Meteren, lyset, og den forunderlige laser - om definition, realisering og sporbarhed

Jes Henningsen. Lektor, dr.scient. Dansk Institut for Fundamental Metrologi

Indledning

En af de få kendsgerninger, der er fælles for danskernes tekniske paratviden, er at meterdefinitionen er baseret på en platin-iridium stang, der under særdeles beskyttede omstændigheder opbevares i Paris. Forkert! Sådan var situationen ganske vist i en periode på godt 160 år, fra den første platinmeter blev fremstillet i 1799, men der er nu gået mere end 30 år siden platinmeteren i 1960 blev overhalet af den tekniske udvikling, og overgik til museumsstatus. Siden da er meterdefinitionen blevet ændret endnu en gang, og gennem sin ca 200 års levetid har den bevæget sig fra polarkvadranten, over platin-iridium normaler og kryptonlamper, til den i dag er baseret på lysets hastighed i det tomme rum. Parallelt hermed er reproducerbarheden blevet forbedret med fem størrelsesordener, således at en meter i dag kan realiseres med en relativ nøjagtighed på 10^{-10}.

Cubit og alen

Behovet for at have en enhed for længde er formentlig opstået på det tidspunkt hvor mennesker første gang er begyndt at handle med hinanden. Den tidligste vi kender er en cubit, der har været anvendt i Babylon, Egypten og Rom. Navnet kommer fra det latinske ord *cubitus*, der betyder albue, og ganske analogt kan vor egen alen spores tilbage til det tilsvarende græske ord ωλενη. Dette illustrerer et generelt træk, nemlig at de tidligste enheder var afledt af dimensioner, der på en eller anden måde havde med det menneskelige legeme at gøre. Og deres livskraft afspejler sig i at man den dag i dag stadig klarer sig fint i en tøm merhandel når man specificerer brøddernes tykkelse i enheder af en tommelfingerbredde, og deres længde ved hjælp af fødderne.

For at komme ud over de individuelle variationer i den menneskelige anatomi, blev enheder som tomme, fod og alen tidligt defineret gennem det man kalder *materialiserede mål*, dvs målestokke af specifik længde, opbevaret på et passende sikkert sted. Frem til 1700 tallet havde hver by og hver region sine egne prototyper, men med et stadig mere udbygget handelssamkvem og med naturvidenskabens behov for kommunikation af præcise måleresultater på tværs af landegrænser, var der efterhånden opbygget et behov for et internationalt anerkendt enhedssystem. Og i 1790 fremlagde Talleyrand i den franske nationalforsamling det lovforslag, der 9 år senere førte til, at metersystemet blev indført i Frankrig.

Polarkvadranten

Etablering af enheden for en fysisk størrelse involverer tre essentielle trin

1) Enheden skal *defineres*
2) På basis af definitionen skal enheden *realiseres*
3) Den realiserede enhed skal *opbevares* på en sådan form, at den kan anvendes til kalibreringer.

Meteren blev *defineret* som en timilliontedel af polarkvadranten, dvs. afstanden mellem jordens nordpol og ækvator. Hermed var den fastlagt udfra en geofysisk størrelse, der måtte formodes dels at holde sig konstant igennem tiden, dels at være hævet over eventuelle nationale fordomme. Det sidste punkt var dog kun delvis opfyldt, idet man præciserede at definitionen gjaldt for den meridian, der går gennem Paris. For at *realisere* definitionen, valgte man at udmåle et udsnit af denne meridian, og for dog at give realiseringen et vist internationalt element, lod man udsnittet krydse grænsen til Spanien, med endestationer i Dunkerque og Barcelona.

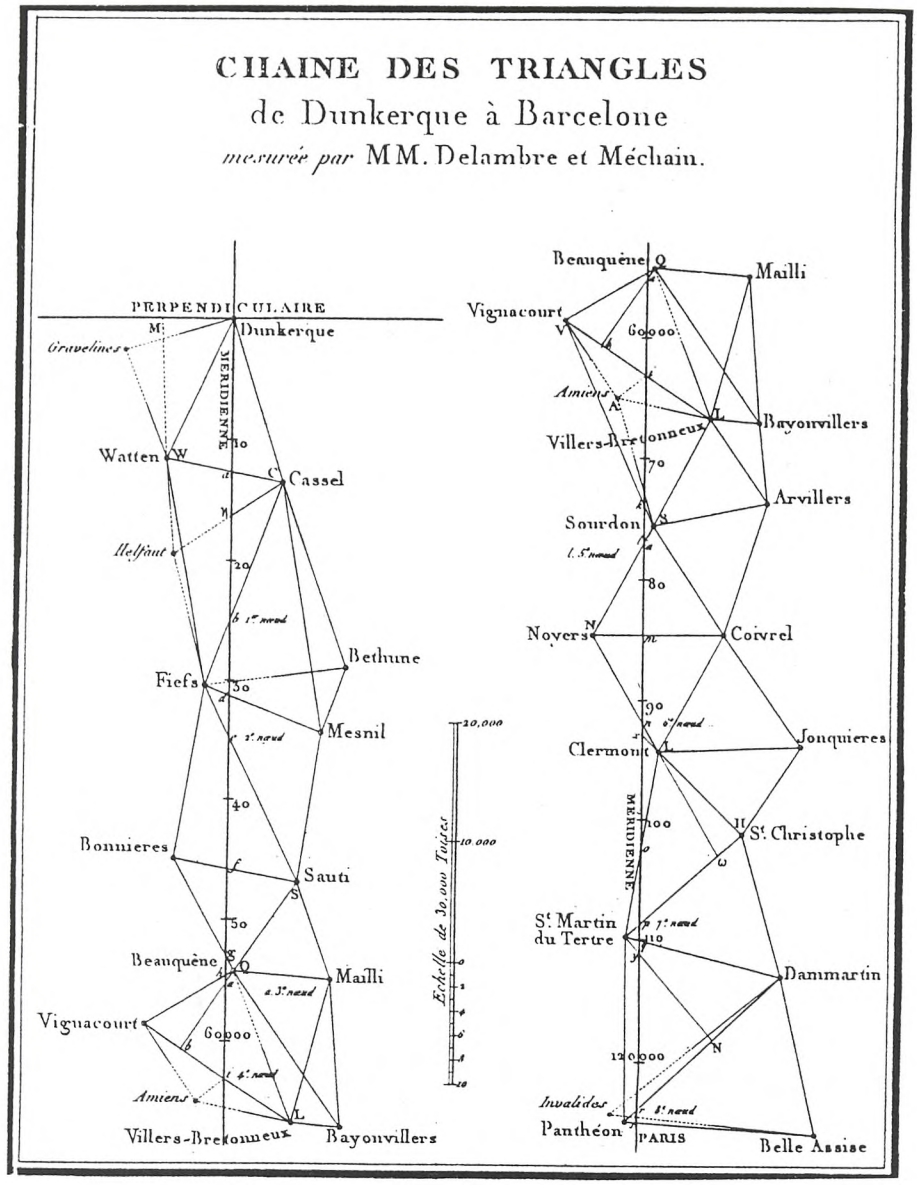
Medens Tuillerierne blev stormet, og medens østrigske og preussiske tropper rykkede frem mod Paris, indledte M.M. Delambre og Méchain i 1792 det uhyre omfattende arbejde med at triangulere sig ned gennem Frankrig og udmåle vinkler og sider i trekanter på samme måde som landmålere har gjort helt op til vor tid. Da de i 1797 var færdige, kunne de, efter at have suppleret med nøjagtige målinger af breddegraderne for de to endepunkter, fremlægge resultatet for jordkvadranten, udtrykt i toise, den enhed man dengang anvendte. Ved at sætte dette lig 10.000.000 meter kunne man nu etablere omregningsfaktoren mellem toise og meter, og den således realiserede meter blev herefter *opbevaret* i form af meterstokke, fremstillet af platin, det mest bestandige materiale man kendte, og sikkert forvaret i det franske nationale arkiv.

Der skulle gå mange år før det internationale samfund var parat til at følge Frankrig, og først ved en diplomatisk konference i 1875 kunne 20 lande, heriblandt Danmark, undertegne meterkonventionen. Et institut - Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) - blev oprettet med det formål at forestå fremstilling af prototyper, og endelig i 1889, kunne den Første Internationale Konference for Mål og Vægt give meteren status som internationalt anerkendt længdeenhed.

Platinmeteren

På det tidspunkt var det allerede muligt at foretage kalibreringer i forhold til platinmeteren med en nøjagtighed på omkring 0.2 μm. Hvis den samme relative nøjagtighed skulle opnås i udmålingen af jordkvadranten, så skulle usikkerheden på de ca 1100 km fra Dunkerque til Barcelona

Triangulering

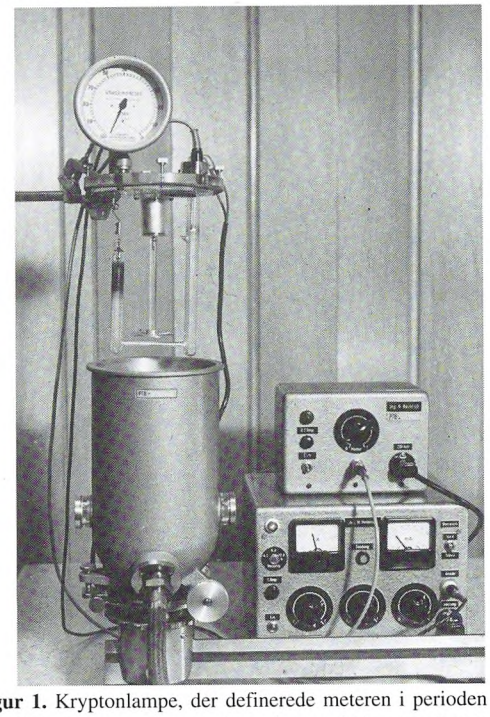


I triangulering går man ud fra en basis, der udmåles så nøjagtigt som muligt. Fra dens to endepunkter måles sigtevinkelen til et tredie punkt, og afstanden til dette kan herefter beregnes. En af de fundne sider i trekanten kan nu benyttes som basis i en ny trekant. På figuren ses den nordligste del af Delambre og Méchains trianguleringer, dækkende strækningen Dunkerque-Paris. Usikkerheden på længden af hele strækningen til *Barcelona*, der bl.a. forløber hen over Pyrenæerne, var blot ca 13 meter.

ned på 20 cm, og at nå en sådan nøjagtighed ved triangulering var naturligvis helt urealistisk. I konsekvens heraf blev platinmeteren anvendt ikke blot som *opbevaring*, men også som *definition* af meteren. Skønt dette valg repræsenterede det optimale i henseende til nøjagtighed, så var det i en anden forstand et tilbageskridt. For hvor jordkvadranten er fælleseje, så indtog Frankrig nu en særstilling i forhold til andre nationer. Kalibreringer af de nationale prototyper var betinget af adgang til Frankrig, og helt bortset fra hvad politiske forhold, verdenskrige og lignede måtte indebære, så ville der altid være en potentiel risiko for at meteren simpelthen gik tabt.

Kryptonmeteren

Muligheden for at vende tilbage til en mere almen definition viste sig indenfor atomfysikken. Allerede tidligt i 1800-tallet vidste man at atomer udsender lys i *form* af spektrallinier, og i 1865 havde Maxwell opstillet de ligninger, der viser at lys er elektromagnetisk stråling, hvor produktet af frekvens og bølgelængde er lig lysets hastighed. En række eksperimenter førte gradvist til den erkendelse at lysets hastighed i det tomme rum er en naturkonstant, der er uafhængig af såvel lysgiverens som iagttagerens hastighed. Det var en erkendelse der på radikal måde stred mod intuitionen, og den var en del af grundlaget for den specielle relativitetsteori, som Einstein formulerede i 1905. Den dybere forståelse af mekanismen bag atomers lysudsendelse kom kort tid efter med Bohrs atommodel, der sammenknytter frekvensen af det udsendte lys med energiforskelle mellem atomernes stationære tilstande. Og pointen er nu at et atom er et bemærkelsesværdigt uforanderligt objekt, og i den henseende langt overgår jorden. For hvor jordens omkreds kan ændre sig på grund af erosion, meteornedslag, og lignende, og hvor afstanden mellem to punkter på jorden kan ændre sig på grund af jordskælv eller kontinentaldrift, så er vi ret sikre på at de stationære tilstande for et isoleret atom er evigt uforanderlige.



Figur 1. Kryptonlampe, der definerede meteren i perioden 1960 til 1983. For at reducere den ubestemthed, der stammer fra kryptonatomernes termiske bevægelse, er lampen kølet med flydende kvælstof til -196°C. Billedet er udlånt fra PTB, Braunschweig.

I 1960 var man nået så langt i henseende til udmåling og sammenligning af lysbølgelængder at tiden var moden for den tredie meterdefinition, og meteren blev nu fastlagt som 1.650.763,73 gange bølgelængden af det orange lys, der udsendes fra krypton isotopen med massetal 86, når den anvendes i en spektrallampe under nærmere specificerede driftsbetingelser. Hermed havde man opnået to væsentlige forbedringer. For det første indebar den nye definition en forbedring i reproducerbarhed på 50 gange, men med dette tekniske fremskridt fulgte også den mere principielle fordel at meteren nu kunne realiseres i et hvilket som helst laboratorium verden over ved at følge nogle præcise forskrifter. Alle krypton-86 atomer er lige gode, og definitionen beror ikke længere på et specifikt objekt, der opbevares et bestemt sted. Meterdefinitionen var blevet decentraliseret.

Laseren

Netop det år hvor krypton definitionen blev indført, blev laseren opfundet, og hermed var der sat en udvikling i gang, der 23 år senere skulle give krypton-lampen plads på museumshylden ved siden af platin-iridium meteren.

Lys i daglig forstand indeholder altid et spektrum af bølgelængder, og det samme gælder for det lys, der udsendes fra krypton-lampen. Selv om dens orange lys stammer fra en enkelt spektrallinie, vil atomernes tilfældige termiske bevægelser via Doppler effekten gøre bølgelængden en anelse ubestemt, og det er denne ubestemthed, der i sidste instans begrænser den relative nøjagtighed af krypton definitionen til $4 \cdot 10^{-9}$.

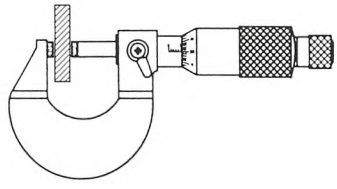
Men lys er elektromagnetiske bølger, og de kendes i en anden manifestation som radiobølger, karakteriseret ved en enkelt bølgelængde, hvor ubestemtheden i princippet kan gøres vilkårligt lille. Under den anden verdenskrig havde behovet for radar betydet at grænserne for radioteknikken var skubbet op i mikrobølgeområdet, og det førte op igennem 1950-erne til teoretiske overvejelser over om man også i det synlige område kunne fremstille en lyskilde, der havde radiobølgens kvaliteter. Det var netop hvad der skete i 1960.

Lasere findes i dag i et utal af varianter, og den der er aktuel i forbindelse med meterdefinitionen er en gaslaser, helium-neon laseren. Ganske som spektrallampen, er gaslaseren baseret på en enkelt spektrallinie, i dette tilfælde fra neon atomet. Men hvor de forskellige atomer i spektrallampen udsender deres lys uafhængigt af hinanden, og med en spredning i bølgelængder, der afspejler deres forskellige hastigheder, så vil de i laseren arbejde sammen, og udsende lys med en bølgelængde, der er ekstremt veldefineret.

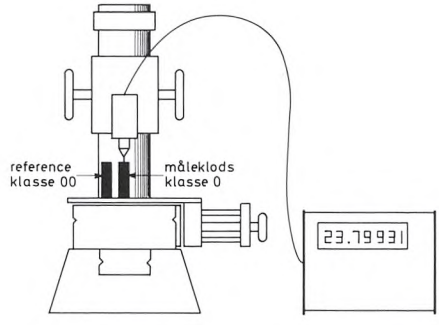
Lysets hastighed

I begyndelsen var der ikke nogen der tænkte på at sætte laseren i forbindelse med meterdefinitionen. Derimod stod det hurtigt klart at hvis man kunne stabilisere *dens* frekvens,

Sporbarhedskæden

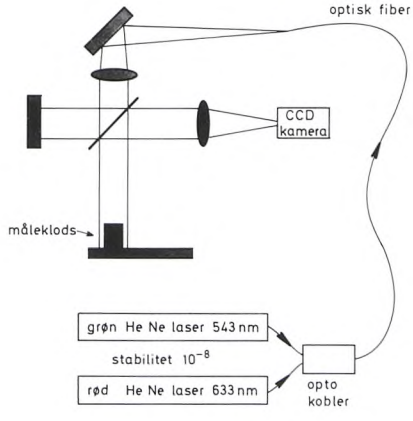


- En længdemåling på et vilkårligt nøjagtighedsniveau kan gennem en kæde af kalibreringer relateres til meterdefinitionen. På værkstedet kontrolleres det mekaniske emne med en mikrometerskrue.

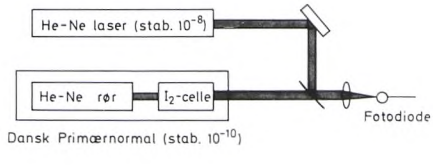


- Mikrometerskruen kalibreres ved hjælp af en måleklods af nøjagtighedsklasse "0". Måleklodser er fremstillet af rustfrit stål, wolfram-carbid, eller keramik, og har plane, højglanspolerede endeflader. Ved kombination af klodser, der heftes sammen ved optisk kontakt, kan man realisere længder mellem 1 og 100 mm i spring på 0.1 mm.

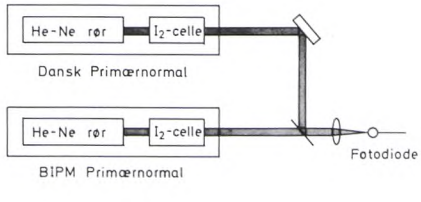
- På et kalibreringslaboratorium sammenlignes måleklodsen ved en mekanisk aftastning med en tilsvarende måleklods af den højere nøjagtighedsklasse "00".



- På Dansk Institut for Fundamental Metrologi (DFM) udmåles klasse "00" måleklodsen interferometrisk i forhold til bølgelængden af en Zeeman stabiliseret *helium-neon* laser, der er stabil indenfor $\pm 2 \cdot 10^{-9}$. Dette skal gøres med intervaller på et til to år, idet faseomdannelser i materialet får måleklodserne til at "vokse".



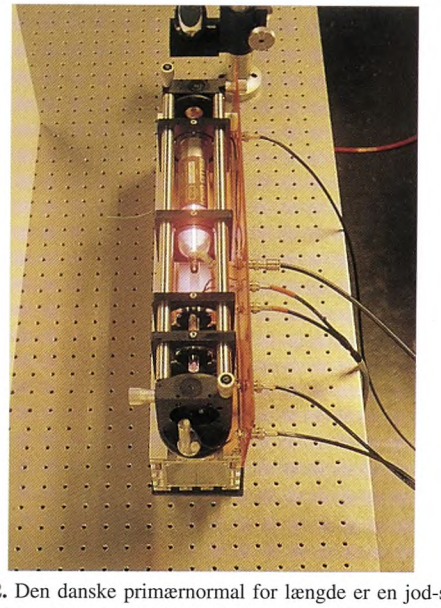
- Frekvensen af den Zeeman-stabiliserede helium- neon laser bliver, ligeledes ved DFM, sammenlignet med frekvensen af den danske primærnormal, en jod-stabiliseret helium-neon laser, der er stabil indenfor $\pm 10^{-10}$. Signalet fra de to lasere sendes ind mod en fotodiode, og differensfrekvensen måles.



- Frekvensen af den danske primærnormal sammenlignes med frekvensen af tilsvarende primærnormaler fra andre lande, og fra BIPM, og der etableres en international konsensus.

og måle den med stor nøjagtighed, så var der via produktet af frekvens og bølgelængde mulighed for at bestemme lyshastigheden med mindre usikkerhed end tidligere.

Princippet i at måle en høj frekvens er at tage udgangspunkt i et signal hvis frekvens er så lav at den kan måles med en elektronisk tæller. Når dette signal sendes ind mod et ulineært element, som f.eks. en diode, dannes der højere harmoniske, hvis frekvenser er eksakte multipla af grundtonen, og disse sammenlignes i den samme diode med den ukendte frekvens. Denne kan nu benyttes til en ny måling af en endnu højere frekvens, og således kan man ved en kæde af sammenligninger arbejde sig fra mikrobølgeområdet, hvor man via cæsiumuret er i kontakt med sekunddefinitionen, op til det optiske område. Antallet af nødvendige led i kæden gjorde målingerne til en sand eksperimentel tour de force, og den kulminerede i 1972, da en gruppe ved det amerikanske National Bureau of Standards målte frekvensen af den røde helium-neon laser, låst til en absorptionslinie i jod-molekylet. Bølgelængden for den samme laser blev udmålt ved direkte sammenligning med krypton normalen, og hermed kunne lyshastigheden bestemmes som 299.792.458 ±1.2 m/sek.



Figur 2. Den danske primærnormal for længde er en jod-stabiliseret helium-neon laser, der befinder sig på Dansk Institut for Fundamental Metrologi i Lyngby.

Der var egentlig ikke tale om nogen særlig stor forbedring af nøjagtigheden i forhold til tidligere, men det interessante var at man nu var stødt ind i en principiel barriere, idet den relative usikkerhed på $4 \cdot 10^{-9}$ udelukkende var bestemt af usikkerheden på kryptonmeteren. Stabiliteten og reproducerbarheden af laseren i sig selv var omkring 10^{-10}, dvs 40 gange bedre, men ingen nok så genial forbedring af eksperimentet ville kunne føre til en større nøjagtighed for lyshastigheden, så længe den skulle udtrykkes ved den til rådighed værende meter. Hermed var kryptonmeterens utilstrækkelighed klart demonstreret, og i 1983 var man klar til at tage konsekvensen.

Den nye meterdefinition

Hvis man havde valgt at gøre i 1983 som man gjorde i 1960, ville man have defineret meteren som et bestemt antal bølgelængder af en jod-stabiliseret helium-neon laser. Man ville så igen have haft en definition som repræsenterede den aktuelle tekniske formåen, men den ville være forældet i samme øjeblik der var udviklet en laser med endnu bedre stabilitet. For at undgå dette tilbagevendende problem valgte man en mere elegant løsning. Man vendte problemstillingen på hovedet, fastsatte definitionsmæssigt lyshastigheden i det tomme rum til 299.792.458 m/sek, og definerede meteren som *den strækning lyset bevæger sig i det tomme rum i 1/299.792.458 sek.* Realiseringen valgte man at basere på den allerede gennemførte direkte udmåling af frekvensen for den jod-stabiliserede helium-neon laser, og opbevaringen af meteren sker herefter i form af sådanne lasere, fremstillet efter nøje fastlagte specifikationer.

Fordelen ved denne strategi er, at når man i fremtiden konstruerer lasere med forbedret stabilitet og reproducerbarhed vil det ikke føre til et behov for at ændre *definitionen* af meteren, idet lyshastigheden i vacuum jo forbliver uforandret. Men den forbedrede stabilitet vil umiddelbart føre til en mere nøjagtig *opbevaring*, og hvis der gennemføres direkte frekvensmålinger, der lever op til disse laseres forbedrede egenskaber, også til en mere nøjagtig *realisering* af meteren. Først når meterdefinitionen begynder at kunne konkurrere med sekunddefinitionen, der for øjeblikket har en relativ ubestemthed på mindre end 10^{-13}, bliver der igen behov for at tage definitionen op til overvejelse.

Næste generation

Med en aldrig svigtende trang til at skubbe grænserne for det mulige endnu længere frem, arbejdes der nu på at eliminere de problemer, der i dag begrænser nøjagtigheden til 10^{-10}. Analyserer man eksperimenterne, bliver det klart at skurken i stykket er hastigheden af de jod-molekyler, der benyttes til at stabilisere laseren. Ifølge relativitetsteorien giver den anledning til en uundgåelig Doppler forskydning, og derfor koncentrerer anstrengelserne sig nu om at udvikle teknikker til, gennem absorption og reemission af lys, at reducere molekylernes hastighed. Målet - at låse laseren via en meget svag kobling til et isoleret molekyle i hvile - ligger ude i fremtiden. Men for hvert lille skridt der tages i den retning vil det blive muligt at måle med højere præcision, og dermed at åbne for ny grundvidenskabelig indsigt.



Jes Henningsen. Lektor, dr.scient. Dansk Institut for Fundamental Metrologi.