

FREKVENTIESTABILITEIT VAN GESTABILISEERDE HELIUM-NEON LASERS

P.H.J. Schellekens

Laboratorium voor Lengtemeting, Technische Hogeschool Eindhoven

Samenvatting

In dit artikel wordt het gedrag van frequentiegestabiliseerde He-Ne lasers behandeld. Na een inleiding over de opbouw van deze lasers wordt aandacht geschonken aan de verschillende technieken die gebruikt worden om de frequentie van dit type laser te stabiliseren. Hierna wordt aangegeven hoe de frequentiestabiliteit kan worden gemeten en wat de resultaten zijn voor een aantal van de beschreven lasertypen. Tot slot worden de toepassingsgebieden aangegeven.

1. Inleiding

Hoewel de meeste lezers ongetwijfeld bekend zijn met de He-Ne laser zal hier de opbouw nog eens in het kort worden aangegeven.

De laser is op te splitsen in een gasontladingssysteem dat invallende straling kan versterken en een spiegelsysteem dat voor laserwerking zorg draagt en mede de frequentie van de straling bepaalt die de laser uitzendt. De gasontlading wordt bedreven in een nauwe buis met een binnendiameter van 1 - 2 mm. De elektroden, wolfram voor de anode en een aluminium cilinder als kathode, zijn in met de nauwe buis verbonden, andere gedeelten aangebracht. De versterking van straling — gestimuleerde emissie — wordt verzorgd door de neon atomen die in een geschikte energietoestand zijn gebracht via energie-uitwisseling met de heliumatomen. De drukverhouding He-Ne bedraagt ongeveer 7 : 1 bij een totaal druk van 200 tot 500 Pa afhankelijk van de binnendiameter van de gasontladingsbuis. Plaatst men nu spiegels met zodanige eigenschappen (kromming en reflectie) om de gasontlading dat straling na een rondgang in de laser in zichzelf terugkeert en daarbij een netto versterking 1 ondergaat dan zal laserwerking optreden. Hieruit volgt dat in het stationaire geval

de versterking gelijk is aan de totale verliezen. Voor een goed gedimensioneerde He-Ne laser (1) is het mogelijk in het zichtbare gebied ($\lambda = 0,6 \mu\text{m}$) over een frequentiegebied van 1500 MHz aan deze voorwaarden te voldoen.

Naast het zichtbare gebied is laserwerking in het infrarood ($\lambda = 1,15 \mu\text{m}$ en $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$) mogelijk. De gasontlading kan tussen de laserspiegels zelf worden opgesloten of tussen kwarts vensters geplaatst onder de brewsterhoek. In dit laatste geval treedt lineaire polarisatie van de straling op daar slechts in één polarisatierichting de verliezen t.g.v. reflectie voldoende klein zijn. Gewoonlijk wordt een van de laserspiegels gebruikt voor uitkoppeling van straling terwijl de andere een zo hoog mogelijke reflectie heeft. De figuren 1a en 1b geven de hier beschreven typen He-Ne lasers schematisch weer.

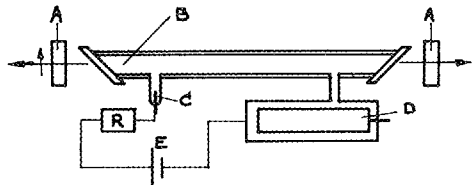


Fig. 1a. He-Ne laser met brewstervensters. A laserspiegels, B gasontladingsbuis met brewstervensters, C anode, D kathode, E spanningsbron, R serieweerstand.

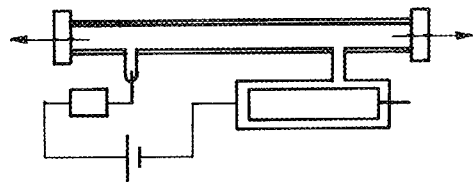


Fig. 1b. He-Ne laser met laserspiegels direct op de gasontlading.

2. De frekwentiebepalende grootheden in de He-Ne laser

De relatie tussen de laserfrequentie en de andere grootheden in de laser kunnen uit het hierna volgende model worden afgeleid, de invloed van axiale frekwenties en spiegelkrommingen zijn verwaarloosd.

We veronderstellen dat in de He-Ne laser een staande golf optreedt waarbij voldaan is aan

$$L = k \frac{\lambda}{2} \quad (a)$$

Hierbij is L de afstand tussen de laserspiegels, λ de golflengte van de laserstraling en k een (groot) geheel getal

Met de relatie $\lambda = \frac{c}{n\nu}$ (b) volgt nu door substitutie

$$\nu_L = \frac{kC}{2nL} \quad (c)$$

Hierin is ν_L de laserfrequentie, C de lichtsnelheid en n de brekingsindex. Uit (c) volgt dat meerdere frekwenties tegelijkertijd kunnen optreden als voldaan is aan

$$\frac{C}{2nL} < \Delta\nu_{ne} \quad (d)$$

$\Delta\nu_{ne}$ is het frekwentiegebied waarin laserwerking kan optreden, dit bedraagt ongeveer 1500 MHz voor de He-Ne laser. Eén

frekwentie treedt op als $\frac{C}{2nL} > \Delta\nu_{ne}$ waaruit met $n \approx 1$ en $C = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ volgt dat $L < 0,1 \text{ m}$

De meest bekende He-Ne lasers zullen dus meerdere frekwenties tegelijkertijd uitzenden. Wordt de laser zo gedimensioneerd dat deze straling van één frekwentie uitzendt dan kan deze frekwentie "ergens" in het gebied $\Delta\nu_{ne}$ komen te liggen afhankelijk van de instelling van L .

Bij een laserfrequentie van $5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ is de relatieve onzekerheid derhalve

$$\frac{\Delta\nu_{ne}}{\nu_L} = \frac{1,5 \cdot 10^9}{5 \cdot 10^{14}} = 3 \cdot 10^{-6} \quad (e)$$

Hieruit kan men conkluderen dat het frekwentiegedrag van de He-Ne laser weinig beter is dan dat van conventionele goede lichtbronnen. Er zijn daarom de laatste 15 jaar steeds nieuwe ideeën aangedragen om de frekwentiestabiliteit van deze lasers te verbeteren. In de nu volgende paragrafen zullen de stabilisatiemogelijkheden van de He-Ne laser worden besproken.

3. Frekwentiestabilisatie op referenties verbonden met de neonlijn

3.1. Eén frekwentielaser met stabilisatie op de top van de neonlijn

Zoals uit (c) volgt is de laserfrequentie ν_L te veranderen door de laserlengte L te verstemmen

Registreert men tijdens het verstemmen de intensiteit van een éénfrekwentielaser ($L \leq 0,1 \text{ m}$) a.f.v. de frekwentie dan blijkt deze, mits geen verzadigingseffekten optreden, een gaussisch verloop te hebben met een maximum $\nu_L = \nu_{ne}$. ν_{ne} is de frekwentie behorende bij het maximum van de neonspektraallijn

Door ν_L via L te sturen kan men de laser zodanig afregelen dat steeds is voldaan aan $\nu_L = \nu_{ne}$

Het sturen van L kan worden uitgevoerd door een van de laserspiegels op een dunwandige cilinder van piezo-elektrisch materiaal (PZT) te monteren en via verandering van de lengte van de cilinder L te veranderen. De lengteverandering van de cilinder is evenredig met de aangelegde spanning over de cilinderwanden. Legt men een sinusvormige spanning $V_0 \sin 2\pi\nu_M t$ aan dan zal de laserfrequentie gemoduleerd worden volgens

$$\nu_L(t) = \nu_L(0) + \Delta\nu_L \sin 2\pi\nu_M t \quad (f)$$

Hierin is $\Delta\nu_L$ het frekwentiegebied waarover gemoduleerd wordt ($\Delta\nu_L = CV_0$) en $\nu_L(0)$ de via L ingestelde laserfrequentie. $\nu_L(0)$ is verder te justeren door nog een instelbare gelijkspanning aan de PZT toe te voeren

Stelt men nu hiermee $\nu_L(0)$ zo in dat $\nu_L(0) > \nu_{ne}$ dan volgt dat de intensiteitsvariaties ν_l van de laser t.g.v. ν_M dezelfde

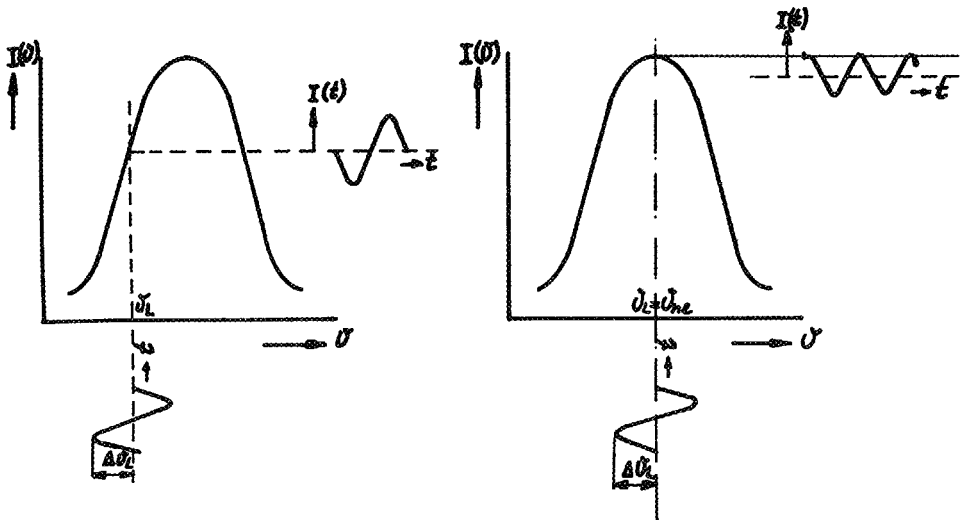


Fig. 2. Intensiteitsgedrag He-Ne laser bij verschillende $\nu_L(0)$

frekwentie hebben maar in *tegenfase* zijn en indien $\nu_L(0) < \nu_{ne}$ eveneens gelijke frekwentie maar *in fase*. Indien $\nu_L(0) = \nu_{ne}$ dan geldt $\nu_j = 2\nu_M$

Fig. 2 geeft de laatste twee gevallen weer. Er is elektronische apparatuur (lock-in versterker) die bij detektie van $I(\nu)$, indien $\nu_j = \nu_M$, een gelijkspanning met zodanige polariteit afgeeft dat deze na versterking kan worden teruggekoppeld naar de PZT om $\nu_L(0)$ bij te regelen tot $\nu_L(0) = \nu_{ne}$. Fig. 3 geeft een mogelijk stabilisatieschema waarbij gebruik is gemaakt van een lock-in versterker

N.B. Stabilisatie op de top van het neon lijnprofiel kan worden verstoord door verzadigingseffecten in de laser versterking rond $\nu = \nu_{ne}$, waardoor ν_{ne} meestal slecht gedefinieerd is

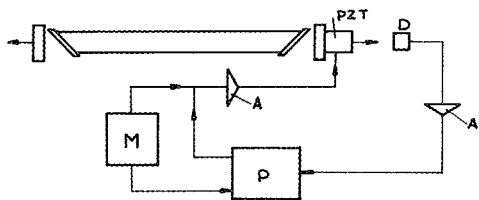


Fig. 3. Stabilisatieschema He-Ne laser. D detektor, A versterkers, M frekwentiegiver voor ν_M , P lock-in versterker.

3.2. Stabilisatie via verzadigde emissie in één-frekwentielasers

Zoals reeds opgemerkt kan in goed gedimensioneerde één-frekwentielasers verzadiging van emissie optreden voor $\nu_L = \nu_{ne}$. Deze effecten zijn beschreven door W E Lamb (2) en worden veroorzaakt door interactie van laserstraling met aangeslagen neonatomen met axiale snelheid nul.

Meet men in deze situatie de laserintensiteit $I(\nu_L)$ dan treedt voor $\nu_L = \nu_{ne}$ een "deuk" op in het intensiteitsprofiel, de zg "Lamb-dip"

Experimenten, in het Lab voor Lengtemeting THE, aan een zelfgebouwde laser (3) van dit type hebben uitgewezen dat de afmetingen van de dip bepaald worden door de mengverhouding, druk en stroomdichtheid in de He-Ne laser. Fig. 4 geeft een polaroidopname vanaf een oscilloscope van het intensiteitsverloop van dit type laser.

Het stabilisatieschema voor dit type laser kan gelijk zijn aan het voorgaande waarbij hier op het minimum van de lamb-dip wordt afgeregeld (3)

3.3. Stabilisatie m.b.v. een twee-frekwentielaser

Dimensioneert men een He-Ne laser zodanig dat voldaan is aan

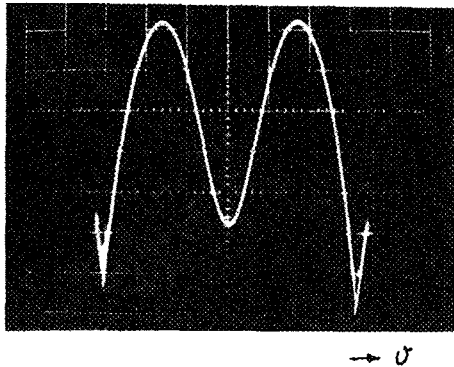


Fig. 4. Intensiteitsverloop Lamb-dip laser
Foto Lab. Lengtemeting, THE.

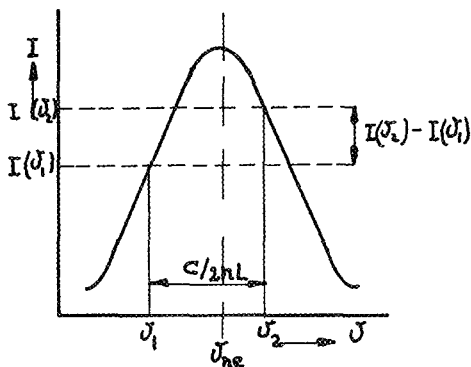


Fig. 5. Stabilisatieprincipe twee-frekventielaser.

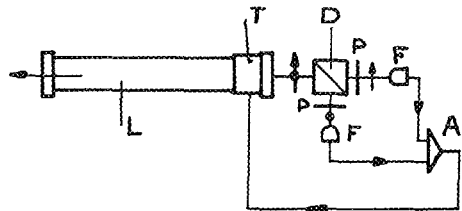


Fig. 6. Stabilisatieschema twee-frekventielaser.
L laser, T spiegeltranslator, D deelprisma,
P polarisatoren, F fotodetektor, A verschil-
versterker, \ddagger orthogonale lin, polarisatie.

$$\frac{C}{2nL} < \Delta\nu_{ne} < \frac{C}{nL}$$

dan treden bij juiste instelling van L twee laserfrequenties tegelijkertijd op met frekwentieverschil $\Delta\nu = \frac{C}{2nL}$. Wanneer de

laserspiegels direct op de gasontlading worden gemonteerd (Fig 1b) dan treedt bij dit type laser orthogonale lineaire polarisatie op van de twee laserfrequenties veroorzaakt door anisotropie-effecten in de spiegeloppervlakken

Via polarisatoren zijn deze frequenties te scheiden en uit meting van de bijbehorende intensiteiten $I(\nu_1)$, $I(\nu_2)$ kan men een regel-sig-naal $V = C(I(\nu_1) - I(\nu_2))$ verkrijgen dat L zodanig stuurt dat $I(\nu_1) = I(\nu_2)$

Fig 5 geeft het stabilisatieprincipe en Fig. 6 een mogelijk stabilisatieschema (4).

3.4. Frekwentiestabilisatie m.b.v. zeeman-splitsing van de neonlijn

Brengt men de He-Ne laser in een axiaal magneetveld dan zal de neonlijn worden opgesplitst in twee lijnen die, afhankelijk van de sterkte van het magneetveld, een frekwentiegebied $\Delta(\nu_{ne})$ uit elkaar liggen. De stralingen behorende bij deze neonlijnen zijn tegengesteld cirkulair gepolariseerd. Stelt men nu, via justage van L, de laserfrequentie ν_L in op een waarde nabij ν_{ne} dan oscilleert de laser tgv het "pushing-effekt" op twee frequenties $\nu_L \pm \Delta\nu_L$ waarbij $\Delta\nu_L$ afhangt van $\Delta(\nu_{ne})$. Een veel gebruikte waarde is $\Delta\nu_L \approx 1\text{MHz}$. De stralingen $\nu_L \pm \Delta\nu_L$ zijn evenals de neonlijnen tegengesteld cirkulair gepolariseerd zodat door gebruik van een $\lambda/4$ plaatje deze te scheiden zijn in twee orthogonaal lineair gepolariseerde stralingen. Frekwentiestabilisatie is nu weer mogelijk met als criterium $I(\nu_L + \Delta\nu_L) = I(\nu_L - \Delta\nu_L)$. Het stabilisatieschema kan gelijk zijn aan het onder 3.3 beschrevene (5) Fig. 7 schetst het stabilisatieprincipe.

Het spreekt vanzelf dat het hierboven beschreven stabilisatieprincipe alleen kan worden toegepast in een laser die weer vol-

doet $\frac{C}{2nL} > \Delta\nu_{ne}$ daar anders meerdere frequenties optreden die optisch niet te scheiden zijn

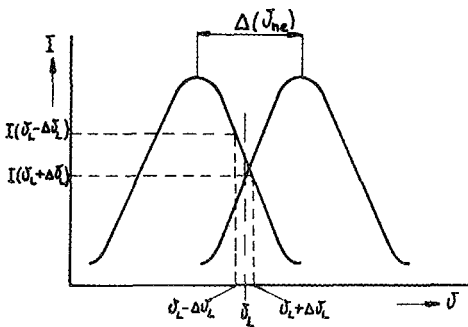


Fig 7. Stabilisatieprincipe via splitsing van neonlijnen

4. Frekwentiestabilisatie via externe referenties

4.1. Inleiding

De in paragraaf 2 beschreven stabilisatiemethoden zijn alle gekoppeld aan de neonlijnen en dus onderhevig aan frekwentiefluktuaties hiervan. Verschillende auteurs (6) hebben deze fluktuaties beschreven en rapporteren als belangrijkste invloed een drukafhankelijke verschuiving van $0,2 \text{ MHz Pa}^{-1}$. Daar drukveranderingen van 100 Pa in deze lasers geen zeldzaamheid zijn kunnen deze verschuivingen dus aanzienlijk zijn ($10^8 < \frac{\Delta\nu}{\nu} < 10^7$)

Er is daarom gezocht naar externe referenties die een betere frekwentiestabiliteit hebben.

Uit dit onderzoek zijn twee belangrijke typen gestabiliseerde He-Ne lasers naar voren gekomen met excellent stabiliteitsgedrag. Allereerst werd in 1969 een He-Ne laser geïntroduceerd die gestabiliseerd werd m.b.v. verzadigde absorptie in methaandamp en werkende op een golflengte van $3,39 \mu\text{m}$. In 1970 werd een He-Ne laser beschreven gestabiliseerd op verzadigde absorptie in jodiumdamp en werkende in het zichtbare gebied ($\lambda = 0,63 \mu\text{m}$). Hoewel de methaan-gestabiliseerde laser een iets betere frekwentiestabiliteit vertoont is de jodium gestabiliseerde laser favoriet omdat deze in "gewone" optische opstellingen kan worden gebruikt.

Daar de toegepaste stabilisatietechniek gelijk is zal hier in het kort de jodiumgestabiliseerde He-Ne laser worden besproken zoals deze in het Lab voor Lengtemeting THE is gebouwd (7).

4.2. De He-Ne- $^{127}\text{J}_2$ gestabiliseerde laser

De laser is van het brewsterventertype waarbij behalve de gasontladingsbuis ook een absorptiebuis tussen de laserspiegels is gemonteerd. Een van de spiegels is ook hier weer bevestigd op een PZT waarmee L gemoduleerd en gestuurd kan worden. In de absorptiecel bevindt zich gezuiverd jodium ($^{127}\text{J}_2$) in vaste vorm met damp waardoor de toestand van het jodium vastligt als functie van de temperatuur $P_{\text{J}_2} = f(T)$. Door nu voldoende intense straling van een geschikte frekwentie door de jodiumdamp te sturen is het, binnen de laserspiegels, mogelijk de absorptie in de jodiumdamp te verzadigen.

In het uitgangssignaal van de laser manifesteert zich dit verschijnsel als een *toename* in de intensiteit met een maximum samenvallend met de (resonante) absorptiefrekwenties van de jodiummolekulen. Daar het mechanisme van de verzadiging analoog is aan het onder 3.2. beschrevene wordt de hier optredende "dip" wel de "inverse Lamb-dip" genoemd. Er zijn bij dit type laser totaal 10 frekwenties binnen het laserfrekwentiegebied $\Delta\nu_{\text{Ne}}$ waar verzadigde absorptie optreedt.

Fig 8a geeft het verloop $I(\nu_L)$ in het gebied waar verzadigde absorptie waargenomen is terwijl Fig 8b de lijnvorm van een van deze inverse Lamb-dips in detail toont. De absorptiefrekwenties vertonen evenals het neonlijnenprofiel een drukafhankelijkheid doch deze is veel geringer, nl $\Delta\nu(P) \approx 6 \text{ KHz Pa}^{-1}$. Omdat rond $T = 300^\circ\text{K}$ voor de dampdruk-temperatuur-relatie van het jodium geldt $\frac{dP}{dT} = 2,5 \text{ Pa K}^{-1}$ volgt hieruit dat bij een temperatuurstabilisatie van $0,3 \text{ K}$ een frekwentiestabiliteit wordt bereikt van $\frac{\Delta\nu}{\nu}(p) \approx 10^{-11}$. Slaagt men erin

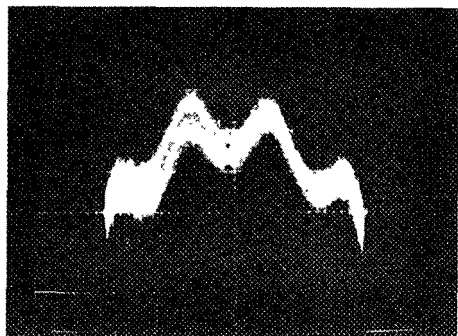


Fig. 8a. Intensiteitsverloop ${}^3\text{He}\text{-}{}^{20}\text{Ne}\text{-}{}^{127}\text{J}_2$ laser rond ν_{ne}

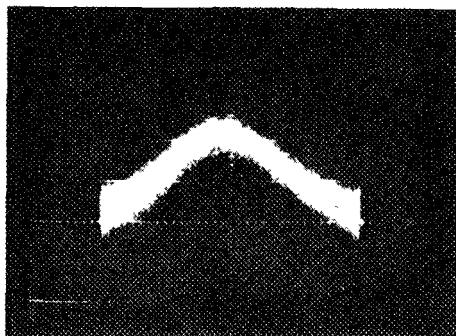


Fig. 8b Intensiteitsverloop ${}^3\text{He}\text{-}{}^{20}\text{Ne}\text{-}{}^{127}\text{J}_2$ laser "d-dip"

de He-Ne laser voldoende nauwkeurig vast te zetten op de verzadigde absorptielijn dan is dus een hoge frekwentiestabiliteit te verwachten. De stabilisatiemethode is vergelijkbaar met deze beschreven onder 3.1. en 3.2, wel is een aantal verfijningen aangebracht i.v.m. de afmetingen van het signaal. Fig 9 geeft het stabilisatieschema van dit type He-Ne laser

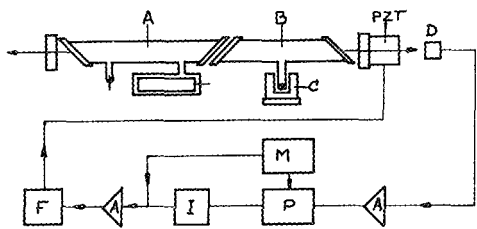


Fig 9. Stabilisatieschema He-Ne ${}^{127}\text{J}_2$ laser. A gasontladingbuis, B absorptiebuis ${}^{127}\text{J}_2$, C temperatuurkontrolle ${}^{127}\text{J}_2$, D fotodetektor, M modulator voor PZT, P lock-in versterker, A versterkers, I integrator, F filter

Wanneer het regelsysteem voldoende zorgvuldig bedreven wordt is het mogelijk onder de hier aangegeven omstandigheden een relatieve frekwentiestabiliteit te berekenen van 10^{-11} (7) Voor de methaan-gestabiliseerde laser zijn zelfs nog betere waarden gevonden. Het Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM) heeft in 1973 (8) een voorlopige waarde voor de golflengte van een van de absorptielijnen van de J_2 laser vastgelegd waarmee het nu mogelijk is ook de golflengte van andere gestabiliseerde lasers te bepalen (zie paragraaf 5)

5. Bepaling van de frekwentiestabiliteit van He-Ne lasers

5.1. Frekwentiemeting

Vanwege de hoge frekwentie van de straling is het niet mogelijk de frekwentiestabiliteit van de hier beschreven lasers rechtstreeks te meten. Heeft men twee onafhankelijk gestabiliseerde lasers met frekwentie ν_1 en ν_2 dan kan door mengen van de straling uit het gedrag van de hierbij ontstane verschil-frekwentie $\nu_1 - \nu_2$ worden afgeleid wat het frekwentiegedrag van lasers afzonderlijk is. Wordt de straling van twee vergelijkbare lasers gemengd dan zal voor de variantie van het mengproduct gelden

$$S_M^2 = S_1^2 + S_2^2 \approx 2 S^2$$

$$\text{zodat volgt } S = \frac{SM}{\sqrt{2}}$$

Zijn de stabilisatiemethoden duidelijk verschillende b.v. $S_1 \gg S_2$ dan volgt $S_M \approx S_1$

Deze situatie komt voor als men de straling van de jodiumgestabiliseerde laser mengt met een van de lasers beschreven in paragraaf 3.

De absolute frekwentie van een gestabiliseerde He-Ne laser kan bepaald worden door de verschilfrekwentie tussen een jodiumgestabiliseerde laser, waarvan de fre-

kwentie bij internationale afspraak vast ligt, en een andere gestabiliseerde He-Ne laser te meten

Het mengen van laserstraling geschiedt via het op elkaar afbeelden van de bundels m b v spiegels en lenzen. De samengevoegde bundels worden afgebeeld op een snelle, gevoelige fotodiode waarna het hierdoor afgegeven signaal wordt versterkt en gemeten en daarna verder verwerkt.

Fig. 10 geeft schematisch het meetstelsel met informatieverwerking weer

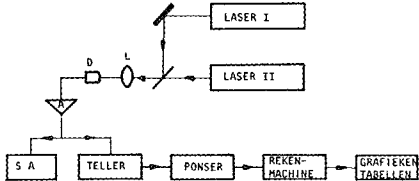


Fig. 10. Schema van opstelling voor het meten van de stabiliteit van lasers. A versterker, D fotodetektor, L lens.

5.2. Frekwentiestabiliteit van enige lasertypen

Met het onder 5.1 beschreven meetstelsel zijn stabiliteits- en frekwentiemetingen uitgevoerd aan jodiumgestabiliseerde lasers en tussen jodiumgestabiliseerde lasers en andere gestabiliseerde lasertypen

Fig. 11 geeft het verloop van het frekwentieverval tussen twee jodiumlasers. De meetwaarden zijn frekwentiefrequenties gemiddeld over 10 s.

Uit deze metingen blijkt dat de frekwentievervalsaties niet groter zijn dan 10 kHz. Dit komt overeen met een relatieve frekwentiestabiliteit beter dan $2 \cdot 10^{-11}$. Stabiliteitsmetingen met andere lasers hebben uitgewezen dat de frekwentievervalsaties hier veel groter zijn

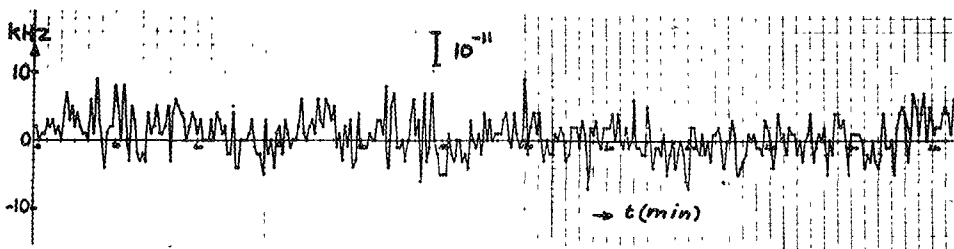


Fig. 11. Frekwentiedrag van twee J₂ gestabiliseerde lasers, Lab. voor Lengtemeting THE.

In fig. 12 is een tabel gegeven met gemiddelde frekwentievervalsaties van een aantal gestabiliseerde lasers, gemeten in het Lab voor Lengtemeting THE

Type gestabiliseerde He-Ne laser	Gemiddelde frekwentievervalsaties (MHz)	Frekwentieverval met J ₂ laser (MHz) (1-dip)
He-Ne- ¹²⁷ J ₂	10-2	0
Twee-frekwentie laser	10	107
Lamb-dip laser	1,5	-18
Zeeman-laser	3	24

Fig. 12 Meetwaarden verschillende typen gestabiliseerde He-Ne lasers.

6. Conclusies

Hoewel de metingen in het Lab. voor Lengtemeting nog niet zijn afgesloten kan gesteld worden dat de jodiumgestabiliseerde lasers een geschikte bron zijn om het frekwentiedrag van andere He-Ne lasers te bestuderen. Men kan hiermee ook de absolute frekwentie van de He-Ne lasers bepalen waarna met de bekende waarde van de lichtsnelheid (8) de golflengte in vacuüm kan worden berekend. Uit fig. 12 blijkt dat de lamb-dip stabilisatie een beter stabiliteitsgedrag oplevert dan de andere lasers hoewel de relatieve fluctuaties $\frac{\Delta\nu}{\nu}$ voor alle lasers beneden 10^{-7} blijven. Wel blijken veel grotere frekwentievervalsaties op te treden tussen verschillende lasers van één stabilisatietype. Zo zijn frekwentievervalsaties gemeten van 25 MHz tussen twee zeemanlasers terwijl zij beide werden gebruikt in een interferometer waarin werd aangenomen dat hun frekwentie gelijk was

Samengevat kan gesteld worden dat de hier besproken lasers gebruikt kunnen worden als lichtbron in interferometers mits met bovengeschreven methoden de golflengte is bepaald. De relatieve meetfouten t.g.v. frequentiefluctuaties zullen dan beneden 10^{-7} blijven.

Literatuur

- (1) PT-rapport nr. 403, 1977 (intern THE).
Ontwerp en konstruktie van He-Ne lasers.
P. Schellekens
- (2) W E Lamb
Theory of an optical maser.
Physical Review, **134** A1429-A1450, 1966
- (3) Het stabilisatieprincipe is gebruikt in de door Spectra-Physics commercieel uitgebrachte laser SP-119.

- (4) In het Lab. voor Lengtemeting THE wordt op dit moment gewerkt aan de bouw van een laser gebaseerd op dit principe
PT-rapport nr. 396, W M. Sluyter.
Stabilisatie van een He-Ne laser.
Het principe is ook gebruikt in lasers van de firma's Soro en Tropel.
- (5) Dit principe is toegepast in de laser van het lasermeetsysteem 5526 A uitgebracht door Hewlett-Packard
- (6) E. Engelhard
JOSA, vol **61**, nr. 2, 1971
A.D. White
Applied Physics Letters, **70**, 24, 1967
- (7) WT-rapport nr. 418, 1978.
Frequentiestabilisatie van He-Ne lasers met behulp van verzadigde absorptie in jodiumdamp
P. Schellekens.
- (8) J Terrien
Metrologia **10**, 75-77, 1974.

