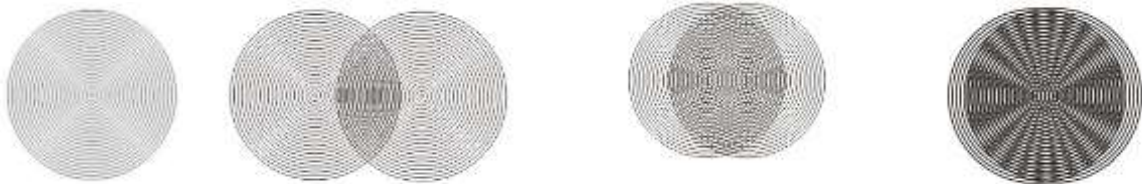


Enkele theoretische en praktische toelichtingen.

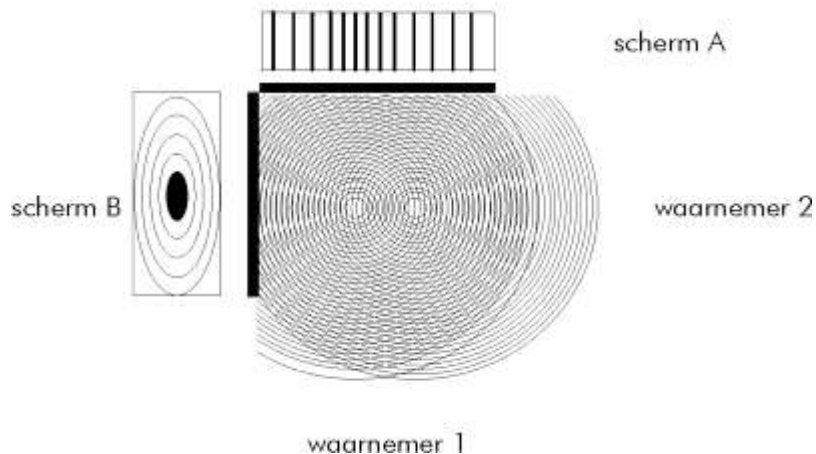
Geven we hier een meer uitgebreide beschrijving van de experimenten, voor wie ze technisch wil doorgronden, eventueel voor wie ze zelf wil overdoen. Gaan we vooreerst iets dieper in op het thema optische interferentie.

Optische interferentie

Twee coherente lichtpunten die bijzonder dicht bij elkaar liggen genereren lichtgolven die als vele concentrische bollen steeds verder uitdijen en zich met elkaar vermengen. Illustreer we dit met twee transparanten waarop een aantal concentrische cirkels staan afgeprint en schuiven we de transparanten geleidelijk meer en meer over elkaar. Ze lijken wel een soort van moiré-patroon te vormen.



Het papier toont dit alles in een plat vlak, in twee dimensies. In wezen gaat het echter niet om cirkels, maar om uitdijende bollen die nog een ruimtelijke- en een tijdsdimensie hebben.



Hierboven zien we een bovenaanzicht van twee coherente monochromatische puntlichtbronnen, noemen we ze A en B, die bijzonder dicht bij elkaar liggen. De horizontale en de verticale zwarte strook stellen elk het bovenaanzicht van een projectiescherm voor. De

schermen A en B, zijn diezelfde schermen, maar nu enigszins wat opengeklapt, zeggen we op 45° , waardoor we kunnen zien wat erop geprojecteerd wordt.

Vanuit het gezichtspunt van waarnemer 1 liggen de lichtbronnen A en B naast elkaar. Op het scherm A zullen er zich een aantal evenwijdige interferentielijnen tonen, wat ons bij de interferentie-experimenten van Young en Fresnel brengt.

Vanuit het gezichtspunt van waarnemer 2 evenwel, liggen de lichtbronnen A en B echter achter elkaar. Op het projectiescherm B zullen er enkele concentrische cirkels te zien zijn, wat verwijst naar newtonringen.

Trachten we dit te verduidelijken. De afbeeldingen hieronder zijn details van de zojuist gegeven afbeeldingen.

Kijken we vooreerst naar het scherm A.

Bovenaan in het midden zien we een donkere lijn, de lijn van destructieve interferentie. Het punt C valt op die lijn. Alle lichtstralen vanuit A en B die de lijn vormen waarin C zich situeert, zoals de lichtstralen 1 en 2, hebben een tegengestelde fase en doven elkaar uit.

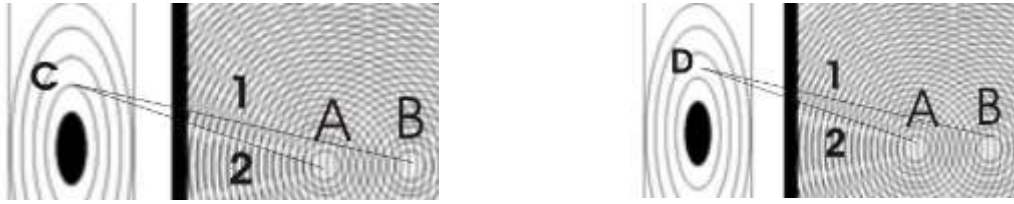
Het punt D op de afbeelding rechts valt op een lichtende bredere band, een lijn van constructieve interferentie. Alle lichtstralen vanuit A en B die die de lijn vormen waarin D zich situeert, zoals de lichtstralen 1 en 2, hebben eenzelfde fase en versterken elkaar. Het licht is er intenser.



Kijken we vervolgens naar het scherm B.

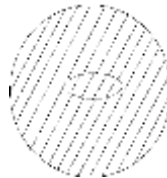
Het punt C op de afbeelding links valt op een donkere cirkel, een cirkel van destructieve interferentie. Alle lichtstralen vanuit A en B die de cirkel C vormen, zoals de lichtstralen 1 en 2, hebben een tegengestelde fase en doven elkaar uit.

Het punt D op de afbeelding rechts valt op een lichtende bredere cirkel, een cirkel van constructieve interferentie. Alle lichtstralen vanuit A en B die die de cirkel D vormen, zoals de lichtstralen 1 en 2, hebben eenzelfde fase en versterken elkaar. Het licht is er intenser.



Gaat men nu geleidelijk van de positie van waarnemer 1 over naar die van waarnemer 2, dan zullen theoretisch gezien deze lijnen, die eerst evenwijdig waren, zich geleidelijk omvormen tot krommen, tot ze uiteindelijk overgaan in concentrische cirkels.

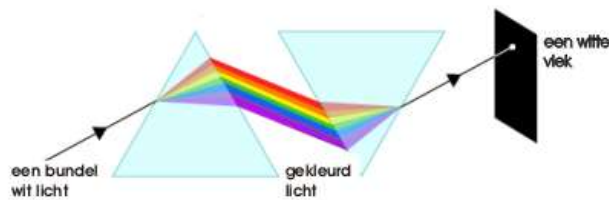
Bij een bepaalde vorm van interferentiemicroscopie wordt het gezichtsveld zo afgesteld dat het gevuld is met vele lijnen van destructieve interferentie. Een doorzichtige bacterie in de lichtweg gebracht, zal het licht vertragen waardoor deze lijnen lichtjes vervormd en verschoven worden. Dit geeft dan enige informatie over de plaats, de vorm en de van de dikte bacterie.



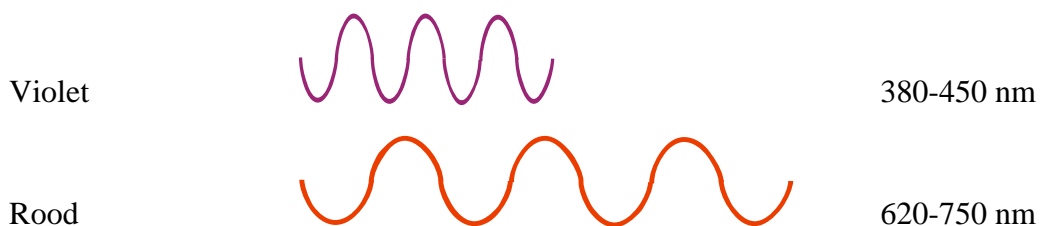
Brengt men de beide lichtbronnen nog dichter bij elkaar, dan zullen deze cirkels op het scherm B steeds groter worden. Uiteindelijk zal de middelste ring zo groot zijn dat hij voor de waarnemer het hele gezichtsveld vult. Men spreekt dan met een Angelsaksische term van 'infinite fringe width'. Kortom we dit in wat volgt af tot 'IFW'.

Iets over kleuren

De geniale Engelse natuurkundige Isaac Newton (1643/1727) toonde aan dat het zonlicht dat door een prisma gaat, in zijn samenstellende kleuren wordt ontbonden. Een tweede prisma kan deze kleuren weer samenbrengen tot wit licht.



Elke kleur heeft een eigen golflengte. De golflengte van b.v. rood (tussen 620-750 nanometer) is veel langer dan de golflengte van violet (tussen 380-450 nanometer).



Wit licht

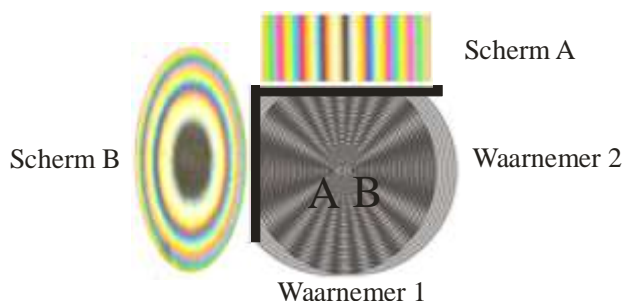


380-750 nm

De 'witte' puntlichtbron S hieronder genereert alle kleuren van de regenboog. Omdat er zo'n tweeduizend (!) golven in één enkele millimeter gaan, overlappen de onderscheiden kleuren elkaar al zeer vlug en ontstaat er vrij snel terug wit licht.



Wij werken bij onze experimenten met wit licht. De interferentielijnen en de newtonringen op onze beide projectieschermen zullen er dus heel wat kleurrijker uitzien. We krijgen:



Wat in de afbeeldingen bij onze monochromatische lichtbron zwarte lijnen of cirkels waren, zijn nu lijnen en cirkels met de kleuren van de regenboog.

Geven we hieronder een detail van zowel scherm B als scherm A en brengen we in centraal in elke afbeelding een rode lijn aan. We zien dat in de beide schermen de helften elkaars spiegelbeeld zijn.



Zouden we nu inzoomen op de blauwe kleur van interferentielijn 1, dan vinden we links ervan de rode kleur. Zomen we in op lijn 2, dan vinden we de rode kleur rechts van de blauwe.

Redeneren we een stap verder. We stellen zo af dat het hele spiegeloppervlak van onze hoofdspiegel gevuld is met één enkele kleur van het spectrum. Als we de lichtweg dan verstoren door b.v. onze hand net voor de spiegel te houden, dan zal de verwarming/verdamming die van onze hand uitgaat, de lichtweg op die plaats vertragen en zal dit leiden tot een verschuiving van de interferentiekleuren. Het ligt dan voor de hand dat deze verschuiving in functie zal zijn van de interferentielijn of -cirkel links of rechts van de lijn of

cirkel van destructieve interferentie. M.a.w.: het hangt ervan af of we ons dan bevinden in het interferentiegebied 1 of 2.

Een verstoring in een interferentieopstelling, veroorzaakt door monochromatisch licht, zal een verschuiving van de interferentielijnen veroorzaken. Dat illustreerden we met het voorbeeld van de bacterie in de microscoop.

Werken we met wit licht, dan is zo'n lijn een verzameling van kleuren. Zouden we onze opstelling zo kunnen afstellen dat het spiegeloppervlak gevuld is met één enkele kleur van één enkele lijn, dan hebben we goede redenen om te veronderstellen dat we een veel gevoeliger instrument zullen bekomen. Dat is uiteindelijk de basisgedachte achter alle volgende experimenten die we willen uitvoeren.

Iets over interferometers

Zoals gezegd wordt in een interferometer het licht in twee deelbundels gesplitst die op een of andere wijze verstoord worden en zich nadien terug verenigen en aanleiding kunnen geven tot interferentie en waarneembare kleurverschuivingen.

Gebruikte afkortingen

S = Source, puntlichtbron.

M = Mirror, concave spiegel, 155 mm doormeter, $f = \pm 1250$ mm

m = mirror, kleine vlakke spiegel, met spiegelende laag aan bovenzijde

Bs = beamsplitter cube voor visueel licht, 50/50, 20 mm³.

E = Eye, oog, plaats van de waarnemer

v = voorwerpsafstand

b = beeldafstand

B = beeldpunt

K (de hoofdletter) = krommingsmiddelpunt

k (de kleine letter) = krommingsmiddelpuntafstand

La = Groene laser, noodzakelijk om de onderdelen op elkaar af te stellen. La wordt achter E geplaatst, zodat bij het kijken het hoofd tussen La en E komt, en het gevaar om door de laser verblind te worden, verkleint. Het blijft aangeraden bij het kijken de laser te doven.

IFW: infinite fringe width: een beeld waarbij het spiegeloppervlak slechts één kleur van het spectrum heeft. M.a.w. één enkele interferentielijn is zo breed uiteen gespreid dat M gevuld is met één enkele kleur.

Een radiale interferometer.

1. Algebraïsche benadering

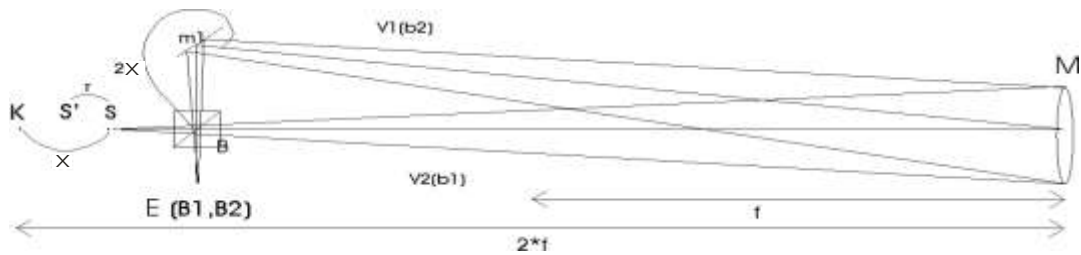
Voor de opstelling hieronder gelden nog:

a = lichtweg van S naar M in wijzerzin

b = lichtweg van S naar M in tegenwijzerzin

x = de afstand a – b

r = $\sqrt{x^2 + f^2} - f$



Noemen we deze opstelling de 'basisopstelling'. Denken we de puntlichtbron in S' en trachten we de beide voorwerpsafstanden algebraïsch te definiëren.

We krijgen:

v_1 , de voorwerpsafstand in wijzerzin, is gelijk aan de afstand van S' naar S, dan naar B, m_1 en M, of: $v_1 = 2*f - (x - r) + 2*x = 2*f + x + r$. (1)

v_2 , de voorwerpsafstand in tegenwijzerzin, is gelijk aan de afstand van S' naar S en verder via B tot M of: $v_2 = 2*f - (x - r) = 2*f - x + r$ (2)

Via de spiegelformule $1/f = 1/b + 1/v$ vinden we: $b = (v*f)/(v-f)$, zodat b_1 , de eerste beeldafstand, behorend bij v_1 , en die van M via B in de richting van E gaat, gelijk is aan:

$$b_1 = (2*f - x + r)*f / (2*f - x - r - f) \quad (3)$$

Voor b_2 , de tweede beeldafstand, behorend bij v_2 , en die van M via m_1 en B in de richting van E gaat vinden we:

$$b_2 = (2*f + x + r)*f / (2*f + x + r - f) \quad (4)$$

Zien we vervolgens op de tekening waar b_1 zich situeert, dan merken we dat de beschikbare weg voor b_1 gelijk is aan v_2 . Het beeldpunt B1 (de hoofdletter ter onderscheiding van de kleine letter b_1 , de beeldafstand) zal dus op $b_1 - v_2$ van E verwijderd liggen, of:

$$B_1 = b_1 - v_2$$

Zien we geheel analoog waar b_2 zich situeert, dan stellen we vast dat de beschikbare weg gelijk is aan v_1 . Het punt B2 zal dus op $b_2 - v_1$ van E verwijderd liggen.

$$B_2 = b_2 - v_1$$

De onderlinge afstand D tussen de beide beeldpunten B1 en B2 vinden we door het verschil tussen deze beide laatste waarden te maken.

We krijgen:

$$D = B_2 - B_1 = (b_2 - v_1) - (b_1 - v_2) = (b_2 - b_1) - (v_1 - v_2) \quad (5)$$

Uit (1) en (2) vinden we:

$$(v_1 - v_2) = 2*f - x + r - 2*f - x - r = -2*x \quad (6)$$

zodat we (5) kunnen herschrijven als: $D = (b_2 - b_1) + 2*x$ (7)

Vervangen we nu in (7) voor b_2 en b_1 de waarden bekomen in (3) en (4):

$$D = ((2*f - x + r)*f / (f - x + r)) - ((2*f + x + r)*f / (f + x + r)) + 2*x$$

Werken we deze vergelijking nu verder uit.

$$\begin{aligned}
 &= (((2f^2 - fx + fr) * (f + x + r) - (2f^2 + fx + fr) * (f - x + r)) / ((f - x + r) * (f + x + r))) + 2x \\
 &= (2f^3 + 2f^2x + 2f^2r - f^2x - fx^2 - fxr + f^2r + fxr + fr^2) / ((f + x + r) * (f - x + r)) - \\
 &\quad (2f^3 - 2f^2x + 2f^2r + f^2x - fx^2 + fxr - f^2r - fxr + fr^2) / ((f + x + r) * (f - x + r)) - 2x \\
 &= (2f^2x / ((f + x + r) * (f - x + r))) - 2x \\
 &= (2f^2x / (f^2 - fx + fr + fx - x^2 + xr + fr - xr + r^2)) - 2x \\
 &= (2f^2x / (f^2 + 2fr + r^2 - x^2)) - 2x \\
 \text{of } D &= (2f^2x / ((f+r)^2 - x^2)) - 2x \tag{8}
 \end{aligned}$$

Met deze laatste uitdrukking hebben we nu een formule die ons zegt op welke afstand de beide beeldpunten B1 en B2 van elkaar verwijderd liggen in onze opstelling, en dit in functie van de brandpuntsafstand f van onze spiegel M , van de waarde voor x en van de radiale verschuiving r van onze puntlichtbron.

Laten we in deze uitdrukking r naar 0 streven, en werken we verder uit dan verkrijgen we:

$$\begin{aligned}
 D &= (2f^2x / (f^2 - x^2)) - 2x \\
 D &= (2f^2x - 2x(f^2 - x^2)) / (f^2 - x^2) \\
 D &= (2f^2x - 2xf^2 + 2x^3) / (f^2 - x^2) \\
 D &= 2x^3 / (f^2 - x^2)
 \end{aligned}$$

We zien zo dat de waarde van D kleiner wordt naarmate de waarde van x verkleint en/of de waarde van f vergroot. Willen we bij $r = 0$, de beeldpunten B1 en B2 dichter bij elkaar brengen zullen we dus de voorwerpsafstanden v_1 en v_2 zoveel mogelijk aan elkaar moeten gelijk maken en werken met spiegels met lange(re) brandpunten. Het belang van een kleine D -waarde zal in het volgende duidelijk blijken, waar zal aangetoond worden dat we dan over een ruimere mechanische speling beschikken bij het afstellen van onze opstelling.

Het ligt nu voor de hand ons af te vragen wanneer de beide beeldpunten echt samenvallen, of wanneer de waarde voor D gelijk wordt aan 0. We zullen dit berekenen in functie van de afstand r , omdat deze waarde in een opstelling het gemakkelijkst kan gewijzigd worden, door de lichtbron voor- of achteruit te verplaatsen. Werken we dit uit, vertrekkend van de vergelijking gegeven onder (8), dan vinden we:

$$\begin{aligned}
 D &= (2f^2x / ((f+r)^2 - x^2)) - 2x, \text{ of:} \\
 (2f^2x / ((f+r)^2 - x^2)) - 2x &= 0
 \end{aligned}$$

en werken we verder uit:

$$\begin{aligned}
 2f^2x / ((f+r)^2 - x^2) &= 2x, \text{ of} \\
 (f+r)^2 - x^2 &= 2f^2x / 2x \\
 (f+r)^2 &= f^2 + x^2 \\
 f + r &= \text{sqr}(x^2 + f^2), \text{ of}
 \end{aligned}$$

$$r = (\text{sqr}(x^2 + f^2)) - f$$

Met deze laatste formule hebben we het gevraagde; een nulwaarde voor D in functie van r. Indien dus r aan de hierboven beschreven voorwaarde voldoet dan moeten de beide beeldpunten B1 en B2 theoretisch samenvallen.

2. Rekenkundige benadering.

Gaan we dit na met enkele concrete waarden.

Doormeter M = 155 mm, f = 1250 mm, Bs = 10mm³,

Afstand m1 tot midden Bs = 10, dan is 2x = 10mm en x = 5mm.

Als B1 en B2 moeten samenvallen dan moet r moeten voldoen aan:

$$r = \text{sqr}(f^2 + x^2) - f, \text{ of}$$

$$r = \text{sqr}(1250^2 + 5^2) - 1250 = 0.01\text{mm.}$$

Bij r = 0.01 moet D = 0 zijn. Gaan we na:

$$D = (2f^2x / ((f+r)^2 - x^2)) - 2x, \text{ of}$$

$$D = (2 \cdot 1250^2 \cdot 5 / ((1250+0.01)^2 - 5^2)) - 2 \cdot 5 = 0 \text{ mm.}$$

We krijgen verder:

$$v1 = 2f + x + r \text{ of } 2 \cdot 1250 + 5 + 0.01 = 2505.01$$

$$v2 = 2f - x + r \text{ of } 2 \cdot 1250 - 5 + 0.01 = 2495.01$$

Via $1/f = 1/v + 1/b$ krijgen we:

$$b1 = (v1 \cdot f) / (v1 - f) \text{ of } (2505.01 \cdot 1250) / (2505.01 - 1250) = 2495.01$$

$$b2 = (v2 \cdot f) / (v2 - f) \text{ of } (2495.01 \cdot 1250) / (2495.01 - 1250) = 2505.01$$

Gaan we na waar in E de punten B1 en B2 liggen:

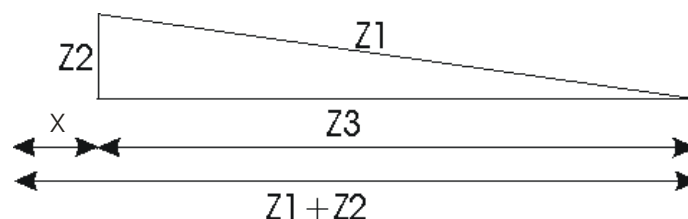
$$b2 - v1 = 2505.01 - 2505.01 = 0$$

$$b1 - v2 = 2495.01 - 2495.01 = 0$$

D is dan ook 0, zodat de B1 en B2 theoretisch exact samenvallen.

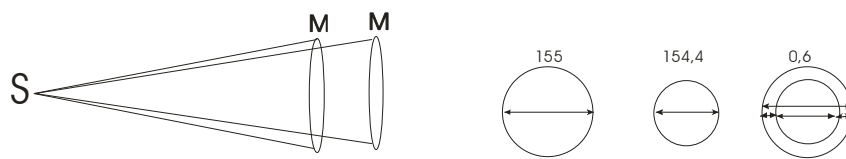
De basisgedachte achter dit type van radiale interferometer is heel eenvoudig.

Eenzijds: in de rechthoekige driehoek is $z1 + z2 > z3$ en $z1 + z2 - z3 = x$.



En anderzijds: is $v < k$, dan is $b > k$ en dan is $v - b = x$.

Samengevat: we beschreven en berekenden een type van radiale interferometer. Het is een interferometer omdat twee lichtwegen - wijzerzin en tegenwijzerzin - zich in E verenigen, en omdat deze beelden hier niet dezelfde grootte hebben. De lichtweg M, Bs, E is inderdaad korter dan de lichtweg M, m1, Bs, E. En toch vallen, met de gegeven waarden, theoretisch, de beide beeldpunten samen.



3. Drie verschillende situaties

Gaan we hieronder na wat de gevolgen zouden zijn bij waarden die een beetje verschillen van de theoretisch berekende waarden. M.a.w.: vragen we ons af of onze opstelling wel praktisch te verwezenlijken is. Stel b.v. dat we een fout van één millimeter maken. We berekenen onze opstelling wanneer de afstanden 1 millimeter te kort zijn, en vergelijken dit met de afstanden die exact volgens de theorie zijn, en tenslotte wanneer ze 1 millimeter te lang zijn. Om de voorwerps- en beeldafstanden niet door elkaar te laten lopen vervangen we in de tekening hieronder de holle spiegel door een lens.

Situatie 1: de afstanden zijn 1 millimeter te kort.

$$v1 = 2 * f + x + r - 1$$

$$v2 = 2 * f - x + r - 1$$

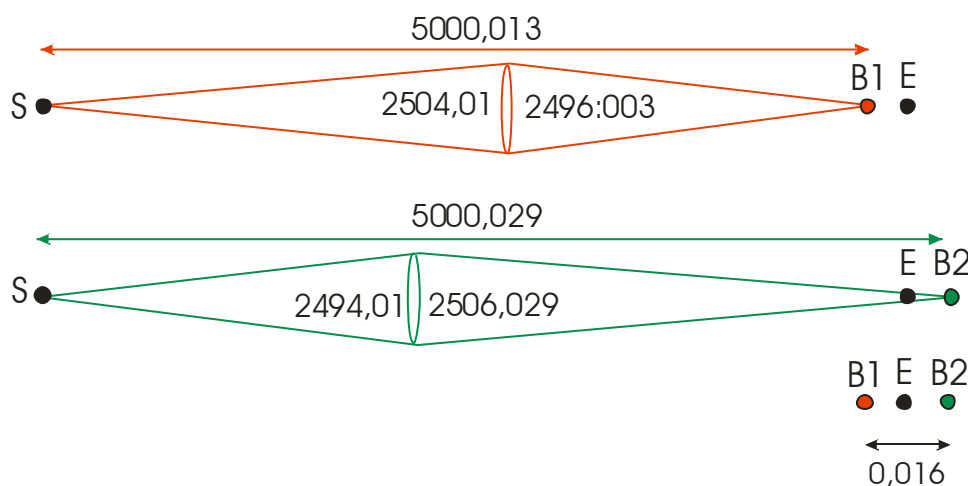
$$v1 = 2504,01 \quad b1 = (2504,01 * 1250) / (2504,01 - 1250) = 2496,003$$

$$v2 = 2494,01 \quad b2 = (2194,01 * 1250) / (2494,01 - 1250) = 2506,019$$

$$v1 + b1 = 2504,01 + 2496,003 = 5000,013$$

$$v2 + b2 = 2494,01 + 2506,019 = 5000,029$$

$$5000,029 - 5000,013 = 0,016$$



Omdat $b1 = 2496,003$, maar $v2 = 2494,01$, valt B1 op $v2 - b1$ of $2494,01 - 2496,003 = -1,993$ voorbij E

Omdat $b2 = 2506,019$, maar $v1 = 2504,01$, valt B2 op $v1 - b2$ of $2504,01 - 2506,019 = -2,009$ voorbij E

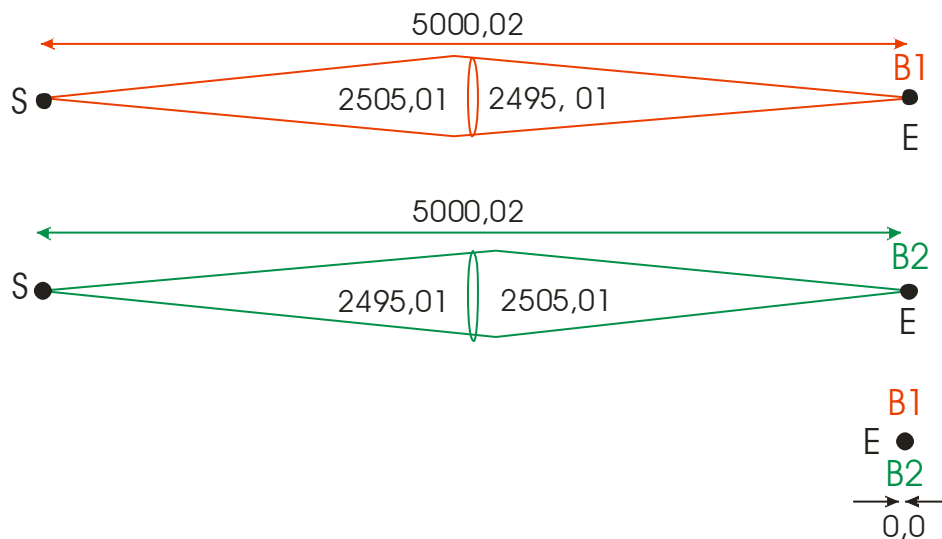
B2 ligt dus **verder** van E dan B1,
hun onderling verschil bedraagt: $B2-B1 = 2.009 - 1.993 = + 0.016,$

Situatie 2: de afstanden zijn aan elkaar gelijk.

$$\begin{aligned} v1 &= 2 * f + x + r \\ v2 &= 2 * f - x + r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v1 = 2505,01 & \quad b1 = (2505,01 * 1250) / (2505,01 - 1250) = 2495,01 \\ v2 = 2495,01 & \quad b2 = (2495,01 * 1250) / (2495,01 - 1250) = 2505,01 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v1 + b1 &= 2505,01 + 2495,01 = 5000,02 \\ v2 + b2 &= 2495,01 + 2505,01 = 5000,02 \\ 5000,02 - 5000,02 &= 0,0 \end{aligned}$$



Omdat $b1 = 2495,01$, en $v2 = 2495,01$,
valt B1 op $v2-b1$ of $2495,01-2495,01 = 0$ valt B1 in E

Omdat $b2 = 2505,01$, en $v1 = 2505,01$,
valt B2 op $v1-b2$ of $2505,01-2505,01 = 0$ valt B2 in E

B2 en B1 vallen dus **samen**,
hun onderling verschil bedraagt $B2-B1 = 0$

Situatie 3: de afstanden zijn 1 millimeter te lang.

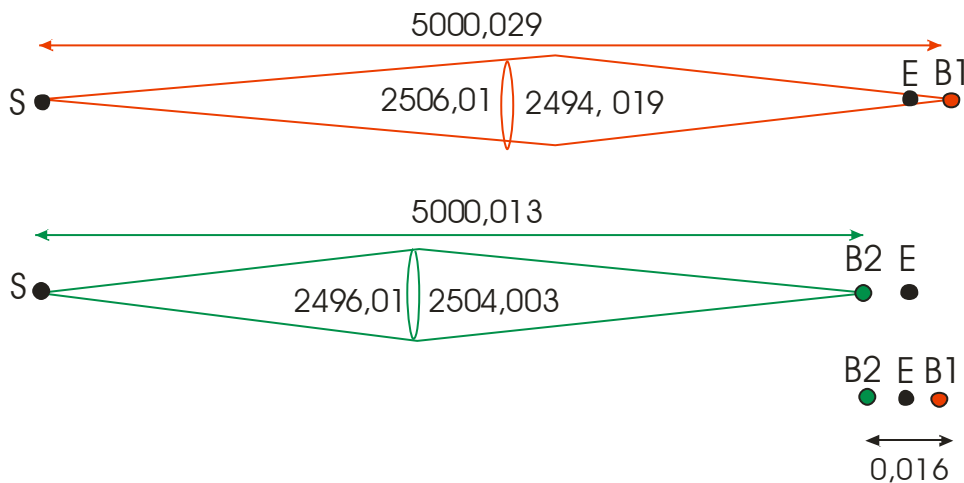
$$\begin{aligned} v1 &= 2 * f + x + r + 1 \\ v2 &= 2 * f - x + r + 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v1 = 2506,01 & \quad b1 = (2506,01 * 1250) / (2506,01 - 1250) = 2494,019 \\ v2 = 2496,01 & \quad b2 = (2496,01 * 1250) / (2496,01 - 1250) = 2504,003 \end{aligned}$$

$$v1 + b1 = 2506,01 + 2494,019 = 5000,029$$

$$v_2 + b_2 = 2496,01 + 2504,003 = 5000,013$$

$$5000,029 - 5000,013 = -0,016$$



Omdat $b_1 = 2494,019$, maar $v_2 = 2496,01$, valt B1 op $v_2 - b_1$ of $2496,01 - 2494,019 = 1,991$ voor E

Omdat $b_2 = 2504,003$, maar $v_1 = 2506,01$, valt B2 op $v_1 - b_2$ of $2506,01 - 2504,003 = 2,007$ voor E

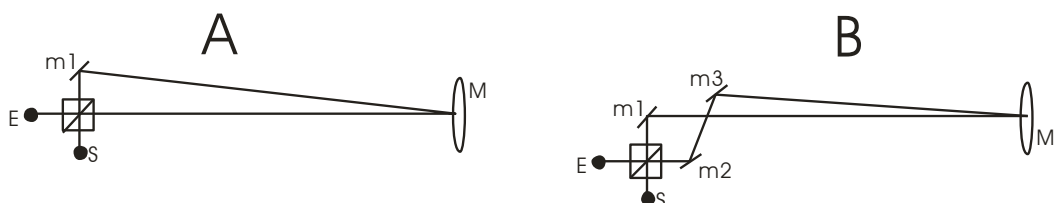
B2 ligt dus **verder** van E dan B1, hun onderling verschil bedraagt $B_2 - B_1 = 1,991 - 2,007 = -0,016$,

Veralgemeen we: In de basisopstelling kunnen variabelen zo gekozen worden dat t.o.v. de spiegel M, B2 uitzonderlijk dicht na B1 komt (1), dat beiden samenvallen (2), of dat B2 uitzonderlijk dicht voor B1 komt (3). M.a.w.: we hebben theoretisch een middel om 2 beeldpunten ongelooflijk dicht bij elkaar te brengen of zelfs exact te laten samenvallen.

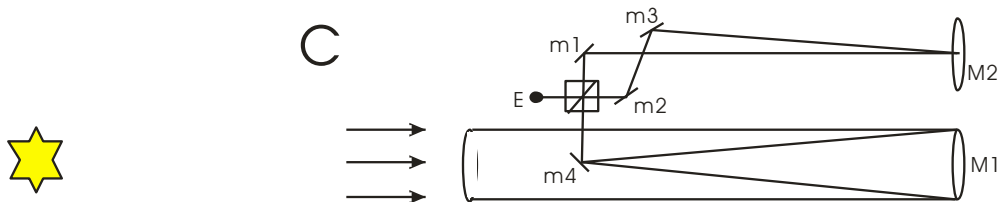
De beide beeldpunten kunnen zo zelfs heel wat dichter bij elkaar gebracht worden dan in het klassieke tweespleten-experiment van Young voor mogelijk gehouden wordt.

We zullen vaststellen dat dit gegeven de deur opent voor het doen ontstaan van zeer brede interferentielijnen.

En nog dit: In de afbeelding hieronder zien we onder A de basisopstelling schematisch weergegeven: de radiale interferometer. Onder B zien we opnieuw de basisopstelling, maar nu met gelijke lichtweg, zodat de radialiteit streeft naar 0. Zo werd het mogelijke om een destructieve interferentie te bereiken.



Men kan zich afvragen of er nog andere toepassingen denkbaar zijn. Zo hebben we onder C de opstelling B gekoppeld aan een newtonkijker. De vraag rijst of hiermee ook destructieve interferentie kan verkregen worden van het beeld dat in de kijker opgevangen wordt. Dan bevinden we ons echter op het professionele niveau dat veel verder reikt dan wat voor een amateur mogelijk is.



4. Aan de slag

Enkele praktische opmerking vooraf.

Een hele kamer.

Hou er rekening mee dat een opstelling een hele kamer vereist, die we bovendien kunnen verduisteren.

De puntlichtbron.

We gebruikten voor S een puntlichtbron met een doormeter van 0,3 mm. We monteerden het ene eind van een glasvezelkabel in een stukje van een plastic elektriciteitsbuis dat we afsloten met een metalen plaatje (b.v. van een frisdrankbusje) en prikten er met een acupunctuurnaald van 0,3 mm een gaatje in. Daarna zorgvuldig alle braam wegschuren en controleren met een microscoop. Het andere einde van de glasvezel werd op enige afstand (+/- 200 mm van een lamp (+/- 50 Watt) gehouden. Dit om de plastic houder van de vezel niet te verbranden. We gebruikten geen ventilator omdat die storende luchturbulenties veroorzaakt. En om diezelfde reden stond de lamp niet in de lichtweg. Verder voorzien we de lamp in de buurt van E van een dimmer zodat we de lichtintensiteit kunnen versterken of verzwakken. We maakten de lichtbron verder lichtdicht om de kamer duister te houden.

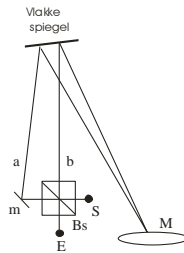
Een laser

Het uitlijnen van elke opstelling gebeurt met een laser. Deze moet krachtig genoeg zijn omdat in sommige opstellingen de lichtweg wel 15 meter bedraagt. Hoe langer de lichtweg, hoe breder en zwakker de laservlek wordt en hoe moeilijker de afstelling. We plaatsen de laser achter E, zodat het laserlicht bij het kijken vanuit E, op ons achterhoofd schijnt. We vermijden angstvallig alle laserlicht in het oog. Ja met een schakelaar bij de hand zetten we, alvorens te in de opstelling te kijken, de laser uit.

Een extra vlakke spiegel.

We willen nagaan wat er te zien zal zijn van onze hand wanneer ze in een dergelijke opstelling net voor M geplaatst wordt. Met een f-waarde van +/- 1250 mm en een k- waarde van +/- 2500 mm. lukt dit uiteraard niet. Om bij het bekijken van de hand niet telkens afhankelijk te zijn van derden, plaatsen we halverwege de lichtweg een extra vlakke spiegel

(doormeter +/- 100 mm) zodat kijkend vanuit E, de waarnemer de hand nog voor M kan houden en zelf kan nagaan wat er zich toont.



De hoofdspiegel

We gebruikten een zelf geslepen spiegel met een doormeter van 155 mm, zowat de standaardwaarde voor wie een cursus spiegelslijpen volgt bij de een of andere populaire sterrenwacht met het oog op het bouwen van een Newtonkijker.

Enkele spiegelstukjes

En verder zullen we nog enkele spiegelstukjes nodig hebben met de spiegelende laag aan de bovenzijde, dit om fouten te vermijden die zouden kunnen ontstaan doordat het licht anders door het glas moet gaan. Hun grootte hangt af van hun plaats in de opstelling. Staan ze dicht bij Bs dan is 15*15 mm voldoende. Zelf hadden nog enkele spiegelstukjes nodig van 15*100 mm. Dat wordt nog toegelicht.

Een drietal grotere hulp spiegels (H1, H2 en H3)

Deze gewone spiegels zullen ons helpen bij het uitlijnen van moeilijkere opstellingen. We gebruikten spiegels van ongeveer 100 mm * 900 mm, met de spiegelende laag op de achterzijde. Ze zijn bevestigd op een balk die niet iets langer is. We haalden ze uit oude spiegelkastjes die men b.v. boven wastafels plaatst of op deuren van kleerkasten. Ofschoon niet echt 'vlak' volgens hoogwaardige optische normen, toch voldoen ze meestal voor ons doel.

4.1. De basisopstelling

Het schema van de basisopstelling werd onder 1. *De algebraïsche benadering*, reeds toegelicht. Ook werd het gebruik van een extra vlakke spiegel reeds vermeld.

Omdat alle onderdelen hier in hetzelfde 'vlak' liggen, is deze opstelling relatief gemakkelijk te bouwen en af te stellen met een laser. Het maakt bij deze opstelling b.v. niet uit of de lichtweg Bs-m evenwijdig is met de optische bank of niet. Worden b.v. twee splitters of meerdere kleine spiegelstukjes gebruikt, dan wordt, zoals we nog zullen zien, het afstellen heel wat moeilijker.

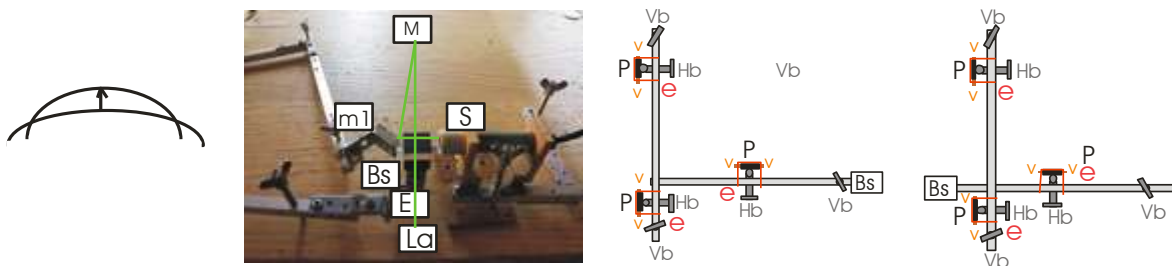
Wie deze basisopstelling bouwt, merkt vrij vlug een aantal interferentielijnen of concentrische cirkels. Men kan experimenteren door het wegverschil tussen de beide lichtwegen (s-Bs-m-M en s-Bs-M) te vergroten of te verkleinen. Verstoringen, vervormingen van de interferentielijnen door b.v. een brandende kaars, een brandende sigaret of de hand in de lichtweg te brengen, worden waarneembaar wanneer het wegverschil zo klein mogelijk gehouden wordt, d.i. wanneer m en Bs erg dicht bij elkaar staan en de afstand tot M nauwgezet voldoet aan de berekening. Zelf maakten we hierbij telkens gebruik van de Foucault-knife-test. Echter met dit verschil dat het mes in E een vaste positie innam, en we de afstand tot M en m nauwgezet konden wijzigen. De afstand van m tot Bs wijzigen gaat met de stelschroeven. De

afstand van M tot E wijzigen is iets moeilijker. We plaatsten M op een wagentje met 4 wielen en verbonden dit met een langere balk die onder de optische bank doorging tot hij binnen handbereik was van de waarnemer in E. Om het doorbuigen van de balk tegen te gaan werd er een metalen balk van +/- 15 mm dik tegen geplaatst. In het andere uiteinde van de balk (bij E) werd een Hb en een Vb geplaatst, samen met een bout die de spiegel M wat dichterbij of verder van E kan verschuiven.



Merken we nog op dat een radiale interferometer twee gelijkaardig verstoorde golven, die enigszins in grootte verschillen, bij elkaar brengt. Trachten we dit te verduidelijken met onderstaande tekening links. Daar waar beide golven elkaar 'snijden' mengen ze zich en treden er kleurverschillen op die het oog kan waarnemen.

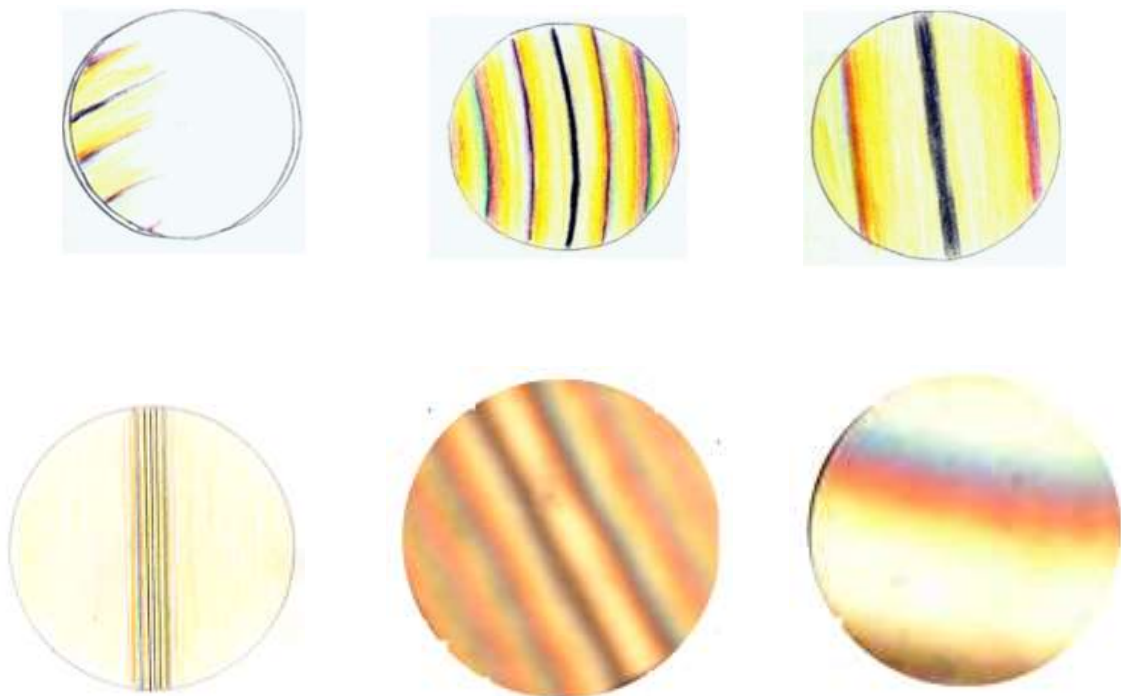
Letten we op de foto (de tweede afbeelding hieronder) die een schematisch een deel van de basisopstelling weergeeft. Met eenvoudige hoekijzertjes kunnen m1 en Bs ruwweg volgens de vereiste assen bewogen worden: het spiegeltje m1 volgens de x- en y-as, Bs volgens de x-, y- en z-as. Met de aluminium staven (doormeter: 10 mm²) kan dan telkens voor de vereiste onderdelen de fijnere afstelling gebeuren. De groene lijn op de foto is later aangebracht en wil de weg van het laserlicht aangegeven. M bevindt zich evenwel buiten de foto gezien de grote f-waarde ervan.



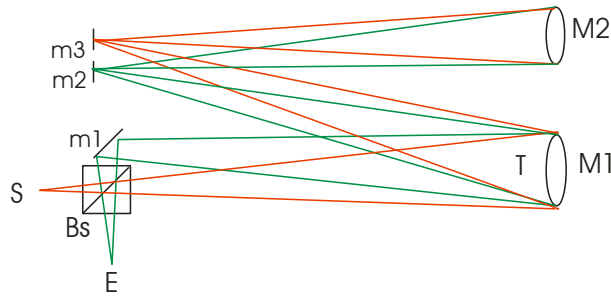
De derde afbeelding rechtsboven geeft b.v. Bs weer in een aangepaste houder. Beide 'hefbomen' zijn van aluminium, hebben een doormeter van 10 mm² en zijn ongeveer 400 mm lang, 'Hb' staat voor 'Horizontale bout', 'Vb' staat voor 'verticale bout'. Deze bouten zijn bovenaan voorzien van een vleugelmoer en werden conisch uitgeboord. In de hierdoor ontstane opening werd een kogeltje gekleefd om de wrijving tussen de bout en de optische bank bij het draaien van de bout tot een minimum te beperken. De letter 'P' staat voor een opstaand vast plankje waartegen de bout zich bij het aandraaien kan afzetten. De letter 'e' staat voor een rekkertje dat de bout tegen het plankje drukt, de letter 'v' staat telkens voor een klein vijsje waaraan het rekkertje kan bevestigd worden. Men ziet dat door een samenspel van de 6 bouten, Bs volgens zijn 3 assen, maar ook wat naar links, rechts, boven, onder, vooruit of achteruit kan bewogen worden. Het zijn allemaal bewegingen die we zullen nodig hebben.

De vierde afbeelding geeft een variante van een Bs-houder weer. De Bs staat hierin meer centraal. Men kiest bij elke opstelling uiteraard de meest haalbare variant. Ook elk klein spiegelkje dat deel uitmaakt van een opstelling moet eveneens in een dergelijke houder geplaatst worden.

Heeft een opstelling slechts weinig onderdelen, zoals de basisopstelling, dan is zo'n opstelling relatief gemakkelijk te bouwen. Vereist een opstelling echter verschillende onderdelen, dan is de optisch bank gevuld met vele aluminium staven die elkaar dikwijls in de weg lijken te staan. Dan vereist het enige vindingrijkheid om alles gebruiksvriendelijk te schikken. Herinneren we eraan dat we de belangrijkste stelschroeven willen bedienen vanuit E. Dit betekent dat ze zich binnen armlengte moeten bevinden. Opstellingen met meer dan 1 Bs of m vereisen bovendien extra vlakke hulp spiegels. Bij het uitlijnen moeten alle laserstralen nauwgezet in één vlak liggen. We komen er zo dadelijk nog op terug.

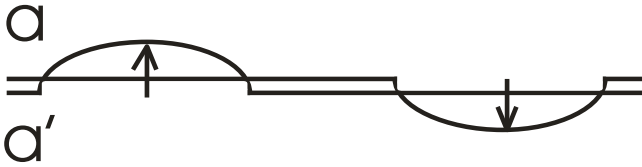


Een variante op deze opstelling (en om enkele volgende opstellingen) is om het licht nog een tweede keer de verstoring 'T', 'T' van 'turbulentie', hier meestal onze hand, te laten doorlopen. De tekening hieronder toont wel een grote parallax maar in de praktijk speelt dit niet zo'n grote rol. De spiegel M1 staat op 2500 mm van Bs en m2 en m3 staan net naast m1. De tekening is dus helemaal niet in verhouding. Wij ondervonden dat de beeldkwaliteit hierdoor minder goed werd. Het licht doorloopt hier inderdaad een afstand van 15 meter. In principe kan dat geen probleem zijn. We hebben onze spiegels reeds 25 jaar in gebruik en ze zijn nooit opnieuw opgedampt. Wellicht speelt dat ook wel een rol.



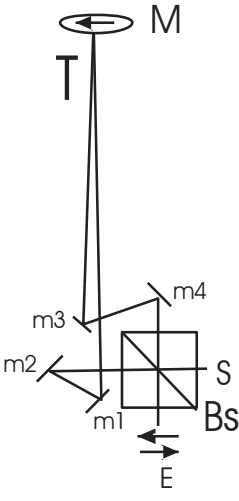
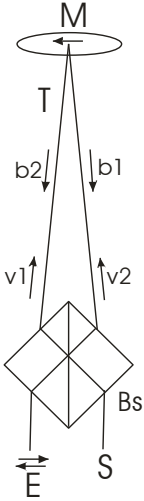
4.2. Een omkeer of 'reversal' interferometer

Zoals reeds werd aangehaald, wordt in een reversal interferometer de ene helft van het beeld met het spiegelbeeld van de andere helft samengebracht. Gaan we met de hand niet voorbij de middellijn van de spiegel dan interfereert een verstoorde golf met een niet verstoorde. Hun onderlinge verschil, telkens aangegeven met de pijl hieronder, is veel groter dan bij een radiale interferometer. We zien dan ook een veel intensere kleurverschuiving. De tekening hiervan in de eerste tekst bevestigt dit inderdaad: we zien dat de verdamping / verwarming van hand twee interferentielijnen omhoog brengt.

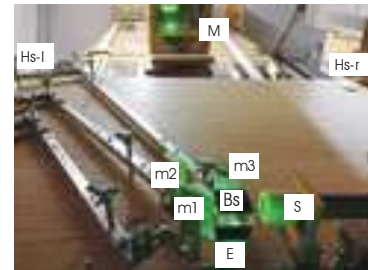
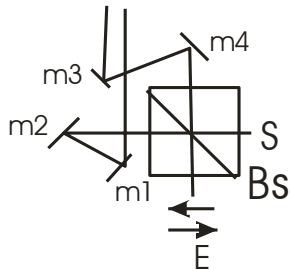


De opstelling in de afbeelding hieronder links toont ons een reversal met één Bs, zoals die in de literatuur beschreven staat. Het lukte ons niet om hiermee een brede interferentie te genereren. De lichtbundels vallen al te schuin op Bs, wat de IFW fel bemoeilijkt.

Dus omzeilden we dit probleem met de opstelling zoals weergegeven in de afbeelding in het midden. Om de onderscheiden lichtwegen zoveel mogelijk aan elkaar gelijk te maken, gebruikten we een kaartje (afbeelding rechts) waarbij de beide lichtwegen nauwgezet, tot op minder dan 1 mm wegverschil, bijna even lang konden worden gemaakt. Spiegeltjes m1 tot m4 konden zo, weer via de vaste foucault test - zeer precies op de juiste plaats gezet worden.



De foto hieronder toont links een detail van de opstelling. Letten we bij de foto in het midden op m4. We zien hierin het spiegelbeeld van de uitgetekende lijnen op het kartonnetje. Als we het spiegeletje m4 zo afstellen dat we de uitgetekende lijn en haar spiegelbeeld in elkaars verlengde zien, dan weten we dat de afstelling al behoorlijk nauwkeurig is. Dit geldt uiteraard voor alle spiegeltes.

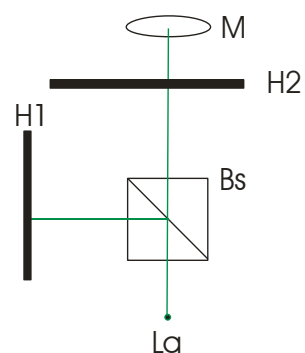
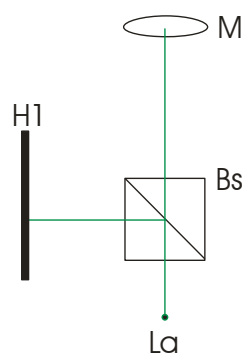
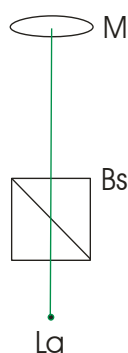


Omdat alle onderdelen nauwgezet in hetzelfde vlak moeten liggen, is deze opstelling heel wat moeilijker te bouwen. Het uitlijnen met een laser vereist een vooraf weloverwogen algoritme. Wijzelf deden het als volgt.

1. Afbeelding links. De laser wordt op de hoofdspiegel M gericht. We stellen M zo af dat het licht terug weerkaatst wordt naar de laser. De splitter Bs wordt in de lichtweg geplaatst en wel zo dat het eerder zwakke lichtstraaltje dat de voorzijde weerkaatst, exact terug samenvalt met de laser.

2. Afbeelding in het midden. H1, de eerste hulpspiegel wordt geplaatst. Hij is zo opgesteld dat hij volgens zijn twee assen kan bewegen en dat hij het licht dat van Bs komt, exact terug naar Bs weerkaatst.

3. Afbeelding rechts. H2, de tweede hulpspiegel wordt geplaatst. Hij kan volgens zijn twee assen kan bewegen en weerkaatst het licht dat van Bs komt, exact terug naar Bs weerkaatst. Deze spiegel zal nadat het afstellen is afgerond, weer worden verwijderd.

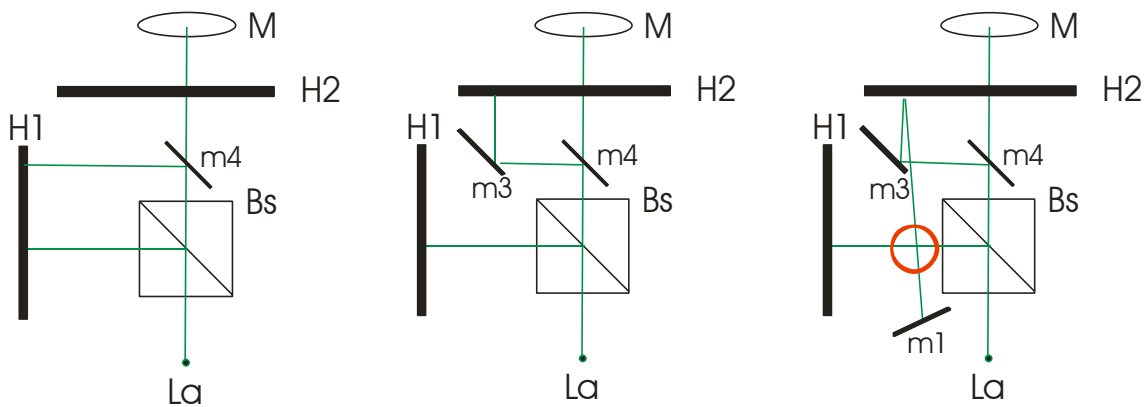


1. Afbeelding links. Het spiegeletje m4 wordt geplaatst en wel zo dat het licht naar H1 gaat en terug weerkaatst op m4.

2. Afbeelding in het midden. De kleine spiegel m3 wordt zo geplaatst dat het licht naar H2 gaat en terug naar H2 weerkaatst.

3. Afbeelding rechts. De kleine spiegel m1 wordt geplaatst. We draaien m3 een beetje zodat het weerkaatste licht op m1 valt. Letten we op de twee laserlijnen die elkaar kruisen in het rode cirkeltje. In bovenaanzicht lijken ze elkaar te snijden. Om hiervan zeker te zijn brengen we een stukje doorzicht glas of plastic even op die plaats in de lichtweg. We zien op dit doorzichtig

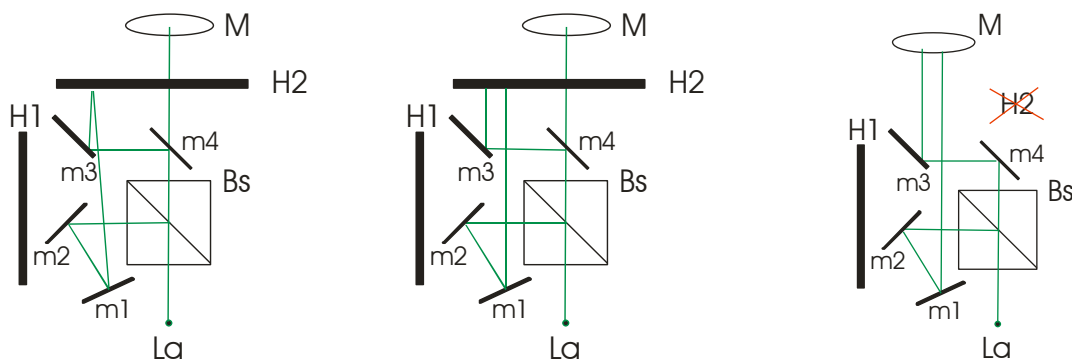
plaatje twee puntjes, van elke laserweg één. Het is de bedoeling dat die twee puntjes op de plaats van de kruising elkaar snijden, dat ze samenvallen. Is dat niet zo, dan moet m3, en alleen m3, nauwkeuriger gericht worden. Zo zijn we zeker dat alle laserlicht nog steeds in hetzelfde vlak ligt.



4. Afbeelding links. Het spiegeltje m2 wordt geplaatst en wel zo dat het licht vanuit Bs op m1 valt, juist op de plaats waar het laserlicht dan van H2 komt, ook reeds op m1 valt. Nu kan spiegeltje m1 worden afgesteld en wel zo dat het licht vanuit H2 via m1 op m2 valt, en het licht vanuit m2 via m1 op H2.

5. Afbeelding in het midden. De spiegeltjes m3 en m1 worden lichtjes getild zodat de laserstraal vanuit m3 naar H2, na weerkaatsing terug op m3 valt, en de straal vanuit m1, terug op m1.

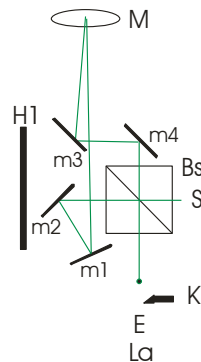
6. Afbeelding rechts. H2, de tweede hulpspiegel wordt verwijderd. De hoofdspiegel M wordt wat naar links verschoven zo dat de laserstralen vanuit m3 en m1 mooi naast het middelpunt van de spiegel M op deze spiegel vallen.



7. De spiegeltjes m3 en m1 worden een beetje getild zodat hun licht netjes in het midden van de spiegel M valt. Deze spiegel wordt zo afgesteld dat het licht vanuit m3 naar M, na weerkaatsing naar m1 gaat, en het licht van m1 naar M, na weerkaatsing naar m3.

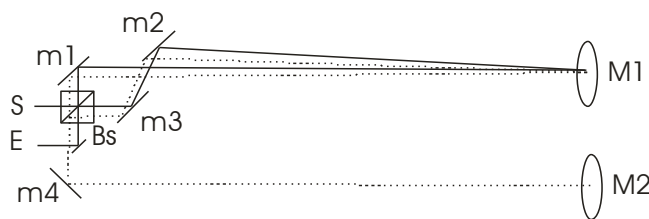
Eveneens wordt de puntlichtbron S (de glasvezel) geplaatst, zo dat het laserlicht vanuit Bs exact op het gaatje van 0,3 mm valt. S is uiteraard in een houder geplaatst zo dat ze nauwkeurig alle bewegingen volgens haar assen kan bewogen worden. Voorzien we bij E ook nog plaats voor 'K', van 'Knife', het mes van de foucault-test, een test die we bij het afstellen van de convergerende bundels wit licht zullen nodig hebben.

En zijn we niet verrast als we alles samen uiteindelijk wel een zestigtal bouten zullen aangedraaid hebben.



4.3. Een opstelling met meervoudige interferentie.

Wordt M1 lichtjes getild, en gebruiken we een tweede en even grote holle spiegel M2, dan kan het licht tweemaal de opstelling doorlopen en krijgen we een interferentie van twee interferenties. We zien in E dat hierbij verticale interferentielijnen zich mengen met schuine lijnen, wat een mooi en symmetrisch kleurenpatroon geeft.



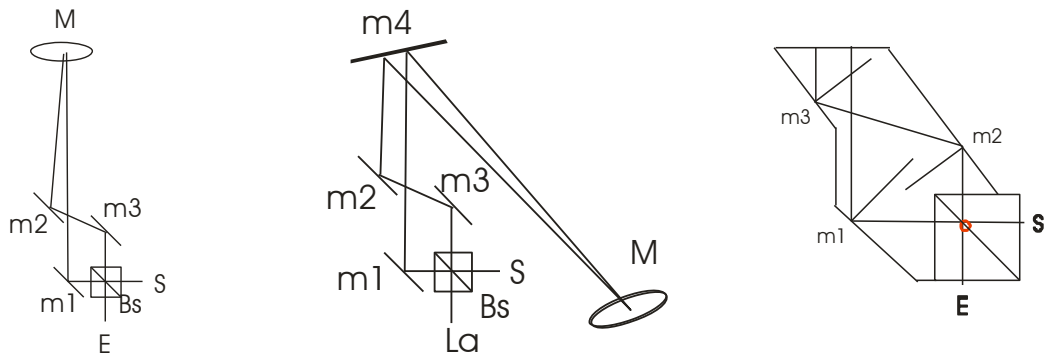
We laten het afstel-algoritme hier achterwege. Het is een variante op de vorige uitvoerig beschreven afstel-procedure.

Om deze interferentielijnen breder te krijgen moeten alle lichtbundels loodrecht op Bs vallen. Omdat de hoofdspiegels M echter lichtjes getild staat, is dit onmogelijk: de gestippelde lichtwegen vallen schuin op Bs. We zien op de splitter Bs inderdaad twee laserpuntjes: het ene vlekje van het licht dat naar M1 gaat, en links ernaast het iets zwakkere lichtpuntje van het vanuit M1 weerkaatste licht.

Deze opstelling is dus ongeschikt om zeer brede interferentielijnen of een IFW te genereren.

4.4. Nulling interferometrie

Zeggen we dat dit type interferometer een ‘limietversie’ van een radiale interferometer is, waarbij het wegverschil der beide deelbundels streeft naar nul. We bereiken dit door aan de basisopstelling de spiegels m2 en m3 toe te voegen.



De tekening in het midden toont ons weer hoe M vanuit E binnen handbereik blijft.

Tekening rechts toont een detail van de opstelling. We maakten weerom een bijzonder nauwkeurig schetsje in een tekenprogramma, dat we nadien hebben verkleind, afgeprint en uitgeknipt hebben en op een stukje karton hebben gekleefd. Dit is noodzakelijk om de spiegeltjes op de vereiste afstand en richting te zetten. Bij een uiterst nauwgezette afstelling bereiken we zo de destructieve interferentie en zien we de flauw lichtende band die de hand omgeeft.

Men ziet zo dat het afstelalgoritme - mutatis mutandis - analoog is aan de eerder beschreven afstelprocedure.

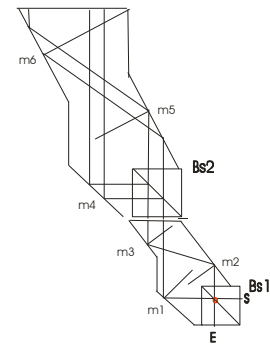
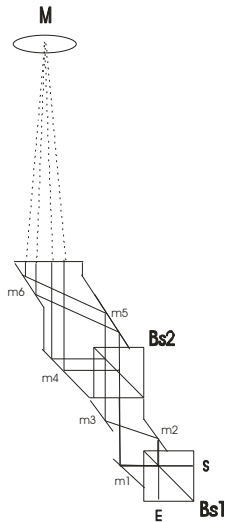
4.5. Meervoudige interferentie met 2 beamsplitters.

Zoals aangegeven in de tekst hierboven kan dit laatste experiment nog uitgebreid worden door het licht een tweede keer de opstelling te laten doorlopen. Enerzijds kan met behoud van één interferentie de vinger een tweede keer belicht worden, maar anderzijds kan dit door het licht een tweede interferentie te laten ondergaan. Een schets van zulk een opstelling zien we hieronder. Tenslotte is eveneens een opstelling denkbaar met een combinatie van beide vorige.

Praktisch zijn ze echter verre van eenvoudig. Na de omslachtige afstelling en uitlijning echter, die een ware beproeving zijn voor ons geduld, loont het de moeite. De beelden zijn prachtig, maar de opstelling is toch zo gevoelig. Zelfs het zacht aanraken van één der afstelschroeven leidt ertoe dat er zich een caleidoscopisch en wisselend kleurenpanorama toont, tot men, bijna met ingehouden adem toekijkt wanneer het beeld zich stabiliseert. Houdt men dan de hand voor de spiegel, ziet men een IFW, en vrij hevige kleurrijke turbulenties, of, zo men afstelt op de destructieve lijn, de lichtende band rond de hand.

De opstelling, hierboven vermeld als combinatie, hebben we niet gebouwd. Zoals reeds eerder vermeld, zitten we hier echt aan de grenzen voor wat een amateur bereiken kan.

Kijken we hieronder naar de opstelling, naar enig voorbereidend werk en naar een detail van de opstelling. .



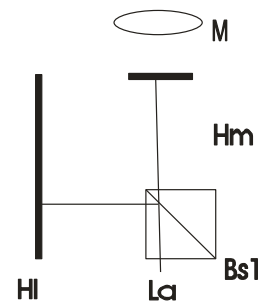
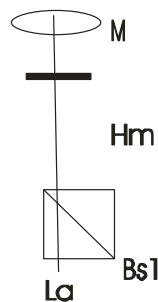
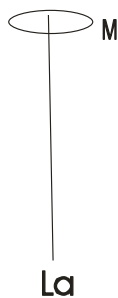
Omdat er met twee beamsplitters gewerkt wordt die nauwgezet in hetzelfde vlak moeten liggen, vereist deze opstelling een nog grotere precisie.

Zo stelden wij deze opstelling af.

Op de tekening hieronder links wordt de laser op de hoofdspiegel M gericht. De werkaatste stralen vallen terug in de laser.

Bij de tekening in het midden wordt Bs1 toegevoegd, en wordt de vlakke hulpspiegel M toegevoegd zodat het licht dat weerkaatst van M nu gehinderd wordt. Bs1 wordt nu zo afgesteld dat het licht dat op zijn voorzijde weerkaatst, eveneens terug naar La gaat. Dan wordt Hm zo afgesteld dat ook het licht dat hiervan weerkaatst, eveneens op La valt. Hm staat dan loodrecht op de laserstraal.

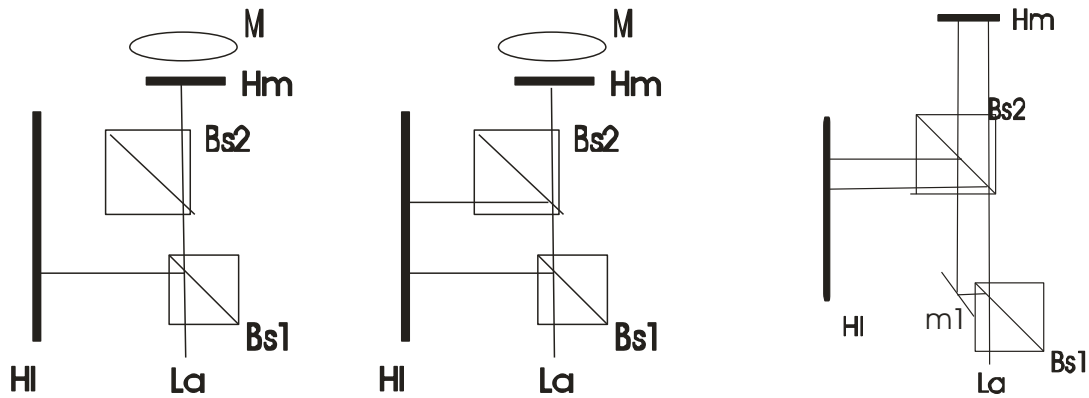
Aan de tekening rechts is H1, de hulpspiegel links toegevoegd. Deze staat wel 600 mm van Bs1 verwijderd. Ook deze spiegel moet het licht vanuit Bs terug naar Bs weerkaatsen.



Links onderaan wordt Bs2 toegevoegd en zo afgesteld dat het aan de voorzijde ervan weerkaatste licht terug in de laser valt.

In het midden wordt Bs2 zo afgesteld dat het licht dat van H1 weerkaatst terug op Bs2 valt, en wel exact daar waar de laserstraal vanuit Bs2 naar H1 vertrok. Dit zijn tijdrovende en lastige afstellingen.

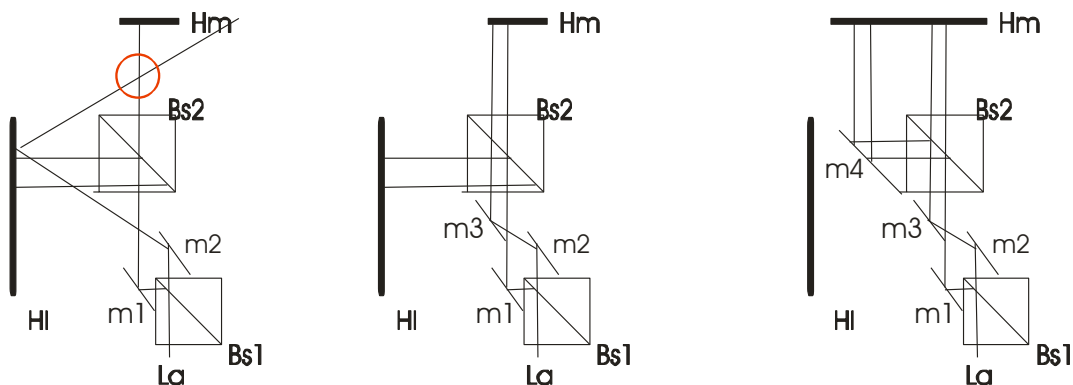
In de tekening rechts is m1 toegevoegd en afgesteld zodat het licht dat naar Hm en H1 gaat, terug op m1 valt.



In de tekening hieronder links is spiegel m2 toegevoegd. Deze staat niet op 45° omwille van de gelijke lichtweg der beide deelbundels. Spiegel m2 valt schuin in op HI die het licht ook schuin weerkaatst. Houden we nu het doorschijnend stukje plastic (of glas) op de plaats van het rode cirkeltje. De lichtbundel vanuit Bs1 naar Hm moet de lichtweg van m2 die weerkaatst op HI, snijden. We stellen m2 zo af dat zulks inderdaad bereikt wordt.

Vervolgens, in het midden, wordt m3 toegevoegd en zo afgesteld dat het licht ervan naar Hm, terug naar m3 weerkaatst.

Rechts wordt m4 toegevoegd, zo dat de stralen naar Hm weer op m4 weerkaatsen.

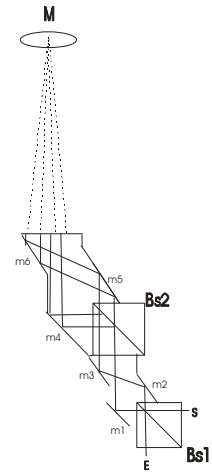
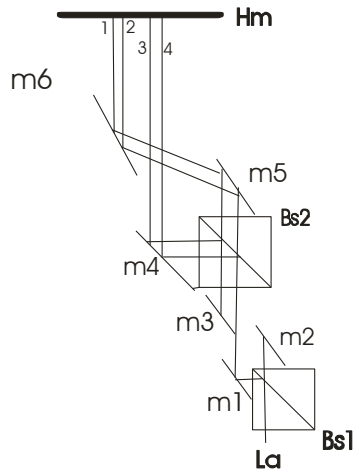
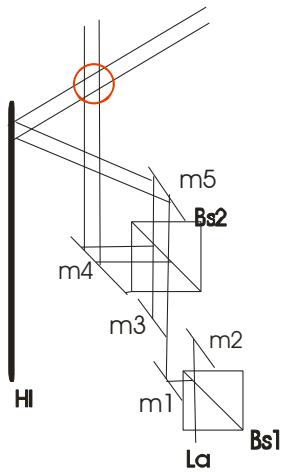


Links onderaan wordt m5 toegevoegd en zo afgesteld dat de laserstralen van m4 de weerkaatsing van het licht via m5- hl elkaar snijden.

In het midden wordt m6 toegevoegd en zo dat de weerkaatste stralen van Hm, weer op m6 vallen. Omwille van de divergentie die zich zal tonen bij het gebruik van wit licht, is m6 al veel langer dan b.v. m1. Bij onze experimenten was m6 reeds 80 mm lang.

Tenslotte wordt Hm weggenomen, wordt M zo geplaatst dat de bundels 1, 2, 3 en 4 op gelijke afstand van het midden van M vallen. De spiegel tjes m1 en m4 (en enkel deze) worden zachtjes zo gedraaid dat de bundels 1, 2, 3 en 4 exact in het midden van M vallen. Als de hele procedure exact is verlopen, weerkaatst 1 naar 4 en 2 naar 3 en zijn deze 4 lichtbundels allen even lang.

Uiteindelijk zullen ze ons een interferentie van twee interferenties tonen, waardoor deze opstelling uitzonderlijk gevoelig wordt voor turbulenties.



Tot zover deze summiere, meer praktische toelichting.

optische experimenten
van 2000 tot ...?