

## Samenvatting van het college bijzondere onderwerpen uit de lengtemeting

**Citation for published version (APA):**

Koning, J., & Struik, K. G. (1976). *Samenvatting van het college bijzondere onderwerpen uit de lengtemeting*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Laboratorium voor mechanische technologie en werkplaatstechniek : WT rapporten; Vol. WT0386). Technische Hogeschool Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1976

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

SAMENVATTING VAN HET COLLEGE BIJZONDERE  
ONDERWERPEN UIT DE LENGTEMETING.

Col.nr. 4.270.0

docent Drs. J. Koning

samenvatting: Ing. K. Struik

Typewerk : E. Langstadt

september 1976

Grafisch werk: A.J. Manders

Technische Hogeschool

Foto's : H.G. Sonnemans

Eindhoven

## INHOUD

1. Standaarden
2. Meetmethoden
3. Meetoculair
4. Oplossend vermogen
5. Meetprincipe volgens Abbe
6. Meetprincipe volgens Eppenstein
7. Foto elektrische microscoop (f.e.m.)
8. Beschrijving van de interferometer in het  
Laboratorium van Lengtemeting
9. Interferentiele lengtemeting
10. Nauwkeurigheden

## HET METEN VAN LINEALEN (STREEPSTANDAARDEN)

### *I. Standaarden.*

Er bestaan verschillende soorten lengtestandaarden.

#### Hoofdgroepen

Eindmaten (worden hier niet behandeld) en streepstandaarden. Tot de streepstandaarden in engere zin behoren ook schroefspillen en allerhande meetsystemen voor numerieke besturing en/of aflezing. Namelijk al die meetsystemen die gekenmerkt zijn door een zich periodiek herhalende structuur. In de hier volgende tekst zal alleen gesproken worden over linealen in engere zin, bestaande uit een drager voorzien van maatstrepen, op afstanden van 1 mm. De discussie zal gaan in de richting van het zeer nauwkeurig meten, zodat alleen linealen van hoge kwaliteit ter sprake komen.

#### Het materiaal van de linealen

Zeer bekend zijn de Platina Iridium linealen, waarvan het materiaal aan de allerhoogste eisen voldoet. Ze zijn echter zeer kostbaar. Het profiel is (meestal) het x profiel van Tresca omdat dit bij gegeven stijfheid het minste materiaal bevat.

Tot voor ca. 20 jaar maakte de firma S.G.I.P. precisie linealen in drie verschillende legeringen:

- Invar, legering met 36% nikkel, temperatuurscoëfficiënt  $(0,5 - 0,8) \times 10^{-6}$ .  
Wordt gebruikt in de landmeetkunde als geodetische standaard.
- Platiniëet, legering met 42% nikkel, temperatuurscoëfficiënt  $9 \times 10^{-6}$ .  
Wordt gebruikt als tussenstandaard ter vergelijking met de Platina Iridium standaard.
- Legering met 58% nikkel, temperatuurscoëfficiënt  $11,5 \times 10^{-6}$ .  
Is geschikt voor normaal gebruik.

Thans worden precisie linealen o.a. gemaakt van:

- a. Glas, met een door een opdamproces aangebrachte metalen verdeling.
- b. Staal met een dunne nikkellaag, die gepolijst wordt en waarin de verdeling gegraveerd wordt.

II. Meetmethoden.

A. Konventionele meetmethoden voor het meten van linealen:

- a. Transversale komparator,
- b. Longitudinale komparator.

Transversale komparator

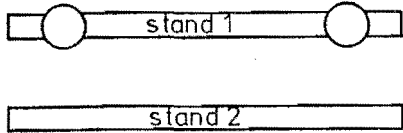


Fig. 2.1.a.

De standaarden die vergeleken moeten worden liggen naast elkaar. Zie fig. 2.1.a.

Door zijdelings te verschuiven worden beurtelings de standaard en de te meten lineaal onder de microscopen gebracht.

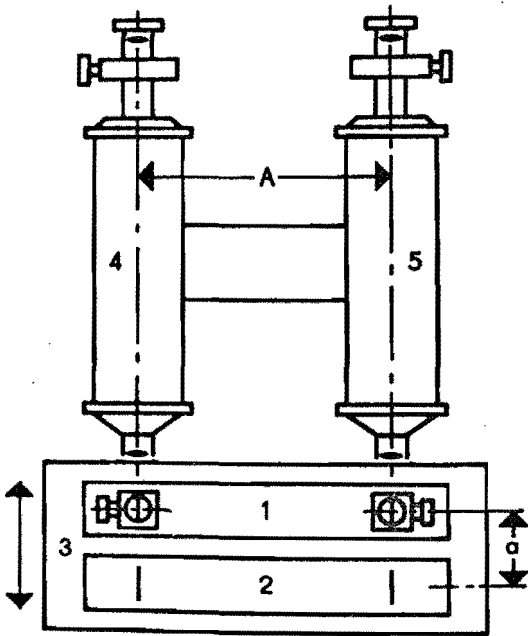


Fig. 2.1.b.

Microscoop 4 stelt men boven de streep, terwijl met behulp van microscoop 5, die een meetoculair bevat het verschil  $\Delta l$  gemeten wordt. Zie fig. 2.1.b.

De vergroting van de microscoop is ongeveer 20. Hierdoor is een fout  $\Delta l$  in het gezichtsveld van de microscoop 20 x groter, en dus nauwkeuriger waar te nemen. Zie fig. 2.2.

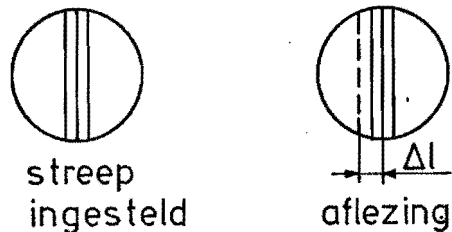


Fig. 2.2.

Longitudinale komparator (zie fig. 2.3 a en b).

De standaarden 1 en 2 zijn beide verplaatsbaar. Door instelling van microscoop 4 op de strepen van de standaard, kan men met microscoop 6  $\Delta l$  bepalen (de afwijking van de lineaal t.o.v. de standaard).

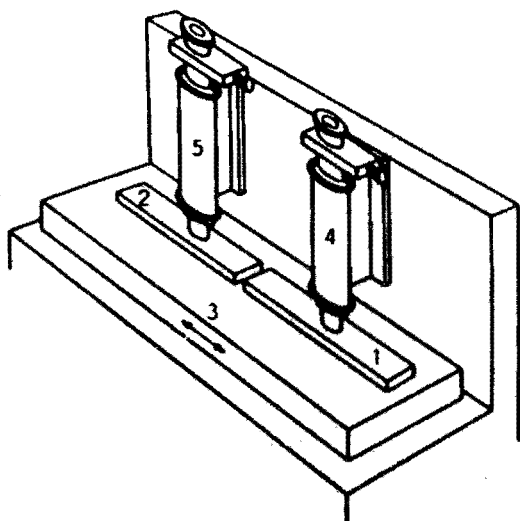


Fig. 2.3.a.

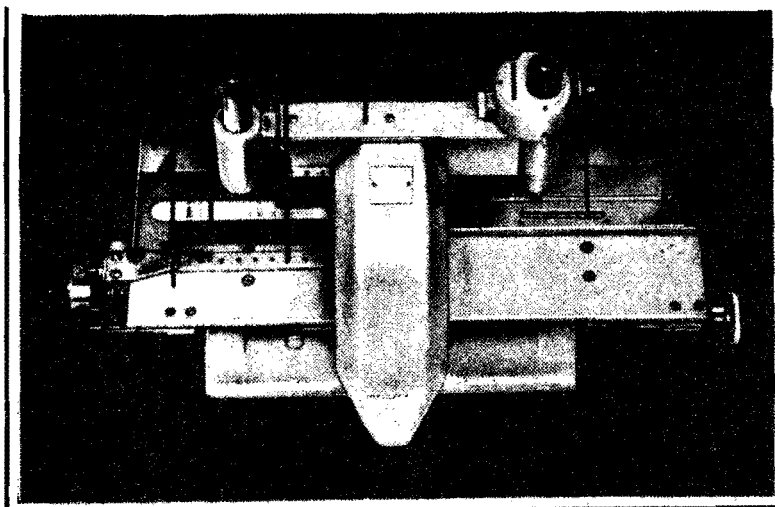


Fig. 2.3.b.

Deze meting geeft het systematische verschil tussen de standaard en de lineaal.

De kortste te vergelijken lengte is nu zeer klein, terwijl deze bij de eerste methode ongeveer 100 mm is; dit is iets meer dan de microscoop diameter. Maximaal te meten lengte bij beide is ca. 1 meter.

Voor langere standaarden gaat men als volgt te werk. Zie fig. 2.4.

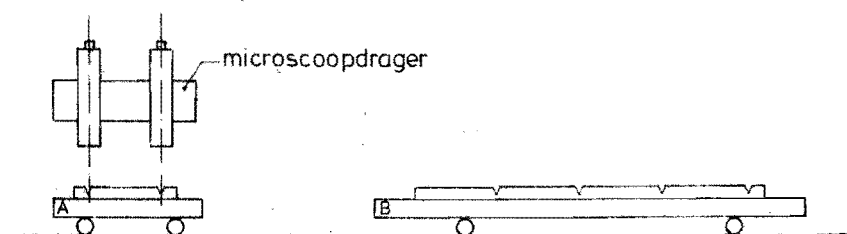


Fig. 2.4.

Op wagen A ligt een standaard van 1 m lengte. Met behulp hiervan worden de microscopen, die aan de drager bevestigd zijn, nauwkeurig afgesteld. Men rijdt nu wagen B, die een lineaal van 4 m draagt, onder de microscopen door, en kan zodoende de afstanden van de 5 hierop aanwezige strepen controleren.

Met behulp van deze laatste lineaal kan men de afstand van een aantal microscopen controleren die om de 4 m aan een muur of aan kolommen bevestigd zijn. Men verkrijgt op deze wijze een grote meetlengte die tot 60 m kan bedragen (situatie bij de P.T.B.). Een dergelijke meetopstelling wordt gebruikt om invar draden te meten ten behoeve van de geodesie. Men spreekt daarom wel van geodetische basis.

#### B. Meetmethode ter bepaling van de afwijkingen van de mm verdeling van een 1 m lineaal.

De verlangde nauwkeurigheid van de metingen is  $1 \mu\text{m}$ . Daar de l.u.c. van staal ca.  $10^{-5}$  is geeft dit bij een temperatuur onzekerheid van  $0.1^\circ\text{C}$  reeds een afwijking van  $1 \mu\text{m}$ . Verder zal de meting zelf ook nog een toevallig karakter hebben, wat inhoudt dat we de temperatuur van de lineaal op enkele honderste graden celcius nauwkeurig moeten weten. Hiertoe volgen we de volgende methode.

Bepaal de totale lengte en de temperatuur van de lineaal (de totale lengte met een nauwkeurigheid kleiner dan  $1 \mu\text{m}$ , en de temperatuur op ca.  $0.02^\circ\text{C}$ ). Door wat eenvoudig rekenwerk is nu de lengte  $y$  van de lineaal bij  $20^\circ\text{C}$  bekend. De lineaal kan nu in stappen van 100 mm gemeten worden, waarbij op de heenweg en terugweg gemeten worden (de metingen liggen equidistant in de tijd).

Stel nu dat er tijdens de metingen een lineair verloop van de temperatuur optreedt, dan is door het middelen van de beide meetseries de maat van de decimeter merken bekend bij een temperatuur van de lineaal behorende bij meetpunt 10, het omkeerpunt van de reeks. (Deze temperatuur hoeft niet bekend te zijn). Zie fig. 2.5.

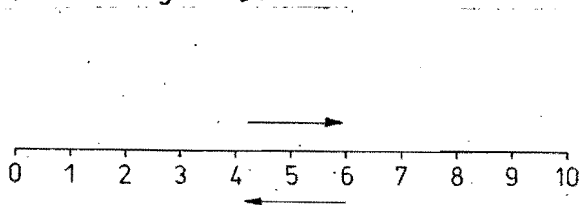


Fig. 2.5.

Men vindt nu als lengte van de lineaal  $y'$ . De lengte van de lineaal bij de punten  $n \leq 10$  is nu m.b.v. de omrekeningsfaktor  $\frac{y}{y_T}$  bij  $20^\circ\text{C}$  te bepalen. Voor het opvullen van de decimeter stukken gaat men nu per decimeter de cm verdeling opmeten (ook weer heen en terug). Door middeling van de beide meetseries en gebruik te maken van de nieuwe korrektiefactor is de cm afstand bekend. (De invloed van de temperatuur is nu een faktor 10 kleiner). Op dezelfde wijze meet men de mm verdeling.

Voordeel: 1 keer nauwkeurige temperatuurmeting.

Opvullen van de decimeter stukken kan over een groot tijdsgebied worden uitgestreken, mits iedere "heen en weer reeks" maar achter elkaar wordt gemeten.

Het minimaal aantal metingen is nu  $1 \times 1 + 1 \times 21 + 10 \times 21 + 100 \times 21 = 2332$ , wat een welhaast onuitvoerbaar aantal is.



## II. Meetoculair.

Er bestaan zeer veel verschillende aflees-systemen, de meest voorkomende zullen we hier behandelen.

### a. Spiraaloculair

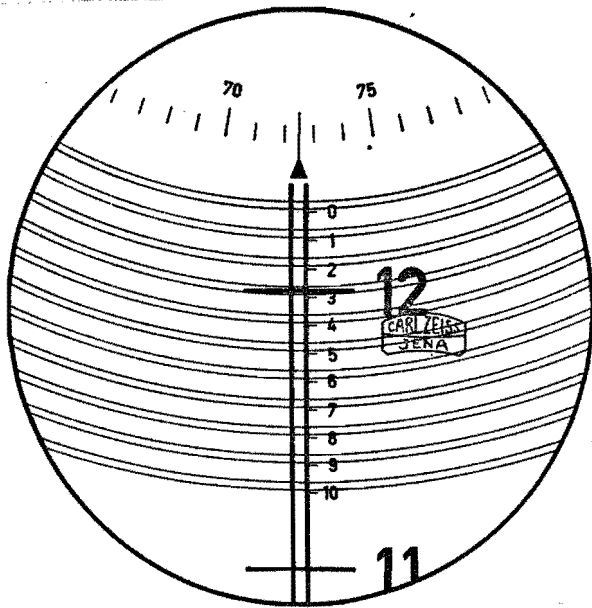


Fig. 3.1.

Fig. 3.1. toont het gezichtsveld van een spiraaloculair. De tiende mm verdeling is vast ingebouwd, de dubbelspiraal met de  $\mu\text{m}$  verdeling is draaibaar. De streep 12 vangt men door draaien van de draaibare dubbelspiraal in tussen 2 strepen van deze spiraal. De stand van de draaibare spiraal is op de randverdeling af te lezen. Nu zijn de mm, tiende mm en  $\mu\text{m}$  waarde af te lezen. AFLEZING IS 12,2724 (Carl Zeiss Jena, Oost Duitsland).

### b. Oculair schroefmicrometer

De tiende mm verdeling is vast ingebouwd. Zie fig. 3.2. De mm streep en de tiende mm worden in het gezichtsveld afgelezen, de  $\mu\text{m}$  aan de trommel van de meetschroef.

AFLEZING IS 46,362.

Nadeel omdat de hulpverdeling buiten is aangebracht moet men telkens het hoofd verplaatsen en de oogaccommodatie wijzigen.

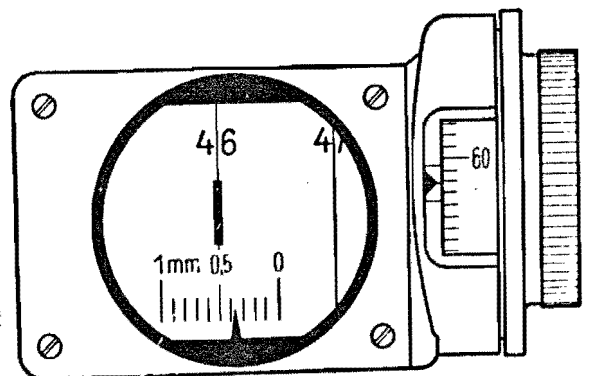


Fig. 3.2.

c. Fijnmeetoculair

Het beeld van de mm streep wordt door verschuiven van 2 wiggen verplaatst, zodat hij invalt tussen een dubbelstreep van de vaststaande tiende mm verdeling. Zie fig. 3.3.

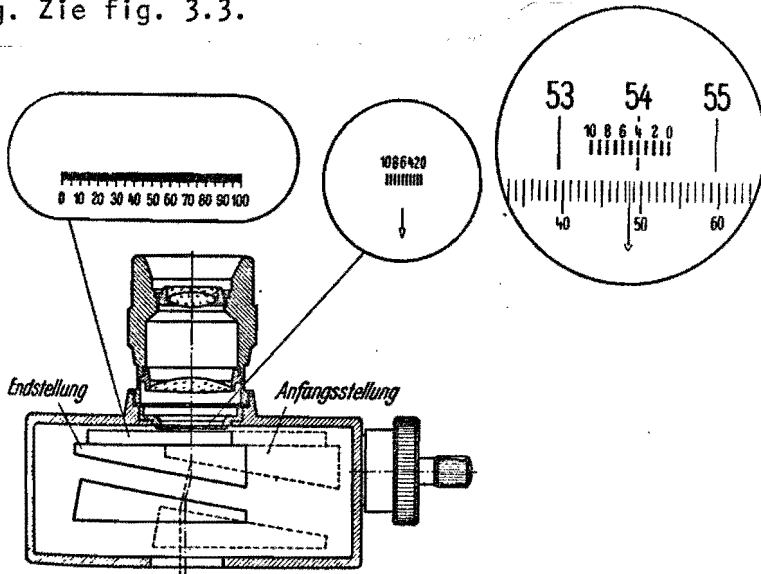


Fig. 3.3.

De aflezing van de verdeling op een van de wiggen t.o.v. een vast merk geeft de  $\mu\text{m}$  waarde. AFLEZING IS 54,4485.

In plaats van wiggen te gebruiken kunnen ook een plan parallelle glasplaat laten kantelen. Zie fig. 3.4.

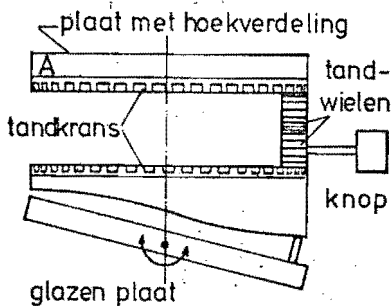


Fig. 3.4.

Plaat A geeft de verdraaiing aan, deze wordt in het oculair afgebeeld.

d. Transversale verdeling

De aflezing geschiedt bij die waarde, waarbij de mm streep symmetrisch in een dubbelstreep is ingevangen. AFLEZING IS 198,733 mm.

Dit systeem is niet bruikbaar beneden 1  $\mu\text{m}$ . Het wordt toegepast in de universeel meetmicroscoop van Zeiss (West Duitsland) dat geen grotere nauwkeurigheid dan 1  $\mu\text{m}$  verlangt. Zie fig. 3.5. Aan de vergroting van een oculair zijn beperkingen opgelegd, daar de geometrie van een sterk vergrote lijn steeds slechter wordt. De lijn is niet meer scherp en recht.

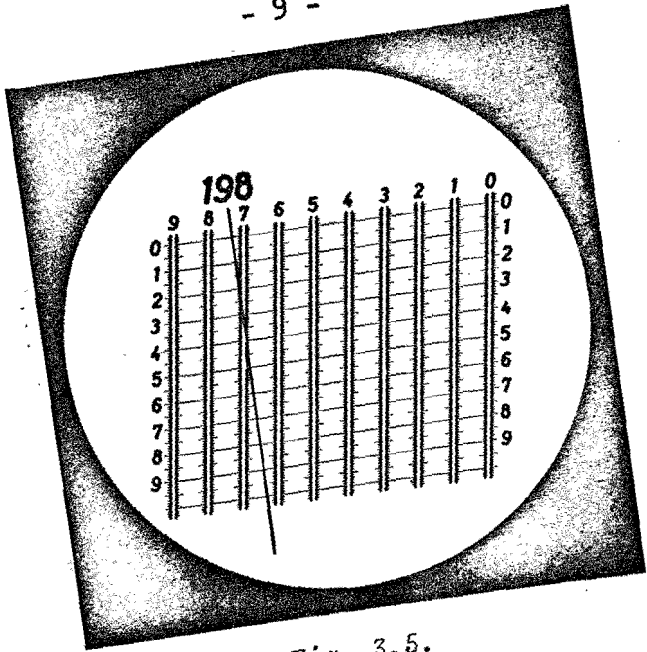


Fig. 3.5.

IV. Oplossend vermogen

A. Het netvlies van een menselijk oog is opgebouwd uit zenuwcellen, die op licht reageren. Het oog ziet twee lichtsignalen alleen dan gescheiden, indien tussen 2 belichte cellen een donkere ligt. Dientengevolge is het scheidend vermogen (oplossend vermogen) van het oog 1', dit komt overeen met 0,07 mm op 250 mm. Zie fig. 4.1. (250 mm is nabijheidspunt).

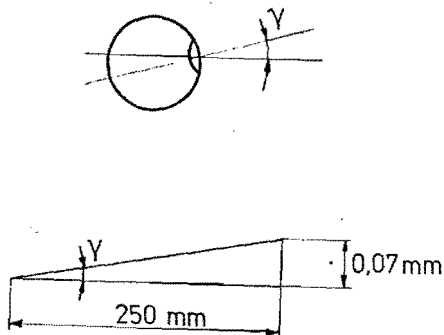


Fig. 4.1.

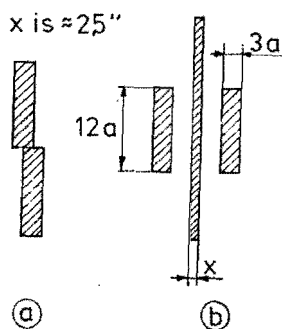


Fig. 4.2.

Een sprong in een lijn is veel gemakkelijker te zien, dan is het oplossend vermogen 16", dan is dus 0,02 mm op 250 mm nog te onderscheiden (1/50 nonius) Zie fig. 4.2.a.

De grootste nauwkeurigheid wordt bereikt bij toepassing van dubbelstrepen. Het oplossend vermogen is nu 5", nu is 0,006 mm op 250 mm nog te onderscheiden.

Fig. 4.3. toont het verloop van de maximale afwijking als functie van  $a$ , voor een oculair volgens fig. 4.2.b.

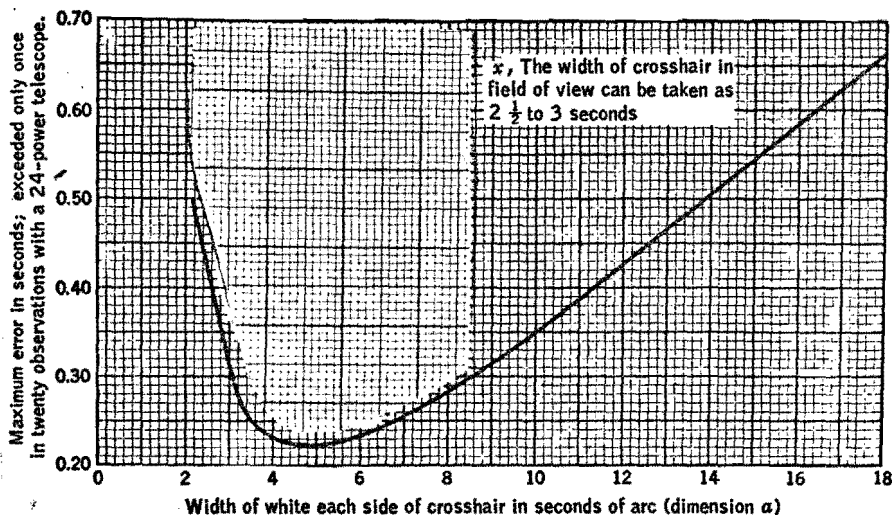


Fig. 8-4. The proportions of the ideal target and the accuracies obtained with different dimensions.

Fig. 4.3.

B. Mogelijke opstelling ter bepaling van de invangnauwkeurigheid (standaardafwijking) als functie van de streep en dubbelstreep geometrie. Zie fig. 4.4.

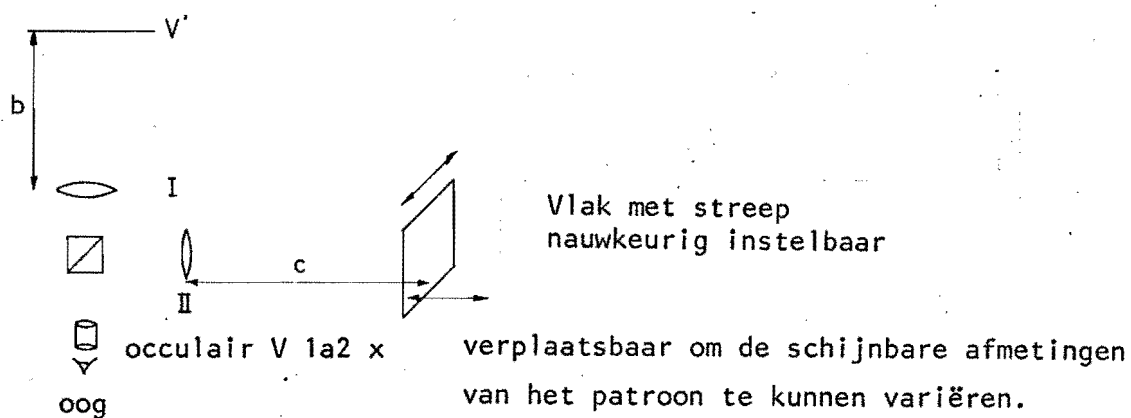


Fig. 4.4.

Afstanden zijn groot, zodat de lenzen I en II een sterke verkleining geven van de streep op vlak V en de dubbelstreep op vlak V', zodat de afwijkingen van beide geen rol spelen in de metingen.

We kunnen vlak V verplaatsen totdat de streep in het midden van de dubbelstreep staat in het oculair en de plaats van V aflezen. Door dit een aantal maal te doen verkrijgt men een inzicht in de instel-nauwkeurigheid.

### V. Meetprincipe volgens Abbe

Volgens Abbe moet een nauwkeurige meting aan 2 voorwaarden voldoen:

1. De meetmachine moet een lineaal bevatten die optisch afgelezen wordt.

Een schroefspil heeft naast een lineair verlopende systematische fout ook een periodieke fout, vanwege kanteling. Duits "Taumelfehler", Engels "Drunkeness". Zie fig. 5.1.

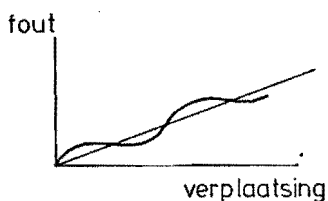


Fig. 5.1.

De lineaalstrepen behoren identiek te zijn, waarvan de afwijkingen t.o.v. de nominale maat bekend behoren te zijn. Interpolatie van de aflezing geschiedt met de hiervoor behandelde oculairen.

2. Meetobject en standaard behoren in een lijn te liggen, ter vermindering van 1e orde afwijking. Zie fig. 5.2.

Als tijdens het transport de wagen kantelt geeft dit een 1e orde afwijking van  $b \sin \phi$ , voor kleine hoeken is dit  $b \cdot \phi$ . Kiest men  $b \approx 0$  dan overheerst de 2e orde afwijking.

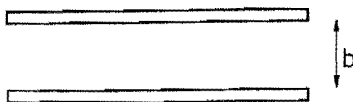


Fig. 5.2.

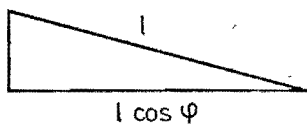


Fig. 5.3.

De 2e orde afwijking is gelijk aan  $l(1 - \cos \phi)$ . Zie fig. 5.3. Voor kleine hoeken is dit  $\frac{1}{2} l \phi^2$ . Deze blijft dan over als lineaal en standaard achter elkaar liggen en de 1e orde afwijking  $\approx 0$ .

## ENKELE BEREKENINGEN

De lengte van de lineaal moet bekend zijn met een nauwkeurigheid van  $10^{-4}$  tot  $10^{-5}$ . De geleidingsfout van een normale meetmachine kan 0,01 mm op 1 m bedragen, zodat  $\frac{0,01}{10^3} = 10^{-5}$  rad.

$$\text{2e orde fout} = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 10^{-10} = 10^{-7} \quad (\ell = 1000 \text{ mm})$$

$$\text{1e orde fout} = 100 \cdot 10^{-5} = 10^{-3} \quad (b = 100 \text{ mm})$$

Abbe zegt: kies  $b = 0$ . We schatten nu hier hoe klein  $b$  moet zijn opdat de afwijking verwaarloosbaar is. Men ziet dat de linealen binnen 1 mm in lijn moeten liggen ( $b \approx 1$  mm), bij een geleiding die op 0,01 mm over 1 m recht is.

Nadeel van Abbe's principe is dat de lengte van de meetmachine  $> 3\ell$  moet zijn, als  $\ell$  de te meten lengte is.

Ander bezwaar is dat door het gewicht van het te meten voorwerp het bed doorbuigt, wat ook meetafwijking als gevolg heeft. Zie fig. 5.4. Vandaar dat machines berustend op het Abbe principe een zware bedconstructie hebben.

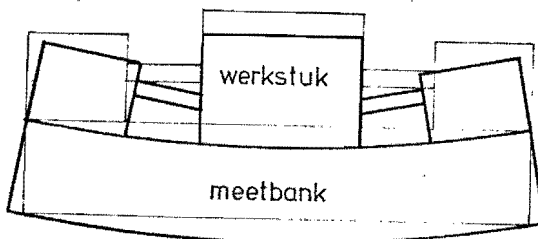


Fig. 5.4.

Voor het meten van lengten tot 4 m heeft de firma SGIP de volgende machine ontworpen. Zie fig. 5.5.

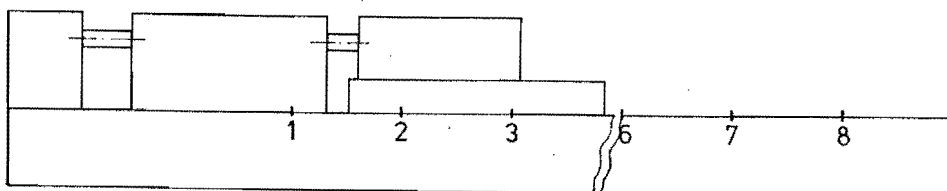


Fig. 5.5.

De machine bestaat uit een zeer zwaar bed waarover een meetwagen kan bewegen. Op het bed bevinden zich op afstanden van 0.5 m 8 microscopen. De wagen draagt een lineaal van 0,5 m. Door ijken kan men de microscoopafstand justeren.

Door de Firma Hilger en Watts is de volgende machine ontwikkeld. Zie fig. 5.6.

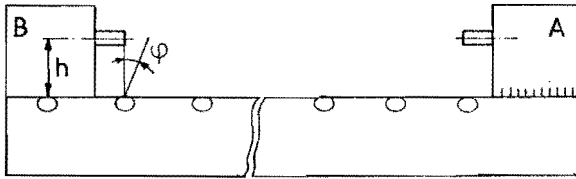


Fig. 5.6.

Het H profiel ligt in het (holle) bed, waarboven op afstanden van een dm glazen plaatsjes (vensters) zijn aangebracht. Deze glazen plaatjes zijn kantelbaar. De schijnbare afstand van de merken op het H profiel kan men nu justeren, met staven van bekende lengte. Op deze wijze

wordt een eerste orde kantelfout van verstelbare kop B gecorrigeerd. De methode geeft geen correctie tegen doorbuiging, slijtage of vuil



Fig. 5.7.



VI. Meetprincipe volgens Eppenstein

Om eerste orde kantelfouten tegen te gaan, terwijl lineaal en standaard zich naast elkaar bevinden, past men soms het Eppenstein principe toe. Zie fig. 6.1.

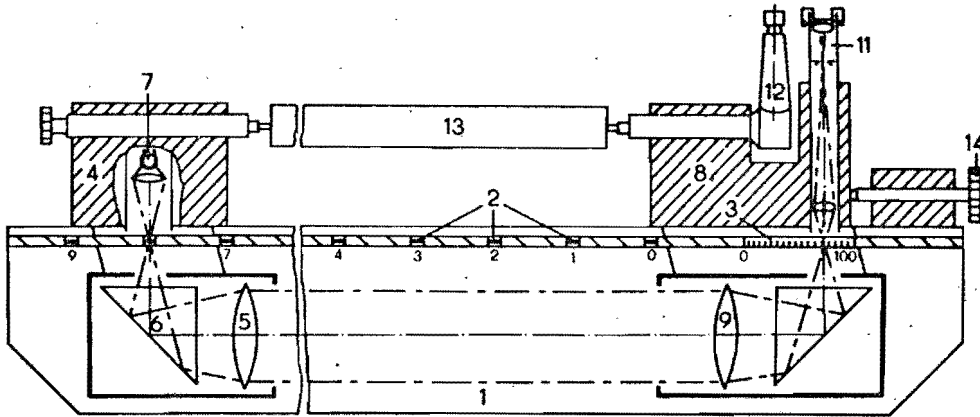


Fig. 6.1.

Verklaring: 1. bed; 2. streepjes op 100 mm afstand; 3. tiende mm verdeling; 4. pinole slede met optisch systeem (lens 5 en prisma 6) en lichtbron 7; 8. meetslede met optisch systeem, lens 9 en prisma 10 en microscoop 11 met mechanisch optische fijntaster 12; 13. meetobjekt; 14. fijnverstelling.

Kantelt kop 4 linksom, dan zal er een kantelfout  $h\phi$  optreden als  $\phi$  kantelhoek is en  $h$  hoogte boven het bed. De evenwijdige lichtbundel uit lens 5 zal ook over hoek  $\phi$  kantelen. Zie fig. 6.2.

Hierdoor verplaatst het instelmerk in de microscoop zich over  $f \times \phi$ . Om dezelfde instelling op de microscoopas te verkrijgen als bij niet kantelen van kop 4, zal kop 8 dus over een afstand  $f \cdot \phi$  naar links verschoven worden. Als nu  $f = h$  dan is de kantelfout opgeheven. De restafwijking is nu  $(h-f)\phi$ , en  $h-f$  is "gemakkelijk" kleiner dan 1 mm te verkrijgen.

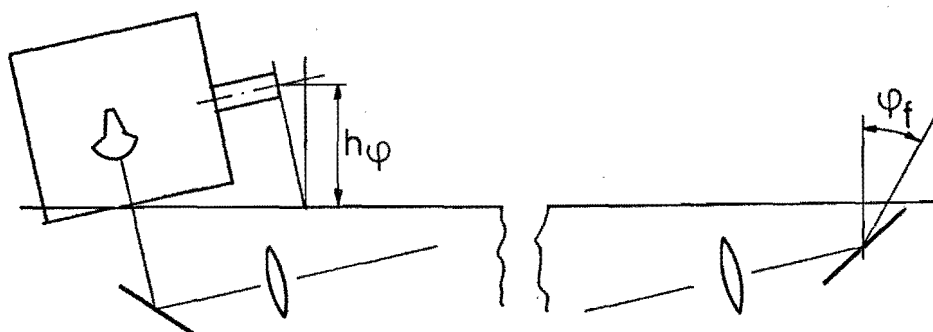


Fig. 6.2.

Ook doorbuiging van de machine wordt gecompenseerd. Stel dat de doorbuiging een verdraaiing  $\phi'$  geeft, nu is de restafwijking  $(h-f)(\phi+\phi')$ . Let op: bij "abbe" machines gebeurt de doorbuiging nadat de nulinstelling heeft plaatsgevonden, en de kanteling wordt dus niet waargenomen. Afwijking bij de machine volgens Abbe is nu  $h\phi'$ .

Vier meter lengte meetmachine (Zeis Jena, Oost Duitsland) voor het meten van lengtes tot 3 m. Zie fig. 6.3.

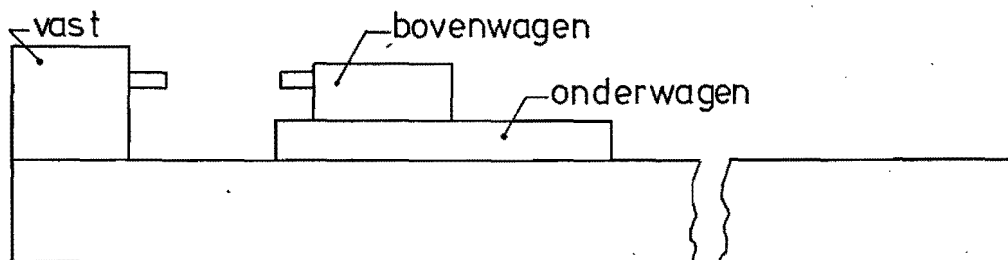


Fig. 6.3.

De onderwagen kan over het gehele bed worden verreden, en boven de decimeter merken worden gejusteerd.

De bovenwagen kan over de onderwagen bewegen. De stand van de bovenwagen t.o.v. de onderwagen kan worden afgelezen op een 100 mm glazen

lineaal die zich in de onderwagen bevindt. Fig. 6.4 geeft een zij-aanzicht van de machine, I is de lineaal met de 100 mm verdeling, II de 100 mm lineaal met tiende verdeling. De Eppenstein correctie geldt voor een as door A  $\perp$  papier.

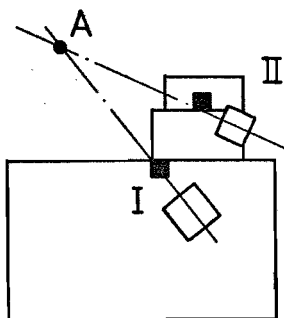
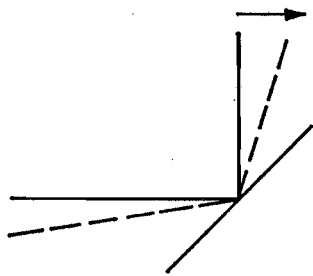


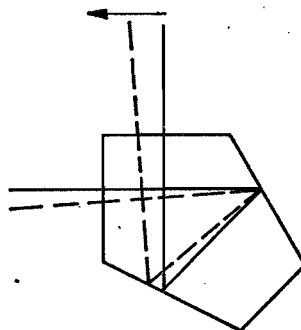
Fig. 6.4.

Schuifmaat volgens Eppenstein.

Als de correctie volgens Eppenstein de verkeerde kant uitgaat, kan men een pentagon prisma gebruiken, i.p.v. een spiegel die onder  $45^\circ$  staat. Zie fig. 6.5.



Spiegel onder  $45^\circ$   
1 reflectie



Pentagon prisma  
2 reflecties

Fig. 6.5.

Dit is nodig bij de "Eppenstein" schuifmaat van de firma Henshold, i.v.m. de positie van de lineaal.

Een methode om een nauwkeurige rechtgeleiding te maken wordt beschreven in rapport nummer 251, dat hier is bijgevoegd. De verkregen rechtgeleiding heeft een fout van ongeveer  $\pm 3 \mu\text{m}$  over 90% van zijn lengte, die 4 m is.

VII. Foto elektrische microscoop (f.e.m.)

1. Een streep op een lineaal neemt men waar met behulp van een microscoop. Om de streep goed waar te kunnen nemen moet men hem belichten.

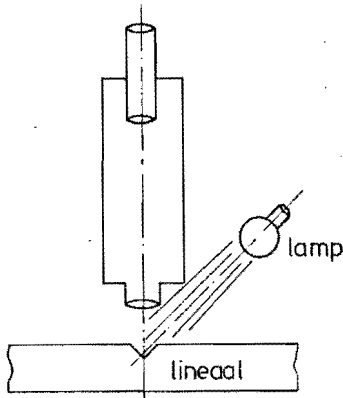


Fig. 7.1.

Vanwege eventuele asymmetrie moet men 2 aflezingen doen, een met microscoop in de getekende stand, en de andere als de microscoop  $180^\circ$  om zijn as gedraaid is. Voor een extra controle zou ook de lineaal omgekeerd moeten worden. Methode Volet (oud directeur BIPM).

Zie fig. 7.1. Bij deze verlichting zal de streep aan de ene kant helderder lijken dan aan de andere kant, dit vanwege de onvermijdelijke asymmetrische belichting. Wat is nu de afstand van twee niet identieke strepen? Om een betere verlichting te verkrijgen moet de streep van boven belicht worden. Zie fig. 7.2.

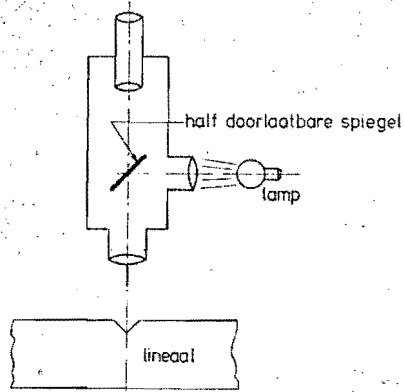


Fig. 7.2.

Bij een groot aantal aflezingen, raakt men te zeer vermoeid en zal de meetnauwkeurigheid afnemen, ook zal de meting erg lang gaan duren. Om dit bezwaar te ondervangen heeft men microscopen ontwikkeld die het beeld van een streep m.b.v. een fotocel waarnemen. Het voordeel is dat de meting sneller maar ook veel nauwkeuriger gaat.

Men zou een televisiecamera achter een normale microscoop kunnen plaatsen. Een televisiebeeld wordt in twee loodrechte richtingen afgetast. Dit geeft echter geen extra informatie en is dus nodeloos gecompliceerd.

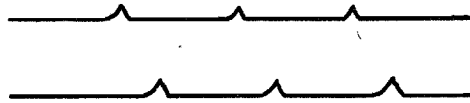
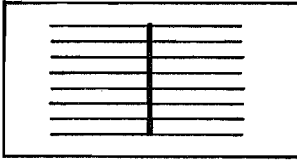


Fig. 7.3.

Met behulp van een t.v. camera wordt het oppervlak afgetast. Iedere keer als de streep gepasseerd wordt krijgt men een signaal, dat zich steeds herhaalt. Zie fig. 7.3. Staat de streep iets verschoven, dan verschijnen de signalen iets later. Men verkrijgt niet meer informatie dan bij een keer aftasten.

2. De gebruikelijke foto-electrische microscopen tasten het beeldveld in een dimensie af m.b.v. een of ander bewegend optisch element.

De foto-electrische microscoop die door het Laboratorium voor Lengtemeting is ontwikkeld, bestaat uit (Zie fig. 7.4):

- a. verlichtingseenheid
- b. afbeeldingseenheid
- c. waarnemingseenheid

De exitator beweegt sinusvormig,  $f = 50$  Hz. De uitgang van de fotocel wordt op de y ingang van een oscilloscoop gezet, terwijl op de x ingang een sinus met een frequentie van 50 Hz wordt gezet, en wel met dezelfde fase.

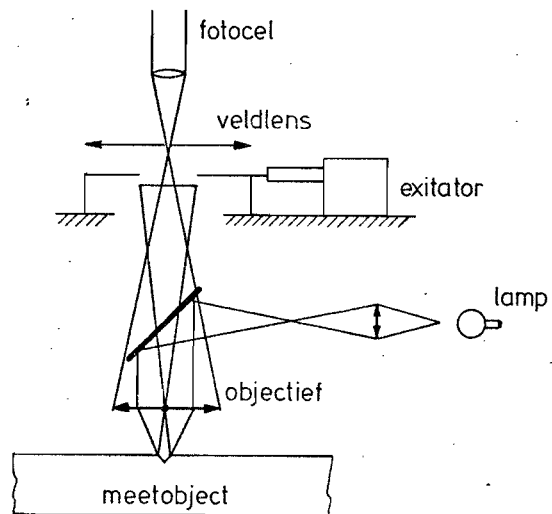
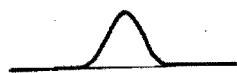


Fig. 7.4.

Afhankelijk van de amplitude van de exitator en de plaats van de lijn verkrijgt men het volgende beeld op de oscilloscoop.



Amplitude  $\approx 5 \mu\text{m}$



Amplitude  $\approx 3 \mu\text{m}$



Bij nog kleinere amplitude is het signaal als functie van de microscoop boven de streep vertikaal 50 Hz Horz. en vert. sin. signaal in fase.



vert. 50 Hz + 2e Harm. in fase.



Alleen 100 Hz + Harm.



vert. 50 Hz + 100 Hz in tegenfase.



Horz. en vert. sin in tegenfase.

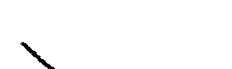


Fig. 7.5.

Het signaal van de fotocel wordt na versterking aangesloten op een servomotor, die op een 50 Hz signaal kan draaien, terwijl de draairichting afhangt van de fase van een referentie signaal.

We hebben nu een hogere meetsnelheid, de totale meettijd bedraagt nu  $\approx 3$  sec. Bij 1000 strepen en heen en terug meten geeft dit een meettijd van  $\approx 2$  uur.

De optische as wordt bepaald door het midden van het objectief en de middenstand van de trillende spleet. Staat deze as niet loodrecht op de lineaal, dan veroorzaakt dit een meetfout, zodat de microscoop  $180^\circ$  om zijn as gedraaid wordt, en de meting herhaald moet worden.

De nauwkeurigheid van het regelsysteem bedraagt ongeveer 20 nm. Dit is bepaald door een aantal malen op dezelfde streep in te stellen. In fig. 7.6 ziet U de resultaten van een 4-tal dubbelmetingen van een lineaal, waarvan de optische kwaliteit van het oppervlak slecht is.

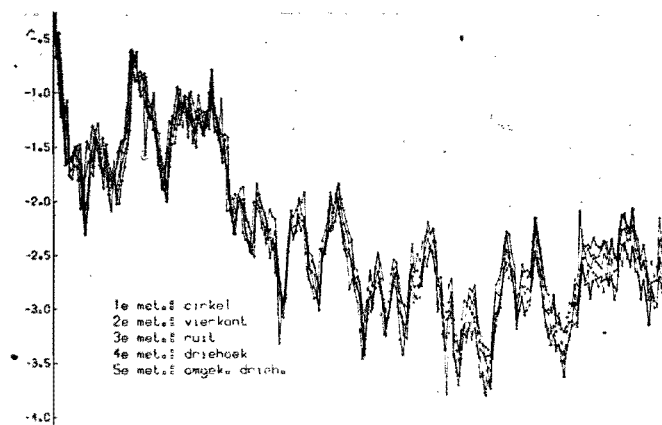


Fig. 7.6.

### 3. Andere foto elektrische microscopen.

#### a. F.e.m. van de firma S.G.I.P. Zie fig. 7.7.

Het licht van de lamp valt op de spleet, waarvan de breedte gelijk is aan de lijnbreedte vermenigvuldigd met de vergroting van het objectief. Dit licht wordt met behulp van 4 spiegels door een helft van het objectief op de lineaal geprojecteerd. Het gelapte oppervlak reflecteert het licht in de andere helft van het objectief. Hierboven is een prisma bevestigd dat ervoor zorgt dat het licht op een fotocel valt, nadat het gereflecteerd is door een 50% reflecterende glazen plaat. Het andere deel van het licht dat door deze half doorlaatbare spiegel gaat valt in op een schaalverdeling, die door een oculair kan worden waargenomen. Dit maakt het mogelijk om visueel in te stellen.

Als er nu een lijn op de optische as van de microscoop staat, zal het beeld van de spleet samen vallen met die lijn en zal er geen licht gereflecteerd worden op de fotocel. Als nu spiegel 5 die in bladveren opgehangen is, in trilling gebracht wordt, zal het beeld van de spleet sinusvormig over het oppervlak bewegen, met behulp van spiegel 4 is het mogelijk erg nauwkeurig op 0 te stellen, zodat

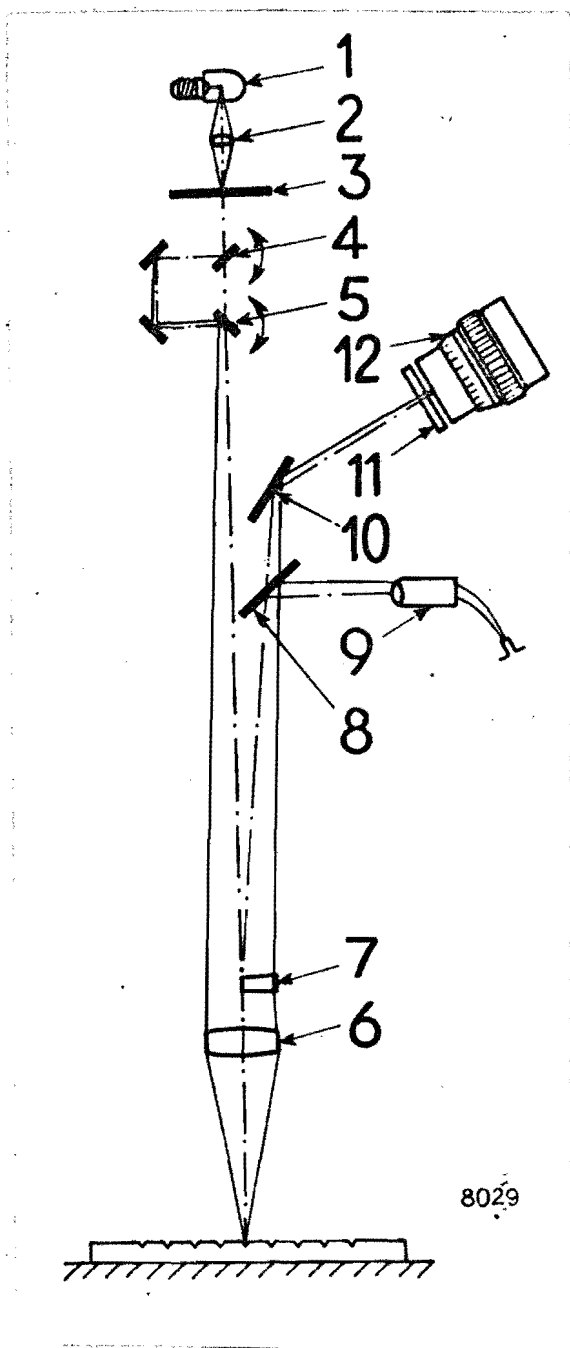


Fig. 7.7.

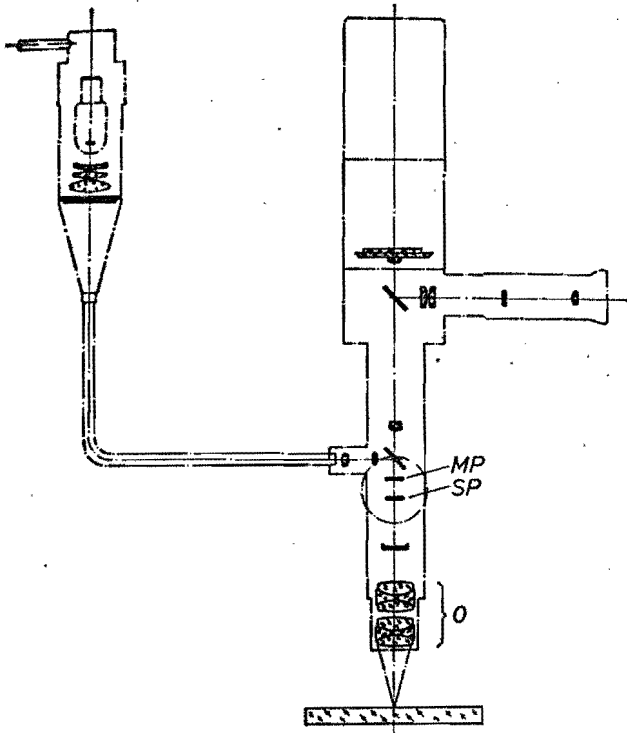
een lijn schijnbaar in de optische as van de microscoop gebracht kan worden. Dit is mogelijk door de spiegel eveneens aan bladveren te bevestigen in een omhullende spoel geplaatst in het veld van een magneet. Door nu een gelijkstroom door de spoel te laten lopen is de spiegel in te stellen; de draaiing van de spiegel is in zeer goede benadering evenredig aan de stroom door de spoel. De signalen uit de foto elektrische microscoop kunnen ook worden vergeleken met een referentie signaal, dat gelijk gemaakt kan worden aan het microscopsignaal. De wijziging van het referentiesignaal is een maat voor de afwijking van de lijn op de lineaal.

Nevenstaande microscoop wordt door de firma S.G.I.P geleverd, en deze heeft het ook ingebouwd in de grote comperator van het Bureau International.

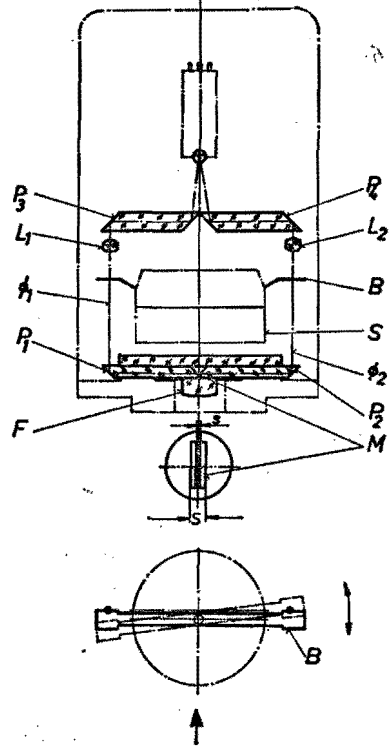
- b. Foto elektrische microscoop van de firma Carl Zeiss Jena.  
Zie fig. 7.8 a en b.

De streep wordt door een afbeeldingsoptiek op de meetspleet M afgebeeld. De meetspleet en een prisma delen het beeld van de streep en zijn omgeving in 2 delen. Het licht van beide delen wordt d.m.v. een trillende afschermvaan beurtelings doorgelaten en op een fotocel afgebeeld. Dit heeft het voordeel dat de optische as van de





7.8.a.



7.8.b.

O = objektief  
 SP = stuurplanplaat  
 MP = meetplanplaat  
 M = meetspleet

$P_1, P_2, P_3, P_4$  = prisma's  
 F = veldlens  
 $L_1, L_2$  = lenzen  
 B = afschermvaan

Fig. 7.8.

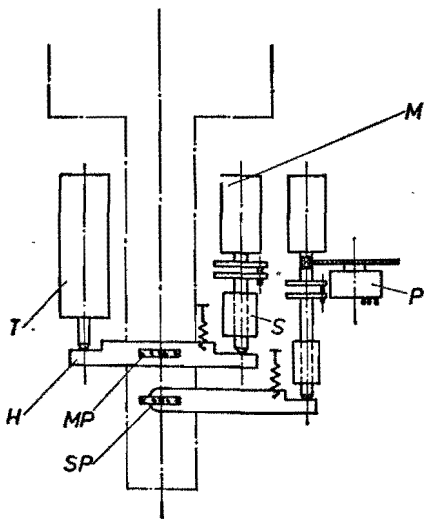


Fig. 7.9.

microscop niet electrisch beïnvloed wordt. De afwijking van de streep t.o.v. de optische as van de microscop kan nu met een planplaat gecompenseerd worden. De hoekverdraaiing van de planplaat MP is nu een maat voor de afwijking. Zie fig. 7.9. Met een 2e planplaat SP kan men naar behoeven de optische as verschuiven, om b.v. het 0 punt in te stellen. De door de fabrikant opgegeven standaardafwijking bedraagt 1 nm. (reproduceerbaarheid)

VIII. Beschrijving van de interferometer in het Laboratorium van Lengtemeting.

Mechanische constructie; Eerste uitvoering.

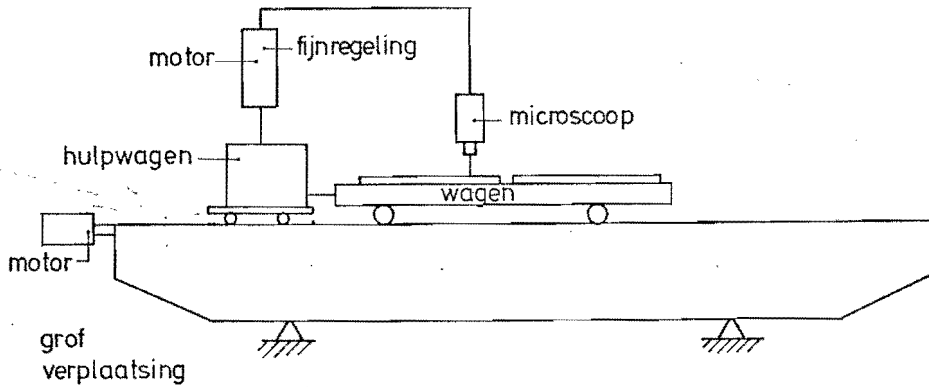


Fig. 8.1.

De motor voor de grofverplaatsing is verbonden aan een draaibankspil met een spoed van 6 mm. De ronddraaiende beweging van deze spil wordt m.b.v. een kinematische moer omgezet in een translatie van de hulpwagen en van de wagen zelf die hieraan gekoppeld is. De microscoop geeft nu een signaal af, dat via een versterker toegevoerd wordt aan een servo motor die de fijnregeling verzorgt. De fijnregeling bestaat in principe uit 2 overbrengingen. Zie fig. 8.2.

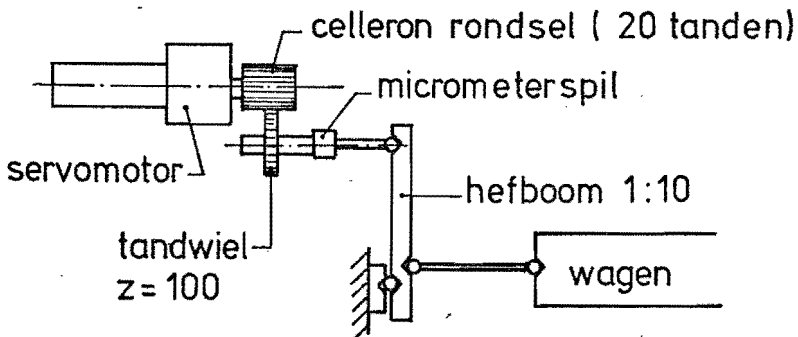


Fig. 8.2.

De speling in de micrometerspil en in de tandwieloverbrenging worden door de overbrengingsverhoudingen verkleind.

B.v. speling micrometer < 1  $\mu\text{m}$ ; na overbrenging < 0,1  $\mu\text{m}$ .

Om een goede temperatuur stabiliteit te verkrijgen zijn moer, hulpwagen, wagen en microscoop later ingebouwd in tempex.

Tweede uitvoering.

De servomotor en de stappenmeter, die constant warmte afgeven staan buiten de tempex bak. De servomotor voor de fijnregeling stond oorspronkelijk op een stellage die op de hulpwagen gebouwd was en dus mee verplaatste.

Zie fig. 8.3.

Dit had tot gevolg dat over een lengte van ongeveer 1,5 m een gleuf in de bak gemaakt moest worden, wat warmtelek veroorzaakte. De constructie van de servomotor bevredigde ons niet. Dit heeft geleid tot de volgende (derde) constructie. Zie fig. 8.4.

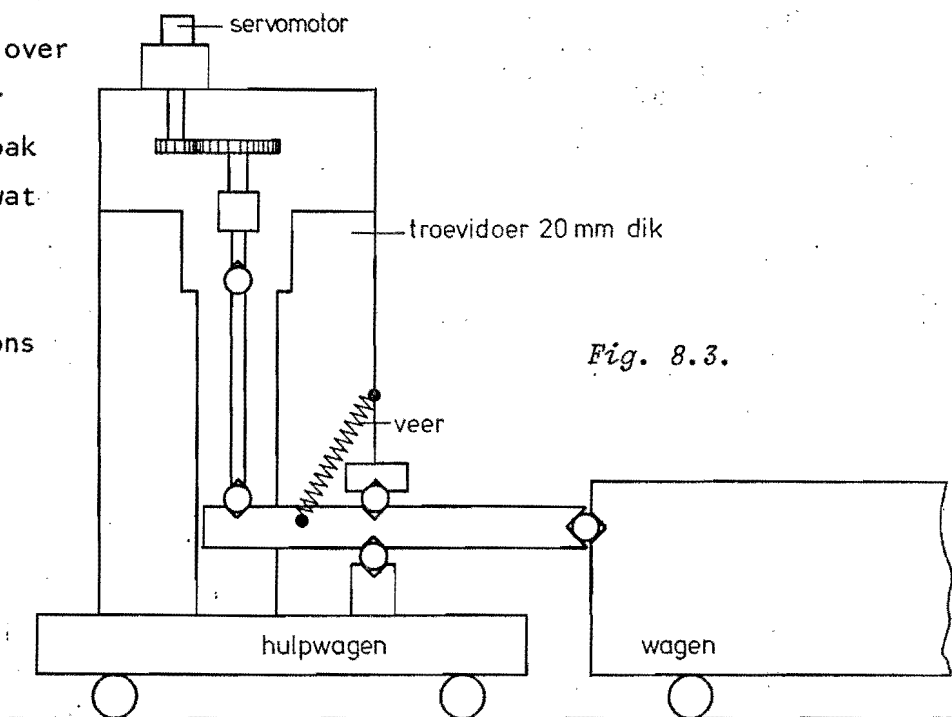


Fig. 8.3.

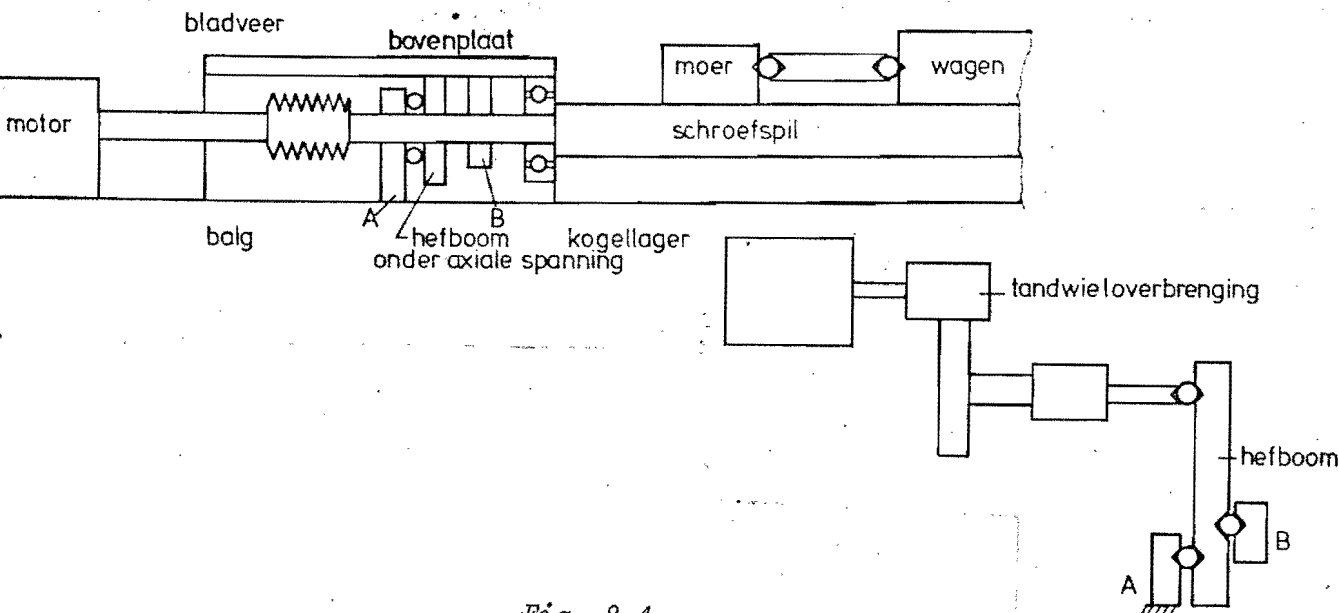


Fig. 8.4.

M.b.v. een voorgespannen balg wordt de schroefspil tegen de lager getrokken, die aan de bovenplaat bevestigd is. De bovenplaat is met 4 bladveren aan het bed vastgemaakt, zodat deze een kleine translatie kan ondergaan, die met de servomotor via bovenstaande overbrenging wordt gerealiseerd. De schroefspil wordt nu ook heen en weer geschoven, en via de moer ook de wagen; essentieel daarbij is dat de moer spelingsvrij is.

#### Constructie van de moer.

De stand van de moer moet eenduidig door de stand van de schroefspil bepaald zijn, en moet transleren als de schroefspil roteert. Dit is mogelijk door 6 juist gekozen steunpunten aan te brengen. Zie fig. 8.5.

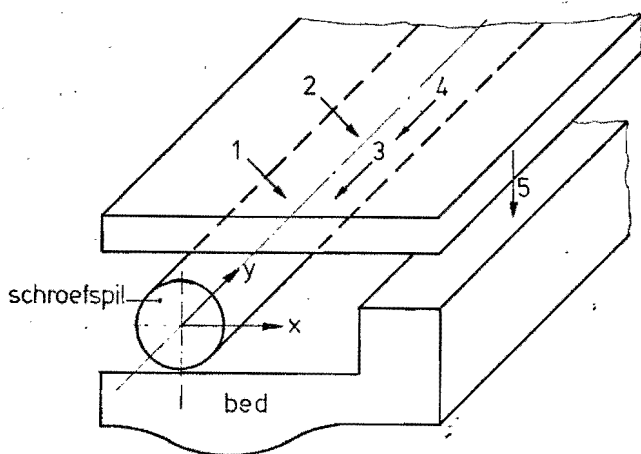


Fig. 8.5.

Steunpunt 1 bevat een kogel die in de schroefdraad aan beide flanken raakt (2 steunpunten). De steunpunten 2, 3 en 4 zijn kogellagers welke op de draadas lopen (dus op de top van het draadprofiel), terwijl kogellager 5 over een leibaan loopt, zodat rotatie om de schroefspil wordt verhinderd.

Bij slingeren van de schroefspil draait de moer t.o.v. het middelpunt van de kogel in steunpunt 1.

In plaats van een kogel als steunpunt, kan men ook een stukje molybdeen (lage wrijvingscoëfficiënt) in de vorm van de schroefdraad gebruiken, wat een groter aanlegvlak en dus geringere vervormingen geeft.

Een andere constructie is een moer met 2 kogellagers die op de flanken van de draadas lopen, i.p.v. een kogel tussen de flanken. Zie fig. 8.6. Een nadeel van deze constructie is dat bij slingeren van de geleidingsstrip de moer roteert om punt S. Dit heeft een verplaatsing van de wagen in de z-richting tot gevolg. Als de draadas slingert, beweegt de moer

vertikaal. Heeft de slinger-  
ring van de draadas een  
gradient dan kantelt de  
moer, wat ook weer een  
verplaatsing van de wa-  
gen in de z-richting  
ten gevolge heeft. Deze  
effecten hebben een  
groter effect dan bij  
de moer die hiervoor  
beschreven is.

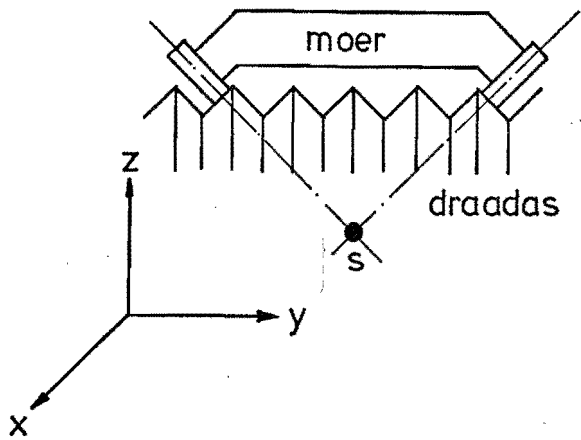


Fig. 8.6.

### IX. Interferentiele lengtemeting.

Men kan de lengte van een lineaal vergelijken met de golflengte van een lichtbron. Deze lichtbron moet dan licht uitzenden waarvan de golflengte goed bekend is. In principe zou men hiervoor het beste een kryptonlamp kunnen nemen, omdat hiermee de tegenwoordige meter is gedefinieerd. Een nadeel van deze kryptonlamp is, dat hij niet erg lichtsterk is, moeilijk te bedienen is en een kleine coherentie lengte heeft. De coherentie lengte is die lengte, waarbij men nog interferentie verschijnselen waar kan nemen, deze is ongeveer 0,5 m. Dit is de reden waarom men tegenwoordig gestabiliseerde lasers gebruikt (laser = Licht Amplification by Stimulated Emission of Radiation). De golflengte is bekend met een nauwkeurigheid van  $1:10^{-7}$  à  $10^{-8}$ . De interferometer die in het Laboratorium voor Lengtemeting is ontwikkeld ziet er in principe als volgt uit. Zie fig. 9.1.

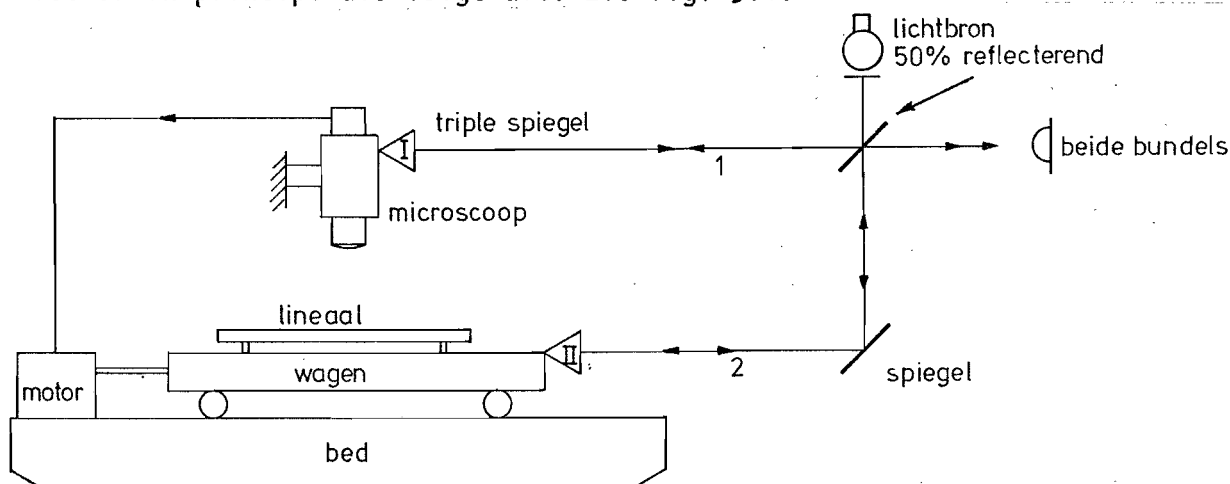


Fig. 9.1.

Het licht uit de lichtbron wordt in 2 bundels verdeeld door de 50% reflecterende glasplaat. De bundels hebben nu gelijke intensiteit, en daarmee dus ook gelijke amplitude  $a$ , daar de lichtintensiteit  $I \sim a^2$ . De bundels gaan nu naar de triple spiegels I en II en worden hier evenwijdig aan zichzelf gereflecteerd. Ze komen op de 50% reflecterende glasplaat weer samen en vallen hierna in op de fotocel. Beide gecombineerde bundels kunnen nu met elkaar interfereren. Op de fotocel komen nu lichtgolven van een zelfde lichtbron via verschillende wegen samen. Men kan voor de amplitude van de ene golf schrijven

$$y_1 = a_1 \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right)$$

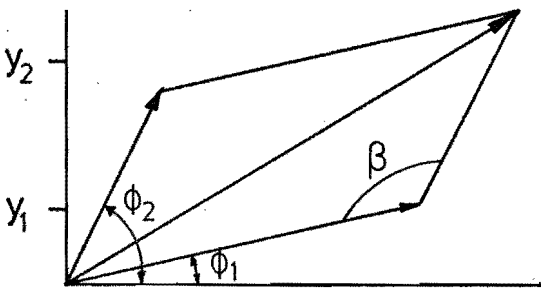
en voor de andere

$$y_2 = a_2 \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right)$$

$x_1$  is de weg in het ene been en  $x_2$  in het andere been van de interferometer.

Fasehoek  $\phi = 2\pi \frac{x}{\lambda}$  en  $\omega = \frac{2\pi}{T}$

de som  $y = y_1 + y_2 = a_1 \sin (\omega t - \phi_1) + a_2 \sin (\omega t - \phi_2)$ .



Zet men  $y_1$  en  $y_2$  uit als in fig. 9.2 dan ziet men direkt dat men met de cosinus-regel voor de resulterende amplitude A kan schrijven

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos \beta$$

$$\beta = 180 - (\phi_1 - \phi_2)$$

Fig. 9.2.

met  $a_1 = a_2$ .

$$I \sim A^2 = 2a^2 \{1 + \cos (\phi_1 - \phi_2)\} = 4a^2 \cos^2 \left( \frac{\phi_1 - \phi_2}{2} \right)$$

I is max als  $|\cos \left( \frac{\phi_1 - \phi_2}{2} \right)| = 1$

dus als  $\frac{\phi_1 - \phi_2}{2} = \kappa\pi \quad \kappa \in \mathbb{N}$

Voor het fasehoekverschil

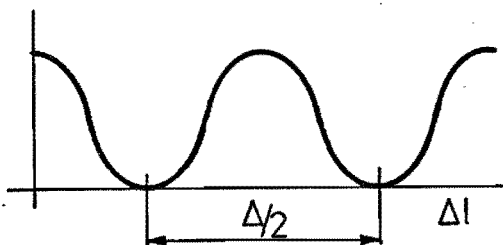
$$\phi_1 - \phi_2 = \kappa \cdot 2\pi \quad \text{met} \quad \phi = 2\pi \frac{x}{\lambda}$$

geeft  $\phi_1 - \phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (x_1 - x_2) = \kappa \cdot 2\pi$

dus  $x_1 - x_2 = \kappa \lambda$ .

Het licht doorloopt de benen  $2x$ , zowel heen als terug. Dit houdt in dat voor een verplaatsing van  $\Delta l = \kappa \cdot \frac{\lambda}{2}$  maxima van de intensiteit optreden. Evenzo volgt voor minima  $\Delta l = (\kappa + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{2}$ .

Er ontstaat op de fotocel dus een lichtsignaal, bestaande uit maxima en minima. Zie fig. 9.3.



De fotocel geeft een spanning af evenredig aan de intensiteit.

Fig. 9.3.

In principe kan men nu op de volgende manieren de stand van de streep op de lineaal bepalen. Continue bewegen, "on the flight", en bij iedere streeppassage de stand bepalen. Deze mogelijkheid wordt momenteel in het Laboratorium onderzocht. Verder kan men de wagen zover laten verplaatsen, dat er een maximaal signaal op de fotocel valt, en nu een glazen plaat onder de microscoop laten draaien zodanig dat de streep schijnbaar met de optische as van de microscoop samenvalt (B.I.P.M.)

Bij de bestaande interferometer in het Laboratorium wordt het signaal uit de foto elektrische microscoop gebruikt om met behulp van een servo motor de streep onder de optische as van de microscoop te justeren. In verband met het servo systeem passeert de intensiteit verschillende malen een maximum bij het inregelen van de streep. Als men dit signaal via een electronische schakeling in een teller stuurt, zal men een heen en weer teller nodig hebben. De plaats van de streep is nu bekend

met een nauwkeurigheid van normaal  $\frac{\lambda}{2} \approx 0,3 \mu\text{m}$ , nog nader te beïnvloeden door de electronica. Gebruiken we 2 foto detectors zoals in fig. 9.4 aangegeven, dan verkrijgen we 2 signalen die  $90^\circ$  in fase verschillen. Zie fig. 9.5 A en B.

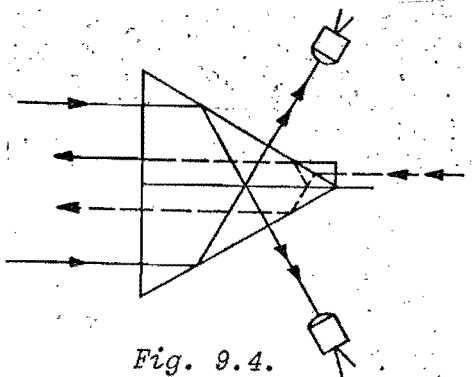


Fig. 9.4.



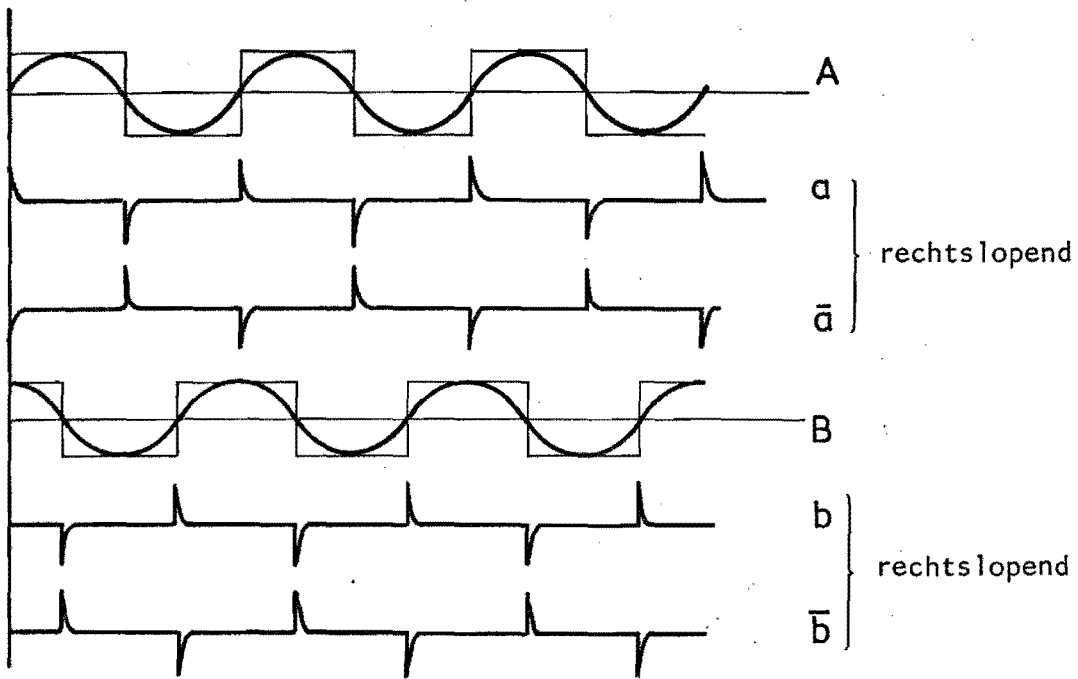


Fig. 9.5.

Het is mogelijk om van deze sinusvormige signalen blokspanningen te maken. Bij het differentiëren van deze blokspanningen krijgen we bij het naar rechts lopen alleen de positieve pulsen  $a$ ,  $\bar{a}$ ,  $b$  en  $\bar{b}$ . De negatieve pulsen verdwijnen omdat er alleen met signalen tussen 0 en 5 volt gewerkt wordt. Zie fig. 9.6. We verkrijgen nu 4 telpulsen per golflengte  $\lambda$ . Door in de interferometer per  $\Delta l = \frac{\lambda}{2}$  golflengte verplaatsing versterkingen optreden, verkrijgen we nu een oplossend vermogen van  $\frac{\lambda}{8} \approx 0,08 \mu\text{m}$

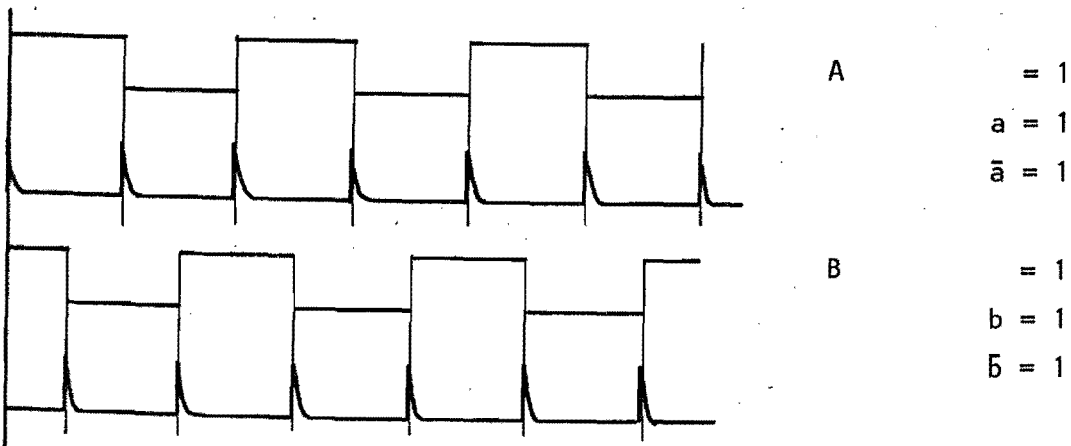


Fig. 9.6.

we zien dat

$a \bar{b} = 0$	$b A = 0$
$a B = 1$	$b \bar{A} = 1$
$\bar{a} B = 0$	$\bar{b} A = 1$
$\bar{a} \bar{b} = 1$	$\bar{b} \bar{A} = 0$

Dit is elektronisch als volg te realiseren. Zie fig. 9.7.



EN poort  $T = x_1 x_2$



OF poort  $T = x_1 + x_2$

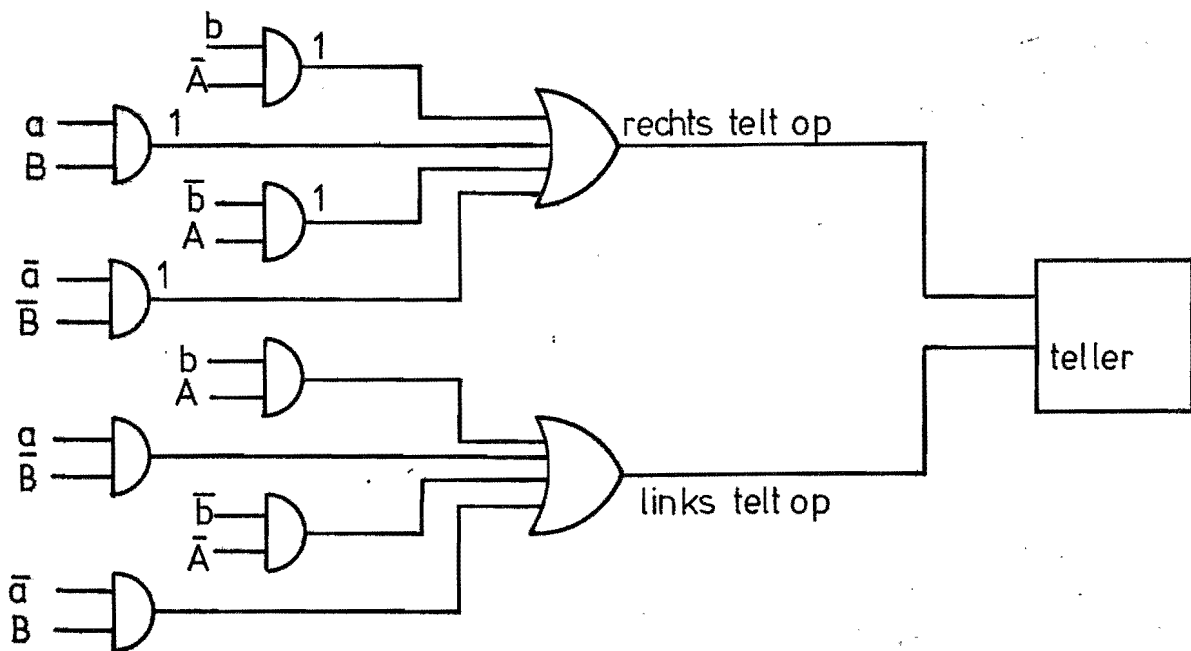


Fig. 9.7.

De meetcyclus is nu als volgt:

1. Starten van groftransport, verplaatsing  $1 \pm 0,01$  mm.
2. Fijntransport, met servo systeem en microscoop.
3. Bepaal tijdstip "klaar" en pons de tellerinhoud.

ad 1. Met behulp van een tweede teller wordt de motor van het grof transport na een instelbaar aantal ca. 1200 telpulsen uitgeschakeld (1 mm komt overeen met 12640 telpulsen). Door zijn traagheid loopt de motor iets door, en wel 600 à 700 telpulsen afhankelijk van zijn snelheid. D.m.v. het servosysteem wordt nu de streep in de optische as van de microscoop gebracht.

ad 3. Het tijdstip "klaar" is te bepalen door naar de frekwentie van het uitgangssignaal van de microscoop te kijken. Zie fig. 7.5, bij afwezigheid van 50 Hz kan men nu de tellerinhoud in een ponsband laten ponsen.

In de praktijk blijkt dat na 2 à 3 sec. de streep wel goed staat, zodat na een vaste cyclus van ongeveer 3 sec. de tellerinhoud wordt geponsd.

De tellerinhoud kan in een geheugen gestopt worden en m.b.v. indicators aangegeven worden. Het schema hiervan is in fig. 9.8. gegeven.

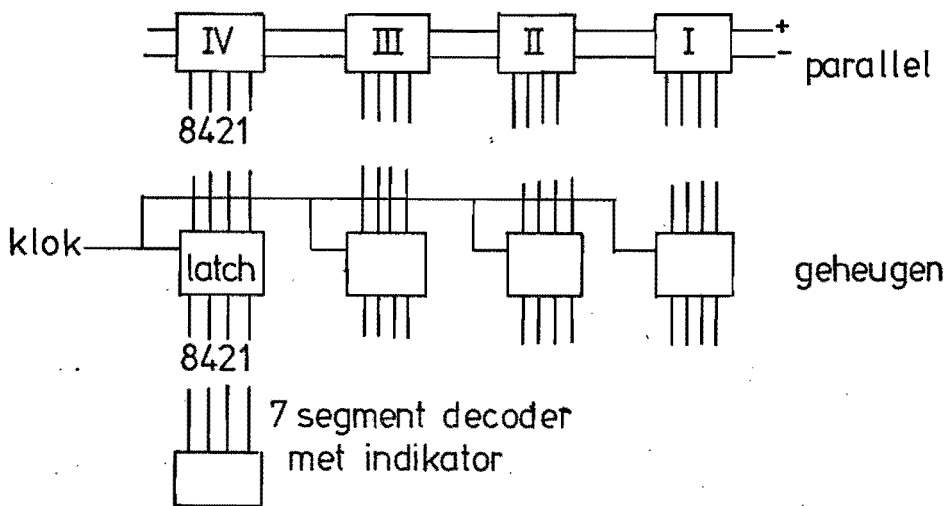


Fig. 9.8.

Teller I telt tot 9, bij de volgende telpuls springt hij op nul en geeft een telpuls af aan teller II, enz.

Na iedere 3 seconden verschijnt er een puls, die er voor zorgt dat de latches die het geheugen vormen de totale tellerinhoud aannemen en vasthouden. De waarde van de latches wordt tevens op een indikator

aangegeven. Het is ook mogelijk om deze waarde te ponsen. Dit gebeurt met een parallelserie omzetter, die cijfer na cijfer van een getal ponsst. Zie fig. 9.9.

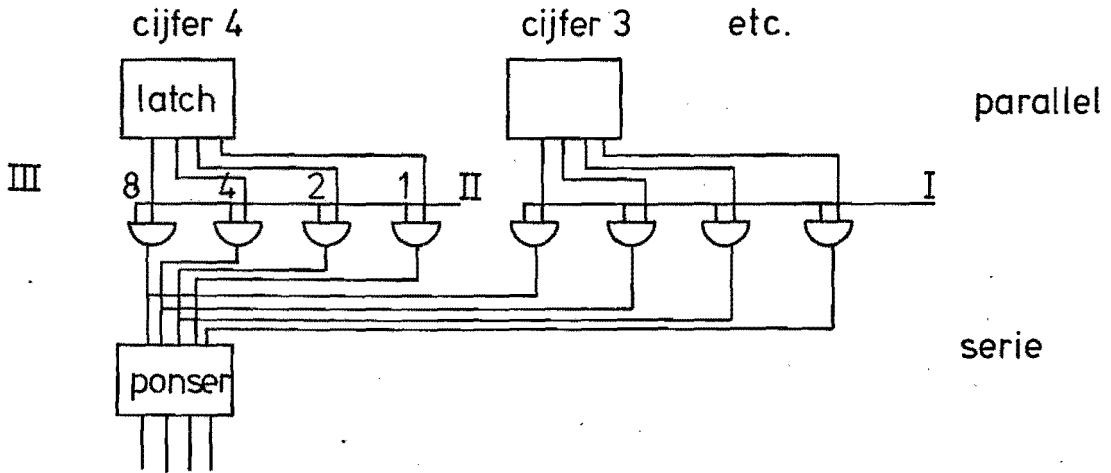


Fig. 9.9.

X. Nauwkeurigheden.

De golflengte van de uitgezonden straling van een gasontladingslamp in vacuüm wordt gegeven door:

$$\lambda_{\text{vac}} = \frac{c}{f} = \frac{h \cdot c}{E_1 - E_2}$$

met  $c$  = lichtsnelheid in vacuüm

$h$  = constante van Planck

$E$  = energie toestand in het atoom.

De interferentie lengtemeting vindt plaats in normale atmosferische lucht. Nu is

$$\lambda_{\text{lucht}} = \frac{V_{\text{lucht}}}{c} \times \lambda_{\text{vac}}$$

met  $V_{\text{lucht}}$  = lichtsnelheid in lucht.

Schrijven we voor  $\frac{c}{V_{\text{lucht}}} = n$ , brekingsindex, dan wordt  $\lambda_{\text{lucht}}$

gegeven door  $\lambda_{\text{lucht}} = \frac{\lambda_{\text{vac}}}{n}$ .

De brekingsindex is voor glas 1,3 - 1,5, voor lucht is  $n \approx 1,0003$ .

De luchteigenschappen zijn niet constant, zodat de brekingsindex ook niet constant is. Het blijkt dat

$$n - 1 \div \frac{P}{T}, \text{ met } P = \text{luchtdruk}$$

$T$  = absolute temperatuur van de lucht.

De afhankelijkheid van de brekingsindex met de temperatuur volgt nu uit

$$\frac{dn}{dT} = - \frac{P}{T} = - \frac{(n-1)}{T}$$

voor lucht met  $\Delta T = 1 \text{ K}$  en  $T = 300 \text{ K}$  geeft dit

$$dn \approx 10^{-6}, \text{ dus } \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = n = 10^{-6}/K$$

Zo volgt voor de drukafhankelijkheid

$$\frac{dn}{dp} = \frac{P}{T \cdot P} = \frac{n-1}{P}$$

met  $P = 1 \text{ bar}$ ,  $P = 1 \text{ mbar}$  geeft dit

$$dn = 3 \cdot 10^{-7} / \text{bar} \quad , \quad \text{dus} \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 3 \cdot 10^{-7} / \text{bar}.$$

De uitzettingcoëfficiënt van de golflengte is dus  $10^{-6}$  per K en  $3 \cdot 10^{-7}$  per bar. Van een stalenlineaal is de uitzettingscoëfficiënt  $\approx 10^{-5}$  per K, van invar ca.  $10^{-6}/\text{K}$ .