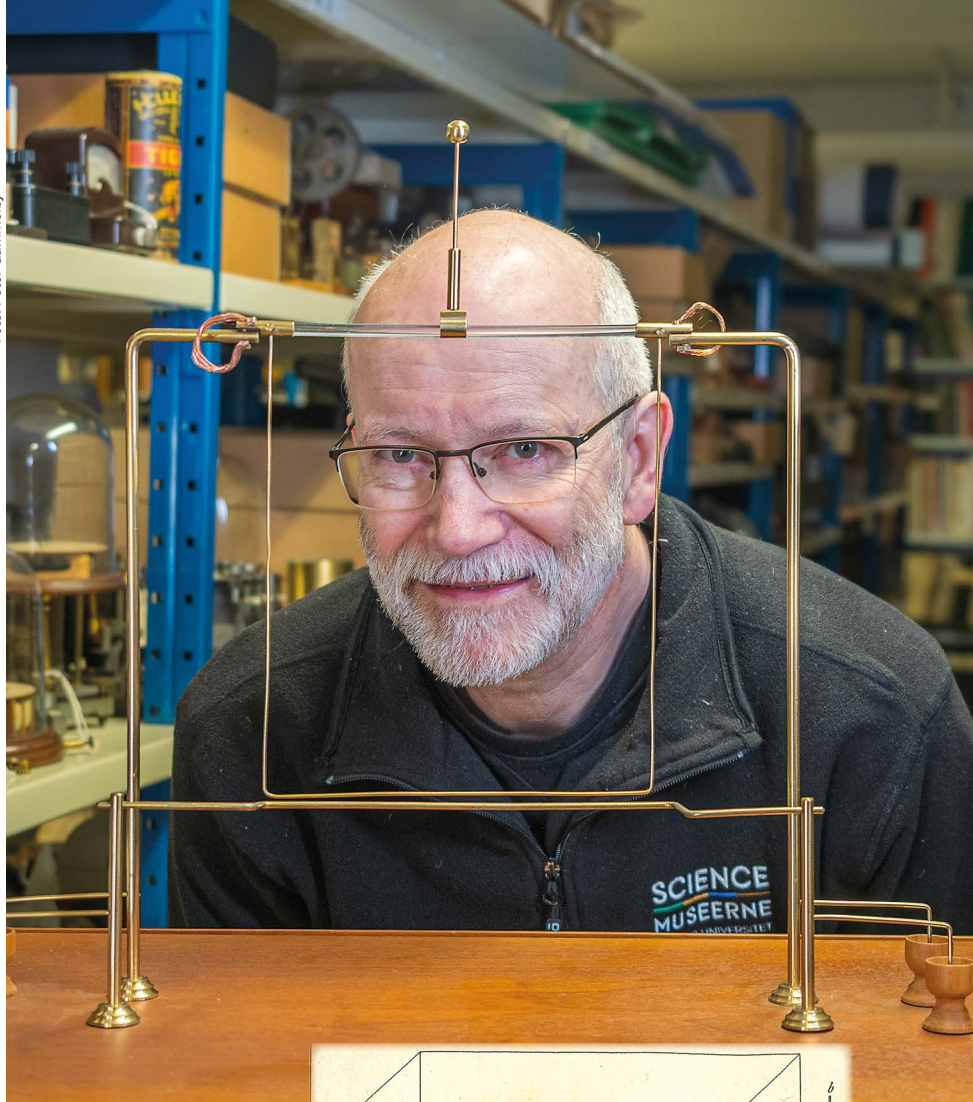
Da Ampère gentog Ørsteds forsøg med en kompasnål tæt på en strømførende ledning, observerede han, at kompasnålen også gav udslag, når han holdt den over batteriet. Det fik ham til at indse, at strømmen ikke bare løb i ledningen, der forbandt batteriets poler, men i hele det lukkede kredsløb, som ledningen og batteriet dannede. Lige så selvfølgelig som det er for os i dag, lige så radikal var opdagelsen på Ampères tid.

I forbindelse med sine forsøg fik Ampère den tanke, at Jordens magnetfelt kunne skyldes strømme i Jordens indre. Men så var det jo også muligt, at en stangmagnet fik sin magnetisme fra elektriske strømme i magnetens indre. Denne tankerække førte Ampère til den dristige antagelse, at al magnetisme skyldes elektriske strømme.

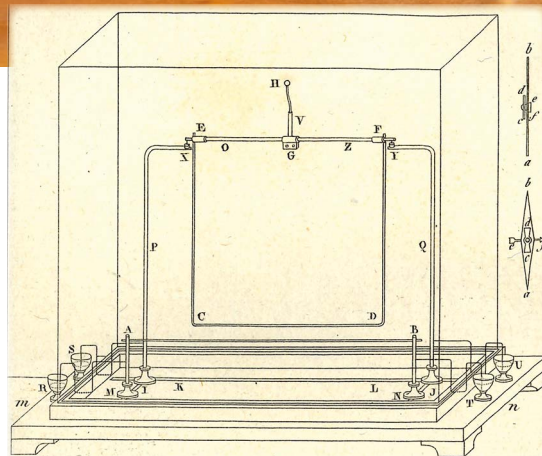
Denne hypotese blev styrende for Ampères videre forskning, som blev en bestræbelse på at beskrive kraften mellem to infinitesimale strømelementer, dvs. to uendeligt små stykker strømførende ledning. Da man jo ikke kan realisere sådanne isolerede strømelementer i praksis, udviklede Ampère en lang række apparater, hvormed han kunne undersøge særlige situationer.

Det første af disse apparater bestod af to parallelle ledninger, hvoraf den ene var fast, mens den

Foto: Peter Gammelby



Til højre ses Ampères skitse af det apparat, som han i 1820 konstruerede til at undersøge kraften mellem to parallelle, strømførende ledere. Den ene leder sidder fast, mens den anden danner en fint afbalanceret gynge, som kan give et udslag selv ved en ret lille strømstyrke. Ovenfor ser forfatteren nærmere på den rekonstruktion af apparatet, der findes i Steno Museets samling.



anden var monteret, så den frit kunne bevæge sig. Det viste sig, at de to ledninger tiltrak hinanden, når strømmen løb samme vej i dem, mens de frastødte hinanden, når strømmene var modsatte. Hermed var det lykkedes Ampère at omsætte strømstyrken i ledningerne til en mekanisk kraft imellem dem. Dvs. at strømstyrken i princippet kunne udtrykkes ved velkendte størrelser som længde, masse og tid. Til brug i sine beregninger indførte Ampère symbolet I for strømmen. Det er en forkortelse af *intensité du courant*, dvs. strømstyrke.

I de følgende år udviklede Ampère en fuldstændig elektrodynamisk teori for kraften mellem elektriske strømme. James Clerk Maxwell, der senere udviklede den endegyldige teori for alle elektromagnetiske fænomener, omtalte derfor Ampère som "elektricitetsens Newton".

Ampères forsøg med parallelle ledninger kom til at danne grundlag for den definition på 1 ampere, som gjaldt fra 1948 til 2019: "En ampere er strømstyrken af en konstant elektrisk strøm, der – når den løber i to parallelle, uendeligt lange ledere med forsvindende



Foto: J. Lee/NIST

Sølvvoltameter til præcis måling af elektrisk strømstyrke ved hjælp af elektrolyse. Det består af et platinkar, der fungerer som katode, og en sølvanode. Hvis karret fyldes med en sølvnitratopløsning, og der sendes strøm igennem, vil der afsættes sølv på karret. Ved at veje hvor meget tungere det er blevet i et givet tidsrum, kan man bestemme strømstyrken.

lille cirkulært tværsnit, som har en indbyrdes afstand på 1 meter og er anbragt i det tomme rum – bevirker, at den ene leder påvirker den anden med kraften $2 \cdot 10^{-7}$ N for hver meter.” Men det var en meget lang og snørklet vej at nå til denne definition. Og som det vil fremgå af det følgende, var den alligevel behæftet med flere problemer. Derfor er 1 ampere i dag defineret på en helt anden måde ud fra en fundamental naturkonstant.

Elektriske enhedssystemer

I årtierne efter Ampères gennembrud arbejdede mange fysikere med at finde den teoretiske sammenhæng mellem de forskellige elektriske størrelser, som man opdagede og definerede. For eksempel fandt den tyske fysiker Georg Simon Ohm en sammenhæng mellem strømstyrke (I), spænding (U) og elektrisk modstand (R), idet han viste, at spændingen over en modstand er lig med produktet af modstanden og strømmen igennem den: $U = R \cdot I$.

Samtidig gjorde den spirende udvikling af telegrafanlæg, elmotorer og generatorer det stadig mere påtrængende at få defineret nogle enheder for de elektriske størrelser, så man kunne måle, hvad der skete i ledningerne og apparaterne – og være enige om målingerne. Derfor begyndte man fra midten af 1800-tallet at udvikle elektriske enhedssystemer i flere lande.

For eksempel blev der i England i 1861 nedsat et udvalg af fysikere, der skulle udvikle et enhedssystem. Da man dengang grundlæggende opfattede verden mekanisk, ønskede udvalgets medlemmer ikke at indføre nye selvstændige elektriske enheder. De ville i stedet udnytte Ampères sammenkobling af elektrisk strøm og mekanisk kraft til at definere de elektriske enheder ud fra de ”mekaniske” enheder centimeter, gram og sekund. Det førte til nogle elektriske enheder, som var ret kontraintuitive. For eksempel fik elektrisk modstand enheden cm/s, altså en hastighed. En yderligere komplikation var, at det i cgs-systemet, som det kaldtes, var nødvendigt at lave vidt forskellige enheder for elektromagnetiske og elektrostatiske fænomener.



Inspireret af Rousseaus pædagogiske ideer fik André-Marie Ampère (1775-1836) ingen formel uddannelse. Men grundig hjemmeskoling og selvstudier udviklede hans store begavelse. Allerede som barn læste han komplicerede matematiske værker. På trods af de manglende formelle kvalifikationer blev han professor i matematik og fysik i Paris.

Som om det ikke var slemt nok, var cgs-enhederne ovenikøbet ofte enten for små eller for store til praktisk brug. Derfor blev der tilføjet et supplerende sæt af såkaldt praktiske enheder. Ret forvirrende. Andre lande udviklede deres egne systemer. Så inden længe blev der anvendt mindst 10 forskellige enheder for strøm, 12 for spænding og hele 15 forskellige enheder for modstand.

Dette babelske kaos førte til, at man i 1881 afholdt Den Første Internationale Elektriske Kongres i Paris. Der var over 250 delegerede fra 28 lande, heriblandt nogle af tidens mest prominente videnskabsmænd og ingeniører.

Hvor meget er 1 ampere?

Hovedresultatet af kongressen var, at man besluttede at gøre det engelske enhedssystem internationalt gældende med enkelte justeringer. Dermed blev betegnelserne ohm for modstand og volt for spænding gjort internationale. Desuden blev man enige om betegnelserne ampere og coulomb for henholdsvis strøm og ladning som en hyldest til kongressens værtsland.

Ud over at definere de elektriske enheder i cgs-systemet besluttede kongressen, at de elektriske enheder skulle have materielle repræsentationer, ligesom eksempelvis enheden meter på det tidspunkt var defineret ved en målestok, den internationale meterprototype.

1 ohm blev i praksis fastlagt som modstanden i en kviksølvstøbe med et tværsnitsareal på én kvadratmillimeter og en længde på 106,3 cm ved 0 °C.

1 volt blev fastlagt som spændingen fra et såkaldt Daniell-element, der er et meget stabilt batteri.

Endelig blev 1 ampere fastlagt som den strøm, der, hvis den sendes gennem en sølvnitratopløsning, vil afsætte 0,001118 gram sølv per sekund på katoden. Denne kemi-

ske definition blev valgt, fordi den tidligere nævnte kraft på parallelle strømførende ledere var umulig at måle i praksis.

Selvom det for så vidt var nyttigt, at enhederne for modstand, spænding og strøm var realiseret hver især, skabte det hurtigt nye problemer. Det gjorde nemlig systemet over-

$$U = R \cdot I,$$

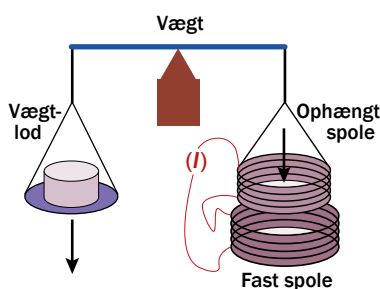
er spænding, strømstyrke og modstand jo ikke uafhængige størrelser. Hvis man kender to af størrelserne, kan den tredje beregnes. Men efterhånden, som man blev i stand til at måle mere præcist, viste det sig, at de vedtagne standarder var fastlagt forkert og derfor ikke opfyldte Ohms lov. Ups!

Den foreløbige løsning kom på en international konference i London i 1908, hvor man besluttede at reducere antallet af elektriske basisenheder fra tre til to ved at omdefinere volt til en afledt enhed.

Fra MKSA til SI

Det var dog en lappeløsning, som ikke ændrede på, at de i praksis anvendte måleenheder var forskellige fra de teoretiske cgs-enheder. Eller på at der opstod nogle meget besværlige omregningsfaktorer mellem diverse elektriske cgs-enheder som konsekvens af kravet om, at systemet udelukkende måtte baseres på de mekaniske grundenheder længde, masse og tid. Det bidrog til en voksende erkendelse af, at verden ikke kun skulle forstås mekanisk, men at det var nødvendigt at integrere elektricitetslæren som et selvstændigt element i beskrivelsen.

I 1901 viste den italienske fysiker og elektroingenør Giovanni Giorgi, at det er muligt at skabe et rationelt, kohærent og konsistent enhedssystem ved at supplere de tre mekaniske enheder meter, kilogram og sekund (MKS) med en fjerde enhed af elektrisk natur. Der var nogen diskussion om, hvilken af de elektriske enheder, man skulle vælge. Det vigtigste var, at den valg-



Billedet viser en amperevægt fra USA's National Bureau of Standards (nu NIST). Som principtegningen viser, består den af en følsom laboratorievægt, hvor den ene vægtskål er erstattet af en spole, som hænger over en fastmonteret spole. Strømstyrken (I) i spolerne bestemmes ud fra, hvor meget masse der skal lægges på vægtskålen for at modsvare tiltrækningen mellem spolerne.

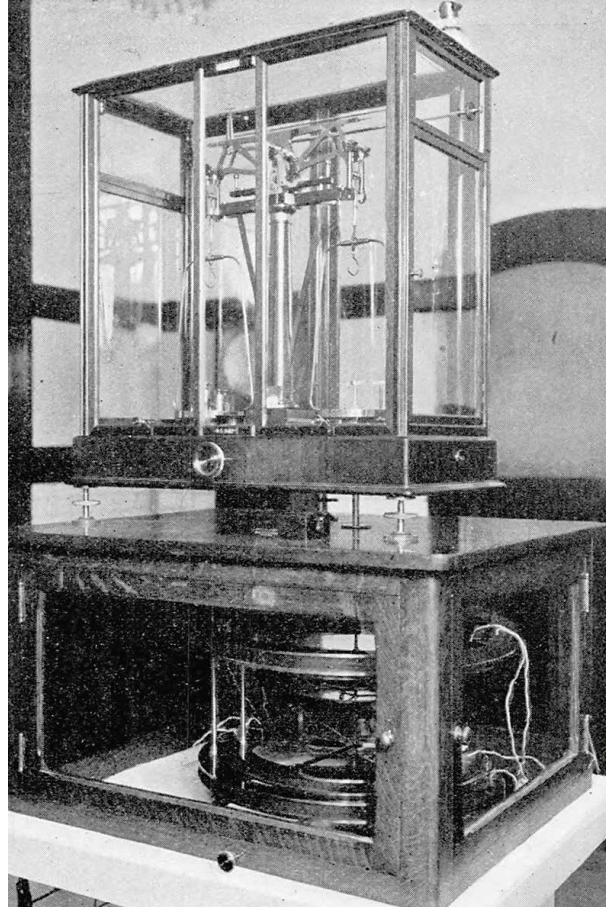
Kilde: Standards Yearbook 1927.

te enhed kunne realiseres nøjagtigt og reproducerbart. Derfor blev det ampere, da mange nationale standardiseringslaboratorier allerede var i gang med præcisionsmåling af strømstyrke ved hjælp af såkaldte amperevægte.

Amperevægten, eller strømvægten som den også kaldes, er et elektromekanisk apparat, der bruges til meget præcis måling af elektrisk strømstyrke. Strømmen, der skal måles, føres gennem to trådspoler, hvoraf den ene er fast, mens den anden er monteret på den ene arm af en følsom vægt. Den elektromagnetiske kraft mellem de to spoler bestemmes så ud fra den masse, der skal placeres på vægts modsatte arm for at opretholde ligevægt. Når spolerens geometri er kendt, kan strømstyrken derefter beregnes nøjagtigt ud fra kraften.

Det var på dette grundlag, at Bureau International des Poids et Mesures i 1948 ændrede definitionen på 1 ampere til den ovennævnte om kraften mellem to parallelle ledere.

Giorgis såkaldte MKSA-system byggede bro mellem den abstrakte fysik og målinger i den virkelige verden og har derfor været nyttigt



for både teoretikere og praktikere. Samtidig har det helt sikkert gjort det knapt så svært for skoleelever og studerende at sætte sig ind i elektricitets teorier, som det ellers ville have været. Derfor blev Giorgis system grundlaget for SI-systemet, som efter et længere tilløb blev etableret af Meterkonventionens medlemslande i 1960.

Den nye amperedefinition

Selvom den nævnte definition smukt udsprang af Ampères opdagelser, havde den både praktiske og principielle problemer, som bidrog til, at realiseringen af 1 ampere havde en relativ usikkerhed på 10^{-6} til 10^{-7} .

Det praktiske problem var, at det på trods af præcise strømvægte var svært at måle 1 ampere nøjagtigt nok.

Det principielle problem var, at amperedefinitionen på grund af koblingen til mekanisk kraft afhang af definitionen af masse og dermed af en materiel prototype, kilogramloddet i Paris. Men da massen af loddet tilsyneladende fluktuerede en lille smule, var 1 ampere heller ikke veldefineret. Derfor var der et voksende ønske om at definere enhederne kilogram og ampere ud

Amperemetret

Det er børnelærdom for mange, at man måler elektrisk strømstyrke med et amperemetret. Der er måske færre, der ved, at måleinstrumentet udspringer direkte af Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen i 1820. Han bemærkede nemlig, at størrelsen af kompasnålels udsving afhang af strømstyrken i ledningen. Ørsteds forsøgsopstilling var altså en primitiv strømmåler.

Den tyske videnskabsmand Johann Schweigger videreudviklede straks ideen ved at vikle en ledning mange gange rundt om et kompas, hvorved han gjorde instrumentet langt følsommere. Han kaldte det derfor en multiplikator. Ulempen ved denne type instrument var, at det skulle orienteres på en ganske bestemt måde i forhold til Jordens magnetfelt.

Det klassiske elektromekaniske amperemetret er af en senere type. I 1882 opdagede fysikeren Jacques-Arsène d'Arsonval og elektroingeniøren Marcel Deprez nemlig, at de kunne lave et meget mere nøjagtigt instrument ved i stedet at benytte en stationær, permanent magnet og en bevægelig spole. Ud over at have bedre følsomhed og linearitet var det såkaldte drejespoleinstrument også mindre påvirket af ydre magnetiske felter.

I dag er de fleste amperemetre integreret i et digitalt multimeter. Heri omsættes den målte strøm af en analog-til-digital-konverter til en talværdi, som vises på et display.

Demonstrationsamperemetret fra Steno Museets samling. Bemærk drejespoleinstrumentets opbygning med en bevægelig spole placeret i en hesteskomagnet. Spolen er vundet omkring en kerne af blødt jern for at koncentrere og forstærke det magnetiske felt i spolen.

Elektrikere og teknikere bruger ofte et såkaldt tangamperemetret. Det er et digitalt multimeter, som er udstyret med en klemme, der kan gribe omkring en ledning. Derved er det muligt at måle strømmen i ledningen induktivt uden at skulle afbryde kredsløbet.



Foto: Kim Frost, AU Foto

Multiplikator fra midten af 1800-tallet. Messingnålen på tværs af kompasnålen er umagnetisk og fungerer som viser. Instrumentet kan roteres, så kompasnålen i hvilestilling ligger inde i spolen. Instrumentet indgår i Steno Museets store samling af måleinstrumenter.

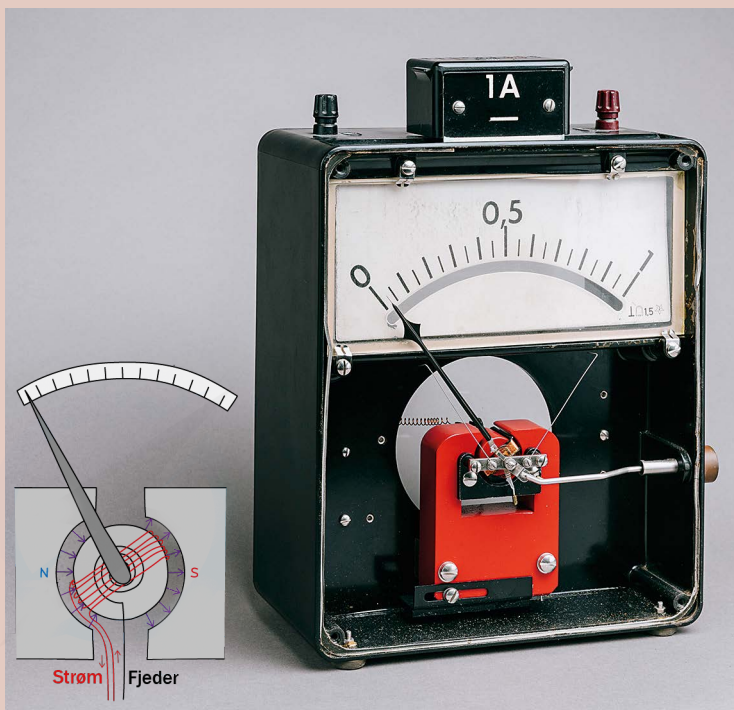


Foto: Kim Frost, AU Foto



Foto: Colourbox

fra uforanderlige naturkonstanter i stedet for et fysisk objekt.

For at løse begge problemer indførte Bureau International des Poids et Mesures 20. maj 2019 en ny definition på 1 ampere, som tager udgangspunkt i elementarladningen. Det betyder, at man ikke længere fastlægger 1 ampere ud fra en kraftpåvirkning, men ved at tælle elektroner. Baggrunden er, at vi nu – i modsætning til Ampère – ved, at strøm er et udtryk for ladning i bevægelse. Jo flere ladninger per sekund, desto større strømstyrke.

Enheden for elektrisk ladning, coulomb (C), var tidligere defineret som den ladning, en strøm på 1 ampere leverer i løbet af 1 sekund, dvs. $C = A \cdot s$. Det betød, at elementarladningens *målte* værdi på cirka $1,602 \cdot 10^{-19}$ C var fastsat ud fra definitionen af 1 ampere – med den usikkerhed, den besad. Med den nye definition har man vendt det hele på hovedet ved at gøre elementarladningens værdi til en *defineret størrelse*.

Selvom det intuitivt giver god mening at definere strømstyrken ud fra, hvor meget ladning der passerer et tværsnit per sekund, er den formelle definition noget kryptisk: "Ampere ... er defineret ved at fastsætte den numeriske værdi af elementarladningen e til at være eksakt $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$, når den udtrykkes i enheden C, som er lig med A s, hvor sekundet er defineret fra $\Delta\nu_{Cs}$."

Sagt på mere jævnt dansk betyder det, at 1 ampere er den strømstyrke, der opstår, når $1/1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ elementarladninger svarende til $6.241.509.074.460.762.608$ elektroner løber igennem et tværsnit af en ledning hvert sekund.

Hvordan udmåler vi nu 1 ampere?

Som man måske kan fornemme, er realiseringen af denne definition heller ikke trivial. I praksis gør



Credit: NIST, © Robert Rathe

Ultrapræcise elektriske målinger skal foregå ved meget lave temperaturer for at mindske den elektriske støj. Her ses fysikeren Rand Elmquist fra National Institute of Standards and Technology (NIST) fylde flydende helium på et apparat til måling af kvante-Hall-effekten for at køle det ned til tæt på det absolutte nulpunkt.

man det på to forskellige måder: Enten tæller man elektroner, eller også går man en omvej, hvor man via ekstremt præcise målinger af spænding og modstand kan regne sig frem til strømstyrke.

Elektrontælling foregår ved hjælp af såkaldte enkeltelektronkilder. De er baseret på særlige kvanteprocesser, som gør det muligt at frembringe et veldefineret antal elektroner per sekund. De dannede strømme er dog kun på få pA (10^{-12} A), så for at metoden kan bruges i praksis, er man afhængig af meget kraftige og støjsvage strømforstærkere.

Det er derfor, man i stedet ofte går via to kvantemekaniske fænomener kaldet Josephson-effekten og kvante-Hall-effekten, som forbinder både spænding og modstand med bestemte kombinationer af Plancks konstant h og elementarladningen e . Derved

kan man meget præcist realisere 1 volt og 1 ohm ud fra disse naturkonstanter værdi, og derefter fastlægge den korrekte størrelse af 1 ampere ved hjælp af Ohms lov.

Med den nye amperedefinition og disse metoder, er det nu muligt at realisere 1 ampere 10-100 gange mere præcist end med den tidligere definition.

Selvom det i mange videnskabelige og højteknologiske sammenhænge er vigtigt med en præcist defineret og nøjagtigt realiserbar ampere, er det heldigvis ikke noget, man behøver at bekymre sig om i dagligdagen. Både den store strøm i lampen over dit hoved og de små strømme i mobiltelefonen i din hånd skal nok løbe alligevel. Og selv hvis du en gang imellem bruger et amperemeter, er det ikke den nye definition, der afgør, om det måler rigtigt. ■

Videre læsning

Neal Carron (2015) Babel of Units. The Evolution of Units Systems in Classical Electromagnetism, arxiv.org/abs/1506.01951.

National Institute of Standards and Technology (NIST) om ampere: www.nist.gov/si-redefinition/ampere-introduction

Om SI-systemet: www.bipm.org/en/publications/si-brochure/

Om realiseringen af de elektriske enheder: www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique