

## MEETTECHNIEKEN IN DE OPTIEK

J. G. de Bruin  
Philips' Natuurkundig Laboratorium Eindhoven

*Beschrijving in hoofdlijnen, van de gebruikelijke meetinstrumenten met hun toepassing in een optische slijperij, ingericht voor het vervaardigen van unica-komponenten en kleine series.*

### Inleiding

De hier beschreven meettechnieken worden gebruikt bij de vervaardiging en controle van optische componenten zoals lenzen, spiegels en prisma's.

De meeste meettechnieken in de optiek berusten op het meten met licht. Hierbij maken we gebruik van de volgende verschijnselen: interferentie; reflectie en refractie.

Alvorens verder in te gaan op de verschillende methodieken geven we eerst een overzicht van de toepassingen.

#### Interferentie:

- Voor het meten van pasfouten. Hiervoor is een controleglas (proefglas) nodig.
- Voor het controleren van de evenwijdigheid van twee oppervlakken.

#### Reflectie:

- Voor het controleren van de evenwijdigheid van twee of meer oppervlakken.
- Voor het meten van hoeken.
- Voor het meten van holle proefglazen.
- Voor het meten van holle spiegels op kromtestraal en regelmatigheid.

#### Refractie:

- Voor het meten van de brekingsindex.

Ook wordt gebruik gemaakt van speciale mechanische meetapparatuur. Deze apparatuur zal beschreven worden bij de onderwerpen waar ze toegepast worden.

### Interferentie

Licht in een golfverschijnsel. Zoals bekend geeft de som van twee lichtstralen die  $180^\circ$  in fase verschoven hun uitdoving, zodat in dit geval niets wordt waargenomen.

Het is bekend dat lichtstralen in glas gebroken en op het glas gedeeltelijk gereflecteerd worden – figuur 1 –.

Bij nadere beschouwing van figuur 1, waar de lichtstralen A en B voorkomen uit dezelfde lichtbron, zien we dat het deel a van de lichtstraal A dat aan de achterzijde reflekteert een langere weg moet afleggen om in punt C te komen dan de lichtstraal B. In punt C zal door het wegverschil van de lichtstralen A en B interferentie ontstaan.

Als nu aangenomen wordt dat de beide glasoppervlakken niet evenwijdig lopen – figuren 2 en 3 – dan heeft lichtstraal A op een andere plaats een kortere of langere weg af te leggen en komen hier ook de beide uiterste mogelijkheden van interferentie voor, namelijk  $180^\circ$  en  $0^\circ$  in fase verschoven.

Bij gebruik van monochromatisch licht zullen dan donkere en lichte banen waargenomen worden.

Wordt in deze situatie daglicht gebruikt, dan zal het patroon, dat zich elke keer herhaald, in kleur worden waargenomen.

De afstand tussen twee lijnen (van dezelfde kleur) noemt men een ring of streep.

Per streep is het hoogteverschil – of dikteverschil –:

$$\Delta = n \cdot \lambda / 2$$

$n$  = de brekingsindex en  $\lambda$  = de golflengte;

Omdat  $n$  voor lucht = 1 en  $\lambda$  0,6  $\mu\text{m}$  is  $\Delta$  voor daglicht  $\approx 1/3 \mu\text{m}$ .

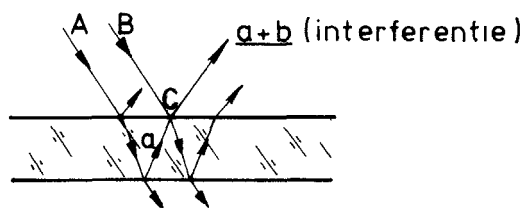
Dus door het aantal strepen wordt een hoogteverschil tussen de oplegpunten aangegeven – figuur 3 –.

Om nu sferisch gebogen vlakken – lenzen – en vlakke oppervlakten met interferentie te meten zijn proefglazen – pasmallen – nodig – figuren 2 en 3 –.

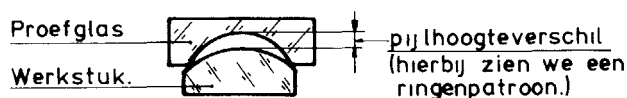
Het meten met proefglazen is enigszins te vergelijken met het meten met kalibers waarvan de instrumentmakers gebruik maken. Met proefglazen is echter de meetnauwkeurigheid groter.

De vlakke proefglazen worden meestal gekocht.

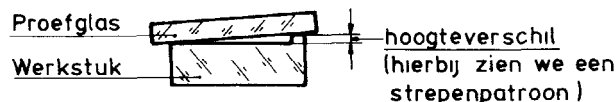
Weliswaar zijn de holle en bolle proefglazen, voor het meten van lenzen, ook te koop maar deze worden meestal door de optiekslijper zelf gemaakt. De vervaardiging hiervan wordt hier in het kort beschreven.



Figuur 1. Reflectie en doorlating bij een glazen plaat.



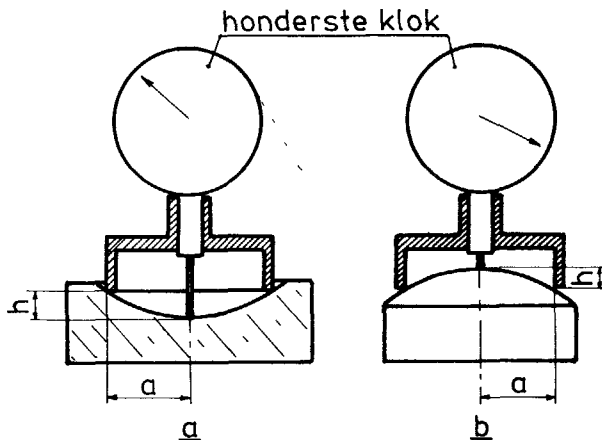
Figuur 2. Meting aan holle of bolle glazen.



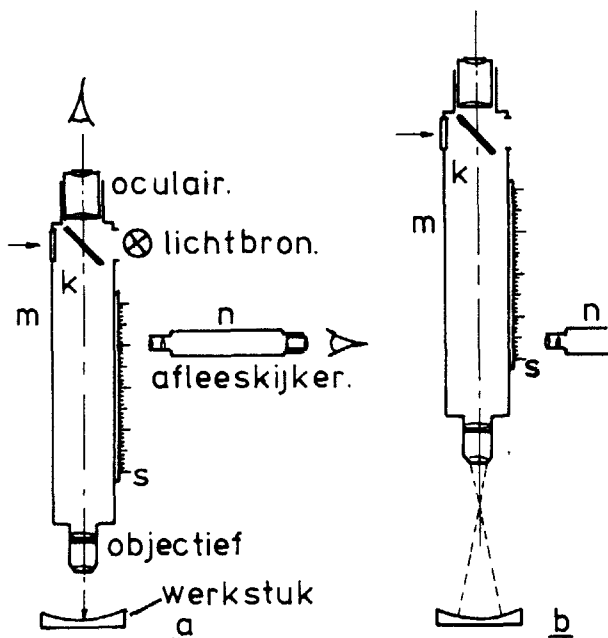
Figuur 3. Meting aan vlakke oppervlakken.



Opleiding afdeling 'Optiek', Leidse Instrumentmakers School.  
Foto H. van Zanten.



Figuur 4. Hand-ringsferometer



Figuur 5. Arnulf-sferometer.

Voor het slijpen van het holle en bolle proefglas wordt respectievelijk een bolle en holle slijpschaal, van staal of messing, gemaakt, waaraan ongeveer de kromming wordt gemaakt die de proefglazen moeten krijgen. Hierop worden de proefglazen, met losse slijpkorrels – SiC (silicium-carbide) of  $Al_2O_3$  (aluminium-oxyde) – gemengd in water, geslepen.

Van de geslepen proefglazen wordt nu de pijlhoogte  $h$  van een bolsegment gemeten – figuren 4a en 4b –. Met deze pijlhoogte  $h$  kan de straal  $R$  van de kromming berekend worden volgens:

$$R = \frac{1}{2}(a^2 + h)$$

$h$  = de pijlhoogte,  $a$  = de halve meetring-diameter en  $R$  = de straal van de kromming.

Na deze bewerking worden de proefglazen gepolijst. Het holle proefglas wordt in eerste instantie gemeten met een 'Arnulf-sferometer' – figuren 5a en 5b –.

Dit apparaat werkt in feite met reflectie, maar wordt hier toch behandeld omdat dit bij de vervaardiging van proefglazen wordt gebruikt.

De 'sferometer' – figuur 5a – wordt eerst scherp gesteld op het oppervlak van het proefglas, waarna met de kijker  $n$  de stand op de schaal  $S$  afgelezen wordt.

Daarna wordt de sferometer scherp gesteld op het kromte-midelpunt van het proefglas – figuur 5b – en wederom wordt met de kijker  $N$  de stand op de schaal  $S$  afgelezen.

Het verschil in de standen van de metingen geeft de maat van  $R$ . De meetnauwkeurigheid is ca. 0,1% van de gevraagde kromtestraal.

Als het holle proefglas redelijk goed is kan het bolle proefglas hierop pasgemaakt worden.

Wanneer het bolle proefglas op  $\approx 8$  ringen pas is, worden van beide proefglazen de krommingen nauwkeuriger gemeten op een optische ring-sferometer – figuur 6.

Het principe van deze meetmethode is gelijk aan die van de handring-sferometer – figuur 4 – alleen de meetnauwkeurigheid is groter; ca. 0,0005 mm.

Uit deze meting kan bepaald worden hoeveel interferentieringen het holle en het bolle proefglas van de gevraagde kromming afwijken.

De proefglazen worden hierna tot vlak bij de gevraagde kromming gepolijst; op  $\pm \frac{1}{2}$  ring.

Wederom worden nu beide proefglazen gemeten op de optische ring-sferometer.

Daarna worden ze door polijsten zodanig op de gevraagde kromming gebracht dat ze precies op elkaar passen – witpassing.

Dat wil zeggen dat de pasfout kleiner is dan  $1/20$  ring (vergelijk met 3 ringen  $\approx 1 \mu m$  pijlhoogteverschil).

Ook bij het meten van vlakke, evenwijdige oppervlakten wordt gebruik gemaakt van het verschijnsel interferentie.

Hiervoor gebruikt men een 'Interferoskoop' – figuur 7.

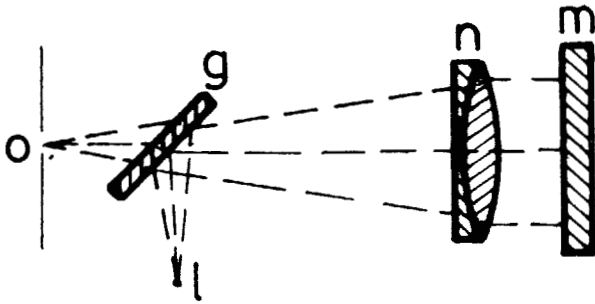
Deze apparaten werken met monochromatisch licht, dat is licht van één golflengte.

Als het te meten werkstuk goed evenwijdig is – figuur 8a – dan zal in het waarnemingspunt 0 – figuur 7 –, van de interferoskoop een egaal verlicht vlak worden waargenomen.

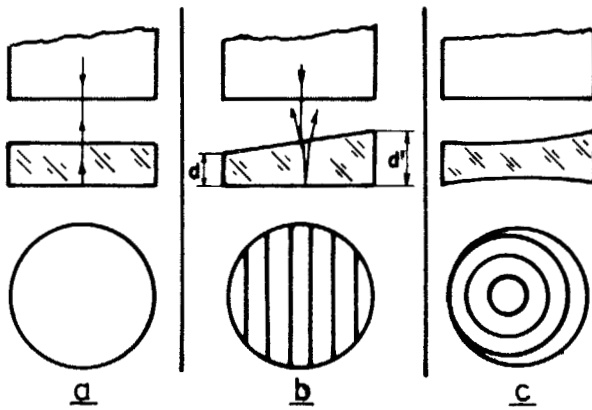
Terwijl als de vlakken van het te meten werkstuk niet evenwijdig zijn, er lichte en donkere strepen worden waargenomen – zie figuur 8b. Bij onvlakke niet evenwijdige oppervlakten krijgt men een aantal niet symmetrische ringen te zien – figuur 8c.

Het verschil tussen  $d$  en  $d'$  uit figuur 8b kan berekend worden. Per streep is dat:

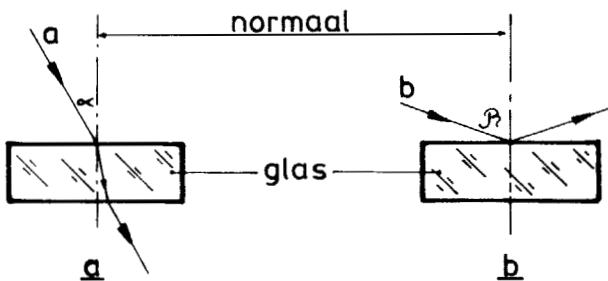
$$n \cdot \lambda / 2$$



Figuur 7. Interferoskoop; o is het waarnemingspunt, l de lichtbron, g een halfdoorlatende spiegel, n het objectief en m het te meten werkstuk.



Figuur 8. Beeldvormen die verschillende oppervlakken in de interferoskoop geven. In het midden het werkstuk, daarboven de interferoskoop.



Figuur 9. a. Lichtdoorlating en b: Lichtreflectie.

**Reflectie**

Reflectie is het terugkaatsen van licht op een – glas – oppervlak. Hierbij is de hoek van inval gelijk aan de hoek van de reflectie. Ook met dit verschijnsel kan de evenwijdigheid van twee vlakke oppervlakken gemeten worden.

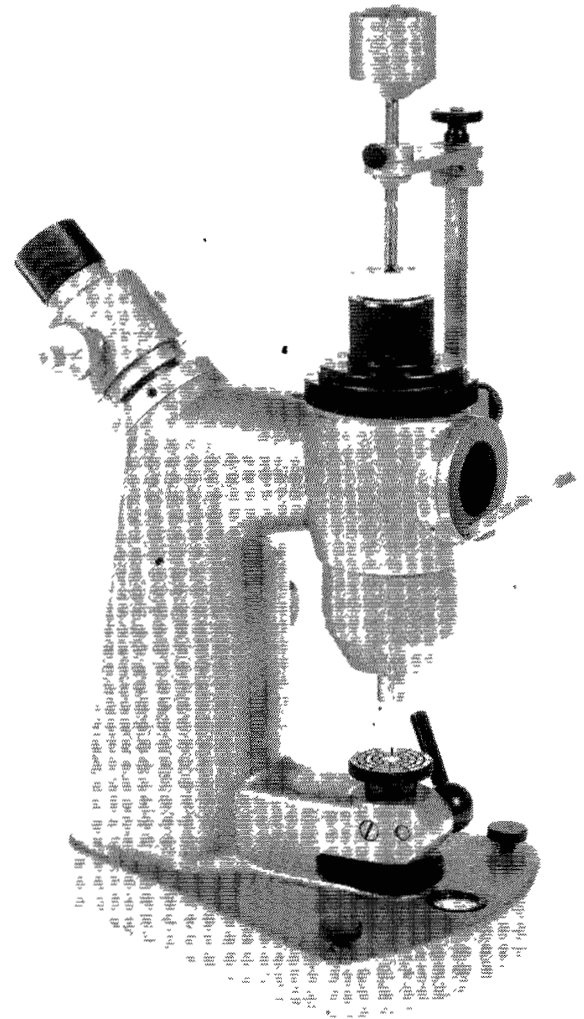
Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een 'autocollimator' – figuur 10.

Met dit apparaat wordt door middel van een lichtbundel een kruisdraad op de oppervlakken afgebeeld waar ze worden gereflecteerd. Er wordt twee keer gereflecteerd en wel aan beide oppervlakken.

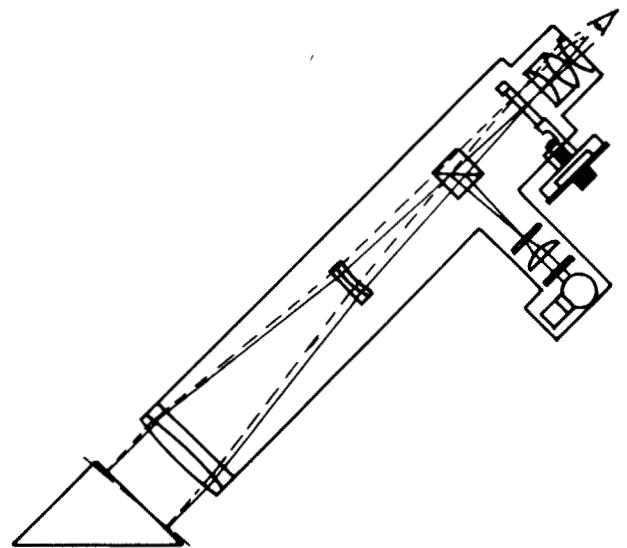
Er ontstaan dus twee reflectiebeelden. De gereflecteerde beelden worden dan in de autocollimator waargenomen. Als de waargenomen beelden elkaar dekken zijn de gemeten oppervlakken evenwijdig.

De meetnauwkeurigheid van een autocollimator is afhankelijk van het gebruikte instrument en ligt tussen de dertig en één boogseconden.

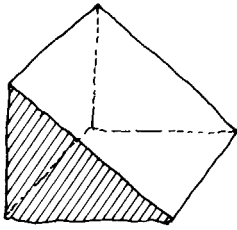
Bij het meten van hoeken aan prisma's wordt ook gebruik gemaakt van de autocollimator.



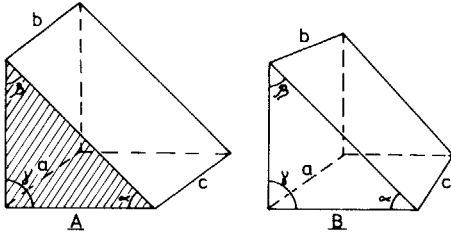
Figuur 6. Optische ringsferometer.



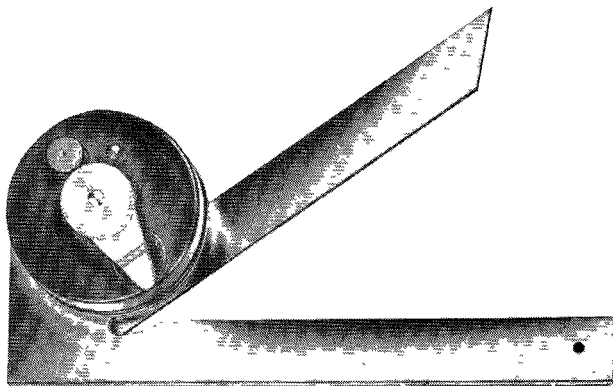
Figuur 10. Autocollimator.



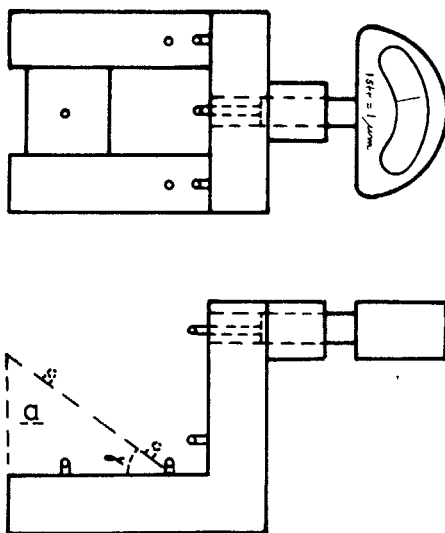
Figuur 11. Voorgezaagd prisma.



Figuur 12. A: Prismahoeken en B: Prisma met piramidale fout.



Figuur 13. Optische zwaaihaak.



Figuur 14. Hoekmeetbankje. Tolerantie van de meetklok is 0,001 mm.

Alvorens hier verder op in te gaan zullen we het vervaardigen van een prisma in het kort beschrijven.

Men gaat uit van een stuk glas dat ruw in de vorm gezaagd is – figuur 11. Hieraan wordt eerst één vlak goed vlak geslepen – het gearceerde vlak in de figuren 11 en 12a.

Dit vlak wordt het standvlak genoemd. Vanuit dit standvlak kunnen dan de andere vlakken geslepen en gemeten worden.

In een prisma kunnen twee soorten hoekfouten optreden; namelijk:

- de hoekfouten van de hoeken,  $\alpha$ ,  $\beta$  en  $\gamma$  – zie figuur 12a
- de piramidale fouten, dit wil zeggen dat de ribben a, b en c niet evenwijdig lopen – zie figuur 12b.

Om te voorkomen dat piramidale fouten optreden worden de prismavlakken ten opzichte van het standvlak haaks geslepen.

Voor het meten van de hoeken tijdens de slijpbewerkingen wordt gebruik gemaakt van de volgende meetinstrumenten:

- a) een winkelhaak
- b) een optische zwaaihaak – zie figuur 13
- c) een hoekmeetbankje – zie figuur 14

Een optische zwaaihaak is in principe een normale zwaaihaak. Alleen de hoekinstelling is nauwkeuriger af te lezen door middel van een ingebouwde gradenverdeling met loupe.

Het meten met een hoekmeetbank berust in feite op het vergelijken van het te meten object met een prisma waarvan de hoeken nauwkeurig bekend zijn. Met dit 'referentie'-prisma wordt het hoekmeetbankje ingesteld.

Door het tussenplaatsen van wiggen – zie a figuur 14 – kunnen verschillende hoeken gemeten worden.

Voor het meten van de haaksheid van de prismavlakken ten opzichte van het standvlak wordt gebruik gemaakt van een winkelhaak en/of het hoekmeetbankje. Terwijl voor het meten van de hoeken gevormd door de prismavlakken wordt gebruik gemaakt van de optische-zwaaihaak en/of het hoekmeetbankje.

Nadat het prisma op maat is geslepen kan worden begonnen aan het polijsten van de prismavlakken.

Voor het meten van de hoeken tijdens het polijsten wordt geen gebruik meer gemaakt van de hiervoor beschreven instrumenten. De kans bestaat dat hiermee het gepolijste oppervlak beschadigd wordt. Bovendien zou bij gebruik van deze instrumenten de meetnauwkeurigheid niet groot genoeg zijn.

Tijdens het polijsten worden de hoeken gemeten met een 'Autocollimator' – figuur 10. Ook met dit apparaat wordt gemeten ten opzichte van een prisma, het referentie-prisma, waarvan de hoeken nauwkeurig bekend zijn.

Uit de autocollimator komt een evenwijdige bundel licht. Deze wordt zodanig ten opzichte van het referentieprisma gesteld dat de lichtbundel gereflecteerd wordt en in zijn oorsprong terugkomt. Nu kan het referentieprisma vervangen worden door het te meten prisma.

Als de te meten hoek van het prisma niet goed is zal de lichtbundel wel gereflecteerd worden maar niet in zijn oorsprong terugkeren. De gereflecteerde lichtstraal gaat dan bijv. volgens de stippellijn – figuur 10.

Uit de afstand tussen de oorsprong en het brandpunt van de gereflecteerde lichtstralen kan de hoekafwijking worden afgelezen.

Ook hier is de meetnauwkeurigheid weer afhankelijk van het gebruikte instrument en ligt tussen de dertig en één boogseconden.

In de beginfase van de bewerking van holle spiegels wordt gebruik gemaakt van dezelfde handring-sferometer – zie figuur 4 – die ook bij de vervaardiging van proefglazen wordt gebruikt.

Met de handring-sferometer is het mogelijk om de kromtestraal van de spiegel te meten. Dit is echter niet voldoende. Ook moet gecontroleerd worden of de sfericiteit van de spiegel goed is. Dat wil zeggen dat het holle spiegeloppervlak precies een deel van een bol oppervlak is.

De sfericiteit kan gecontroleerd worden met de waarnemingsmethode van 'Foucault'. De werking van deze methode is als volgt: – figuur 15.

Bij P staat een puntvormige lichtbron, vlak bij het kromtemiddelpunt van de te controleren spiegel. De afbeelding van P wordt gevormd in P', waar men deze met het oog O kan waarnemen. Als nu bij P' langzaam een mes in de bundel gebracht wordt zal als het mes de bundel begint af te dekken een egale verduistering van de spiegel met het oog worden waargenomen.

Als de spiegel, voor het oog, niet egaal verduisterd wordt, is deze niet sferisch. Aan de vorm en de plaats van de eventuele lichtere of donkere vlek(ken) kan men bepalen wat de afwijking is en waar deze zich bevindt.

Met deze waarnemingsmethode van 'Foucault' kunnen afwijkingen op de sfericiteit kleiner dan  $1/10 \lambda$  worden waargenomen. Ook kan hierbij de straal R gemeten worden. Dit gebeurt meestal met een rolmaat daar de afwijking op de straal R bij spiegels zonder bezwaar een paar procent mag bedragen.

**Refractie – meten van de brekingsindex –**

In figuur 9a is de hoek van de lichtstraal met de normaal klein, waardoor het licht door het glas gaat.

In figuur 9b is deze hoek groter en hier wordt al het licht gereflecteerd. Dit geldt alleen gaande van een optisch 'dun' naar een optisch 'dichter' medium.

Er zal dus ergens een hoek tussen de invallende lichtstraal en de normaal bestaan waarbij de doorlating van de lichtstraal ineens omgezet wordt in volledige reflectie. Deze hoek is de grenshoek. De grootte van de grenshoek is voor elke glassoort anders en wordt bepaald door de brekingsindex van het glas. Met andere woorden als de grenshoek gemeten wordt kan daaruit de brekingsindex berekend worden. De formule hiervoor is:

$$\sin.g. (\text{grenshoek}) = \frac{n(\text{brekingsindex lucht} = 1)}{n'(\text{brekingsindex glas})}$$

Voor het meten van de grenshoek wordt gebruik gemaakt van een 'Refractometer' – figuur 16 –.

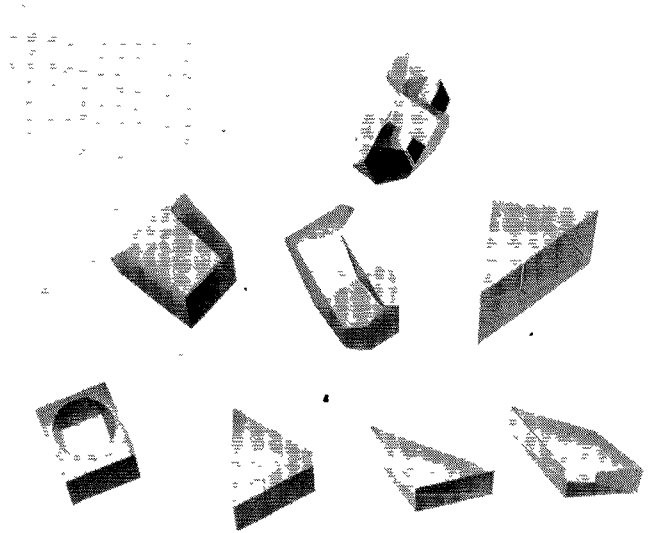
Het te meten glas dient aan de te meten zijde goed vlak gepolijst te zijn. Elke beschadiging aan deze zijde kan een foute meting opleveren.

Het principe van de meting berust op een hoekverdraaiing van een lichtstraal ten opzichte van het te meten oppervlak. Door verdraaiing van de spiegel – in figuur 16 – kan de hoek van het invallende licht veranderd worden. Als men de grenshoek bereikt heeft zal men door het oculair een half donker, half licht beeld waarnemen – figuur 17 –.

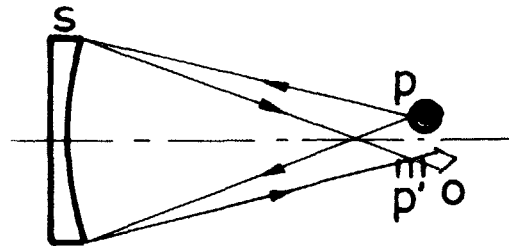
In deze apparaten is een maatverdeling aangebracht waarop rechtstreeks de waarde van de brekingsindex is af te lezen tot op de vierde decimaal.

**Aanbevolen literatuur**

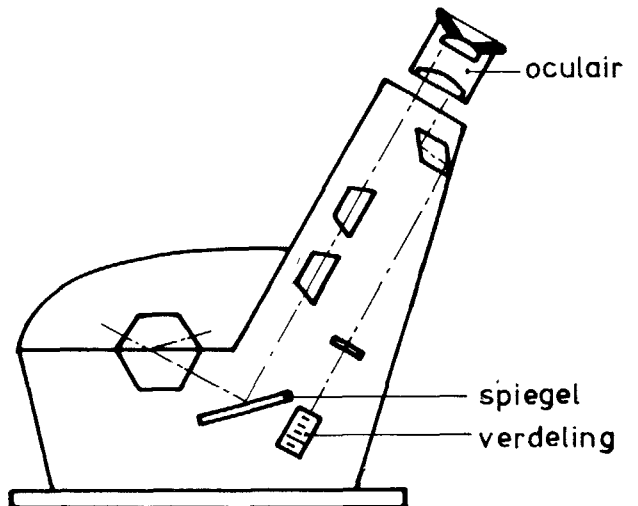
1. Ruchlis, Hy. 'Het wonder van het licht'. Uitg. Prisma.
2. Heel, A. C. S. van, 'Inleiding in de optica'. Uitg. Martinus Nijhoff.
3. Jenkins & White. 'Fundamentals of optics'. Uitg. Mc.Graw-Hill Book Company Inc.
4. Twyman, F., 'Optical glasworking'. Uitg. Hilger & Watts Ltd.
5. Horne, D. F., 'Optical production technology'. Uitg. A. Hilger Ltd.



Verschillende typen prisma's gereed om af te leveren.



Figuur 15. Waarnemingsmethode volgens 'Foucault'.



Figuur 16. Refractometer.



Figuur 17. Het in de refractometer waargenomen beeld.