Ny volt, ny ohm, ny temperaturskala

Finn Berg Rasmussen, H.C.Ørsted Instituttet

Siden nytårsdag har nye ''praktiske'' vedtægter for størrelsen af en volt og af en ohm været i kraft. Den internationale temperaturskala er ændret fra samme dato.

De praktiske virkninger kan illustreres ved følgende: Et præcisionsvoltmeter kalibreret i USA før 1. januar 1990, vil vise en værdi for spændingen, der nu er ca. 9 milliontedele for stor. En standardmodstands angivne værdi vil nu være ca. 1,7 milliontedele for stor. For temperaturmålinger er justeringen mere kompliceret. En temperatur, der sidste år blev målt til 100,000 °C, skal nu angives til 99,974 °C, altså 0,026 °C = 26 mK lavere, mens temperaturer i området omkring 800 °C skal forøges med ca. 0,35 °C. Ved lave temperaturer, fra skalaens begyndelse ved ca. 0,6 K og op til 0 °C, er den største korrektion 14 mK.

Det skal understreges, at der ikke er sket nogen ændring af SI-systemet eller af dets fundamentale enheder. Tværtimod tjener revisionen til at bringe fremtidige målinger i bedre overensstemmelse med SI-systemet, end man kan opnå med de hidtidige måleforskrifter.

Det følgende er en kort forklaring af baggrunden for de nye vedtægter. Først gennemgås de nye elektriske enheders relation til SI-systemet, derefter deres praktiske realisering, og endelig omtales opbygningen af den nye praktiske temperaturskala. En langt mere indgående behandling af fysikken bag målingerne gives af H. Højgaard Jensen i en artikel i *Fysisk Tidsskrift*[1]. For detaljerede praktiske anvisninger må der henvises til egentlige fagartikler, fortrinsvis i tidsskriftet *Metrologia*.

SI-systemet

SI (Systéme International) er et nøje afstemt system af fysiske størrelser og enheder. Kernen i systemet er fire grundstørrelser, længde, masse, tid og strømstyrke. Enhederne for disse størrelser, meter, kilogram, sekund og ampere (med de kendte forkortelser m, kg, s og A) er grundenheder i systemet. Meningen hermed er, at enhver fysisk størrelse, der kan udtrykkes ved de fire grundstørrelser, skal måles i enheder, som kan afledes af de fire grundenheder.

Enheden for masse er den eneste grundenhed, der (endnu) er defineret ved hjælp af een bestemt genstand, normalkilogrammet, som man derfor er henvist til at behandle med yderste omhu.

De øvrige grundenheder er defineret ved naturfænomener og er derfor principielt tilgængelige overalt. Sekundet defineres gennem frekvensen forbundet med en kvanteovergang mellem to niveauer i ^{133}Cs-atomet og meteren ved den strækning, som lyset tilbagelægger i vakuum i en vis brøkdel af et sekund.

Ud fra disse mekaniske grundenheder afledes enheden for kraft gennem Newtons 2. lov (Newton = N = $kg{\cdot}m{\cdot}s^{-2}$). Energienheden fås fra definitionen af arbejde (Joule = J = $N{\cdot}m = kg{\cdot}m^2{\cdot}s^{-2}$), og enheden for effekt fra definitionen af arbejdshastighed (Watt = W = J/s = $kg{\cdot}m^2{\cdot}s^{-3}$).

Enheden for elektrisk strømstyrke (ampere = A) er i SI-systemet en grundenhed, der defineres ud fra kraften mellem to parallelle ledninger i en bestemt afstand, der gennemløbes af den samme strøm. Realiseringen af en ampere kræver således måling af kraft og af længder i overensstemmelse med disse enheders definitioner. De øvrige elektriske enheder afstemmes hertil. Enheden for spænding (Volt = V) kommer man til ved at dividere enheden for effekt med enheden for strøm (V = W/A = $kg{\cdot}m^2{\cdot}s^{-3}A^{-1}$). Endelig findes modstandsenheden (Ohm = Ω) udfra en Volt (Ω = V/A = $kg{\cdot}m^2{\cdot}s^{-3}A^{-2}$).

Praktiske enheder

Som man ser, går det hurtigt med at fortælle, hvordan f.eks. en Ohm er defineret ud fra grundenhederne. Men at realisere en Ohm helt fra grunden, med en nøjagtighed på højde med dagens måleteknik, er en lang og krævende opgave, der betyder års arbejde. Standardlaboratorierne vælger derfor, som resultat af sådanne målerækker, at etablere praktiske repræsentationer for de vigtigste enheder.

De praktiske repræsentanter (''normaler'') danner grundlag for de mere rutineprægede instrumentkalibreringer, hvorved størrelsen af f. eks. en volt kommunikeres ud i samfundet. For målinger i praksis, både i forskning og i mere praktiske anvendelser, er det vigtigere, at størrelsen af en given måleenhed er konstant, end at den er pinligt korrekt i SI-systemets forstand. Der går derfor lang tid mellem ændringer i normalernes angivne størrelse, også selv om man efter nogen tid opdager, at værdien afviger noget fra den korrekte. Og ændringer foretages kun, når der foreligger en god ny grundmåling, og når der er mulighed for en betydelig måleteknisk forbedring.

Valget af praktiske normaler for de afledte enheder afhænger således af de foreliggende tekniske muligheder på det givne tidspunkt. En ohm har hidtil været opretholdt ved sæt af trådviklede modstande, og volten var indtil for nogle år siden repræsenteret ved et sæt af specielle galvaniske elementer, hvis spænding havde vist sig at være særligt stabil.

Der er indlysende vanskeligheder ved denne metode. Ved at opbevare et helt sæt af normaler kan man ganske vist opdage, hvis en enkelt normal bliver ''syg'' og driver væk fra de øvrige, men virkningen af en almindeligt udbredt ældning kan ikke uden videre ses. Desuden har der ofte vist sig at være forskelle fra land til land i den værdi, som man ville tillægge en og samme normal. Hvad specielt volt og ohm angår, har det længe været klart, at vanskelighederne kunne omgås ved at benytte sig af Josephson-effekten og af kvante-Hall-effekten.

Volt og ohm defineret ved kvanteeffekter

Den nye voltstandard, som udnytter *vekselstrøms-Josephson-effekten*[2], består af to superledende elektroder, som holdes adskilt af et tyndt isolerende lag. Når laget er tyndt, er der mulighed for, at elektroner kan passere fra den ene elektrode til den anden ved kvantemekanisk tunnel-effekt gennem isolatoren. Når elektroderne er superledende, og lagtykkelsen nede på ca. 1nm, er strømmen mellem elektroderne domineret af elektroner, der kommer i par, de såkaldte Cooper-par, som er et væsentligt element i dannelsen af den superledende tilstand. Hvis en sådan Josephson-kontakt bestråles med mikrobølger, så giver en måling af spændingsforskellen mellem elektroderne som funktion af strømstyrken en trappeformet kurve. Trappetrinene er lige høje, og spændingsforskellen U_n på det n'te trin kan skrives som $U_n = n \cdot f/K_J$, hvor f er mikrobølgernes frekvens, og K_J er en universel konstant, Josephson-konstanten.

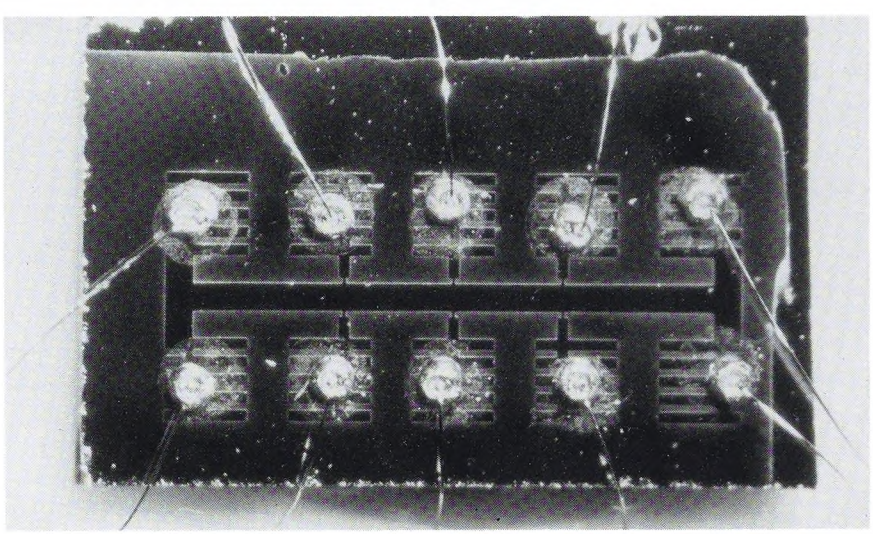
Ifølge teorien for fænomenet er Josephson-konstanten givet ved elektronens ladning e og Plancks konstant h ved ligningen $K_J = 2e/h$. Man kan tænke på denne relation som et resultat af Bohrs frekvensbetingelse for et par af elektroner, der ved at passere fra den ene elektrode til den anden foretager et kvantespring gennem energiforskellen $\Delta E = 2e \cdot U = hf$. Der eksisterer en eksperimentel sammenligning mellem to Josephson-kontakter fremstillet af forskellige superledere, hvor K_J for de to viste sig at være ens indenfor en relativ usikkerhed på 2×10^{-16}.

Den nye volt, gældende fra 1. januar 1990, er fremkommet ved en international vedtægt (gennem CIPM, Comité International des Poids et Mesures) af værdien $K_{J\text{-}90}$ = 483 597,9 GHz/V (eksakt) for Josephson-konstanten. Der regnes med, at en volt målt i overensstemmelse med vedtægten højst afviger 0,4 milliontedele fra den SI-definerede volt. Konsekvensen af denne vedtagelse er en korrektion af de eksisterende, forskellige, nationale voltstandarder. Korrektionen er størst for den amerikanske standard, hvor den som nævnt andrager 9 milliontedele.

Hall-effekten kan iagttages i en leder, der er underkastet et ydre magnetfelt vinkelret på en elektrisk strøm gennem lederen. Her vil opstå en spændingsforskel U_H på tværs af strømmen I og vinkelret på magnetfeltet. Størrelsen $R_H = U_H/I$ har dimension af en modstand og kaldes Hall-modstanden. Ved hjælp af halvlederteknologi kan man fremstille plane strukturer, hvor de elektroner, der leder strømmen, opfører sig som en to-dimensional gas. K. von Klitzing opdagede i 1980, at når man måler R_H som funktion af magnetfeltet, så viser den en tendens til at stabilisere sig på bestemte niveauer, hvis højde er givet ved $R_H(n) = R_K/n$. R_K betyder her en konstant (der nu kaldes von Klitzing-konstanten), og n er et helt tal. Denne kvante-Hall-effekt bliver kun tydelig i meget stærke magnetfelter (5-15 Tesla) og ved temperaturer under 1 Kelvin. Den stiller også høje krav om materialekvalitet. Men det har vist sig, at R_K kan reproduceres indenfor en relativ usikkerhed på ca. 3×10^{-9}.

For at forstå kvante-Hall-effekten skal man tage i betragtning, at elektronernes baner i et kraftigt magnetfelt er lukkede kurver. Kvantisering af bevægelsen i disse lukkede baner fører til en teoretisk værdi for von Klitzing-konstanten på $R_K = h/e^2$.

I lyset af, at R_K er en universel konstant, og af dens eksperimentelle reproducerbarhed har CIPM besluttet, at en ohm fra og med 1. januar 1990 kan realiseres ved hjælp af kvante-Hall-effekten og med benyttelse af værdien $R_{K\text{-}90}$ = 25 812,807 Ω (eksakt). En ohm etableret på denne måde ventes at stemme overens med en SI-ohm indenfor 0,2 milliontedele.



Figur 1. Chip til måling af kvante-Hall effekten[3]. Den elektriske strøm går langs den 4 mm lange, sorte streng, som er opbygget på en isolerende grundplade. Strengens underste lag består af GaAs. Ovenpå ligger et lag af $Ga_{0,72}Al_{0,22}As$, hvis overside er let doteret som n-type materiale. Ledningselektronerne i systemet samler sig ved grænsefladen mellem de to lag, hvor de danner en todimensional gas. Hall-spændingen V_H måles på tværs af strømmen mellem de to midterste elektroder. Når V_H måles som funktion af et magnetfelt vinkelret på papirets plan (ved konstant strøm I), ser man kvantiserede trin. Forholdet V_H/I på et sådant trin definerer den nye internationale, praktiske ohm.

Det er vigtigt at bemærke, at den nye praktiske definition af normaler for volt og ohm ikke må opfattes som en vedtagelse af værdier for e og h. Vedtægten gælder værdier for konstanterne K_J og R_H, til brug i målinger med henholdsvis Josephson- og kvante-Hall-effekt. h og e er naturkonstanter, som kan måles ved flere, uafhængige metoder. Hvordan man finder de bedste værdier for disse og andre naturkonstanter, er en helt anden historie.

Den Internationale Temperatur Skala, ITS-90

''Temperatur'' betyder i SI-systemet den termodynamiske temperatur, som den defineres i varmelæren. Vi skal ikke her gå ind på denne definition, blot bemærke, at den termodynamiske definition kun formulerer, hvad man skal forstå ved *forholdet* mellem to temperaturer. Grundenheden for temperatur (Kelvin = K) er defineret som en bestemt brøkdel af temperaturen for et vist fikspunkt, nemlig vandets triplepunkt: den temperatur og det tryk, hvor rent vand i termisk ligevægt kan være tilstede i tre tilstandsformer (fast, flydende og mættet damp).

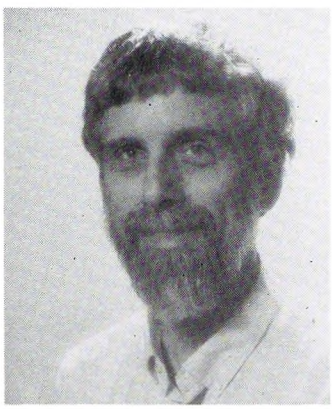
ITS-90 afløser den hidtil gældende internationale praktiske temperaturskala IPTS-68 og en provisorisk lavtemperaturskala EPT-76. I lighed med sine forgængere består ITS-90 dels i temperaturangivelser for en række termometriske fikspunkter (triplepunkterne for H_2, Ne, Ar, O_2, samt Hg og frysepunkterne for Ga, In, Sn, Zn, Al, Au samt Cu), dels i måleforskrifter for interpolation imellem disse samt for temperaturer udenfor det område, som fikspunkterne omfatter. Ved de laveste temperaturer, ned til 0,65 K, anvendes damptrykket af ^{3}He og ^{4}He samt heliumgastermometri. Fra ca. 14 K til 962 °C anvendes platinmodstandstermometri, og ved højere temperaturer benyttes Plancks strålingslov (pyrometri).

Den nye praktiske temperaturskala må opfattes som en udkrystallisation af de mest pålidelige målinger af den termodynamiske temperatur for de nævnte fikspunkter.

Kalibreringer efter den nye voltstandard kan foretages af Dansk institut for fundamental Metrologi (DFM)[4], og et vigtigt afsnit af ITS-90 nemlig området 0-420 °C, er etableret ved Dansk teknologisk Institut i Århus[5].

Referencer:

1. H. Højgaard Jensen, Fysisk Tidsskrift **87** (1990).
2. P. E. Lindelof og N. F. Pedersen, Naturens Verden 1980, 250-263 (1980).
3. B. N. Taylor, Physics Today, august 1989, 23-26 (1989).
4. henv. t. Jan-Ulrik Holtoug, telf. 45 93 11 44.
5. henv. t. Ib Wessel, telf. 86 14 24 00.



Finn Berg Rasmussen, lektor ved Fysisk Laboratorium, Københavns Universitet. Gæsteforsker/professor ved ETH, Zürich 1965/66, Cornell University, New York 1973/74, og Université de Paris-Sud 1982, 1988, 1990. Termodynamiske og NMR eksperimenter ved millikelvin temperaturer.