

# Een stabiele He-Ne laserconstructie geschikt voor golflengtestabilisatie op een jodium absorptielijn

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

Beekmans, W. J., & Schellekens, P. H. J. (1974). *Een stabiele He-Ne laserconstructie geschikt voor golflengtestabilisatie op een jodium absorptielijn*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Laboratorium voor mechanische technologie en werkplaatstechniek : WT rapporten; Vol. WT0339). Technische Hogeschool Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1974

**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.



technische hogeschool eindhoven

laboratorium voor mechanische technologie en werkplaatstechniek

blz. 1 van 21 blz.

rapport nr. 0339

rapport van de sectie: LENGTEMETING.

codering:

M-8-C.

titel: EEN STABIELE HE-NE LASERCONSTRUCTIE  
GESCHIKT VOOR GOLFLENGTESTABILISATIE  
OP EEN JODIUM ABSORPTIELIJN.

auteur(s): W.J. BEEKMANS  
P.H.J. SCHELLEKENS

trefwoord:

LENGTE-  
STANDAARD.

sectieleider: P.H.J. SCHELLEKENS.

Lector: DR. J. KONING.

samenvatting In het Laboratorium voor Lengtemeting is de behoefte ontstaan aan een He-Ne laser met een golflengte onnauwkeurigheid kleiner dan  $1:10^8$ . Om dit te kunnen realiseren is golflengtestabilisatie noodzakelijk op een jodium absorptielijn. Het spreekt voor zich dat hierdoor hoge eisen gesteld worden aan de stabiliteit van de constructie. Uitgaande van het principe van "kinematical design" en rekening houdende met de invloed van temperatuursfluctuaties op de diverse constructieonderdelen is een laserconstructie ontworpen waarmee het mogelijk is golflengtestabilisatie toe te passen.

prognose

datum:

29-10-1974

aantal blz.

21

geschikt voor  
publicatie in:

I-1 STAGE

W.J. BEEKMANS.

## INHOUDSOPGAVE.

1. INLEIDING.

2. ONDERZOEK NAAR HET GEDRAG VAN HET PIEZOOXYDE

3. METING VAN HET TEMPERATUURSVERSCHIL TUSSEN DE  
PLASTABUIS EN HET BED EN TUSSEN DE ALUMINIUM  
JUSTEERPLAAT EN HET BED BIJ DE BESTAANDE  
LASERCONSTRUCTIE.

4. DE LASERCONSTRUCTIE.

4.1. ALGEMEEN.

4.2. DE RESONATORLENGTE.

4.3. HET JUSTEREN VAN DE SPIEGELS.

4.4. DE JUSTAGE VAN DE PLASTABUIS EN VAN DE  
JODIUM ABSORPTIECEL.

5. OPMERKINGEN.

## 1. Inleiding.

In 1970 is in de meetkamer van de vakgroep productietechnologie een aanzet gegeven tot de bouw van een He-Ne Laser, waarbij de golflengte gestabiliseerd wordt op een jodium absorptielijn. Men heeft toen een mechanische constructie toegepast die alleen het doel had om de Laserwerking aan te tonen. Deze constructie vertoonde bij nader inzien echter nogal wat gebreken. In het bijzonder is niet gelet op de invloed van de uitzetting van de gebruikte materialen waardoor de resonatorlengte (dit is de lengte tussen de beide spiegels) niet voldoende constant blijft om golflengte stabilisatie toe te passen.

We hebben een constructie ontworpen waarbij met deze fysische eigenschap van de gebruikte materialen rekening is gehouden.

Verder is de constructie goed stabiel en zijn de benodigde justagemogelijkheden aanwezig.

Om de constructie zo optimaal mogelijk te maken hebben we enkele proeven moeten doen.

Deze proeven zijn:

a onderzoek naar het gedrag van het piezo oxyde (het piezo oxyde zorgt voor de verplaatsing van de beweegbare spiegel).

b het meten van de temperatuurverdeling binnen de bestaande Laserconstructie.

In het volgende zullen allereerst deze proeven besproken worden. Vervolgens wordt het ontwerp van de nieuwe Laserconstructie beschreven.

## 2. Onderzoek naar het gedrag van het piezooxyde [2]

Het gedrag van het piezooxyde in belaste toestand (dit is de situatie die ook in werkelijkheid aanwezig is) is onderzocht met behulp van de meetopstelling die in fig 1 schematisch is weergegeven.

In plaats van een spiegel is een perspexplaatje gebruikt dat door het piezooxyde in verticale richting wordt verplaatst. Het hulpstuk met perspexplaatje en piezooxyde, het statief en de opnemer zijn d.m.v. een tempexkastje van de omgeving afgesloten. Deze omgeving is de meetkamer waar een temperatuur heerst van  $20 \pm 0.1$  °C en bovendien de persoon die de meting verricht. Deze persoon veroorzaakt storingen in de constante temperatuur die in de meetkamer heerst. Het tempex kastje dient ervoor om deze storingen niet tot het te meten object te laten doordringen.

De meting is als volgt uitgevoerd:

Met behulp van het gelijkstroom voedingsapparaat van Harrison en de digitale voltmeter van Fluke regelen we de spanning die op het piezooxyde gezet wordt op resp. 0 - 40 - 80 - 120 - 160 - 120 - 80 - 40 - 0 Volt.

Bij elke spanning meten we de verplaatsing van het perspexplaatje met behulp van de Elmyrometer, die tevoren met een eindmaat is geijkt. Deze meting wordt driemaal herhaald. De resultaten zijn vermeld in tabel I en zijn in grafiek 1 uitgezet. De spanning wordt vervolgens omgepoold en dezelfde metingen worden herhaald. Ook deze metingen staan in tabel I vermeld en zijn in grafiek 1 uitgezet.

Uit grafiek 1 blijkt duidelijk dat het piezooxyde een hysteresis vertoont, die bij deze meetcyclus bij 80 Volt maximaal is ( $0.09 \mu\text{m}$ ). Om dit gedrag in de buurt van 80V nader te onderzoeken hebben we de volgende metingen verricht. Regel de spanning op het piezooxyde op resp. 80 - 82 - 84 - 86 - 88 - 90 - 88 - 86 - 84 - 82 - 80 Volt en meet telkens de verplaatsing van het perspexplaat.

Pool de spanning om en herhaal de meting.

Regel vervolgens de spanning op resp. 90 - 88 - 86 - 84 - 82 - 80 - 82 - 84 - 86 - 88 - 90 Volt en meet de verplaatsing van het perspexplaatje. Pool de spanning weer om en herhaal de meting. Jedere meetserie is driemaal uitgevoerd.

De meetresultaten staan vermeld in tabel II en zijn in grafiek 2 uitgezet.

De maximale hysteresis bedraagt nu ongeveer  $0.02 \mu\text{m}$ . Deze laatste metingen (van 80-90-80 en van 90-80-90 volt in stappen van 2 volt) zijn uitgevoerd om het gedrag van het piezooxyde te leren kennen bij een spanning die tijdens het definitieve gebruik van de Laseropstelling op zal gaan treden.

We zullen in het onderstaande dan de hand van een berekening laten zien, waarom we het gedrag van het piezooxyde hebben bestudeerd bij een spanningsverschil van 10 Volt.

Uit de literatuur [3, 4, 5, 6, 8] blijkt dat we een scanbreedte van 50-100 MHz nodig hebben. Deze scanbreedte ( $\Delta \nu$ ) volgt uit de relatie  $\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta L}{L}$ .

- $\Delta \nu$  = scanbreedte [Hz]
- $\nu$  = frequentie =  $c/\lambda = 5 \times 10^{14}$  Hz
- $\lambda$  = golflengte
- $\Delta L$  = verandering van de resonatorlengte
- $L$  = resonatorlengte (= 300 mm).

We nemen nu  $\Delta \nu = 75 \times 10^6$  Hz.

$$\Delta L = L \times \Delta \nu / \nu = 3 \times 10^5 \times 75 \times 10^6 / 5 \times 10^{14} = 0.045 \mu\text{m}.$$

De gevoeligheid van het piezooxyde is  $0.004 \mu\text{m/V}$ .  
 We hebben dus een spanningsverschil  $\Delta V$  nodig van  $0.045 / 0.004 \approx 10$  Volt.

Meting van het temperatuurverschil tussen de plasmabuis en het bed en de aluminium justeerplaat en het bed bij de bestaande constructie.

Om een indruk te krijgen van het temperatuurverschil binnen de Laserconstructie hebben we een tweetal metingen uitgevoerd aan de bestaande experimentele constructie. We hebben de volgende temperatuurverschillen gemeten:

- 1. tussen de buitenkant van de plasmabuis en het bed.  $(T_1 - T_2)$  [zie fig 2]
- 2. tussen de aluminiumplaat die zorgt voor de justage van de plasmabuis en het bed.  $(T_1' - T_2)$ . [zie fig 3]

Deze metingen zijn verricht met behulp van de opstelling, zoals die schematisch is weergegeven in fig. 2. De aansluitpunten van het thermokoppel zijn, voorzien van warmtegeleidende pasta, met plakband op de meetpunten geplakt.

De metingen gaven de volgende resultaten:

- 1.  $T_1 - T_2 = 85.5^\circ C$  (maximaal)
- 2.  $T_1' - T_2 \approx 11^\circ C$  (maximaal)

Deze resultaten staan vermeld op grafiek 3 en 4. Zowel de opwarmings- als de afkoelingskrommen zijn in beide gevallen geregistreerd met behulp van een recorder. De tijdconstanten van deze krommen zijn op grafiek 3 en 4 vermeld.

Het temperatuurverschil  $T_1' - T_2$  hebben we gemeten om een indruk te krijgen van de warmte overdracht tussen de plasmabuis en de aluminiumjustage-inrichting. Een dergelijke constructie wordt namelijk ook in de ontworpen Laserconstructie toegepast. De plasmabuis wordt d.m.v de thermoplastische polyester ARNITE gescheiden van de aluminium justage inrichting.

Uit de metingen blijkt dat  $T_1' - T_2 \ll T_1 - T_2$ . Dit betekent dus dat ARNITE een bijzonder goede warmteisolator is. Dit is voor onze constructie van bijzonder groot belang.

## 4. De Laserconstructie. (zie fig. 3)

### 4.1. Algemeen.

Het frame van de laserconstructie en alle onderdelen die de justage van de spiegels, de jodiumabsorptiecel en de plasmabuis mogelijk maken zijn geconstrueerd volgens het principe van "kinematical design".

We gaan er hierbij vanuit dat een ruimtelijk lichaam zes graden van vrijheid heeft.

Door nu zes goed gekozen steunpunten te construeren is het lichaam kinematisch volledig bepaald. Door vijf steunpunten te kiezen heeft het lichaam één mogelijke bewegingsrichting. Deze bewegingsrichting kan een translatie of een rotatie zijn. Met vier steunpunten zijn twee bewegingen mogelijk etc.

De afstand tussen de beide spiegels (de resonatorlengte) wordt bepaald door drie staven die in twee steunplaten passen. Om deze staven zijn drie pijpen bevestigd. Op deze pijpen rusten de justageinrichting voor de plasmabuis en de jodiumabsorptiecel. Op deze manier worden de drie staven mechanisch niet belast. De staven bestaan uit een materiaal met een zo klein mogelijke uitzettingscoëfficiënt, opdat de resonatorlengte nagenoeg niet verandert bij temperatuurschommelingen. Het materiaal waaruit de drie staven vervaardigd zijn heet ZERODUR.

Doordat we een staat-pgp constructie hebben gebruikt kunnen we indien dat noodzakelijk blijkt tevens een warmtewisselaar toepassen door een vloeistof tussen de staat en de pgp rond te pompen. Hierbij moeten we dan vooral letten op het voorkomen van trillingen in de laserconstructie ten gevolge van de circulerende vloeistof.

De hoofdlijnen van de constructie zijn nu aan bod gekomen. In het onderstaande zullen we de diverse constructieonderdelen in detail bespreken.



4.2. De Resonatorlengte.

De verandering van de resonatorlengte (alt.g.v. temperatuursfluctuaties wordt in hoofdzaak bepaald door de Lengteverandering van de 3 verbindingstaven t.g.v. deze temperatuurschommelingen. Willen we  $\Delta L$  zo klein mogelijk houden dan moeten wij ervoor zorgen dat het materiaal van de verbindingstaven een materiaal is met een zeer kleine uitzettingscoëfficiënt  $\alpha$ . Zerodur is een materiaal dat deze eigenschap heeft. ( $\alpha_{zerodur} = -0.2 \times 10^{-7} / K$  bij 273 - 323 K)

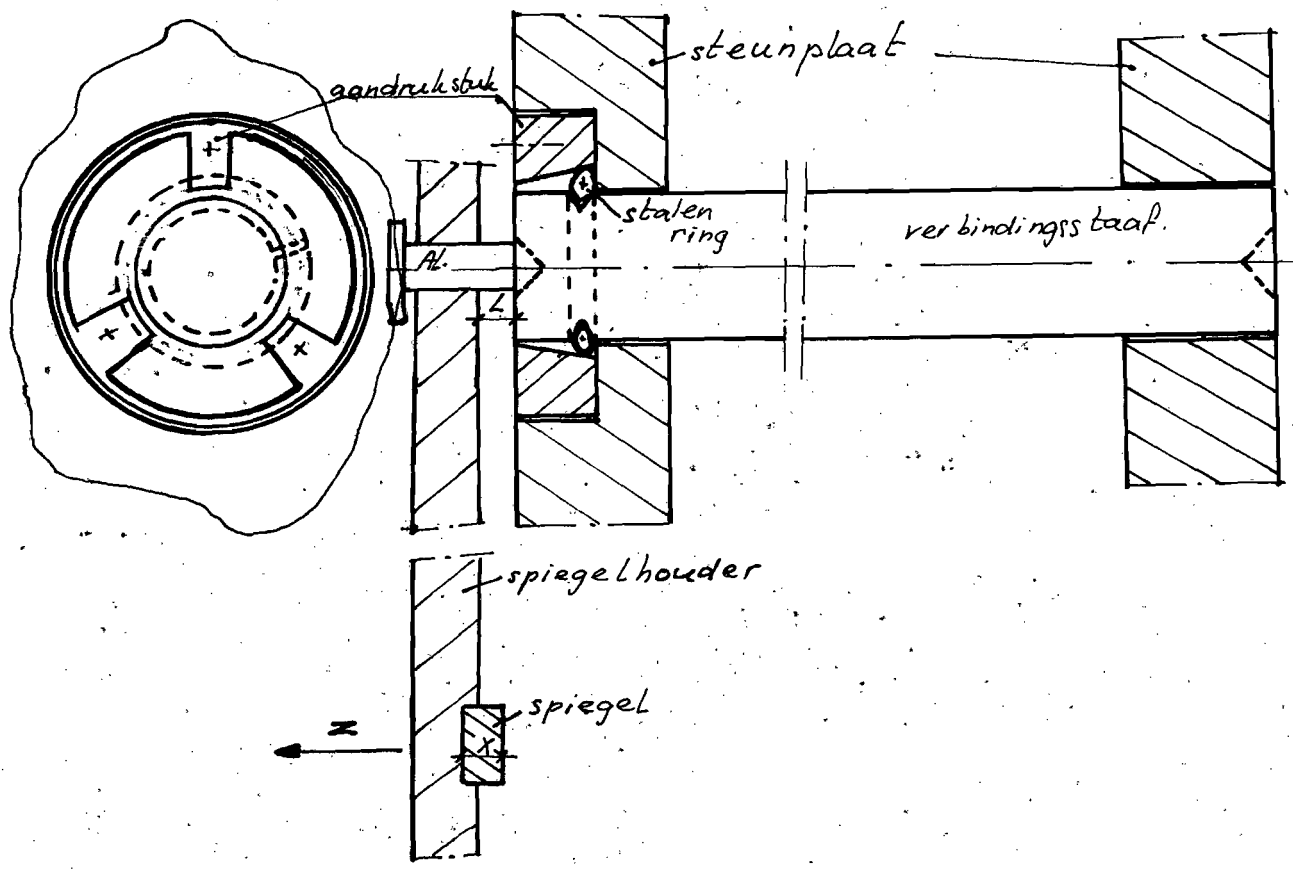
Uit de grafieken 3 en 4 blijkt dat bij een temperatuurverschil van 85.5 K tussen plasmabuïs en bed een temperatuurverschil van 10 K heerst tussen het bed en de justeerplaat. Gaan we voor het gemak even uit van een lineair temperatuurverloop, dan mogen we verwachten dat bij een temperatuurvariatie van 5 K van de plasmabuïs de temperatuur van de justeerplaat  $\frac{5}{85.5} \times 10 \approx 0.6 K$  varieert.

Deze temperatuurschommelingen zijn traag. Een en ander betekent dat:

$$\Delta L_{max} = L \times \Delta T_{max} \times \alpha = 3 \times 10^5 \times 0.6 \times 0.2 \times 10^{-7} \approx 0.004 \mu m$$

Deze lengteverandering kan d.m.v. het piezooxyde gemakkelijk bijgestuurd worden.

De verbindingstaven zijn bij één steunplaat kinematisch ondersteund en zijn met een glijpassing in de andere steunplaat gemonteerd. (zie onderstaande schets.)



Ook de maat  $(L-x)$  uit de schets op de vorige bladzijde bepaalt de resonatorlengte.

Onderstaande berekening toont dit aan. We nemen hierbij aan dat er een homogene temperatuurverdeling in de spiegelhouder heerst.

Beweging in de  $z$ -richting van de spiegel ( $z$ ) is:

$$L * \alpha_{AL} * \Delta T - x * \alpha_g * \Delta T$$

met  $\alpha_{AL} \sim \alpha_g = \alpha$  geldt:

$$z = (L-x) * \alpha * \Delta T$$

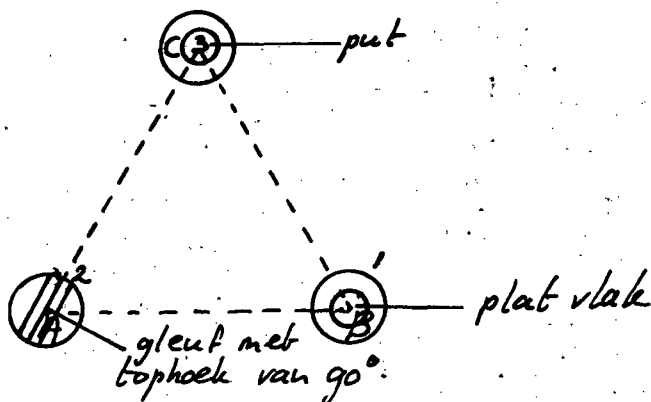
Wanneer we er nu voor zorgen dat  $L=x$  dan heeft deze zaak geen invloed op de resonatorlengte, wanneer de temperatuur varieert.

Een andere maatregel die getroffen is om de resonatorlengte zo konstant mogelijk te houden bij temperatuurvariaties is het feit dat de Laserconstructie door 3 kogels wordt ondersteund. Dit is gedaan om kromtrekken van de constructie te voorkomen bij optredende temperatuurverschillen. Bij de toegepaste kogeloplegging bewegen de steunplaten meteen mee in axiale richting (de rolweerstand van een kogel is immers verwaarloosbaar klein).

Wanneer de steunplaten rechtstreeks contact zouden maken met het bed wordt er t.g.v. de niet te verwaarlozen wrijving tussen plaat en bed een kracht in axiale richting op de steunplaat uitgeoefend. Deze kracht veroorzaakt een kromtrekken van de constructie. De invloed hiervan is echter zeer klein.

#### 4.3. Het justeren van de spiegels.

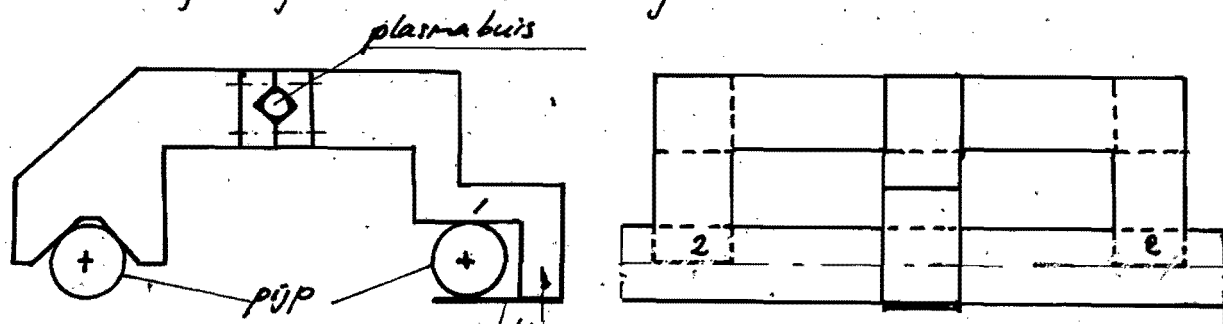
De spiegels zijn in spiegelhouders gemonteerd. Jedere spiegelhouder wordt d.m.v. 3 Aluminium stelschroeven gejusteerd. De stelschroeven rusten rechtstreeks op de verbindingstaven. De spoed van de stelschroeven bedraagt 0.5 mm. De afstand tussen de steunpunten is 100 mm. Deze maten zijn zo gekozen i.v.m. de vereiste instelnaauwkeurigheid van de spiegels [1]. De steunpunten zijn zo gekozen dat de spiegelhouder kinematisch volkomen bepaald is (zie onderstaande schets).



De bijgeschreven cijfers geven het aantal vrijheidsgraden aan dat door de desbetreffende ondersteuning wordt verhinderd. Jedere spiegelhouder wordt d.m.v. 2 trekveren tegen de steunplaat getrokken. De trekveren zijn binnen de driehoek ABC gemonteerd. Op deze manier werkt het draaimoment dat door de trekveren veroorzaakt wordt in de juiste richting t.o.v. de steunpunten.

#### 4.4. De justage van de plasmabuis en de jodium absorptiecel.

De justageinrichtingen van de plasmabuis en de jodium absorptiecel zijn kinematisch gezien volkomen identiek. Zij zijn hieronder geschetst.



De bladveer zorgt ervoor dat de justageinrichting niet in axiale richting kan verschuiven. De beide constructieonderdelen zijn van aluminium gemaakt om zo licht mogelijk te kunnen construeren. Ze rusten op de drie verbindingspijpen. De verbindingsstaven worden dan namelijk niet belast.

### 5. Opmerkingen

De resonatorlengte wordt bepaald door de lengte van de plasmabuis en die van de  $J_2$ -absorptiecel.

De lengte van de absorptiecel wordt bepaald door het benodigde signaal uit de laser. De lengte van de absorptiecel bepaalt op zijn beurt de lengte van de plasmabuis. De berekeningen hiervoor zijn te vinden in [1]. De rubberbalgjes zijn aangebracht om verontreiniging van de spiegels en de Brewster-vensters [1] te voorkomen. Tevens voorkomen we d.m.v. de balgjes snelle variaties van de brekingsindices die "kwispielen" van de laserbundel kunnen veroorzaken.

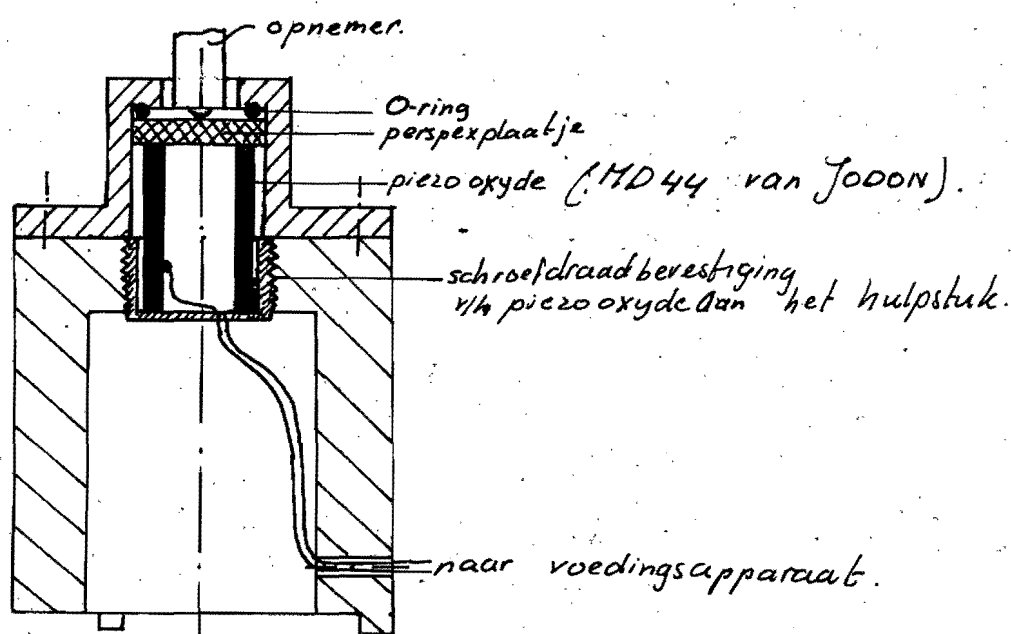
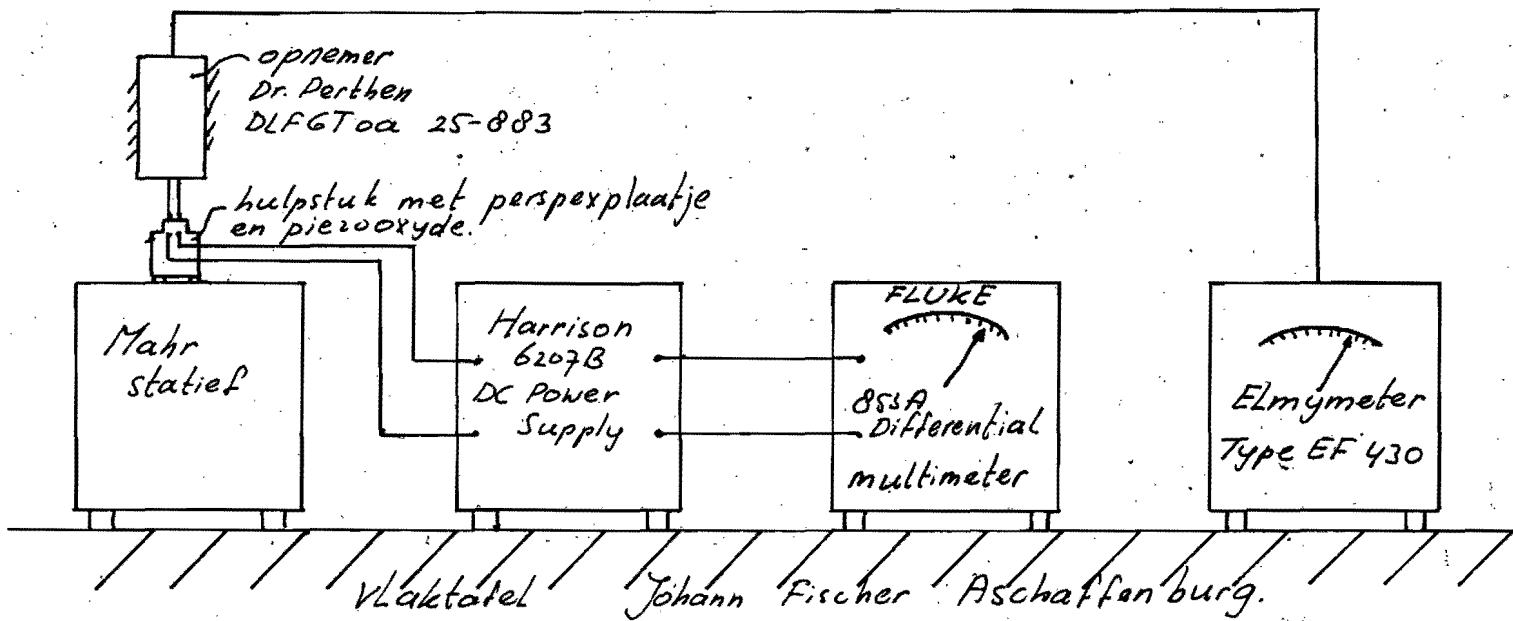
In de door G. v.o. MOLENGRAFT vervaardigde laserconstructie zijn de drie verbindingstaven van INVAR vervaardigd. Dit komt omdat de levertijd van het zerodur  $\pm$  3 maanden was. We wilden de constructie echter binnen die termijn testen. Zodra het zerodur geleverd is zullen de invar-staven door zerodur-staven worden vervangen.

De nauwkeurigheid van de laserwerking moet nog worden gemeten. Dit zal zo spoedig mogelijk gebeuren. Het is namelijk de bedoeling deze laser te gebruiken bij de meting van de in het laboratorium voor lengtemeting vervaardigde streeplijnen.

X

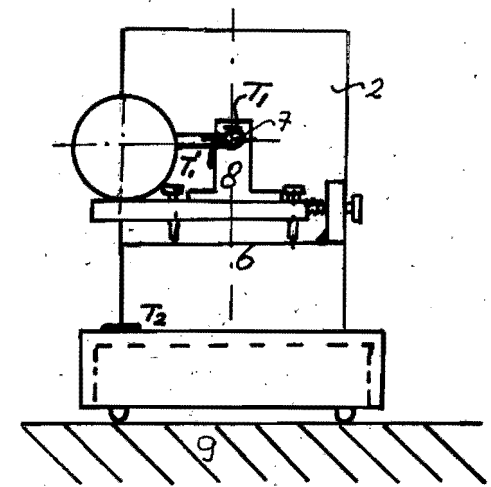
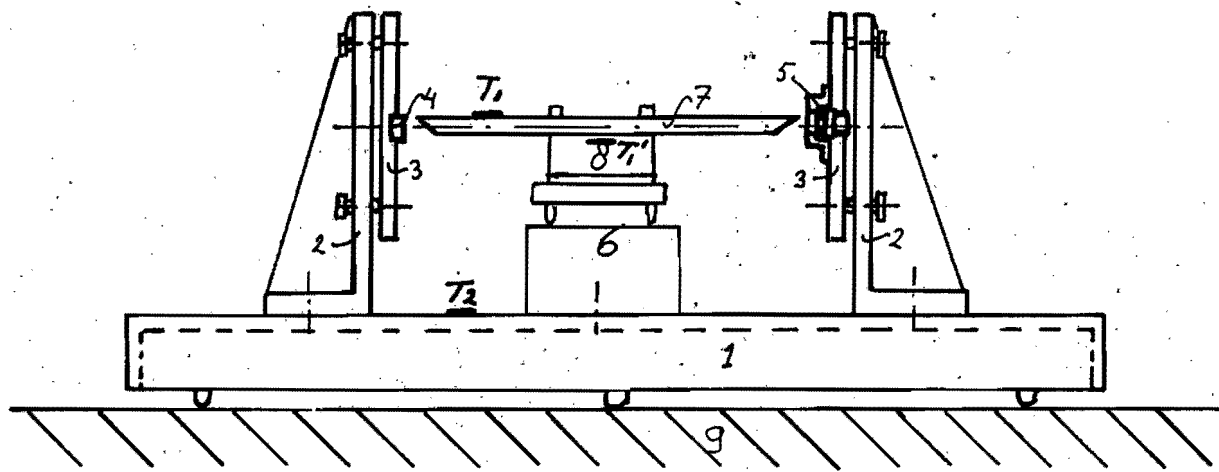
Literatuurlijst.

- 1. J. Jansen : Aanzet tot de bouw van een helium-neon  
P. Schellekens : Laser, waarbij de golflengte gestabiliseerd  
wordt op een jodium-absorptielijn.
- 2. Philips : Piezoelectric Ceramics.
- 3. J. Helmcke : Stabilisierung eines  $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ -Lasers durch  
F. Bayer-Helms : gesättigte Absorption in  $^{129}\text{J}_2$  Wellenlängen-  
bestimmung.
- 4. G.R. Hanes : Iodine hyperfine structure observed in  
C.E. Dahlstrom : saturated absorption at 633 nm.
- 5. A.J. Wallard : Frequency stabilisation of the helium-  
neon laser by saturated absorption in  
iodine vapour.
- 6. J.D. Knox : High-resolution saturation spectra of the  
Yoh-Han Pao : iodine isotope  $\text{I}_2^{129}$  in the 633 nm  
wavelength region.
- 7. W.R.C. Rowley : Wavelength values of the 633 nm Laser,  
A.J. Wallard : stabilized with  $^{127}\text{J}_2$  saturated absorption.
- 8. J.D. Knox : Absorption profiles and inverted Lamb dips  
Yoh-Han Pao : op  $\text{J}_2$  vapor at 633 nm as studied with  
a He-Ne Laser.
- 9. G.R. Hanes : Stability, Reproducibility, and Absolute  
K.M. Baird : Wavelength of a 633 nm He-Ne laser  
J. DeRemigis : Stabilized to an Iodine Hyperfine  
Component



Detailtekening van de montage  
van perspexplaatje en piezoxyde  
in het hulpstuk.

Fig 1. Proefopstelling voor het onderzoek naar het  
gedrag van het piezoxyde in belaste toestand.



- 1 = Bed
- 2 = Hoeksteen
- 3 = Justeerplaat
- 4 = Vaste Spiegel
- 5 = Spiegel, bewegbaar d.m.v. piezoxyde

- 6 = Blok ALuminium
- 7 = Plasmabuis
- 8 = Justeerplaat voor plasmabuis.
- 9 = Marmereen blad

$T_1$ : Aansluitpunt thermokoppel op plasmabuis.  
 $T_1'$ : Aansluitpunt thermokoppel op Al. justeerplaat  
 $T_2$ : Aansluitpunt thermokoppel op optisch bed.

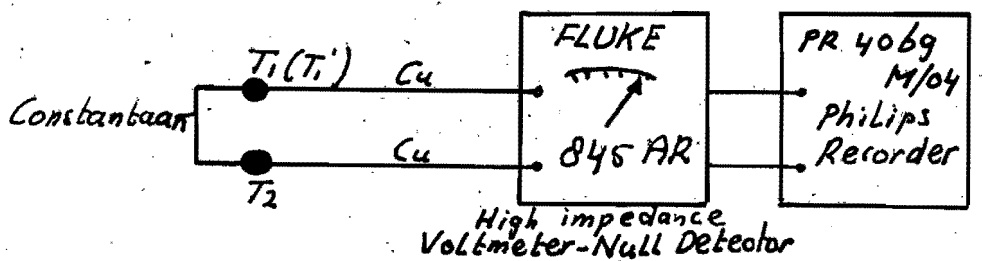
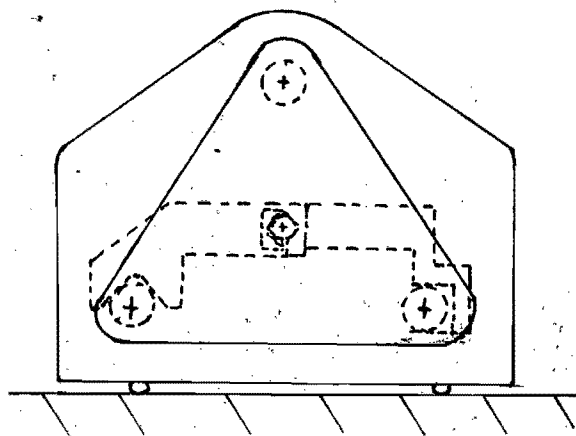
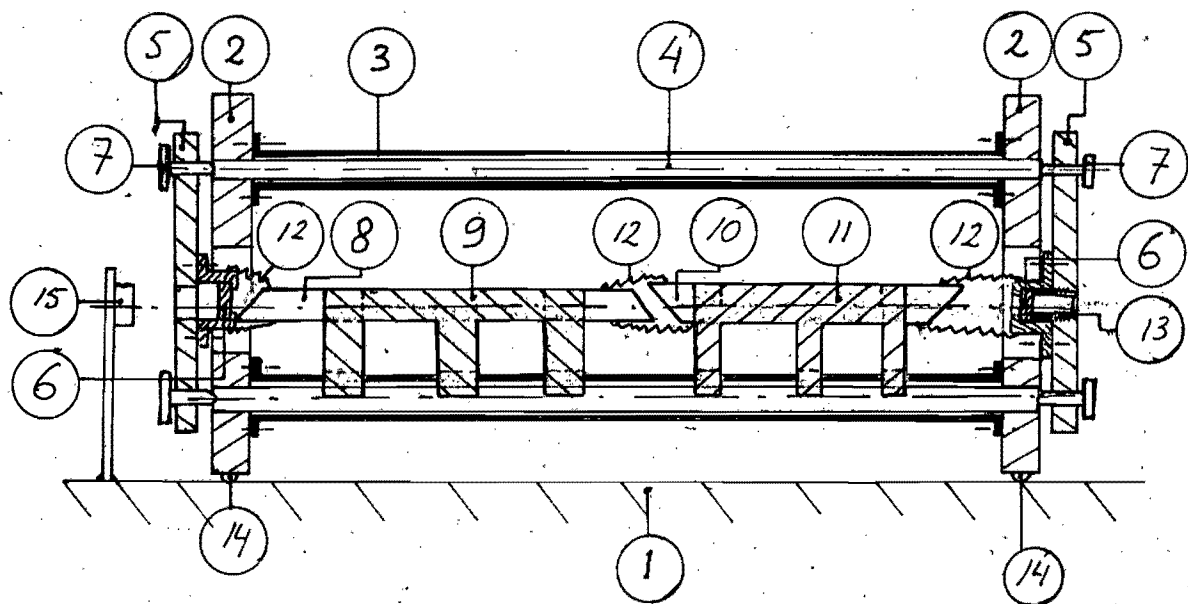


Fig. 2. Schema van de meting van het temperatuurverschil van de plasmabuis en het optisch bed en de aluminium justeerplaat voor de plasmabuis en het optisch bed.



1. Het bed
2. Steunplaat (2x)
3. Verbindingspijp (3x)
4. Verbindingsstaaf (3x)
5. Spiegelhouder (2x)
6. Spiegel (2x)
7. Stelschroef (6x)

8. Plasmabuis
9. Justageinrichting voor plasmabuis
10. I<sub>2</sub>-absorptiecel
11. Justageinrichting voor I<sub>2</sub>-absorptiecel.
12. Rubber balg (3x)
13. Piezooxyde
14. kogel (3x)
15. Fotocel.

**FIG. 3.** LASERCONSTRUCTIE WAARBIJ DE BELANGRIJKE ONDERDELEN SCHEMATISCH ZIJN WEERGEGEVEN.



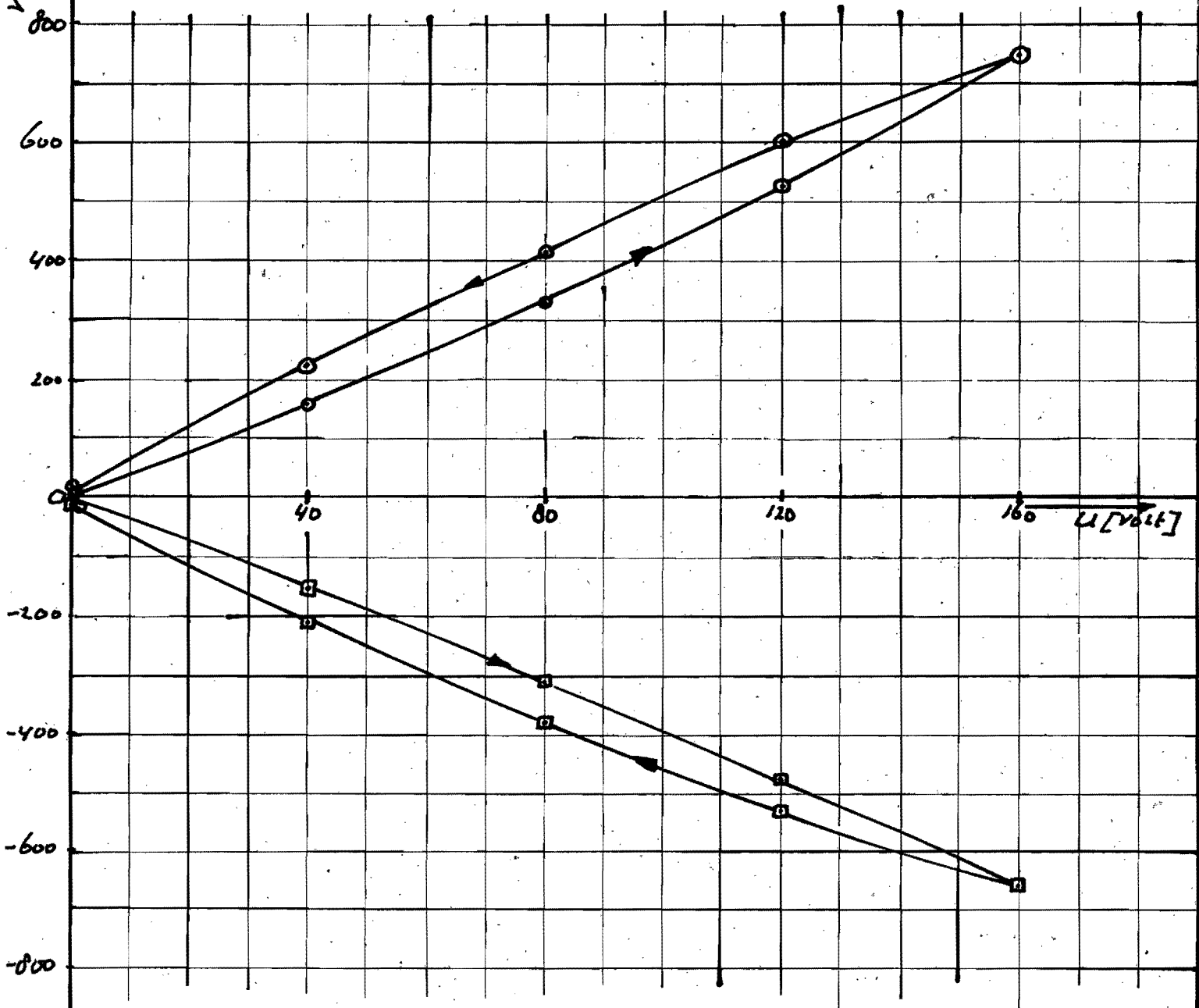
# Hysteresis van het Piezooxyde in belaste toestand

indrinking O-ring = 0.20 mm

Meetcyclus: 0 - 40 - 80 - 120 - 160 - 120 - 80 - 40 - 0 Volt.

⊙ : binnenmantel -  
⊠ : binnenmantel +

verplaatsing [nm]



grafiek 1.

# Hysteresis van het Piezo oxyde in belaste toestand

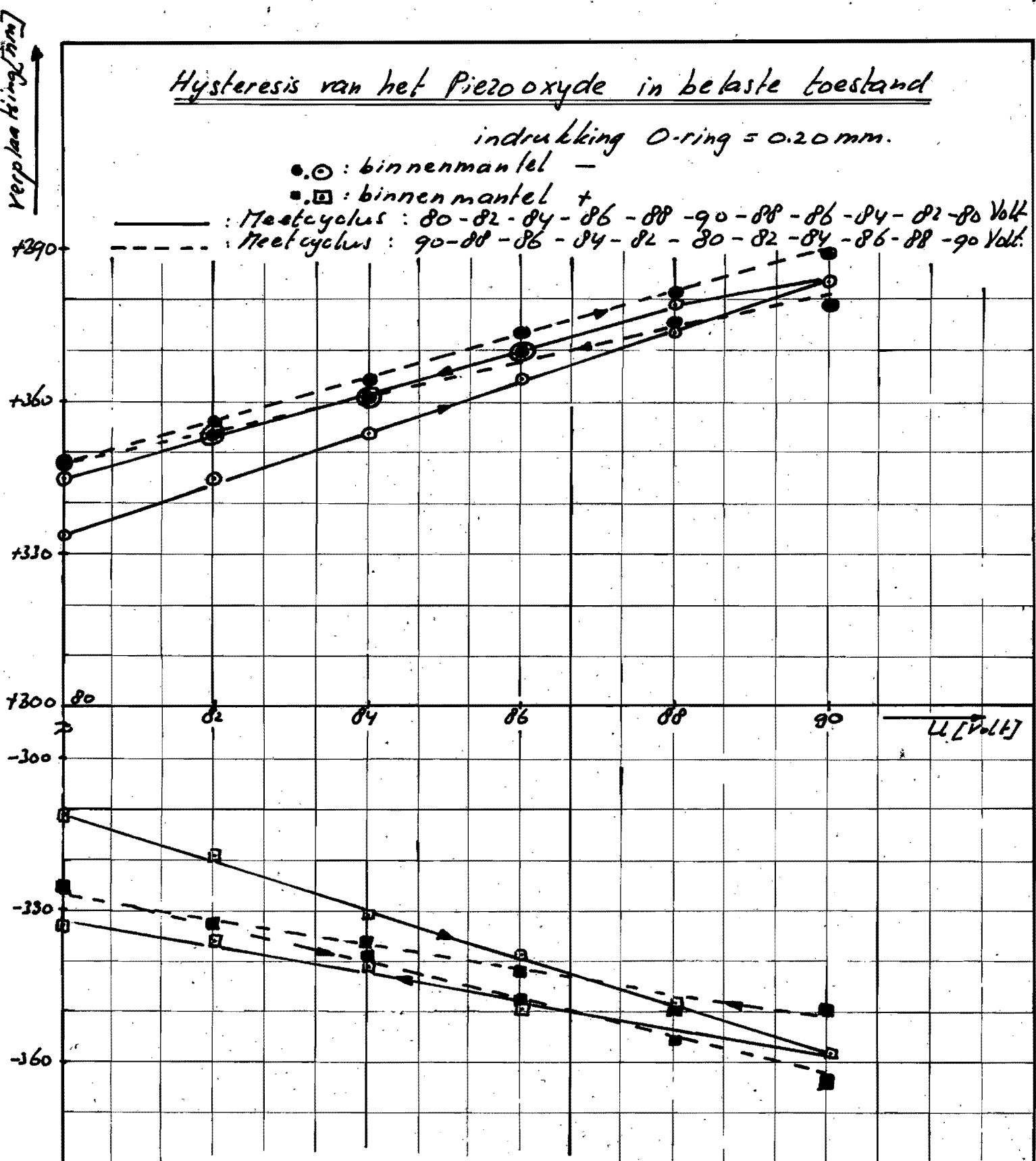
indrukking O-ring = 0.20 mm.

●○ : binnenmantel -

■□ : binnenmantel +

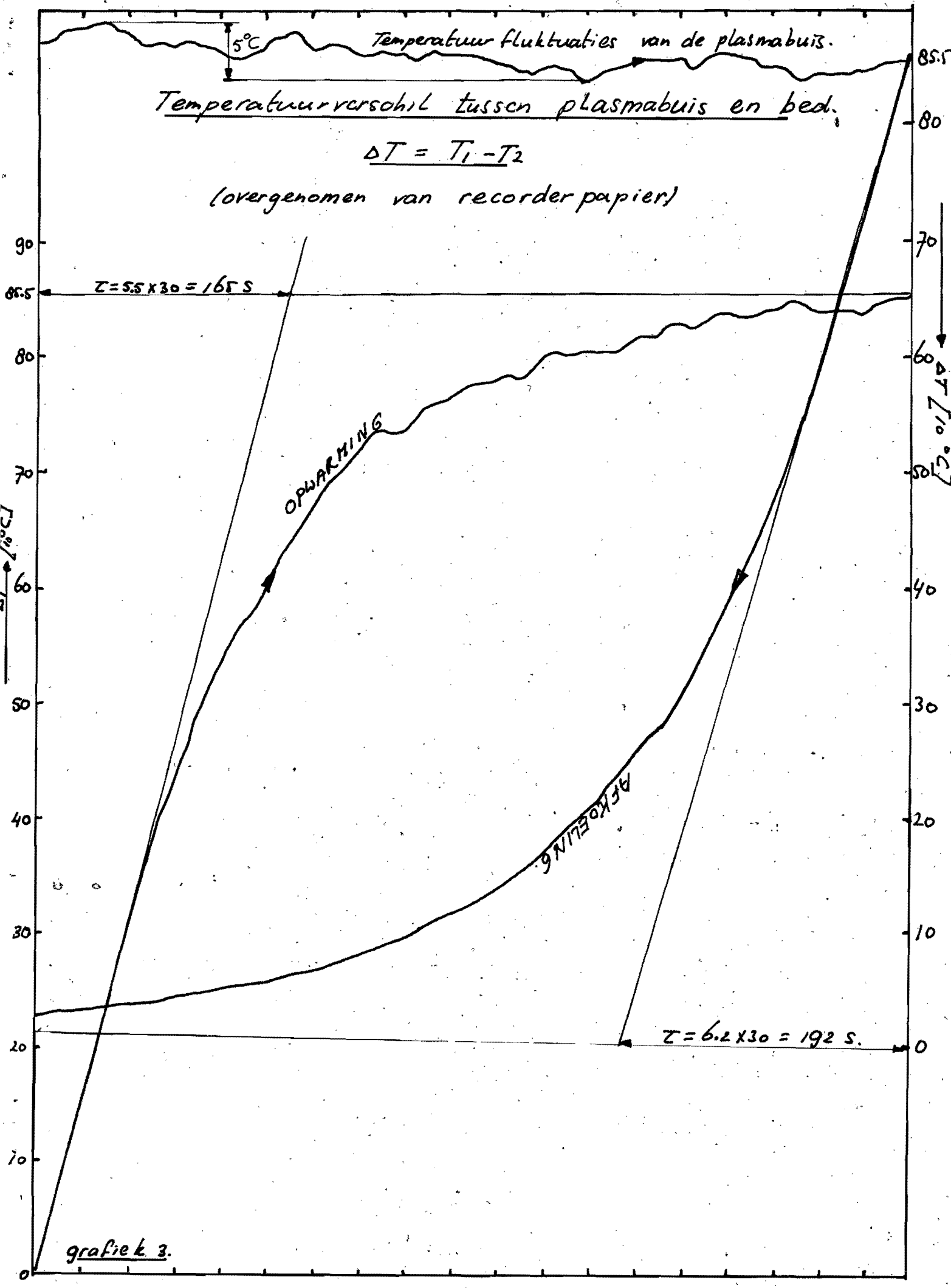
— : Meetcyclus : 80-82-84-86-88-90-88-86-84-82-80 Volt

- - - : Meetcyclus : 90-88-86-84-82-80-82-84-86-88-90 Volt



grafiek 2.

[30s] 7 ←

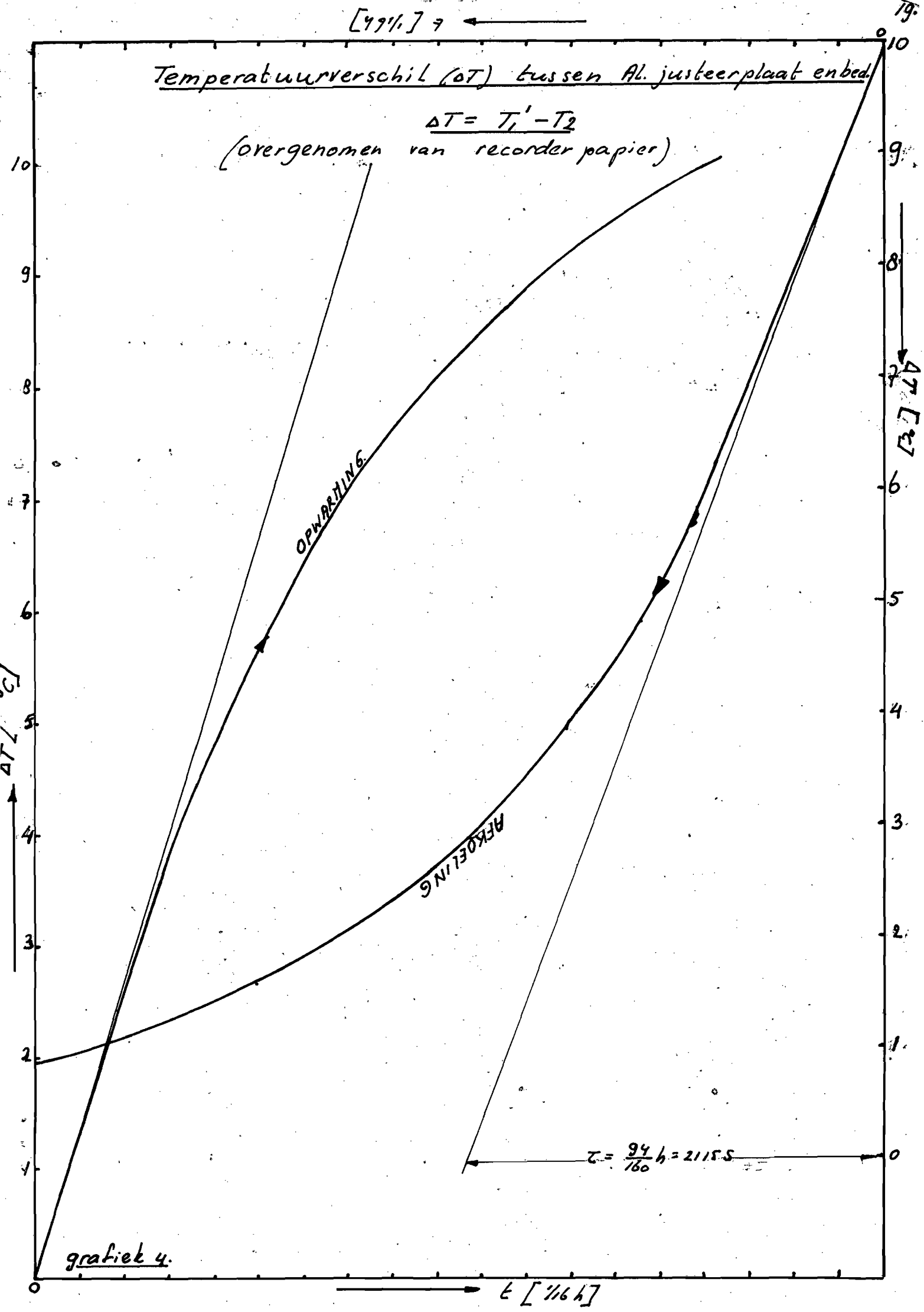


[99%] 7 ←

Temperatuurverschil ( $\Delta T$ ) tussen Al. justeerplaat en bed.

$$\Delta T = T_1' - T_2$$

(overgenomen van recorder papier)



OPWARMING

AFKOELING

$$t = \frac{94}{180} h = 2.112$$

grafiek 4.

$t$  [h]

$\Delta T$  [°C]

$\Delta T$  [°C]

## Uitslag Elmymeter [schaaldelen]

U [Volt]	binnenmantel +			binnenmantel -			$\bar{z}$ [binnenmantel +]		$\bar{z}$ [binnenmantel -]	
	1 <sup>e</sup> meting	2 <sup>e</sup> meting	3 <sup>e</sup> meting	1 <sup>e</sup> meting	2 <sup>e</sup> meting	3 <sup>e</sup> meting	[schaaldel.]	[ $\mu\text{m}$ ]	[schaaldel.]	[ $\mu\text{m}$ ]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	-18	-18	-18	+20	+18	+18	-18	-0.150	+18.7	+0.156
80	-37	-37	-36	+40	+39	+39	-36.7	-0.306	+39.3	+0.328
120	-58	-57	-56	+64	+63	+62	-57	-0.475	+63	+0.525
160	-80	-78	-78	+92	+89	+88	-78.7	-0.656	+89.7	+0.748
120	-65	-63	-63	+74	+70	+70	-63.7	-0.531	+71.3	+0.594
80	-47	-46	-45	+52	+50	+48	-46	-0.383	+50	+0.417
40	-26	-25	-24	+29	+26	+26	-25	-0.208	+27	+0.225
0	-3	-2	-2	+4	+2	0	-2.3	-0.019	+2	+0.017

TABEL I Verticale verplaatsing van het perspex plaatje ten gevolge van een spanning op het piezooxyde.

$d_{\text{perspex}} = 5.17 \text{ mm}$  ; indrukking O-ring = 0.20 mm.

De spanning op het piezooxyde is als volgt aangebracht:

0 - 40 - 80 - 120 - 160 - 120 - 80 - 40 - 0 Volt.

120 schaaldelen  $\cong 1 \mu\text{m}$

$\bar{z} = \text{gemiddelde meting} = \frac{1^{\text{e}} \text{ meting} + 2^{\text{e}} \text{ meting} + 3^{\text{e}} \text{ meting}}{3}$

Uitslag Elmymet [schaaldelen]

U [Volt]	binnenmantel +			binnenmantel -			$\bar{z}$ [binnenmantel+] [schaaldel] [ $\mu\text{m}$ ]		$\bar{z}$ [binnenmantel-] [schaaldel] [ $\mu\text{m}$ ]	
	1 <sup>e</sup> meting	2 <sup>e</sup> meting	3 <sup>e</sup> meting	1 <sup>e</sup> meting	2 <sup>e</sup> meting	3 <sup>e</sup> meting	[schaaldel]	[ $\mu\text{m}$ ]	[schaaldel]	[ $\mu\text{m}$ ]
80	-37	-38	-37	+40	+40	+40	-37.3	-0.311	+40	+0.333
82	-38	-39	-38	+42	+41	+41	-38.3	-0.319	+41.3	+0.345
84	-40	-40	-39	+43	+42	+42	-39.7	-0.331	+42.3	+0.353
86	-41	-41	-40	+44	+44	+43	-40.7	-0.339	+43.7	+0.364
88	-42	-42	-41	+45	+45	+44	-41.7	-0.348	+44.7	+0.373
90	-43	-43	-43	+46	+46	+46	-43	-0.358	+46	+0.383
88	-43	-43	-42	+46	+45	+45	-42.7	-0.356	+45.3	+0.378
86	-42	-42	-42	+45	+44	+44	-42	-0.350	+44.3	+0.369
84	-41	-41	-41	+44	+43	+43	-41	-0.342	+43.3	+0.361
82	-40	-41	-40	+43	+42	+42	-40.3	-0.336	+42.3	+0.353
80	-40	-40	-40	+42	+41	+41	-40	-0.333	+41.3	+0.345

90	-42	-42	-42	+46	+45	+45	-42	-0.350	+45.3	+0.378
88	-42	-42	-42	+46	+44	+45	-42	-0.350	+45	+0.375
86	-41	-41	-41	+45	+44	+44	-41	-0.342	+44.3	+0.369
84	-40	-41	-40	+44	+43	+43	-40.3	-0.336	+43.3	+0.361
82	-40	-40	-40	+43	+42	+42	-40	-0.333	+42.3	+0.353
80	-39	-39	-39	+43	+41	+41	-39	-0.325	+41.7	+0.348
82	-40	-40	-40	+44	+42	+42	-40	-0.333	+42.7	+0.356
84	-41	-41	-40	+45	+43	+43	-40.7	-0.339	+43.7	+0.364
86	-42	-42	-41	+46	+44	+44	-41.7	-0.348	+44.7	+0.373
88	-43	-43	-42	+47	+45	+45	-42.7	-0.356	+45.7	+0.381
90	-44	-44	-43	+48	+46	+46	-43.7	-0.364	+46.7	+0.389

TABEL II Verticale verplaatsing van het perspexplaatje ten gevolge van een spanning op het piezooxyde. 120 schaaldelen  $\cong 1 \mu\text{m}$   
 d perspex = 5.17 mm; indrukking O-ring = 0.20 mm  
 $\bar{z}$  = gemiddelde verplaatsing =  $\frac{1^e + 2^e + 3^e \text{ meting}}{3}$   
 1<sup>e</sup> meetcyclus: U = 80-82-84-86-88-90-88-86-84-82-80 Volt  
 2<sup>e</sup> meetcyclus: U = 90-88-86-84-82-80-82-84-86-88-90 Volt