

Realisering af *meteren* ved frekvensstabile lasere

Harald Simonsen

Dansk Institut for Fundamental Metrologi
Anker Engелunds Vej 1
DK-2800 Lyngby
E-mail: hs@dfm.dtu.dk

Indledning

I dag foregår præcisionsmålinger af længde med elektromagnetiske bølger. Tidligere var '*en meter*' længden af en vis stang der blev opbevaret i Paris, og metalstænger eller klodser anvendes stadig i kalibrering af måleværktøj på et lavere nøjagtighedsniveau. I dag foregår præcise bestemmelser af måleklodsernes længde i laserinterferometre med stabile lasere med kendte bølglængder og for at kunne måle længde med høj nøjagtighed er det derfor et krav at kunne måle bølglængder eller optiske frekvenser med stor præcision.

Fra meterstokken til laseren

Metersystemet blev født under den franske revolution. På daværende tidspunkt havde hver by og region sine egne prototyper for enheder som tomme, fod og alen, men med et stadig mere udbygget handelssamkvem var der behov for et internationalt anerkendt enhedssystem. I 1790 fremlagde Talleyrand i den franske nationalforsamling det lovforslag, der 9 år senere førte til, at *meteren* blev indført i Frankrig. Meteren blev defineret som en timilliontedel af polarkvadranten, der er afstanden mellem jordens nordpol og ækvator. Hermed var den fastlagt ud fra en geofysisk størrelse, der måtte formodes at holde sig konstant igennem tiden. Den praktiske realisering af meteren foregik ved geodætiske opmålinger (fra 1792 til 1797) af et udsnit af den meridian, der går gennem Paris, med endestationer i Dunkerque og Barcelona. Den realiserede meter blev herefter opbevaret i form af meterstokke, fremstillet af platin og iridium. Der skulle dog gå mange år før det internationale samfund var parat til at følge Frankrig, og først ved en diplomatisk konference i 1875



Fig. 1. Meterstokken som international længdeenhed efter 1889.

kunne 20 lande, heriblandt Danmark, underskrive meterkonventionen. Institutet, 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 (CGPM) give meteren status som international anerkendt længdeenhed. Skønt dette valg repræsenterede det optimale i henseende til nøjagtighed, havde det dog sine problemer. Frankrig indtog en særstilling i forhold til andre nationer, ligesom der altid ville være en potentiel risiko for at meteren simpelthen gik tabt. Muligheden for en mere robust definition viste sig inden for atomfysikken. I midten af dette århundrede var måleteknikken baseret på lys nået så langt, at det nu var muligt at reproducere en længdeenhed 50 gange bedre end den gældende definition baseret på meterstokken. Det førte i 1960 til definitionen af meteren som:

1.650.763,73 gange bølglængden af den orange stråling, der udsendes fra krypton isotopen med massetal 86 ved en elektronovergang $2p_{10}$ til $5d_3$, når den anvendes i en spektrallampe under nærmere specificerede driftsbetingelser.

Den nye definition havde den store fordel, at man gik væk fra meteren baseret på en prototype, der i princippet kun var tilgængelig et sted, nemlig i Paris, og over til en definition der kunne realiseres i et hvilket som helst laboratorium verden over. Kryptonlampen fik dog hurtigt stærk konkurrence fra laseren, der blev opfundet samme år, som krypton definitionen blev indført.

Den nye meterdefinition

Med opfindelsen af laseren fik man rådighed over strålingskilder, hvis frekvens og dermed bølglængde var langt mere veldefineret end de hidtil kendte lyskilder. 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 ν , og måle den med stor nøjagtighed, så var der via produktet af frekvens (med reference til cæsium atomuret) og bølglængde λ (med reference til kryptonlampen) mulighed for at bestemme lyshastigheden $c = \nu \lambda$ med mindre usikkerhed end tidligere.¹ Det interessante var, at selvom nøjagtigheden ikke var ret meget bedre end tidligere, så var man nu stødt ind i en principiel barriere, idet den relative usikkerhed på $4 \cdot 10^{-9}$ udelukkende var bestemt af usikkerheden på kryptonmeteren. Reproducerbarheden af laseren var 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 kryptonmeter, og en ny definition var derfor på sin plads.

Man kunne nu vælge at gøre, som man gjorde i 1960, at definere meteren som et bestemt antal bølglængder af en jod-stabiliseret

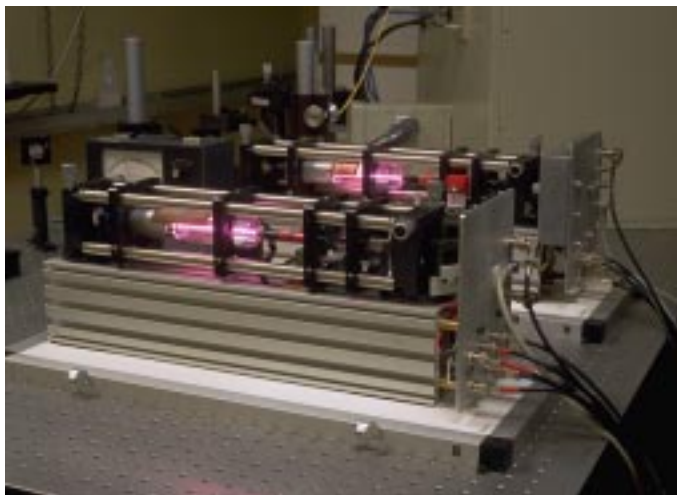


Fig. 2. De danske primærnormaler.

helium-neon laser. Problemet er bare, at man godt nok ville have haft en definition, som repræsenterede den aktuelle tekniske formåen, men den ville være forældet i samme øjeblik, der var udviklet en laser med en endnu bedre stabilitet. For at undgå dette tilbagevendende problem valgte man en mere elegant løsning. Man fastsatte definitions-mæssigt lyshastigheden i det tomme rum (vakuum) til 299.792.458 m/s, og definerede meteren som:

den strækning lyset bevæger sig i det tomme rum i 1/299.792.458 sekund.

Astronomerne havde længe anvendt lysår som et bekvemt mål for interstellare afstande. Store afstande på jorden, eller afstande til planeter blev typisk målt ved *flyvetiden* af laser- eller radarpulser. For at omsætte disse tidsmålinger til en fysisk længdemåling $s=c t$ måtte man anvende den for tiden gældende værdi for lysets hastighed. Fastsettelsen af lyshastigheden er derfor en stor fordel.

Med den nye definition af *meteren* sker realiseringen enten ved en tidsmåling eller ved brug af kendskab til bølgelængden af plane elektromagnetiske bølger. Ved at måle frekvensen ν af den elektromagnetiske bølge med reference til cæsiumuret ved hjælp af en frekvenskæde får man direkte bølgelængden λ ved relationen $\lambda=c/\nu$. Det er imidlertid vanskeligt at måle optiske frekvenser direkte, så i stedet anvendes bølgelængdenormaler, hvis frekvens/bølgelængde er bestemt på forhånd med en kendt nøjagtighed. Den mest anvendte af disse bølgelængdenormaler er den jod-stabiliseret helium-neon laser, der udsender rødt lys ved 633 nm.² De danske primærnormaler for længde er således baseret på netop den type laser, se Fig. 2.

Fordelen ved den nye definition 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 vakuum forbliver uforandret. Men den forbedrede stabilitet vil umiddelbart føre til en mere nøjagtig realisering af meteren under forudsætning af, at man er i stand til at bestemme laserens frekvens med en nøjagtighed, der lever op til disse laserens forbedrede egenskaber. Det har man allerede set med en række forskellige lasersystemer, men først når meterdefinitionen kan konkurrere med sekunddefinitionen baseret på

cæsium atomuret, der for øjeblikket har en relativ usikkerhed på mindre end 10^{-14} , bliver der igen behov for at tage definitionen op til overvejelse.

Bølgelængdenormaler

I forbindelse med meterdefinitionen i 1983 blev der udgivet en liste over kendte frekvenser "*Mise en Pratique of the Definition of the Metre*",³ hvormed SI-meteren kan realiseres i de enkelte lande. Listen indeholder opskrifter på, hvorledes man kan fremskaffe denne stråling ved lasere, hvis frekvens er stabiliseret til passende atomare/molekylære absorptionslinier. I 1992 blev en revideret udgave af "*Mise en Pratique*" udsendt med en forbedret nøjagtighed af en række af frekvenserne, samt en række nye.^a Listen indeholder blandt andet følgende lasersystemer (laser/absorber) – He-Ne laser/ CH_4 ved 3.39 μm , laser/ ^{40}Ca ved 657 nm, He-Ne laser/ $^{127}\text{I}_2$ ved 633 nm og 543 nm, Ar^+ laser/ $^{127}\text{I}_2$ ved 514 nm. Bølgelængden for disse lasere er bestemt enten ud fra en direkte frekvensmåling med reference til cæsium atomuret (frekvenskæde) eller ved interferometri.

DFM har status som primærlaboratorium for længde, og i kraft heraf er en af instituttets opgaver netop at realisere meteren ved hjælp af sådanne lasere. DFMs arbejde har været koncentreret om følgende normaler:

- He-Ne laser/ $^{127}\text{I}_2$ ved 633 nm,
- He-Ne laser/ $^{127}\text{I}_2$ ved 543 nm,
- diodelaser/ $^{127}\text{I}_2$ ved 630-640 nm.

Fremtidige arbejder:

- diodelaser/molekyler i 1.5 μm området.

DFM giver sporbarhed på længde videre ved direkte laser-sammenligning og ved interferometrisk kalibrering af måleklodser. Den *rode* He-Ne laser stabiliseret til en bestemt overgang i jodmolekyler er traditionelt den, der har været anvendt som primærnormal, da den er forholdsvis enkel i opbygning, strålingen er synlig (633 nm), hvilket er en stor fordel i interferometri, og den har en høj nøjagtighed. Sekundære lasersystemer baseret på denne laser anvendes derfor i mange laserinterferometre sammen med den grønne He-Ne laser, hvilket er baggrunden for at DFM arbejder med netop disse lasere. Diodelasere har potentielle fordele på grund af deres lille størrelse, beskedent strømforbrug, høj udgangseffekt, og muligheden for at tune laseren til den *helt rigtige* absorptionslinie. DFM forsker derfor i deres ultimative stabilitet og potentielle anvendelser. Kommende projekter er rettet mod telekommunikationsområdet ved 1.5 μm , hvor udbredelsen af *wavelength division multiplexing* (WDM) systemer stiller øgede krav til kendskab af strålingens absolutte bølgelængde, og dermed med et behov for bølgelængdenormaler.

Inden vi går til en beskrivelse af de enkelte lasersystemer, vil vi kort gennemgå principperne bag laserstabilisering og de spektroskopiske metoder, der gør det muligt at detektere molekulære overgange uden den sædvanlige Doppler-forebredning.

^a Næste revision er på trapperne "*Mise en Pratique '97*".

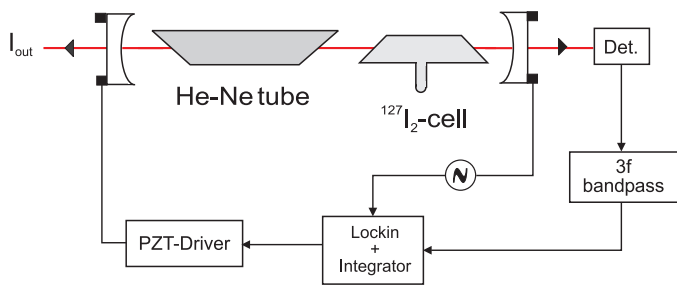


Fig. 3. Principskitse af en jod-stabiliseret He-Ne laser ved brug af en f - $3f$ detektionsteknik.

Laserstabilisering

Princippet bag stabilisering af en laser til en atomar/molekylær absorption er følgende: Monokromatisk stråling fra en laser sendes igennem et ensemble af atomer eller molekyler, forudsat der findes en passende absorptionslinie ved den pågældende frekvens. Absorptionen monitoreres som funktion af laserfrekvensen ν og konverteres til et fejlsignal til brug for stabilisering af laserfrekvensen til liniecentret med overgangsfrekvens ν_0 . For at realisere en nøjagtig frekvens/bølgelængdenormal stilles der en række krav til både laser og absorber. Laseren skal have en smal liniebredde og mulighed for præcis justering af laserfrekvensen. Absorbereren skal have en smal, symmetrisk absorptionslinie. Et mål for den forventede relative stabilitet $\sigma(\tau)$ ved en integrations-tid på τ kan beregnes som forholdet mellem liniebredde (FWHM) og signal-støj forhold (S/N). For at opnå en stabil laser kræves dermed en absorber med en smal liniebredde og en kraftig absorption. Jodmolekyler er i det synlige område særdeles velegnede, da de har kraftig absorption og der findes et utal af linier. På grund af molekylernes termiske bevægelser er absorptionslinierne Doppler-forbrede, og det kræver særlige spektroskopiske teknikker for at eliminere denne forbredding, og dermed opnå den ultimative stabilitet. En sådan metode er mættet absorption, hvor forbreddingen elimineres ved at observere et signal, der kun stammer fra en lille gruppe af molekyler med næsten samme hastighed (der udvælges en smal hastighedsgruppe). Udvalget sker ved brug af to modsat rettede laserbeams, hvor det ene, pumpen, "brænder" et hul i

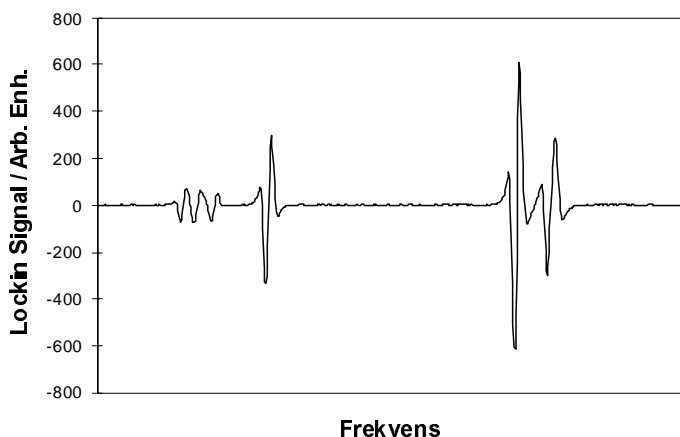


Fig. 4. Udsnit af jod-hyperfinspektrum ved 633 nm optaget med en ekstern kavitet diodelaser.

hastighedsfordelingen, som så probes med det andet beam. Kun når laserfrekvensen svarer til liniecentret vekselsvirker de to beams med samme atomer med transversal hastighed nul, og proben vil se en reduceret absorption. En skitse af opstillingen er vist i Fig. 3, hvor absorptionscellen er monteret i selve laserkaviteten. Laseren frekvensmoduleres ved hjælp af en piezo-elektrisk transducer (PZT), og detekteres den 3. harmoniske af det transmitterede signal ved hjælp af en lock-in-forstærker fås et fejlsignal til stabilisering af laserfrekvensen (se Fig. 4). Er laserens frekvens større end liniecentret er signalet positivt, er frekvensen mindre er signalet negativt. Signalet føres til en anden piezo-elektrisk transducer, hvorved laserens frekvens låses til den pågældende overgang. Ved fasefølsom detektion af den 3. harmoniske i stedet for den 1. harmoniske, der også giver et dispersivt signal, elimineres bidrag fra Doppler-baggrunden.

Den jod-stabiliserede He-Ne laser ved 633 nm

Den mest benyttede bølgelængdenormal, der typisk anvendes som primærnormal for længde, er en He-Ne laser stabiliseret til en absorptionslinie i jodmolekylet ved en bølgelængde på 633 nm. Fra "Mise en Pratique" har vi følgende opskrift:

Det absorberende molekyle $^{127}\text{I}_2$, overgang 11-5, $R(127)$, komponent a_{13} (eller i).

Værdierne $f=473.612.214.705 \text{ kHz}$

$\lambda=632.991.398,22 \text{ fm}$

med en estimeret relativ standard usikkerhed på $2,5 \cdot 10^{-11}$ gælder for strålingen af en He-Ne laser stabiliseret med en intern jodcelle, udsat for følgende betingelser:

temperatur af cellevegen på $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$,

kold-finger temperatur på $15 \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$,

frekvensmodulations amplitude, spidsværdi på $6 \pm 0,3 \text{ MHz}$,

intrakavitet beameffekt på $10 \pm 5 \text{ mW}$, med en afhængighed af frekvensen på effekten på mindre end $1,4 \text{ kHz/mW}$.

DFM har tre lasernormaler DK1, DK2, DK3 baseret på denne opskrift, se Fig. 2. De er konstrueret ved Aarhus Universitet omkring 1986 og senere overført til DFM. Selvom man følger ovenstående opskrift i mindste detalje, er der stadig mulighed

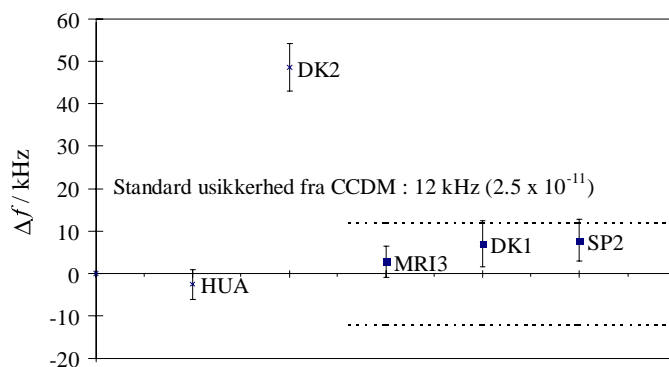


Fig. 5. Gennemsnitlig frekvensforskel mellem nordiske He-Ne lasere og BIPM4 laseren.⁴

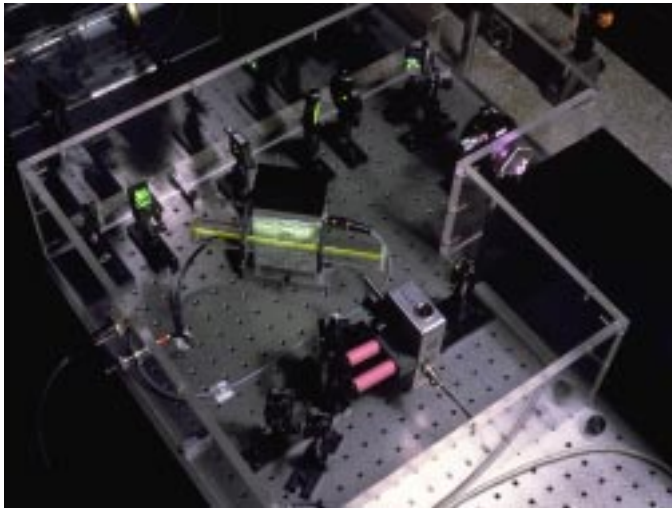


Fig. 6. Jod-stabiliseret He-Ne laser ved 543 nm.

for at introducere skift af laserfrekvensen, og dermed i realiteten af den realiserede længdeenhed. Sådanne frekvensskift kan skyldes mange ting, f.eks. er en af de væsentligste årsager urenheder i jodcellerne. Man foretager derfor med jævne mellemrum frekvenssammenligninger af sine egne normaler, og deltager i internationale sammenligninger.

DFMs røde lasernormaler har deltaget i to nordiske sammenligninger, juli 1990 i Borås, samt oktober 1993 i Helsinki.⁴ Resultatet af seneste sammenligning er vist i Fig. 5, hvor den gennemsnitlige frekvensforskel til en referencelaser BIPM4, hvis absolutte frekvens er målt og ligger tæt på den anbefalede værdi, er givet for de deltagende lasere. Det ses, at alle lasere på nær DK2 ligger fint inden for det bånd på $2,5 \cdot 10^{-11}$, der sætter grænsen for realiseringen af meteren. Skiftet i frekvensen af DK2 skyldes kvaliteten af den anvendte jodcelle, men da det er konstant med tiden kan der let korrigeres for dette. Ved kalibrering af sekundære normaler til brug i laserinterferometre er dette skift desuden uden betydning.

Den jod-stabiliserede He-Ne laser ved 543 nm

Den grønne He-Ne laser er teknologisk noget vanskeligere at fremstille end den røde, da forstærkningen ved denne bølgelængde er langt svagere. Det stiller derfor store krav til laserspejlenes kvalitet for at få laseren til at svinge på denne overgang, hvilket var grunden til at laseren først var tilgængelig næsten 20 år efter den røde laser. Laseren har den fordel, at jodmolekylerne har stærke overgange i det grønne spektralområde, hvilket gør det muligt at anvende eksterne absorptionsceller. Fordelen ved eksterne celler er, at man let kan øge absorptionsvejtlængden, samt at en række systematiske skift af laserfrekvensen kan reduceres. Fra "Mise en Pratique" har vi følgende opskrift:

Det absorberende molekyle $^{127}\text{I}_2$, overgang 26-0, R(12), komponent a_j ,

Værdierne $f=551.579.482,96 \text{ MHz}$

$\lambda=543.516.331,1 \text{ fm}$

med en estimeret relativ standard usikkerhed på $2,5 \cdot 10^{-10}$ gælder for strålingen af en He-Ne laser stabiliseret med en ekstern jodcelle, udsat for følgende betingelser:

kold-finger temperatur på $0 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Det bemærkes, at nøjagtigheden er en faktor 10 dårligere, end hvad der er angivet for de røde lasere. Det skyldes det faktum, at der ikke findes nogen absolut måling af normalens frekvens, men kun en interferometrisk bølgelængde bestemmelse. Den angivne nøjagtighed er dog fuldt tilstrækkeligt til at kalibrere sekundære normaler. Dette gælder også for DFMs grønne normal, der anvendes til at kalibrere den grønne He-Ne laser, der indgår i DFMs kommercielle måleklods interferometer.

Konstruktionen af den grønne laser blev startet ved Aarhus Universitet i 1988 og senere færdiggjort ved DFM. Opbygning er stort set identisk med konfigurationen vist i Fig. 7 for diodelasere. Laseren er af typen med interne spejle, og modulation af laserfrekvensen med henblik på fasefølsom detektion foregår ved at strække hele røret ved piezoelektriske transducere (PZT) limet direkte på laser røret. Kontrol af laserfrekvensen foregår ved samme PZT'er samt ved kontrol af laserrørets temperatur. Systemet blev testet ved en bilateral sammenligning med PTB i 1993.⁵ Reproducerbarheden er fuld på højde med de røde laser systemer, og den tidligere angivne nøjagtighed på $2,5 \cdot 10^{-10}$ er derfor kun begrænset af den interferometriske måling.

Jod-stabiliserede diodelasere

Diodelasere har potentielle fordele på grund af deres lille størrelse, beskedent strømforbrug, høj udgangseffekt og muligheden for at tune laseren til den mest velegnede absorptionslinie. Inden for de sidste fem år har der været en speciel interesse for laserdioder i det synlige område, da de enten kan erstatte de traditionelle jod-stabiliserede He-Ne lasere ved 633 nm (se tidligere afsnit) eller blive et attraktivt alternativ. Specielt det at de kan frekvensafstemmes gør det muligt at udvælge langt kraftigere overgange i det røde spektralområde end den forholdsvis svage overgang, som He-Ne laserne er stabiliseret til, og dermed har de et potentiale for at føre til en langt nøjagtigere normal.

De fleste målinger er hidtil udført på P(33)6-3 overgangen i $^{127}\text{I}_2$, da direkte frekvenssammenligninger er mulig med den nuværende røde primærnormal. Deres frekvensforskel er typisk 1 GHz

30x60cm breadboard

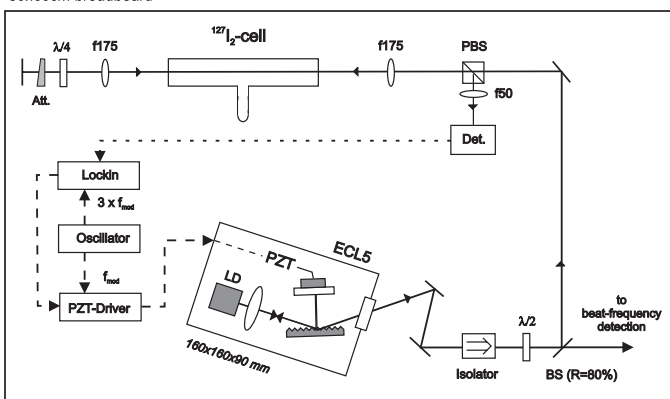


Fig. 7. Eksperimentel opbygning af en jod-stabiliseret ekstern kavitet diodelaser.



Fig. 8. Jod-stabiliseret diodelaser ved 633 nm.

afhængig af hvilke hyperfinovergange der stabiliseres til. I lighed med den grønne He-Ne laser er absorptionen her meget kraftig, hvilket tillader eksterne absorptionsceller og de fordele det dermed tilbyder. DFM forsker i deres ultimative stabilitet og potentielle anvendelser.⁶⁻⁸ En skitse af den eksperimentelle opbygning er vist i Fig. 7. Nøjagtigheden er p.t. på højde med de jod-stabiliserede He-Ne lasere, hvilket netop er blevet demonstreret i en nylig afholdt laser sammenligning ved BIPM i Paris med deltagere fra Tyskland, Finland, England, Tjekkiet og Frankrig. Et billede af den danske jod-stabiliserede diodelaser er vist i Fig. 8. Under sammenligningen blev der ved stabilisering til udvalgte absorptionslinier desuden demonstreret frekvensstabiliteter på en faktor 3 bedre, end hvad der er rapporteret for He-Ne lasere, hvilket åbner op for en endnu bedre primærnormal end den velrenommerede røde jod-stabiliserede He-Ne laser.

Sekundære lasersystemer

Næste skridt i sporbarhedskæden er lasere, der er stabiliseret til egenskaber ved laseren selv (f.eks. Zeeman stabiliseret eller two-mode stabiliseret). Disse såkaldte sekundære normaler med stabiliteter på 10^{-8} til 10^{-9} anvendes typisk i laserinterferometre og kalibreres op mod primærnormalerne fra tid til anden. Stabiliteten af den røde Zeemanlaser, der indgår i DFMs måleklodsinterferometer er vist i Fig. 9. Frekvensen af Zeemanlaseren udviser en lineær drift mindre end 1 MHz/år.

Måling af frekvens/bølgelængde

Ifølge relationen $c=\lambda\nu$ kræver realiseringen af *meteren* ved bølgelængdenormal, præcise målinger af de stabiliserede laserens frekvenser. For at sammenligne frekvenser i det synlige spektrum

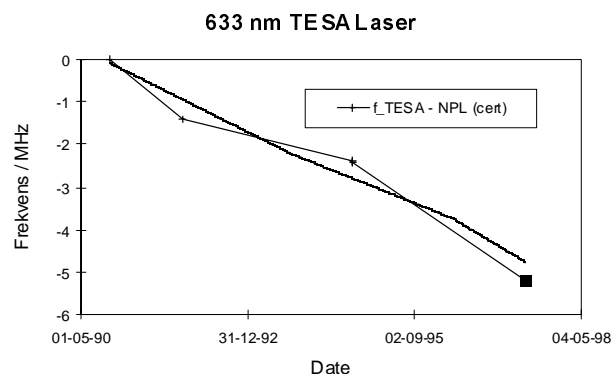


Fig. 9. Frekvensdrift af 633 nm Zeemanlaser.

(hundrede THz) med primærnormalen for tid og frekvens, det vil sige cæsiumatomuret med en ur-frekvens på 9,192 GHz, må man spænde over et frekvensforhold på mere end fire størrelsesordener.

Princippet bag at måle en høj frekvens f_h er at tage udgangspunkt i et signal (f.eks. cæsium atomuret ved 9,2 GHz) hvis frekvens f_1 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 n af grundtonen, og disse sammenlignes i den samme diode med den ukendte frekvens f_h . Det signal, der skal tælles, bliver således $f = n f_1 - f_h$. Frekvensen f_h kan nu benyttes til en ny måling af en endnu højere frekvens, og således kan man arbejde sig fra primærnormalen for tid og frekvens i mikrobølgeområdet, cæsium atomuret, op til det optiske område. På den måde har man blandt andet målt frekvensen af den jod-stabiliserede He-Ne laser ved 633 nm med en nøjagtighed på $7 \cdot 10^{-12}$, der kun er begrænset af laserens egen reproducerbarhed. Det er imidlertid en vanskelig proces at måle en vilkårlig frekvens i det synlige spektrum direkte ved en frekvenskæde, så i stedet anvendes ofte interferometriske metoder til at bestemme frekvens/bølgelængdeforhold med reference til en bestemt bølgelængdenormal.

Nøjagtigheden for bølgelængdesammenligninger ligger på nogle få dele på 10^{-11} , begrænset af effekter som diffraktion og ufuldkommenheder af de optiske komponenter. Er kravet til nøjagtigheden på bestemmelsen af bølgelængden $3 \cdot 10^{-10}$ ved brug af en 1 meter lang Fabry-Perot etalon, svarende til cirka $3 \cdot 10^6 \lambda/2$, er det nødvendigt at bestemme brøkdelen af en orden med en relativ nøjagtighed på 10^{-4} ($\lambda/20000$). Dette er muligt med moderne computerevaluering af interferensmønstrene. Men det bør bemærkes, at planheden af et godt spejl sjældent er bedre end $\lambda/100$. Den ekstra nøjagtighed fås ved at midle over det belyste areal.

Dette arbejde er støttet af Erhvervsfremme Styrelsen.

Referencer

1. Z. Bay, G. Luther, and J. White, "Measurement of an Optical Frequency and the Speed of Light", Phys. Rev. Lett. **29**, 189-192 (1972).
2. G. R. Hanes and C. E. Dahlstrom, "Iodine hyperfine structure observed in saturated absorption at 633 nm", Appl. Phys. Lett. **14**, 362 (1969).

3. T. J. Quinn, "Mise en Pratique of the Definition of the Metre", *Metrologia* **30**, 523-541 (1993/94).
4. B. Ståhlberg, E. Ikonen, J. Haldin, J. Hu, T. Ahola, K. Riski, L. Pendrill, U. Kärn, J. Henningsen, H. Simonsen, A. Chartier, and J.-M. Chartier, "International comparisons of He-Ne lasers stabilized with $^{127}\text{I}_2$ at 633 nm", *Metrologia* **34**, 301-307 (1997).
5. H. R. Simonsen, U. Brand, and F. Riehle, "Intercomparison of two Iodine-stabilized He-Ne Lasers at $\lambda=543$ nm", *Metrologia* **31**, 341-347 (1994/95).
6. H. R. Simonsen, "Iodine-stabilized Extended Cavity Diode Laser at $\lambda=633$ nm," *IEEE Trans. On Instrum. Meas.* **46**, 141-144 (1997).
7. H. Simonsen, "Replacing the I_2 -stabilized He-Ne lasers with diode lasers", *Proceedings of the 4th International IMEKO Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry, Copenhagen 1996*, pp. 129-137 (1996).
8. H. R. Simonsen and A. Zarka, "Iodine-stabilized Extended Cavity Diode Laser at $\lambda=633$ nm: result of international comparison", *Metrologia* **35**, 197-202 (1998).

Om forfatteren

Harald R. Simonsen er kandidat i fysik (1989) og ph.d. (1993) fra Aarhus Universitet. Han opholdt sig fra 1989 til 1992 ved Physikalisch Technische Bundesanstalt, Braunschweig, og har siden 1992 været ansat ved Dansk Institut for Fundamental Metrologi. Hans primære forskningsområde er inden for frekvensstabile lasere og deres metrologiske anvendelser.

