

Nederlandse meter nagemeten met de atoomklok

Dr. S.A. van den Berg • NMI Van Swinden Laboratorium B.V. • Delft

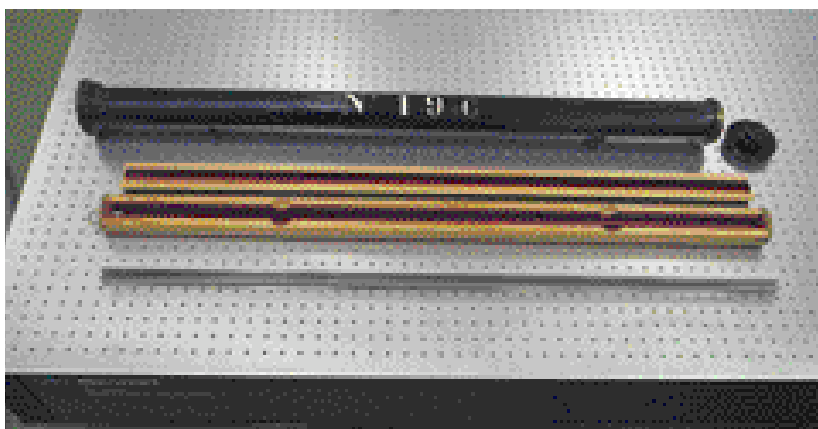
Op het eerste gezicht lijkt het een wat vreemde aangelegenheid om een lengtemaat met een tijdstandaard 'na te meten', zoals de titel aangeeft. De meter is formeel echter al sinds 1983 afhankelijk van de seconde. Alleen was het in de praktijk niet gemakkelijk de link tussen deze SI basiseenheden daadwerkelijk te leggen. Pas door de uitvinding van de frequentiekam in 2000 werd dat op relatief eenvoudige wijze mogelijk. Met een frequentiekam kan de frequentie, en daarmee de golflengte, van zichtbaar licht zeer nauwkeurig worden gemeten ten opzichte van een tijdstandaard, zoals een atoomklok.

De golflengte van (laser-)licht wordt gebruikt als standaard voor lengtemetingen. Verder op in dit artikel zal blijken dat hierdoor de meter direct herleidbaar wordt naar de seconde. In 2005 heeft Theodor Hänsch voor de uitvinding van de frequentiekam de Nobelprijs gekregen. Bij NMI VSL is een frequentiekam opgebouwd, waarmee de meter voor het eerst 'in eigen huis' is afgeleid van de seconde.

Het ontstaan van 'de meter'

Voor een historisch perspectief van de ontwikkeling van de meter gaan we eerst even terug naar Frankrijk aan het eind van de 18^e eeuw. Om een universele maat te krijgen, onafhankelijk van de armlengte van een of andere koning, is ervoor gekozen om de meter te definiëren als een tienmiljoenste van de afstand van de pool tot de evenaar, gemeten over de meridiaan die over het observatorium in Parijs loopt. De meridiaan is hiervoor van Duinkerken tot Barcelona daadwerkelijk opgemeten.

Deze metingen zijn uitgevoerd in de roerige jaren rond de Franse revolutie¹. De Nederlander Jan Hendrik van Swinden heeft een belangrijke bijdrage geleverd aan de berekeningen die voor het bepalen van de meter zijn gebruikt. Op 22 juni 1799 heeft Van Swinden de meter gepresenteerd aan de Franse Wetgevende vergadering en is deze officieel vastgesteld als lengtemaat. NMI VSL is in bezit van een van de eerste prototypes van de staaf van een meter, die in de 19^e eeuw is vervaardigd (zie figuur 1).



Figuur 1. 'De meter' die in de 19^e eeuw is vervaardigd en lange tijd als lengtestandaard dienst heeft gedaan.

¹ Een uitgebreide beschrijving van dit avontuur kunt u vinden in het boek *'De maat van alle dingen, de zevenjarige zoektocht naar de universele meter'*, van Ken Alder.



Steven van den Berg (1974) is als wetenschappelijk medewerker werkzaam bij het NMI Van Swinden Laboratorium. Hij houdt zich voornamelijk bezig met optische frequentiekammen, het beheer en de ontwikkeling van optische frequentiestandaarden en met interferometrische lengte- en afstandmetingen. Steven van den Berg promoveerde in 2002 aan de Universiteit Leiden op de dynamica van lichtgevende polymeren en polymeren lasers.

E-mail: SvdBerg@nmi.nl

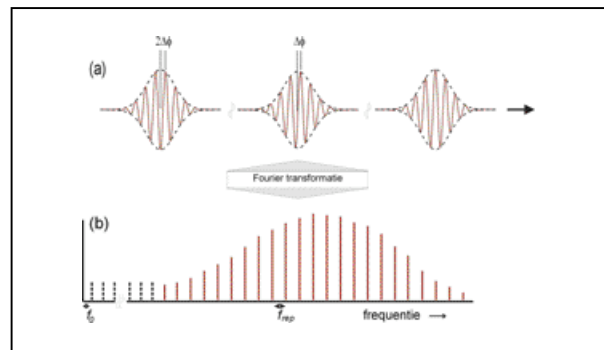
Vanaf 1960 is de definitie van de meter gebaseerd op de golflengte van een spectraallijn van krypton. Het grote voordeel van een dergelijke definitie is dat de lengtestandaard niet meer afhankelijk is van een artefact dat kan beschadigen of anderszins kan veranderen. De laser, die in de jaren zestig is uitgevonden, heeft de rol van de kryptonlamp al snel daarna overgenomen. In 1983 is de meter opnieuw gedefinieerd als *de afstand die het licht aflegt in vacuüm in 1/299792458-ste deel van een seconde*. Hiermee wordt de meter aan de seconde gekoppeld via de lichtsnelheid, een natuurconstante. De lichtsnelheid (in vacuüm) is daarbij gedefinieerd als 299792458 meter per seconde, met een onzekerheid van nul! In de praktijk wordt de golflengte van het licht als lengtemaat gebruikt. Deze golflengte kan uitgerekend worden als de frequentie van het licht bekend is (via $\lambda = c/f$, met λ de golflengte, c de lichtsnelheid en f de frequentie).

Net als de meeste andere nationale meetinstutten gebruikt ook NMI VSL een jodiumgestabiliseerde helium-neonlaser als primaire lengtestandaard. Het was tot voor kort echter bepaald niet eenvoudig om optische frequenties nauwkeurig te meten omdat deze bijzonder hoog zijn (rond $5 \cdot 10^{14}$ Hz). Om de laserfrequenties toch te kunnen meten ten opzichte van de atoomklok was een extreem complexe en kostbare opstelling nodig, die slechts op enkele plaatsen in de wereld kon worden gerealiseerd. Met een dergelijke opstelling zijn ook de spectraallijnen van de jodiumdamp gemeten die in de heliumneonlasers als referentie worden gebruikt. In de praktijk werd (en wordt) de kwaliteit van de primaire lasers gewaarborgd door internationale onderlinge vergelijkingen. De directe link met de atoomklok werd bijna nooit gelegd. Met de komst van de frequentiekam is het nu wel mogelijk de meter en de seconde op een relatief eenvoudige manier aan elkaar te koppelen. In het vervolg van dit artikel wordt de werking van de frequentiekam beschreven, gevolgd door de resultaten zoals die behaald zijn met de frequentiekam bij NMI VSL.

Wat is een frequentiekam?

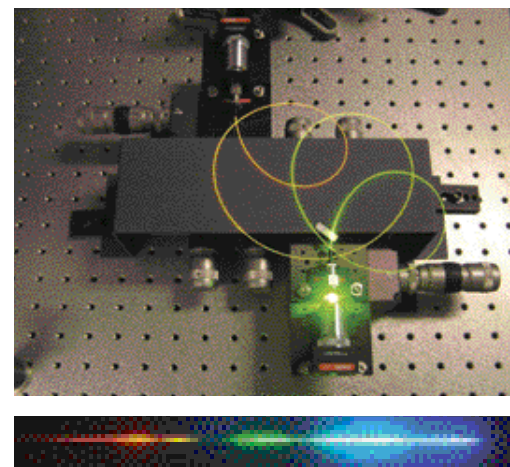
Met 'frequentiekam' wordt het spectrum van een gepulste laser aangeduid. Het spectrum van een laser die (zeer) korte pulsen uitzendt, bestaat uit een groot aantal frequenties, die samen een 'kam' vormen. De (Fourier-)relatie tussen het tijd-domein en frequentiedomein wordt geïllustreerd in figuur 2.

De frequenties hebben een onderling frequentieverschil, dat gelijk is aan de frequentie waarmee de pulsen door de laser worden uitgezonden. De totale breedte van het spectrum hangt af van de pulsduur: naar mate de pulsen korter zijn, is het spectrum breder. Een breed spectrum is van belang om de frequentiekam goed te kunnen gebruiken en te stabiliseren.



Figuur 2 Een laser die korte pulsen uitzendt heeft een spectrum dat is opgebouwd uit een groot aantal frequentiecomponenten met onderling gelijke afstand: een frequentiekam.

Er zijn twee belangrijke ontwikkelingen geweest die het genereren van een spectraal brede frequentiekam mogelijk hebben gemaakt. Ten eerste is dat de ontwikkeling van de titaan-saffierlaser in de jaren negentig, waarmee zeer korte pulsen (10-100 fs) kunnen worden gegenereerd. Ten tweede is dat de uitvinding van de 'microstructured fiber' ongeveer 5 jaar geleden. Dit is een glasvezel waarvan de kern (met een diameter van slechts $2 \mu\text{m}$) omgeven is door dunne kanalen gevuld met lucht. De lichtpulsen van de titaan-saffierlaser worden door deze dunne glasvezelkern gestuurd, zodat er een zeer hoge lichtintensiteit wordt bereikt (voor ons systeem: $0,5 \text{ nJ/puls}$ en een pulsduur van 30 fs geven een lichtintensiteit van $0,5 \text{ TW/cm}^2$). Door deze hoge intensiteit ontstaan allerlei niet-lineaire effecten (zoals zelf-fase-modulatie) waardoor het spectrum van de lichtpuls verder wordt verbreed. Een voorbeeld van zo'n fiber en het resulterende spectrum worden weergegeven in figuur 3.



Figuur 3 Boven: een korte lichtpuls (infrarood (800 nm), niet zichtbaar op de foto), wordt door de 'microstructured' fiber geleid, waardoor zichtbaar licht wordt gegenereerd. Onder: het spectrum dat na de fiber is ontstaan strekt zich uit van blauw tot in het infrarood en bestaat uit enkele honderdduizenden individuele lijnen met onderling gelijke afstand.

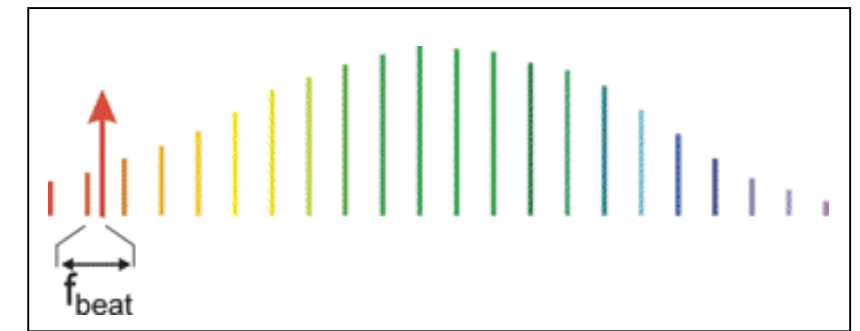
De frequentie van één lijn in de kam kan geschreven worden als $f_n = n \cdot f_{rep} + f_0$, met n een geheel getal, f_{rep} de herhalingsfrequentie van de laser en f_0 een offsetfrequentie. De radiofrequenties f_{rep} (ongeveer 1 GHz) en f_0 ($< 1 \text{ GHz}$) zijn direct meetbaar, n heeft waarden rond 10^5 . Als f_{rep} en f_0 bekend zijn, kunnen de frequenties van alle lijnen van de frequentiekam worden uitgerekend! Via de grote factor n wordt in één stap de koppeling tussen radiofrequenties en optische frequenties gelegd.

De radiofrequenties zijn direct meetbaar en dus herleidbaar naar de atoomklok. Via de frequentiekam zijn dan ook de optische frequenties direct meetbaar en herleidbaar naar de atoomklok. De koppeling tussen meter en seconde wordt vervolgens gelegd door de relatie tussen de golflengte en frequentie van licht ($\lambda = c/f$).

In de praktijk worden zowel f_{rep} als f_0 gestabiliseerd ten opzichte van een referentiefrequentie die gekoppeld is aan de tijdstandaard. In de nieuwe huisvesting van NMI VSL is speciaal een glasvezel getrokken van de atoomklokken op de 6^e verdieping naar de frequentiekamopstelling op de begane grond. In kader 1 staat beschreven hoe beide frequenties worden gestabiliseerd.

Kalibratie van een primaire standaard met de NMI-frequentiekam

Met de frequentiekam die bij NMI VSL is opgeboord, is de frequentie van de jodiumgestabiliseerde helium-neonlaser NMI-5 gemeten. Dit gebeurt door het licht van de frequentiekam en van NMI-5 op dezelfde detector te laten vallen. De laagste frequentie die met de detector wordt gemeten is de verschilfrequentie tussen de NMI-5 en de dichtstbijzijnde lijn van de frequentiekam (zie figuur 4).



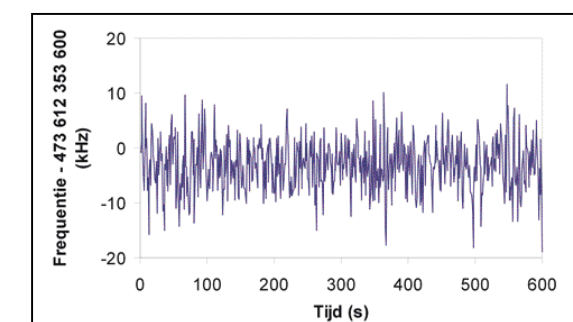
Figuur 4 De zwevingsfrequentie (f_{beat}) is het frequentieverschil tussen de laserfrequentie (rode pijl) en de dichtstbijzijnde frequentie van de frequentiekam.

Meting en stabilisatie van f_{rep} en f_0

kader 1

De herhalingsfrequentie is eenvoudig te meten met een fotodiode en een frequentieteller. Deze frequentie kan gestabiliseerd worden door de lengte van de laser bij te regelen met een terugkoppelsysteem. Het is immers de lengte van de laser die bepaalt wat de afstand tussen de opeenvolgende pulsen is. Het meten en stabiliseren van f_0 is wat minder eenvoudig. Hiervoor is het essentieel dat het spectrum een octaaf omvat. Dit betekent dat er zowel licht bij f_n als bij f_{2n} aanwezig moet zijn. Door de frequentie van f_n te verdubbelen in een niet-lineair kristal ontstaat de frequentie $2f_n$. De verschilfrequentie tussen f_{2n} en $2f_n$ is gelijk aan de offsetfrequentie f_0 (want $f_{2n} = 2n \cdot f_{rep} + f_0$ en $2f_n = 2n \cdot f_{rep} + 2f_0$). De waarde van f_0 hangt af van de 'carrierenvelope phase shift', $\Delta\Phi$, zoals aangegeven in figuur 1. Deze kan beïnvloed worden door de intensiteit van de laser te variëren. Stabilisatie van f_0 ten opzichte van een referentiefrequentie vindt daarom plaats door terugkoppeling te geven via de laserintensiteit.

Met deze meting kan de laserfrequentie worden uitgerekend via $f_{laser} = n \cdot f_{rep} \pm f_0 \pm f_{beat}$. De tekens van f_0 en f_{beat} moeten nog bepaald worden (de gemeten waarden zijn altijd positief, maar het is niet bekend of de laserfrequentie links of rechts van de dichtstbijzijnde kamfrequentie ligt). Ook de waarde van n moet nog worden bepaald, zodat kan worden vastgesteld met welke lijn uit de kam de zwevingsfrequentie f_{beat} wordt gemeten. Hiervoor is voorkennis nodig van de waarde van f_{laser} . In veel gevallen is deze frequentie al goed genoeg bekend. Zo niet, dan volstaat een voor meting met een golflengtemeter om de tekens en n te bepalen. Een typisch resultaat van de meting van f_{beat} tussen NMI-5 en de frequentiekam is weergegeven in figuur 5.



Figuur 5. Gemeten laserfrequentie van NMI-5 (f-component) over een periode van 10 minuten. De ruis wordt volledig gedomineerd door frequentiefluctuaties van NMI-5.

De gemeten laserfrequentie van de f-component van NMI-5 bedraagt 473 612 353 596,9 kHz. Een jaar eerder gaf een meting met de BIPM-frequentiekam in Parijs een waarde van 473 612 353 597,6 kHz. Het verschil valt ruim binnen de onzekerheid van NMI-5 (enkele kHz), die als transferstandaard kan worden beschouwd. De lijnen van de frequentiekam hebben een relatieve nauwkeurigheid die vergelijkbaar is met die van de tijdstandaard (relatieve onzekerheid van 10^{-12} in 60 s). Dit betekent dat de kam zelf niet of nauwelijks bijdraagt aan de onzekerheid bij frequentiemetingen. Met deze meting is bij NMI VSL voor het eerst een optische frequentie direct ten

opzichte van de atoomklok gemeten. De koppeling tussen de meter en de seconde is hiermee tot stand gebracht.

Conclusie en vooruitblik

Bij NMI VSL is een frequentiekam gerealiseerd waarmee optische frequentiestandaarden kunnen worden gekalibreerd door direct vergelijk met de nationale tijdstandaard, een atoomklok. Op dit moment wordt het onderzoek met de frequentiekam voortgezet in een samenwerkingsprogramma waarbij de Vrije Universiteit (Amsterdam) en de TU Delft betrokken zijn. Het onderzoek met de VU richt zich op het meten van diverse optische overgangen in het ultraviolet.

Hiermee kan een bijdrage worden geleverd aan het onderzoek op het gebied van fundamentele natuurconstanten. Met de TU Delft wordt samen gewerkt aan het nauwkeurig meten van lange afstanden (100 m met μm onzekerheid). Dit kan worden toegepast voor afstandbepaling tussen satellieten in de ruimte. NMI VSL draagt met dit onderzoek bij aan zowel de praktische als de fundamentele metrologie. ♦

Nederlandse Vereniging voor Fotonica tevens sectie Fotonica van de NNV en de KNCV
Fotonica magazine wordt 4x per jaar uitgegeven.

Aanmelden kan op de volgende manieren:

- via de website <http://www.fotonica.nl>
- per e-mail aan fotonica.dekker@xs4all.nl o.v.v. de gevraagde gegevens in dit formulier
- door onderstaand formulier te sturen naar NVvF p/a E. Dekker, Koninginneweg 236, 3078GS Rotterdam



A A N M E L D I N G S F O R M U L I E R

Naam: **Werkzaam bij:**

Privé-adres: **Adres:**

Postcode: **Postcode:**

Plaats: **Plaats:**

Telefoon: **Telefoon:**

E-mail: **E-mail:**

Gewenst verzendadres: Privé werk

Bezwaar tegen: opname verzendadres in gepubliceerde ledenlijst
 gebruik verzendadres voor mailing e.d. van derden, waarvan NVvF-bestuur denkt dat die in het belang van leden kan zijn

Lid NNV: ja nee **Lid KNCV:** ja nee

Wenst lid te worden van de Nederlandse Vereniging voor Fotonica inclusief abonnement op Fotonica Magazine à € 36,- per jaar.

Datum:

Handtekening: