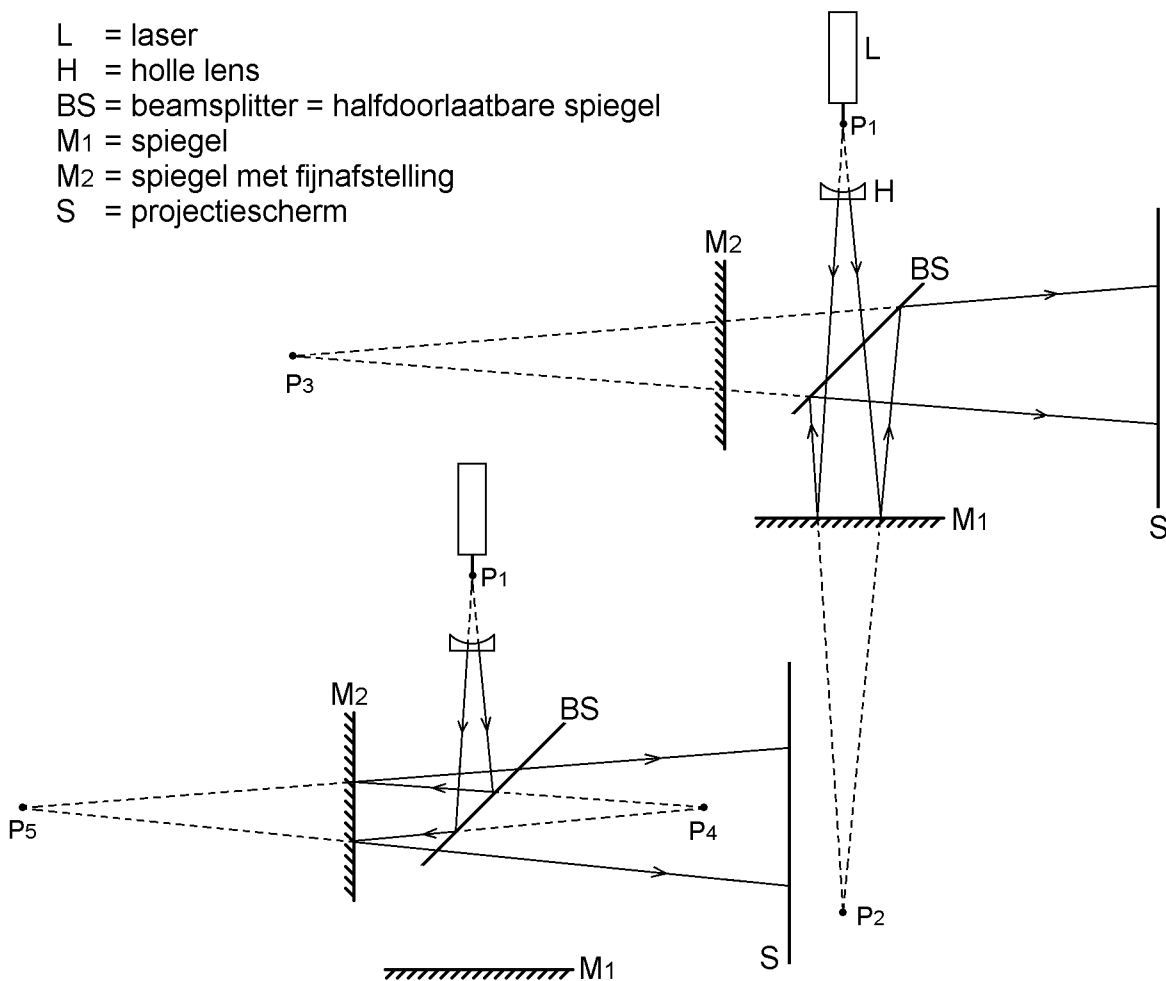


Michelson interferometer (eenvoudige uitvoering met laser)

Opstelling

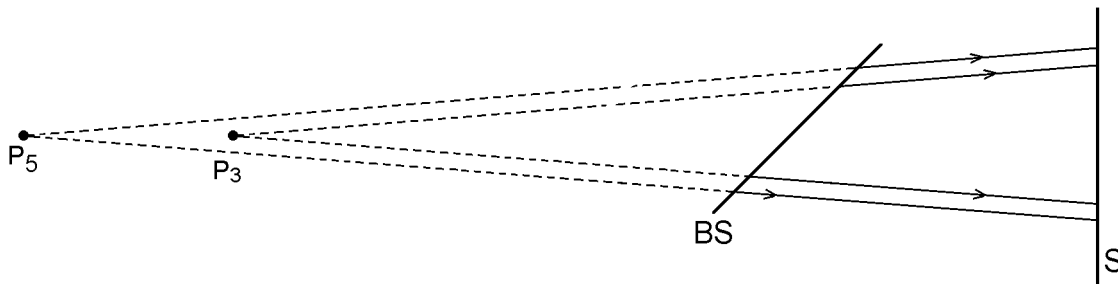
In de onderstaande figuren staat een eenvoudige versie van een Michelson interferometer afgebeeld. Een laserstraal wordt door een holle lens H divergerend gemaakt. Vervolgens valt de lichtbundel op een halfdoorlaatbare spiegel BS (beamsplitter). Deze laat 50% van het licht door en kaatst 50% van het licht terug. In de bovenste figuur is getekend hoe de doorgelaten lichtbundel verder gaat en in de onderste figuur is getekend hoe de teruggekaatste lichtbundel verder gaat.

- L = laser
- H = holle lens
- BS = beamsplitter = halfdoorlaatbare spiegel
- M₁ = spiegel
- M₂ = spiegel met fijnafstelling
- S = projectiescherm

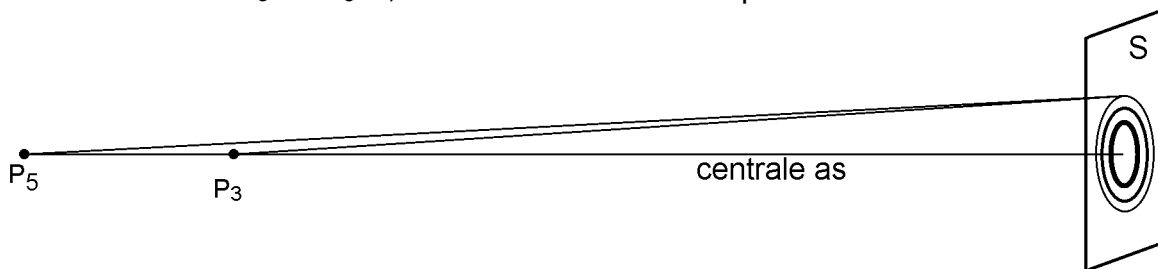


De door de holle lens divergerend gemaakte lichtbundel lijkt uit één punt P₁ te komen. Zoals in de bovenste figuur te zien is, beeldt spiegel M₁ punt P₁ af in punt P₂ en beeldt spiegel BS punt P₂ vervolgens af in punt P₃. In de onderste figuur is te zien dat spiegel BS punt P₁ afbeeldt in punt P₄ en vervolgens spiegel M₂ dit punt afbeeldt in punt P₅. Spiegels M₁ en M₂ hoeven niet exact loodrecht op elkaar te staan. Evenmin hoeft de halfdoorlaatbare spiegel (BS) exact onder een hoek van 45° te staan. Tenslotte kan de holle lens vervangen worden door een bolle spiegel: deze maakt de laserstraal ook divergerend.

Resultierend bereiken twee divergerende lichtbundels het scherm S. De ene lichtbundel lijkt uit punt P_3 te komen en de andere lichtbundel uit punt P_5 . Dit is in de volgende figuren weergegeven. Alleen de lichtbundels tussen de halfdoorlaatbare spiegel (BS) en het scherm (S) zijn als doorgetrokken lijnen getekend.

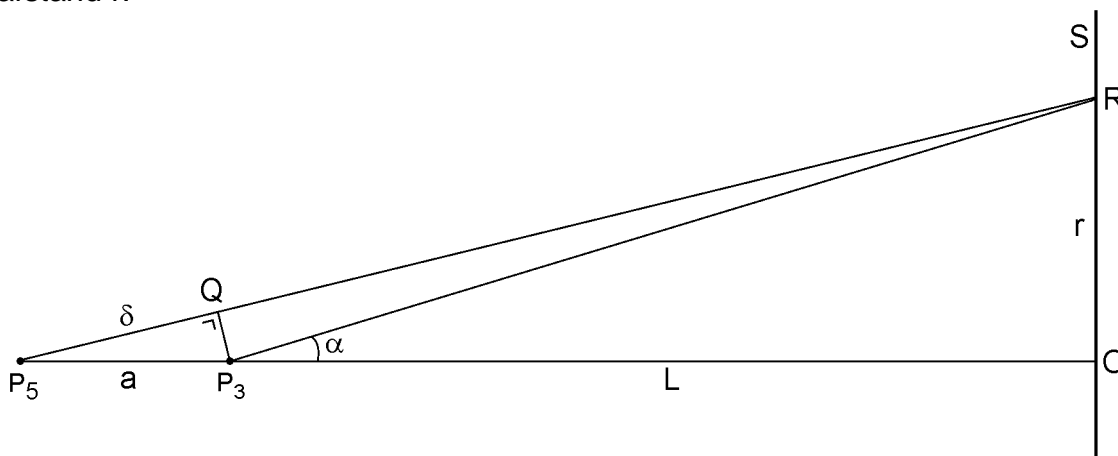


Op het scherm S ontstaat een interferentiepatroon in de vorm van concentrische cirkels. Dit is in de onderstaande figuur getekend. Het ontstaan hiervan is eenvoudig te begrijpen. Punten P_3 en P_5 zenden in fase lichtgolven uit. De weglengte van P_3 naar een willekeurig punt op het scherm verschilt van de weglengte van P_5 naar dat punt. Afhankelijk van het verschil in weglengte zal er in het punt constructieve of destructieve interferentie optreden. Omdat de geometrie symmetrisch rond de centrale as door P_3 en P_5 is, bestaat het interferentiepatroon uit cirkels.



Interferentiepatroon op het scherm

In de onderstaande figuur staat het interferentiepatroon op scherm S centraal. Dit patroon bestaat uit concentrische cirkels met punt O als middelpunt. Hierbij is O het snijpunt van de centrale as door P_3 en P_5 met het scherm. Punt R is een willekeurig punt van het scherm op afstand r tot O. Vanuit P_3 en vanuit P_5 vertrekken lichtgolven die in R aankomen. Het verschil in weglengte is in de figuur met δ aangegeven. Er geldt dus $\delta = P_5R - P_3R$. We onderzoeken hoe het weglengteverschil δ afhangt van afstand r .



We nemen nu aan dat het scherm in het verre veld staat. In de figuur betekent dit dat de lijnen P_3R en P_5R (bij benadering) evenwijdig zijn. De afstand tussen P_3 en P_5 is met a aangegeven en de afstand tussen P_3 en het scherm met L . In de figuur is de loodlijn getrokken van punt P_3 op lijn P_5R en het snijpunt is met Q aangeduid. In de volgende berekeningen wordt afbuighoek α in radialen uitgedrukt en is α veel kleiner dan 1 radiaal.

Uit driehoek P_3OR volgt:

$$\tan(\alpha) = \frac{r}{L}$$

Uit driehoek P_3P_5Q volgt:

$$\cos(\alpha) = \frac{\delta}{a}$$

Omdat hoek α klein is, kunnen deze vergelijkingen vereenvoudigd worden tot:

$$\alpha = \frac{r}{L} \quad \text{en}$$

$$1 - \frac{1}{2}\alpha^2 = \frac{\delta}{a}$$

Uit de laatste twee vergelijkingen volgt dan:

$$\delta = a \cdot \left(1 - \frac{r^2}{2 \cdot L^2} \right)$$

Uit de formule kunnen we concluderen dat het weglengteverschil maximaal is voor $r = 0$. Naar buiten toe (dus voor toenemende r) neemt het weglengteverschil af. De afname van het weglengteverschil neemt kwadratisch toe met r .

Op het scherm kunnen we concentrische cirkels aanwijzen met O als middelpunt waarbij het weglengteverschil gelijk is aan $a - n \cdot \lambda$ met n gelijk aan 0, 1, 2, 3 enzovoort. De straal van deze cirkels geven we aan met r_n . De lichtintensiteit ter plaatse van deze cirkels is gelijk aan de lichtintensiteit bij het middelpunt O . Er geldt dan:

$$\frac{a \cdot r_n^2}{2 \cdot L^2} = n \cdot \lambda$$

Hieruit volgt:

$$r_n = L \cdot \sqrt{\frac{2\lambda}{a}} \cdot \sqrt{n}$$

Uit deze formule kunnen we de volgende conclusies trekken.

1)

De straal van de n -de interferentiering op het scherm is evenredig met de wortel uit n . Dit betekent dat de ringen steeds dichter bij elkaar komen te liggen.

2)

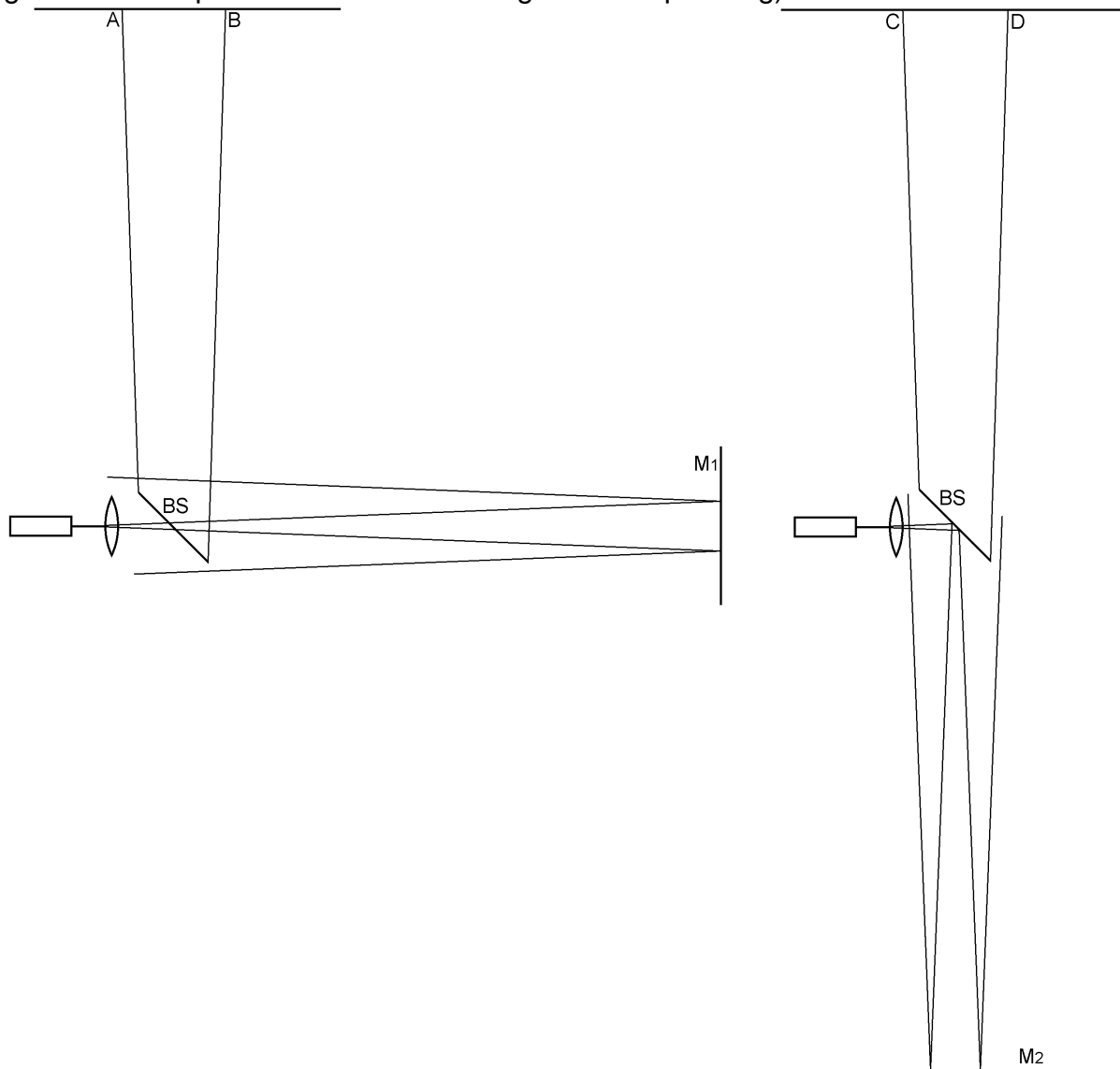
Naarmate a kleiner is (dus hoe dichter P_3 en P_5 bij elkaar liggen), des te groter de afstand tussen de interferentieringen op het scherm is.

3)

Naarmate L groter is (dus hoe verder het scherm weg staat), des te groter de afstand tussen de interferentieringen op het scherm is.

Praktische aspecten

Bij het in de praktijk opbouwen van de interferometer kun je het volgende stappenplan volgen. Zie ook de onderstaande figuren (de opstelling is een kwart slag gedraaid ten opzichte van de eerder afgebeelde opstelling).



- 1) Plaats de lens voor de laser en zorg ervoor dat het midden van de divergerende bundel horizontaal loopt en zich ter hoogte van het midden van de spiegels bevindt.
- 2) Plaats de halfdoorlaatbare spiegel (BS) net voorbij de lens. De oppervlakte van de BS is de beperkende factor voor het aantal zichtbare interferentieringen op het scherm. Dit komt omdat de lichtbundel divergeert en als laatste door de BS gaat of door de BS teruggekaatst wordt. Het is dus belangrijk om de doorsnede van de lichtbundel niet onnodig te laten groeien tussen de lens en de BS.

3)

Plaats spiegel M_1 zodanig, dat de door hem teruggekaatste bundel op de BS valt en door de BS teruggekaatst wordt in de richting van het scherm (zie de linker figuur hierboven). Bij grotere afstanden tussen BS en M_1 zal de rand van de lichtbundel langs de BS gaan (in plaats van erop te vallen). Op het scherm zijn dan de rechte lijnige begrenzingen A en B van de BS zichtbaar.

4)

Plaats spiegel M_2 zodanig, dat de door hem teruggekaatste bundel op de BS valt. Bij grotere afstanden tussen BS en M_2 zal de rand van de lichtbundel weer langs de BS gaan. Op het scherm zijn dan de rechte lijnige begrenzingen C en D van de BS zichtbaar.

5)

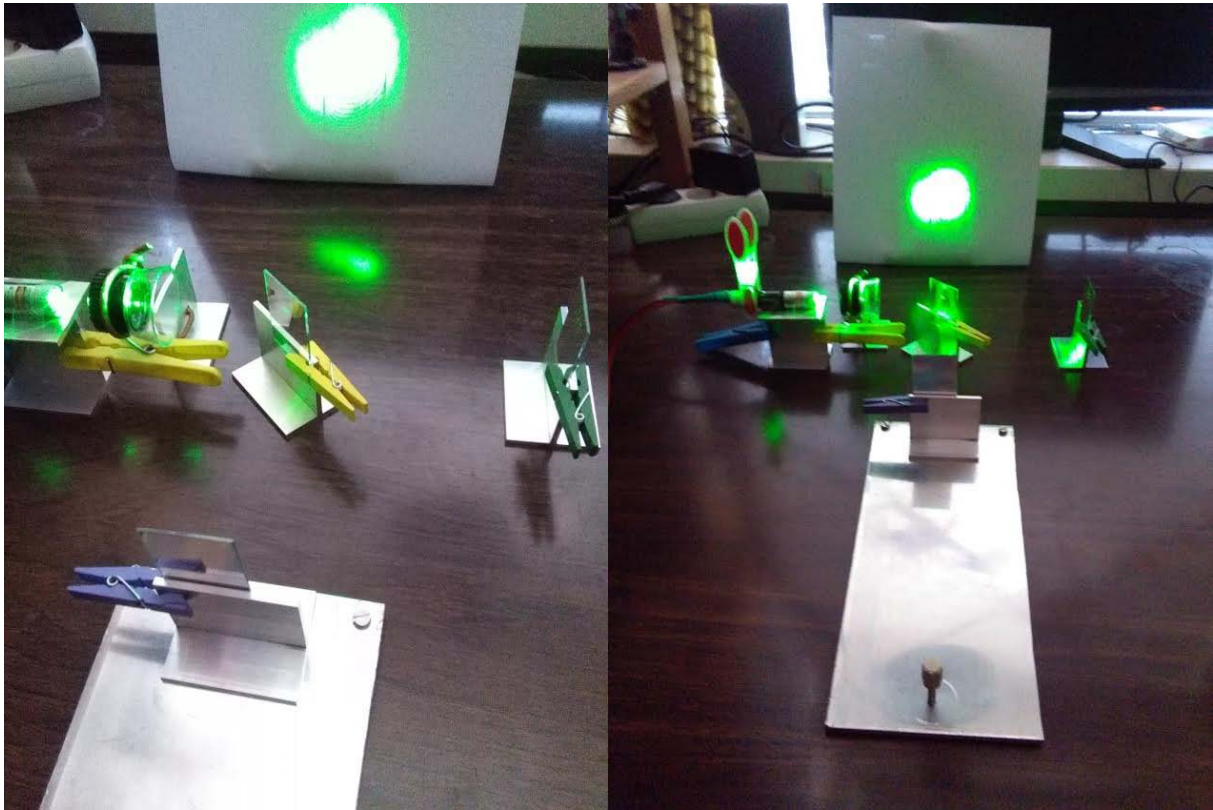
Verplaats en verdraai M_2 zodanig, dat er op het scherm interferentiepatronen verschijnen. Daarbij wordt de centrale as die door P_3 en P_5 gaat (zie een bovenstaande figuur) zodanig gericht, dat deze het midden van het scherm doorsnijdt. Daarbij kan een speld, die in de lichtbundel net voorbij de BS geplaatst wordt, nuttig zijn. In principe ontstaan er twee beelden van de speld op het scherm. Met de fijnafstelling van M_2 moet het ene beeld op dezelfde plaats gebracht worden als het andere beeld.

Een interferentiepatroon is het gemakkelijkst te vinden als de afstand tussen M_1 en BS ongeveer gelijk is aan de afstand tussen M_2 en BS. De punten P_3 en P_5 liggen dan dicht bij elkaar. P_3 en P_5 mogen ook weer niet te dicht bij elkaar liggen want dan verschuift het interferentiepatroon te veel bij een kleine verdraaiing van M_2 . Als het interferentiepatroon op het scherm eenmaal zichtbaar is, kan de afstand tussen de interferentiepatronen vergroot worden door M_2 voorzichtig naar de BS toe of van de BS af te schuiven.

Mogelijke fouten in de opstelling zijn de volgende. 1) De aluminiumlaagjes die op M_1 en M_2 zitten, zitten aan de achterkant van het glas in plaats van aan de voorkant. 2) De lichtbundels treffen de spiegels niet in het midden. Dit geldt in het bijzonder voor M_2 die verschoven en verdraaid wordt.

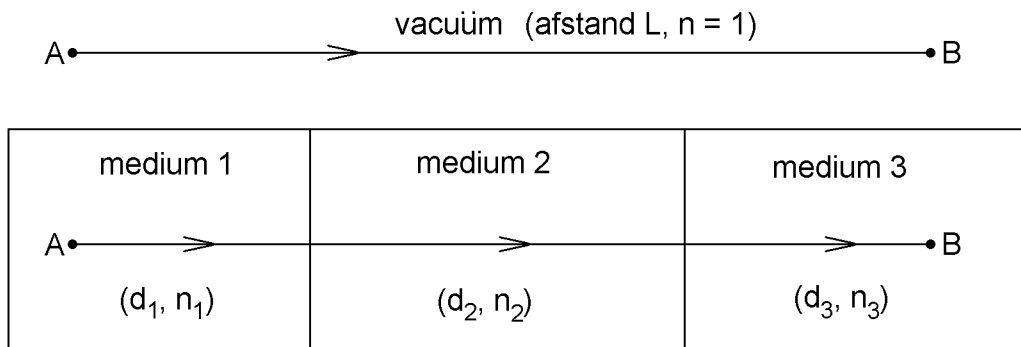
Als er geen interferentiepatronen maar ovaalvormen op het scherm zichtbaar zijn, is dat (waarschijnlijk) het gevolg van het feit dat punt P_1 , en dus ook de punten P_3 en P_5 , geen punten zijn maar bepaalde afmetingen hebben. Deze situatie komt vooral voor als P_3 en P_5 heel dicht bij elkaar liggen.

De volgende foto's tonen een zelf gebouwde Michelson interferometer op een vlakke tafel. De spiegelplaatjes zijn [hier](#) besteld. De aluminium plaat, waar spiegel M_2 op staat, bevat een stelschroef waarmee de stand van deze spiegel geregeld kan worden.



Optische weglengte

In de volgende figuren gaat een lichtstraal van punt A naar punt B. In de bovenste figuur gaat de lichtstraal door vacuüm. De afstand tussen A en B is L en de brekingsindex is per definitie 1. In de onderste figuur gaat de lichtstraal door drie media. De door de lichtstraal afgelegde afstanden in de drie media zijn d_1 , d_2 en d_3 en de brekingsindices zijn n_1 , n_2 en n_3 . Zoals bekend, geeft de brekingsindex van een medium aan hoeveel keer de lichtsnelheid in dat medium kleiner is dan die in vacuüm. Het licht heeft in de onderste figuur dus meer tijd nodig om van A naar B te gaan (aangenomen dat n_1 , n_2 en n_3 groter dan 1 zijn).



Onder de optische weglengte die een lichtstraal op zijn weg van punt A naar punt B aflegt, verstaan we de afstand die het licht in dezelfde tijd in vacuüm zou afleggen. De optische weglengte in de onderste figuur is dus groter dan die in de bovenste figuur. De optische weglengte in de bovenste figuur is L . De optische weglengte Δ in de onderste figuur is:

$$\Delta = n_1 \cdot d_1 + n_2 \cdot d_2 + n_3 \cdot d_3.$$

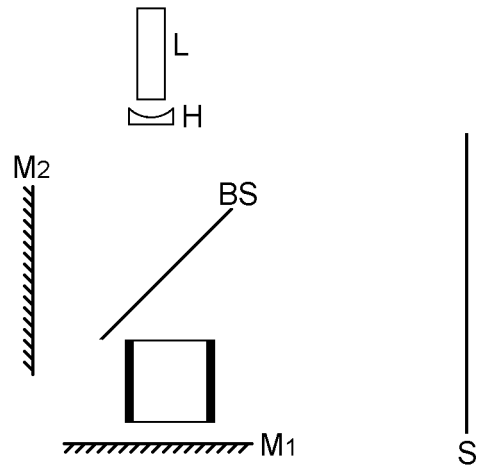
Als we aannemen dat het licht monochromatisch is, is de golflengte in een medium omgekeerd evenredig met zijn brekingsindex want de frequentie blijft onveranderd. Hieruit volgt dat als een lichtstraal van A naar B gaat, het aantal golflengtes k tussen A en B gegeven wordt door:

$$k = \frac{\Delta}{\lambda}.$$

Hierin is λ de golflengte in vacuüm.

Bepaling van de brekingsindex van een gas

De michelson interferometer leent zich er goed voor om de brekingsindex van lucht (of een ander gas) te bepalen. In één van de twee wegen die het licht aflegt, wordt een cel geplaatst met een glazen voor- en achterkant. Zie de figuur hiernaast. Eerst wordt het interferentiepatroon op het scherm S verkregen waarbij er vacuüm in de cel heerst. Langzaam wordt er lucht in de cel toegelaten tot atmosferische druk. Hierdoor verloopt het interferentiepatroon op het scherm. Elke keer als de optische weglengte met één golflengte toeneemt, verschuift het interferentiepatroon met één ring.



Stel dat de cel een lengte L heeft en dat de brekingsindex in de cel toeneemt met Δn . De toename van de optische weglengte bedraagt dan $2 \cdot \Delta n \cdot L$. De factor 2 komt voort uit het feit dat het licht twee keer door de cel gaat. Stel verder dat het interferentiepatroon in totaal m ringen verschuift. Er geldt dan:

$$m \cdot \lambda = 2 \cdot \Delta n \cdot L.$$

Hieruit volgt voor de toename van de brekingsindex:

$$\Delta n = \frac{m \cdot \lambda}{2 \cdot L}$$

De brekingsindex van het gas is dan $1 + \Delta n$.