

W. K. H. J. 1937 02

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

DE INVLOED VAN DE TREKKRACHT OP HET DEBIET
ENDE DIAMETER BIJ HET SPINNEN VAN GLASDRADEN

W. K. H. J. 1937 02
W. K. H. J. 1937 02
W. K. H. J. 1937 02
W. K. H. J. 1937 02

AFSTUDEERVERSLAG

H. BONNE (N)

januari 1966

LABORATORIUM VOOR FYSISCHE TECHNOLOGIE

original equation of motion.

Physical properties, which appear in these five equations and will be assumed to be determined by thermodynamic state equations, are fluid density, ρ ; specific heat at constant pressure, c_p ; heat absorption due to chemical reaction k , ΔH_k and fictitious enthalpy of stream n , h'_n . The definitions of these last two properties were given in section 1-3 in terms of partial molal enthalpies as

$$1-5.6 \quad \Delta H_k = \sum_{i=1}^I \bar{H}_i a_{ki}$$

$$1-5.7 \quad h'_n = \sum_{i=1}^I \bar{H}_i y_{ni} / \tilde{M}_i$$

If these properties are uniquely determined as functions of the system thermodynamic state variables: temperature, pressure and composition the system equations describe variations in the system variables: mass, M ; mass fractions, y_i ($i=1, \dots, I-1$); temperature, T ; pressure, P ; and velocity components, v_k as functions of the system variables and external conditions. A summary of the most probable external variables which could influence the system and have been represented in equations 1-5 is listed below.

- a) External variables which affect flow into and out of the system (F_n and v_{nk}) including external pressures P_n and other factors, ξ_n , such as control valve settings.
- b) External variables which affect diffusion across system boundaries including external compositions, y_{nm} , and other factors, γ_n , such as flow rates along the system boundaries.
- c) External variables which affect the heat transfer rates, Q_j , including external temperatures, T_j , and other factors, σ_j , such as coolant flow rates.
- d) Mechanical work done by the system, W .
- e) External forces with components, F'_k .
- f) Any parameters specified as characterizing the pressure-volume relation in eq.4.

The major restrictions on the application of system equations 1-5 arise from the assumption of no spacial variations within the system. Thus for example shear dissipation does not appear because the system was assumed to move with a uniform velocity. The restriction to regions of uniform state should not be taken too literally, however, since there are

cases where quite large spacial variations can be tolerated. Indeed the heat conduction and diffusion terms in the equations may cause quite large temperature and concentration gradients near (but within) the system boundaries. If the mass contained in these regions is small in comparison to the bulk of the system (with approximately uniform state) then the essential role of the regions is that of a resistance. In other cases where there is no large region of uniform state conduction and/or diffusion may occur throughout the system. The resistances then are distributed throughout the volume. One may still (for certain types of disturbances at least) replace the real distributed resistance system with a model in which resistance effects and inertial effects are separated. The latter process is the basis of many finite difference schemes for the solution of conduction problems. Such a substitution must be justified, however. For simple conduction phenomena (one dimensional and constant physical properties) conditions under which finite difference schemes are allowable have been analysed in detail. In more complicated cases one must rely on less quantitative means for estimating errors. This subject will be considered in more detail in the section on continuous systems (3-4).

We will conclude this chapter with several examples illustrating the use of equations 1-5 to derive the system equations for some important chemical processes. The general equations will be simplified in three stages for use in chemical reactor studies. First those terms which can be neglected in most chemical reactors with uniform state will be dropped. Then simple forms of the relations to determine property values, flow rates, heat transfer rates and reaction rates will be used to develop a restricted set of equations. Finally specific examples of reaction schemes and flow patterns will be considered.

In a continuous flow, stirred chemical reactor the following assumption may usually be justified providing the reactor contents are mixed to a sufficient degree of homogeneity:

- a) the kinetic energy and mechanical work terms in the energy balance may be neglected;
- b) diffusion across system boundaries may be neglected;
- c) either the volume of the system is constant and the fluid is a gas or the pressure in the system is imposed externally and the fluid is a liquid.

DE INVLOED VAN DE TREKKRACHT OP HET DEBIET

EN DE DIAMETER BIJ HET SPINNEN VAN GLASDRADEN.

AFSTUDEERVERSLAG

Laboratorium voor Fysische Technologie

H.Bonne (N)

januari 1966

Samenvatting.

Dit onderzoek is opgezet om tot een beter inzicht te komen in het spinproces van dunne glasdraden, zoals dat in de glasvezel-industrie wordt toegepast.

Men maakt hier glasdraden met een diameter van ca $10 \cdot 10^{-6}$ m door de draad met een snelheid van ongeveer 50 m/sec. uit een spinopening te trekken (diameter ca $2 \cdot 10^{-3}$ m), die onder een oven met vloeibaar glas is aangebracht.

De variabelen, die dit proces beheersen, zijn :

1. De fysische eigenschappen van het gebruikte glas.
2. De temperatuur van de spintuit.
3. De afmetingen van de spintuit.
4. De statische druk van het glas op de spinplaat.
5. De kracht, waarmee de draad uit de spinopening wordt getrokken.

In hoofdstuk I is de meetopstelling beschreven.

De oven wordt elektrisch gestookt; het warmtetransport naar het glas vindt voornamelijk plaats door straling van de siliciumcarbide verwarmingselementen, die boven het glasbad zijn gemonteerd.

Om oververhitting van de staven te voorkomen, is een temperatuurregeling toegepast.

De spinplaat is gemaakt van Pt - 13% Rh. en is voorzien van drie spinopeningen van verschillende diameter. De verwarming geschiedt door Ohmse warmteontwikkeling tengevolge van een door de spinplaat geleide elektrische stroom (ca 3000 A.).

Daar de temperatuur van de spintuit van grote invloed is op het spinproces, is een temperatuurregeling noodzakelijk. De regelaar stuurt een transducer, die via een transformator de stroom voor de spinplaat levert. De temperatuur van de spinplaat kan tot ca 1300°C opgevoerd worden met een nauwkeurigheid van $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

*De spintuit gebouwd door ...
hoe gemeten?
zie label Blk 56*

Voor het trekken van de glasdraad uit de spinopeningen zijn twee methoden toegepast, namelijk één, waarbij de draad tussen twee wrijvingswielen wordt geleid, die met bekende snelheid draaien en één, waarbij de draad op een trommel wordt gewikkeld. De methode met wrijvingswielen is goed bruikbaar bij lage snelheden. Bij hoge snelheden geeft het opvangen van de gesponnen draad moeilijkheden. Met de opwikkeltrommel kan bij treksnelheden van 0,5 m/sec. tot 50 m/sec. gemeten worden.

Om de trekkracht in de draad te kunnen meten, is een trekkrachtmeter ontwikkeld. Omdat een schoon glasoppervlak een zeer hoge statische wrijving vertoont (2) moet de glasdraad gesmeerd worden. Met de trekkrachtmeter kan tot draadsnelheden van 50 m/sec. gemeten worden.

Voor het meten van het glasniveau in de oven is een hoogtemeter ontworpen, waarmee continu de stand van het glasniveau kan worden gemeten. De verstelling van de taster geschiedt met behulp van een servosysteem. Met de hoogtemeter kunnen hoogteverschillen op $0,3 \cdot 10^{-3}$ m gemeten worden. De absolute stand van het glasniveau kan worden bepaald op $\pm 2 \cdot 10^{-3}$ m.

In hoofdstuk 2 is de meting van de viscositeit en de oppervlaktespanning beschreven. (5)

Het glas blijkt zich in het beschouwde temperatuurgebied (1000°C tot 1300°C) Newtons te gedragen, terwijl het verband tussen de viscositeit en de temperatuur exponentieel is. In hetzelfde temperatuurgebied verloopt de oppervlaktespanning weinig; de gemiddelde waarde bedraagt 0,28 N/m.

In hoofdstuk 3 zijn de metingen aan het uitstromende glas beschreven.

In eerste instantie is bij constante statische druk en spintuitdiameter het verband tussen massadebiet en treksnelheid gemeten met de spintuittemperatuur als parameter; met de trekkrachtmeter is de bijbehorende trekkracht in de draad bepaald.

Verder zijn metingen gedaan aan de glaspegels, die aan de spintuit ontstaan door vrije uitstroming onder invloed van de zwaartekracht. Hieruit kan het massadebiet en de draaddiameter als functie van de trekkracht bepaald worden.

Het blijkt, dat tengevolge van kleine trekkrachten in de draad (ordegrootte 10^{-2} N) de debieten door de spintuit ca 2 maal groter zijn dan die, gemeten bij trekkracht = 0.

In hoofdstuk 4 is een theoretische beschouwing gewijd aan het uitstroomverschijnsel. Hiermee kan het verband tussen debiet en trekkracht kwalitatief verklaard worden.

Bij grote spinsnelheden blijkt het debiet vrijwel constant te zijn. De trekkracht wordt bepaald door en is evenredig met de treksnelheid. Bij kleine spinsnelheden is het debiet sterk afhankelijk van de trekkracht.

Aangezien vrijwel alle metingen slechts één maal zijn uitgevoerd, moet met het trekken van kwantitatieve conclusies de nodige voorzichtigheid betracht worden. De metingen, die in dit rapport beschreven zijn, dienen eerder gezien te worden als een inleiding tot een uitgebreid meetprogramma, waarin ook de invloed van de spintuitafmetingen en de statische druk op de spinplaat nader moet ^{ten} worden onderzocht.

Inhoud.

	pagina
Samenvatting	1
Inhoud	4
Inleiding	6
Hoofdstuk 1 Meetopstelling en Instrumentatie	8
1.1 De spinoven.	8
a. Constructie.	
b. Verwarming en temperatuurregeling.	
1.2 De spinplaat.	13
a. Inleiding.	
b. Verwarming.	
c. De temperatuurregeling van de spinplaat.	
1.3 Het meten van de hoogte van het glasniveau in de glasoven.	23
a. Principe en constructie.	
b. IJking van de niveaumeter en invloed van de uitwendige parameters op de aanwijzing.	
1.4 Het trekken van de glasdraad.	30
a. Draadtrekmechanisme met wrijvingswielen.	
b. Draadtrekmechanisme, waarbij de draad op een trommel wordt gewikkeld.	
1.5 Het meten van trekkracht in de draad.	35
a. Constructie van de trekkrachtmeter.	
b. IJking van de trekkrachtmeter.	
Hoofdstuk 2 Bepaling van de viscositeit en de oppervlaktespanning van "E" glas.	41
2.1 Het meten van de viscositeit.	41
a. Meetmethode.	
b. Meetopstelling.	
c. Verwerking van de waarnemingen.	
2.2 Meting van de oppervlaktespanning.	46
a. Meetmethode en opstelling.	
b. Verwerking van de waarnemingen.	
Hoofdstuk 3 Metingen aan het uitstromen van glas uit een spinopening.	48
3.1 Inleiding.	48
3.2 Meting van het debiet als functie van de treksnelheid met het draadtrekmechanisme.	50
3.3 Meting van de trekkracht in de draad als functie van de treksnelheid.	52
3.4 Meting van het verband tussen debiet en trekkracht bij verschillende spinplaattemperaturen.	55

	pagina
3.5 Bepaling van het verband tussen draad- diameter en trekkracht.	58
Hoofdstuk 4 Theoretische achtergrond en discussie.	61
4.1 Energiebalans.	61
4.2 Discussie.	66
Hoofdstuk 5 Conclusies en aanbevelingen.	69
a. De spinoven.	
b. De spinplaat.	
c. De niveaumeter.	
d. Het opwikkelmechanisme.	
e. De trekkrachtmeter.	
f. De viscositeit.	
g. De oppervlaktespanning.	
h. De meetresultaten.	
Appendix I Dynamisch gedrag van het systeem spinplaat- lastrafo-transductor-stuurstroomgever.	73
Appendix 2 Fabricage van de taster van de niveaumeter.	80
Literatuur	83
Lijst van gebruikte symbolen.	84

Inleiding :

De grote vlucht, die de toepassing van polymeren als constructie-materiaal genomen heeft, is voor een deel te danken aan de uitstekende mechanische eigenschappen, die worden verkregen door het toepassen van een wapening van glas.

Voor de wapening worden dunne getrokken glasdraden gebruikt (diameter ca $10 \cdot 10^{-6}$ m), omdat glas in deze vorm de grootste treksterkte heeft (2) en de tengevolge van buiging optredende spanningen bij dunne draden klein zijn.

Het spinnen van deze glasdraden berust op gedwongen uitstroming, onder invloed van een trekkracht in de draad, uit een spinopening, waarboven zich een laag vloeibaar glas bevindt. De trekkracht ontstaat, doordat de draad met grote snelheid uit de spinopening wordt getrokken (ca 60 m/sec.)

De meniscus van de uitstromende glasstraal vertoont een sterke contractie; de diameters van de spinopening van de vaste glasdraad verhouden zich als 200 : 1.

De variabelen, die het spinproces beheersen zijn :

1. De fysische constanten van de gebruikte glassoort.
2. De temperatuur van de spintuit.
3. De afmetingen van de spintuit.
4. De statische druk op de spinplaat.
5. De kracht, waarmee de draad uit de spinopening wordt getrokken.

Van de fysische achtergrond van het spinproces is weinig bekend; de in de glasindustrie toegepaste waarden van bovengenoemde variabelen berusten op empirie.

Dit onderzoek is opgezet in opdracht van prof.dr.ir. W.J. Beek. Het doel is om langs experimentele weg de invloed van de varia-

belen te bepalen en eventueel op grond hiervan een theorie te ontwikkelen, die het spinproces beschrijft.

Bij de bouw van de meetopstelling is voortgebouwd op het werk van ir. W.H. van Houwelingen (1), die een experimenteeroven geconstrueerd en een niveaumeter ontworpen heeft.

Bij de dimensionering van de opstelling is uitgegaan van de in de glasindustrie gebruikelijke waarden van genoemde grootheden, die hier echter over een zo groot mogelijk gebied gevarieerd kunnen worden.

De N.V. Silenka te Hoogezand heeft hierbij steun verleend door het verschaffen van gegevens en materialen. Tevens heeft dit bedrijf de spinplaat geassembleerd.

Hoofdstuk 1.

Meetopstelling en Instrumentatie.

1.1 De spinoven.

a. Constructie.

De constructie van de spinoven is gebaseerd op ervaringen, opgedaan met de door Van Houwelingen (1) gebouwde experimenteeroven.

Zowel voor het frame, de bemetseling en de isolatie, als voor de verwarming en de temperatuurregeling is gebruik gemaakt van dezelfde constructies, materialen en schakelingen.

Figuur 1 geeft de hoofdafmetingen van de oven. Hierin is tevens aangegeven op welke wijze het verstelmecanisme van de niveaumeeter (1.3) bevestigd is.

De figuren 2 a en b tonen de inwendige constructie van de spinoven. De gebruikte materialen zijn hierin aangegeven.

De smeltruimte van de oven is bekleed met zirkoonsilikaatsteen (heavy zircon). Dit materiaal is toegepast i.v.m. de corrosieve eigenschappen van het gebruikte borosilikaatglas (E-glas). Deze voering is 20 mm dik. Tengevolge van de slechte bewerkbaarheid van dit materiaal kunnen geen hoge eisen gesteld worden aan de toleranties van de onderdelen. De voering wordt met vuurvaste specie gemetseld op een steunlaag van silimanitesteent; de naden in de voering worden afgesmeerd met specie. De chamotte isolatiesteent is los gestapeld. Tussen de hoekstalen van het ovenframe zijn plaatijzeren deksels aangebracht. Deze deksels en de bodem van de oven zijn aan de buitenzijde geïsoleerd met glaswol.

b. Verwarming en temperatuurregeling.

Het glas wordt verwarmd door straling van de siliciumcarbide verwarmingselementen, die boven het glasbad zijn gemonteerd. De staven zijn door doorlopende gaten van 15 mm ϕ in de oven geschoven. Om te voorkomen, dat de staven bij hoge temperatuur door de basische steent worden aangetast, (Zie figuur 3) zijn de uiteinden

bekleed met asbestkous.

Voor de verwarming zijn acht staven gebruikt, die in twee groepen van vier gesplitst zijn. De vier staven in iedere groep zijn in serie geschakeld en worden gevoed uit een variac. De stroom door de staven kan worden afgelezen op een Amperemeter.

Figuur 4 geeft het elektrische schema van de ovenverwarming.

Tabel I geeft het toegestane vermogen per staaf als functie van de oventemperatuur.

De temperatuur van het vloeibare glas wordt gemeten met een thermokoppel (Pt-Pt-10% Rh), dat is ingebouwd in een beschermhuls van Pt-10% Rh.

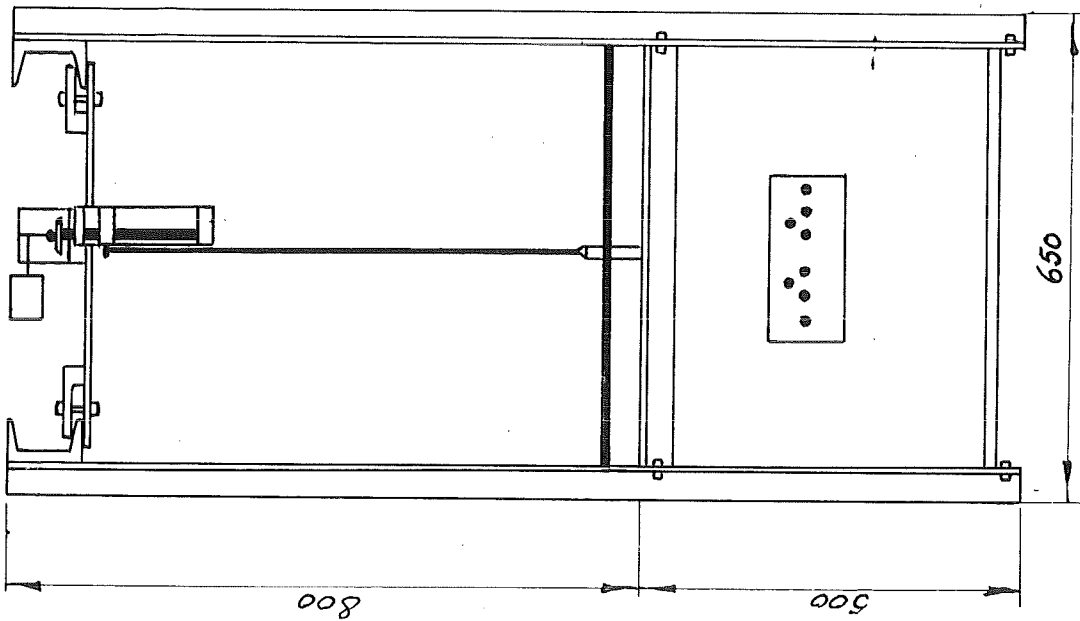
De thermospanning wordt afgelezen op een Honeywell recorder, die is voorzien van een nulpuntsonderdrukking, teneinde het meetbereik te vergroten bij constante schaalwaarde. Als regelaar wordt een mV meter gebruikt, die is voorzien van een valbeugelmecanisme. Wanneer de temperatuur boven de ingestelde waarde stijgt, bekrachtigt de regelaar een relais, waardoor de stroom door een groep van vier staven wordt uitgeschakeld. De oven is beveiligd tegen oververhitting door een schakeling in de regelaar, die het relais bekrachtigt bij onderbreking van het thermokoppel, waardoor de helft van de ovenverwarming wordt uitgeschakeld.

Tabel I

Maximum vermogen van Crusilite verwarmingselementen type X 10/100/540/2.25 als functie van de oventemperatuur.

Temperatuur °C	Maximum vermogen Watt
1500	118
1450	140
1400	186
1350	295
1300	430

Het glas wordt door een vulopening aan de bovenzijde in de oven gebracht in de vorm van kogels.



Figuur 1. Afmetingen van de spirover.

chamottesteen

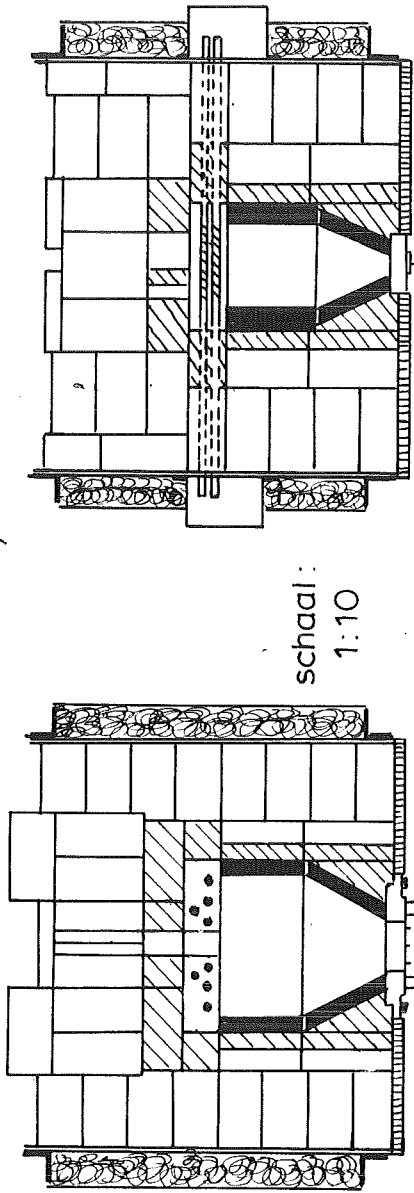


glaswol

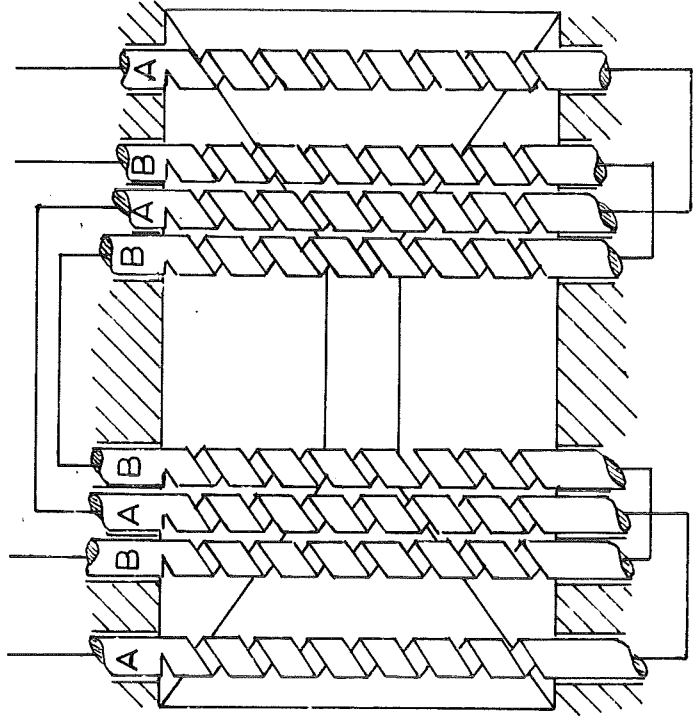
silimanitesteen



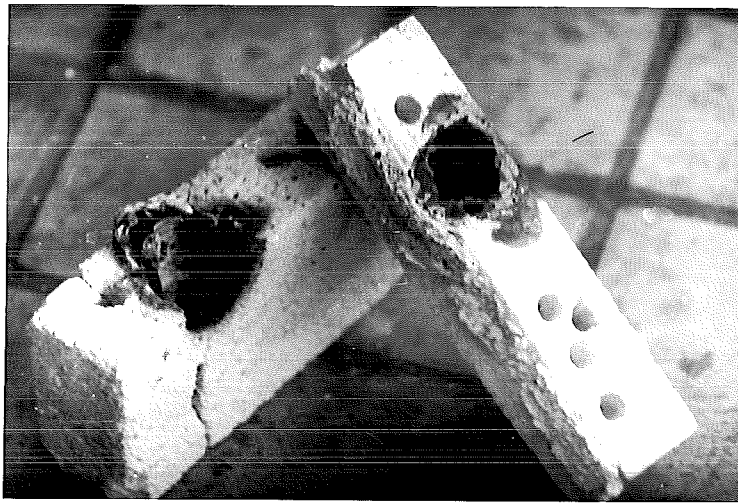
zirkoonsilikaatste



Figuur, 2 a.

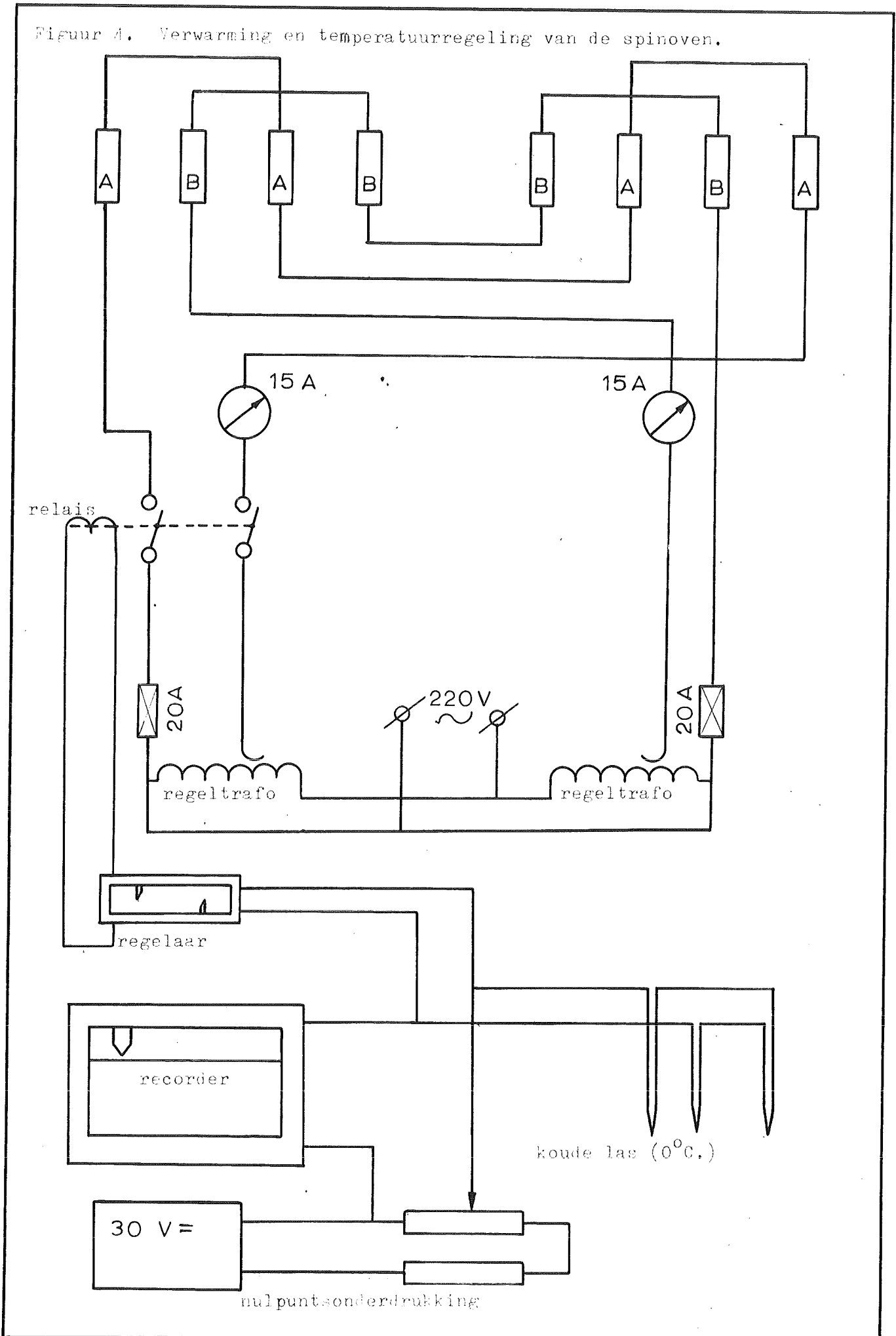


Figuur 2. Constructie van de spirover.
Figuur 2 b.



Figuur 3. Beschadiging tengevolge van samensmelten van de
verwarmingselementen en de steen.
(Links chamotte-, rechts silimanitesteen).

Figuur 4. Verwarming en temperatuurregeling van de spinoven.



1.2 De spinplaat.

a. Inleiding.

De spinplaat vormt de bodem van een bakje van Pt-10% Rh, dat aan de bovenzijde is voorzien van een flens. Dit bakje is ingekit in een bronzen frame. In de kit ligt een koelleiding van roestvrij staal. Figuur 5 geeft een beeld van de zijde van de spinplaat, die naar de oven is gekeerd.

In de spinplaat zijn drie spinopeningen aangebracht op een onderlinge afstand van 16 mm (figuur 6). De spinopeningen zijn uitgevoerd als pijpjes van ca 4 mm lengte.

Inwendige diameter van de spinopeningen : (gezien vanaf de voorzijde van de oven)

links	midden	rechts
1,51 mm	1,99 mm	2,18 mm

Op de zijwand van het bakje, recht boven de middelste spinopening zijn twee thermokoppels gelast. Een hiervan wordt gebruikt voor het meten van de temperatuur; het andere stuurt de temperatuurregelaar. De thermokoppels zijn van het type Pt-Pt-13% Rh.

Uit de onderzijde van de spinplaat steken twee lippen, waarop de stroomklemmen voor de verwarming worden aangesloten (figuur 6).

b. Verwarming.

De spinplaat wordt verwarmd door Ohmse warmteontwikkeling. De benodigde stroom (ca 3000 A) wordt geleverd door een lastransformator, die secundair van twee windingen is voorzien. Van deze windingen wordt de stroom door koperen rails naar de spinplaat geleid. De rail is met de spinplaat verbonden door watergekoelde koperen klemmen. Figuur 7 geeft een beeld van de onderzijde van de oven. Hierop zijn de klemmen en een gedeelte van de rail zichtbaar. Het benodigde vermogen bedraagt 4,5 kW bij ca 1350°C.

De lastrafo wordt gevoed door een transductor. Deze is voorzien van een stuurstroomgever, die ervoor zorgt, dat het verband tussen stuurstroom en uitgangsspanning lineair is.

De transductor wordt gestuurd door een P.I. regelaar. Deze wordt beschreven in 1.2 c.

In het elektrische circuit (zie figuur 8) zijn twee beveiligingen opgenomen: in de aansluiting op het net bevindt zich een bi-metaalschakelaar, die de spinplaat beschermt tegen te grote stromen (de schakelaar is ingesteld op 22 A), de tweede beveiliging beschermt de spinplaat tegen schade ten gevolge van het uitvallen van de koelwatertoevoer. Na het doorlopen van de klemmen en de koelleiding in de spinplaat stroomt het koelwater in een bakje, dat in de bodem een opening heeft. Het bakje is opgehangen aan een balans, zoals in figuur 9 is aangegeven. Wanneer het waterniveau in het bakje beneden een bepaalde stand daalt, bedient de balansarm een schakelaar, die het sunvic-relais bekrachtigt, waardoor de stroomtoevoer naar de spinplaat wordt uitgeschakeld.

c. De temperatuurregeling van de spinplaat.

Om een inzicht te krijgen in de regelbaarheid van de temperatuur van de spinplaat, is een onderzoek gedaan naar de dynamische eigenschappen van het systeem transductor-lastrafo-spinplaat. Dit onderzoek is beschreven in appendix I.

Uit dit onderzoek blijkt, dat we hier een systeem hebben met drie tijdconstanten, waarvan de faseverschuiving nooit groter wordt dan $-\pi/2$ rad., waaruit men kan concluderen, dat hier volstaan kan worden met een proportionele regeling. (12)

Wanneer echter de versterking van de P. regelaar te groot wordt gemaakt, gaat het systeem oscilleren. De resonantiefrequentie is 0,57 Hz. Deze treedt op in het gesloten systeem, terwijl de responsiemetingen gedaan zijn aan het open systeem. Het optreden van deze instabiliteit is het gevolg van het aanwezig zijn van niet-lineariteiten.

De uitgangsspanning u van de transducer is evenredig met de stuurstroom en deze is bij een P.regelaar evenredig met de afwijking van de ingestelde temperatuur. De spinplaat kan beschouwd worden als een Ohmse weerstand, zodat het opgenomen vermogen evenredig is met u^2 .

Aangenomen, dat de stuurstroom sinusvormig verandert, geldt :

$$\begin{aligned} \text{stuurstroom} & i = i_0 + \hat{i} \cos wt \\ \text{uitgangsspanning lastrafo} & u = u_0 + \hat{u} \cos wt. \end{aligned}$$

Deze spanning is amplitude-moduleerd op de netfrequentie. Deze is echter hoog t.o.v. de hoogste eigen-frequentie van het systeem.

Opgenomen vermogen :

$$P = \frac{u^2}{R} = (u_0^2 + 2u_0\hat{u} \cos wt + \hat{u}^2 \cos^2 wt) / R.$$

$$\text{Stel } \hat{u} = 0,1 u_0$$

$$\begin{aligned} P &= (u_0^2 + 0,2 u_0^2 \cos wt + 0,01 u_0^2 (\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2wt)) / R \\ &= (1,005 + 0,2 \cos wt + 0,005 \cos 2wt) u_0^2 / R. \end{aligned}$$

Dus in het vermogen komt een term met $\cos 2wt$ voor. Dit is ook te zien aan het temperatuurverloop als functie van de tijd, als het systeem oscilleert. Zie figuur 10.

Verder heeft de transducer 2 sec. nodig om het volle regelbereik te doorlopen. Dit geeft ook aanleiding tot hogere harmonischen.

Het spontaan oscilleren van het systeem beperkt dus de versterkingsfactor van de regelaar. Hierdoor is het niet mogelijk met alleen P actie de afwijking van de ingestelde waarde ("offset") voldoende klein te maken.

Daarom is de regelaar uitgevoerd met proportionele en integrerende actie.

Figuur 11 geeft het schema van de regelaar. Als ingang is een Honeywell gelijkspanningsversterker gebruikt. Het thermokoppel, waarmee de temperatuur gemeten wordt, is op de spinplaat vastge-

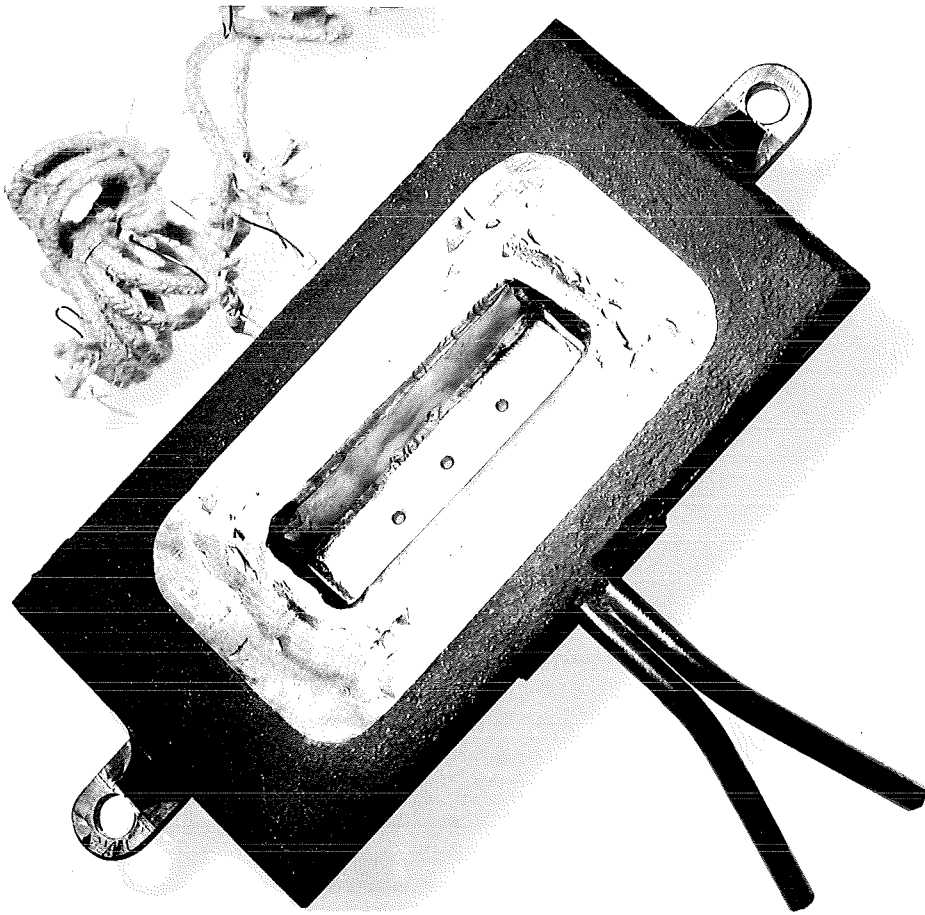
last en ligt dus via het glas en het koelwater aan aarde. De ingang van de regelaar moet dus zwevend t.o.v. aarde zijn. Op de thermospanning is een sterk 50 Hz stoorsignaal aanwezig, dat de regelaar instabiel maakt. Dit 50 Hz signaal wordt door de versterker ongeveer 100 dB onderdrukt. De versterking wordt m.b.v. een potentiometer aan de uitgang op 1 ingesteld. Na de versterker wordt het signaal vergeleken met de ingestelde waarde ("set point"). Deze wordt ingesteld met een multi turn potentiometer. Eén omwenteling hiervan komt overeen met 2,00 mV. Het verschil tussen ingestelde en gemeten waarde wordt 100 x versterkt en toegevoerd aan de operationele versterkers, waarin de regelfuncties zijn ingebouwd. De "offset" kan worden afgelezen op een lichtvlek-galvanometer. De integratietijd T_i kan worden ingesteld van 0 tot 12 sec., de versterking K_p van 1 tot 10 x. Na optellen van het versterkte en het geïntegreerde signaal en vermogensversterking wordt het signaal aan de transducer toegevoerd. De integrerende actie kan worden uitgeschakeld. Dit is nodig bij het opwarmen van de spinplaat, omdat anders door overstuurd raken van de integratieversterker de maximale stroom door de spinplaat worden gestuurd, waardoor grote mechanische spanningen ontstaan.

De stuurstroom, 1 mA voor het volle regelbereik, kan op een meter worden afgelezen.

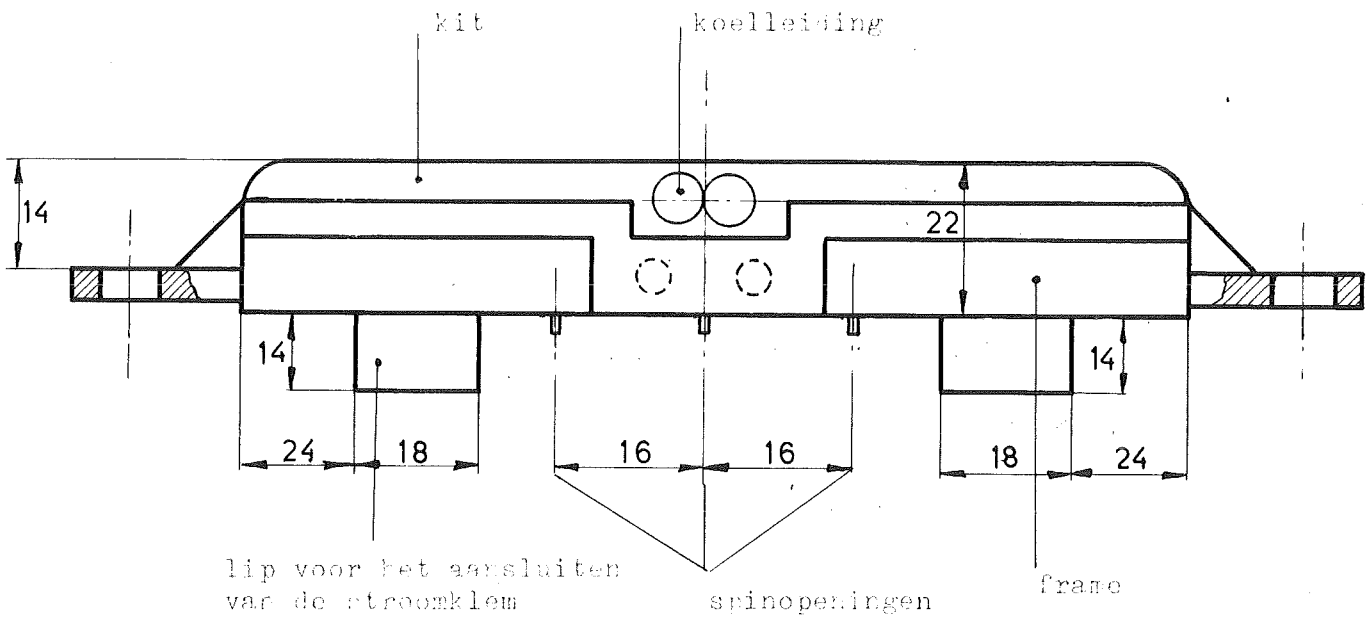
Voor het instellen van de regelaar wordt uitgegaan van de situatie, dat het gesloten systeem juist instabiel wordt. (12).

Noemen wij de versterking, waarbij dit gebeurt, K_u en de periode van de instabiliteit T_u sec., dan wordt de regelaar zo ingesteld, dat de versterking $K_p = \frac{1}{2} K_u$ en de integratietijd $T_i = \frac{1}{2} T_u$.

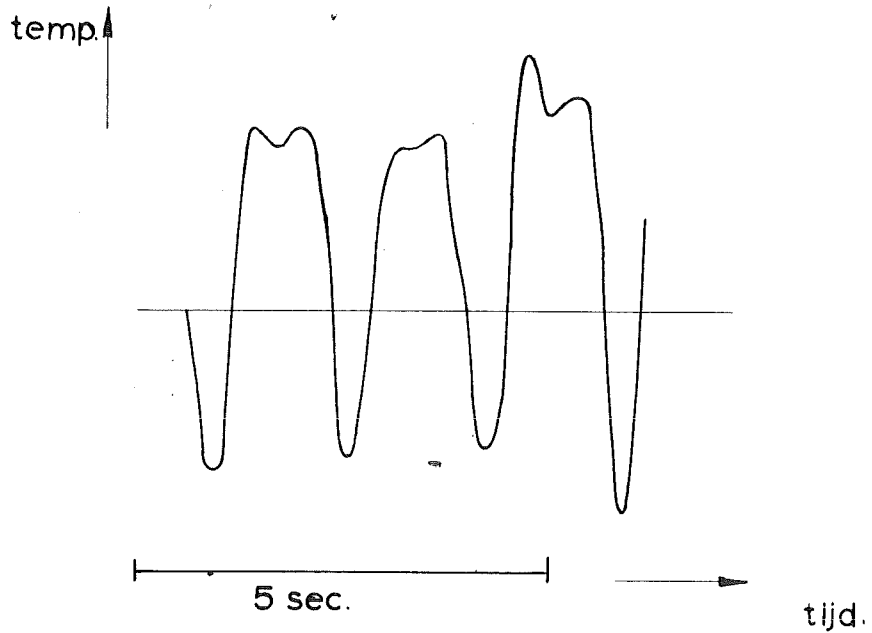
Gemeten is : $T_u = 1,77$ sec. en $K_u = 4$, dus instellen $T_i = 0,9$ sec. en $K_p = 2$.



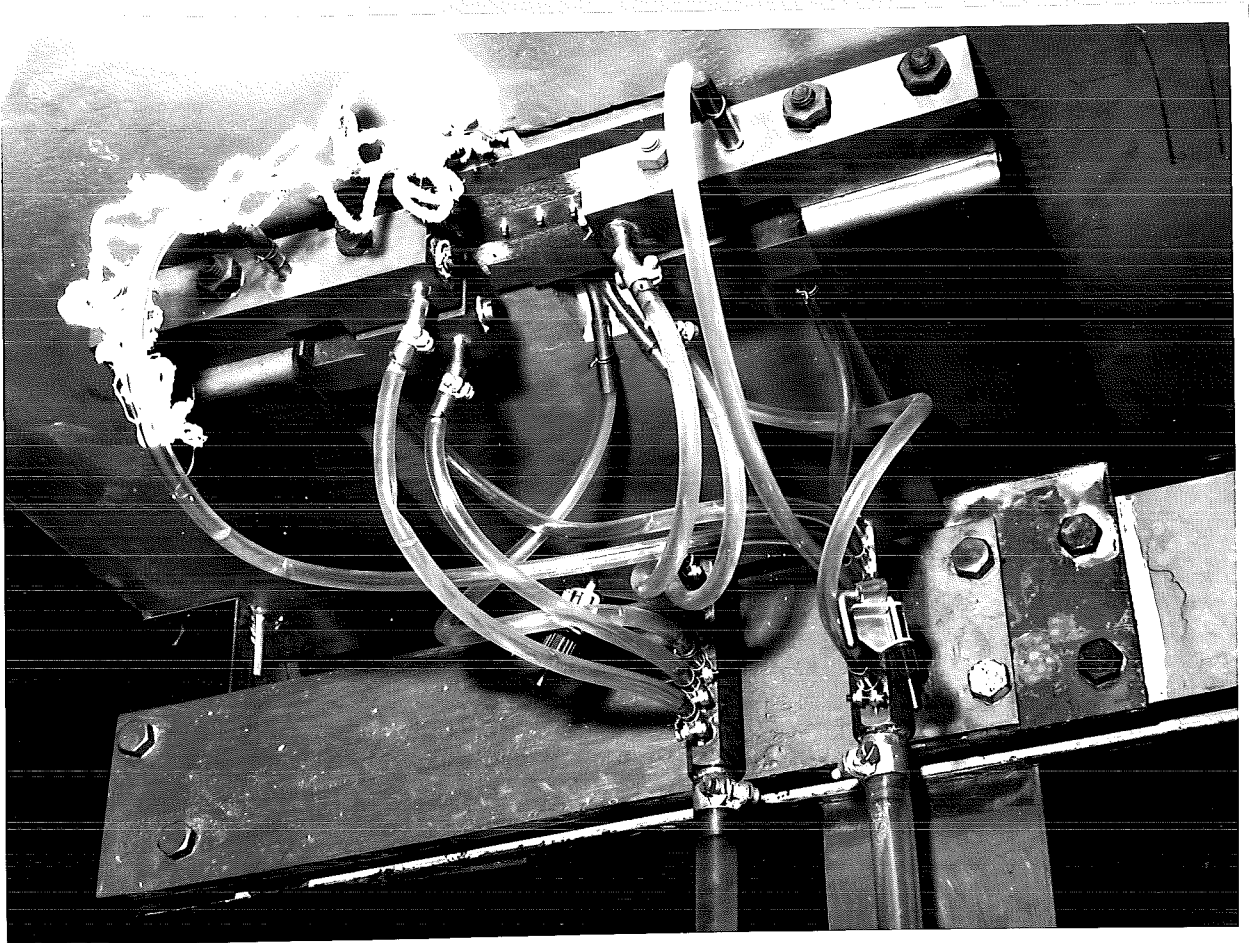
Figuur 5. Bovenaanzicht van de spinplaat.



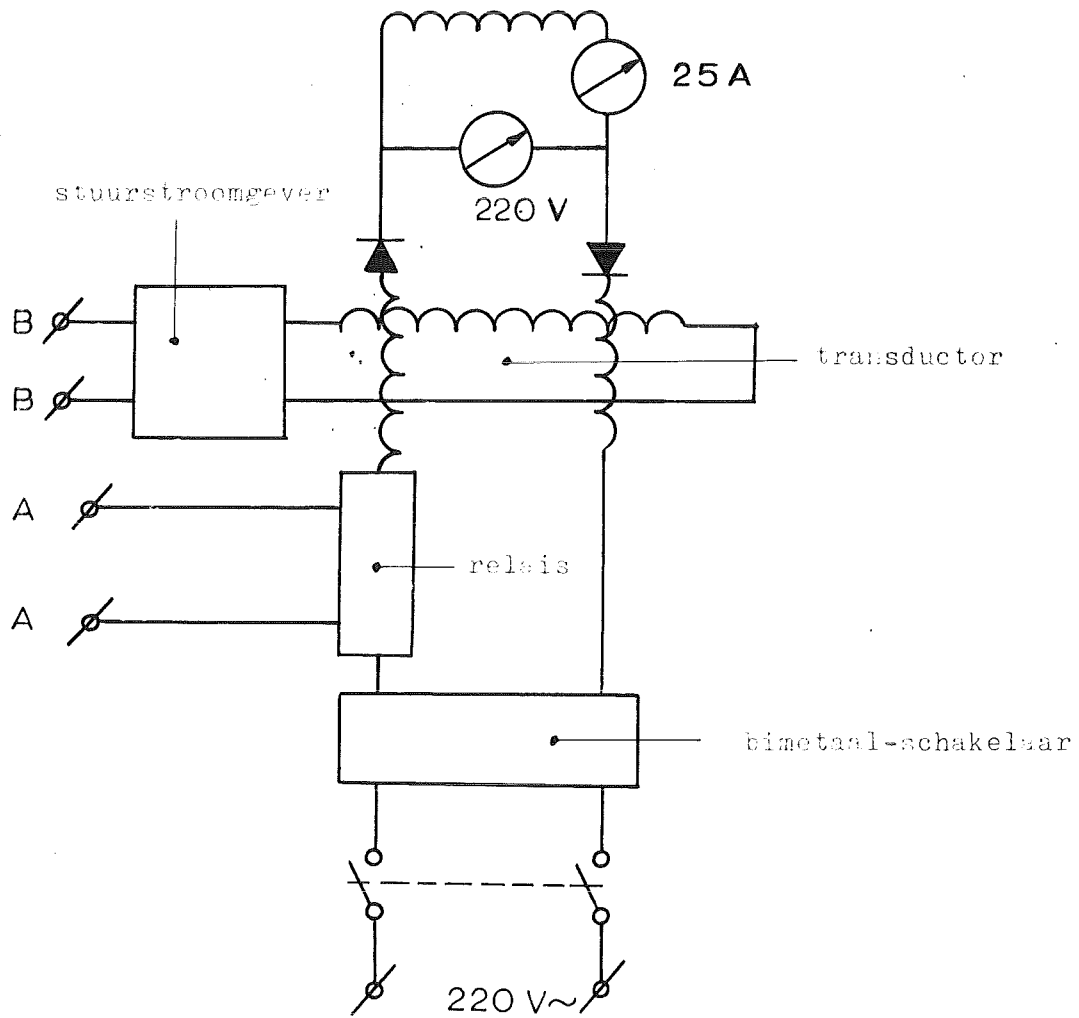
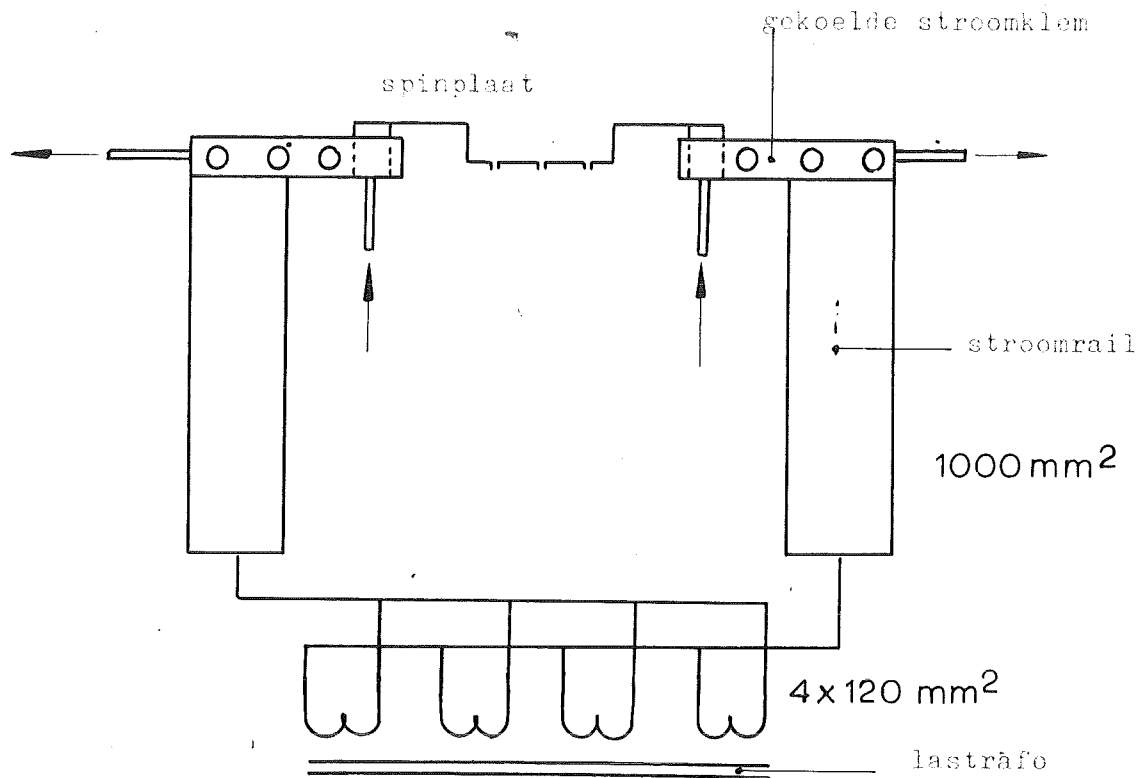
Figuur 6. Constructie van de spinplaat.



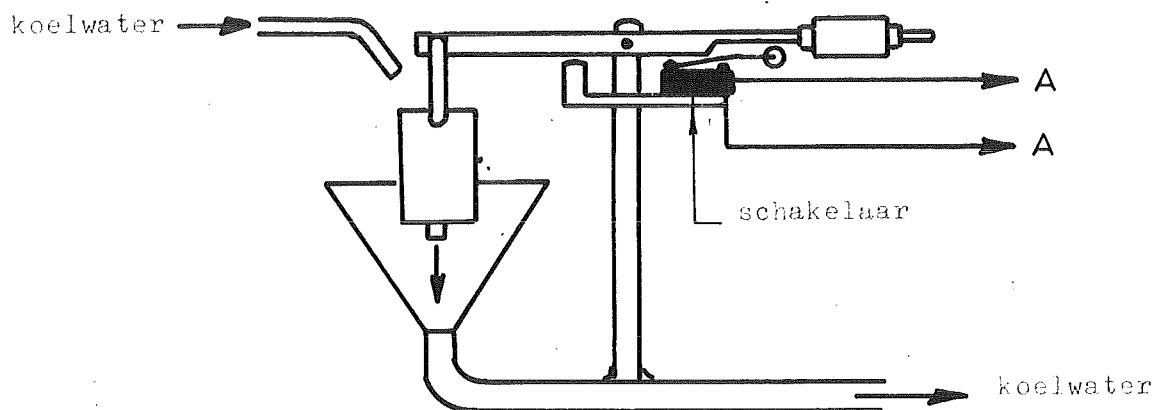
Figuur 10. Temperatuurverloop bij oscillerend systeem.



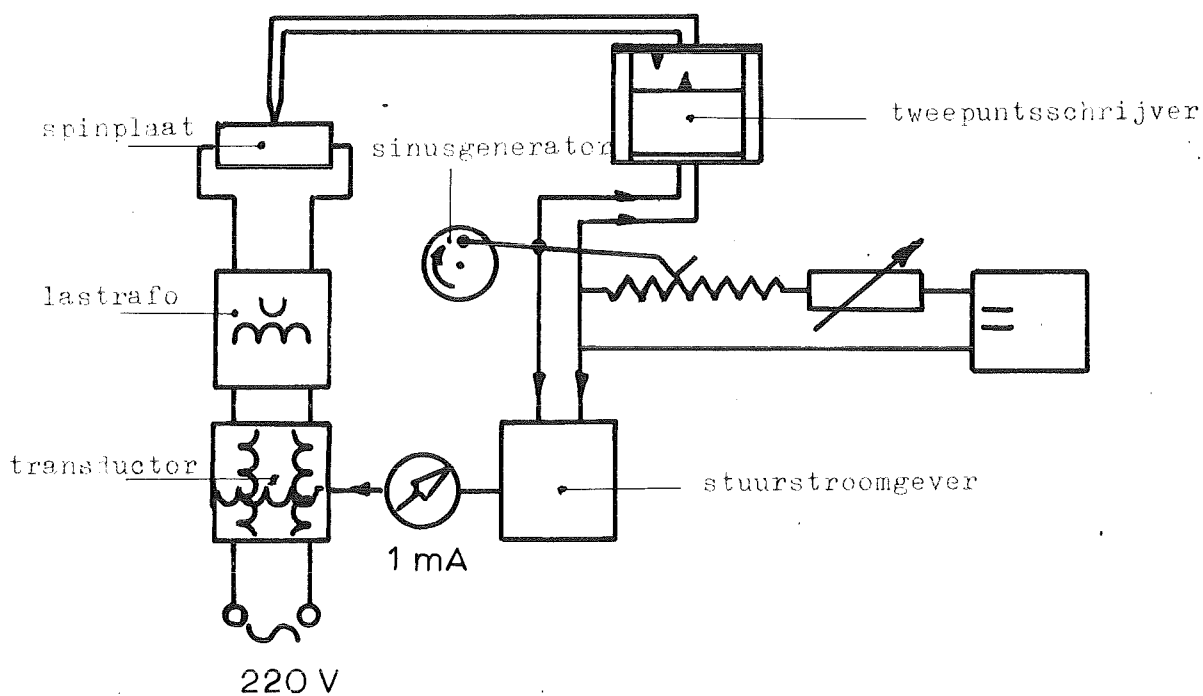
Figuur 7. Onderzijde van de spinoven met spinplaat, gekoelde aansluitklemmen en stroomrail.



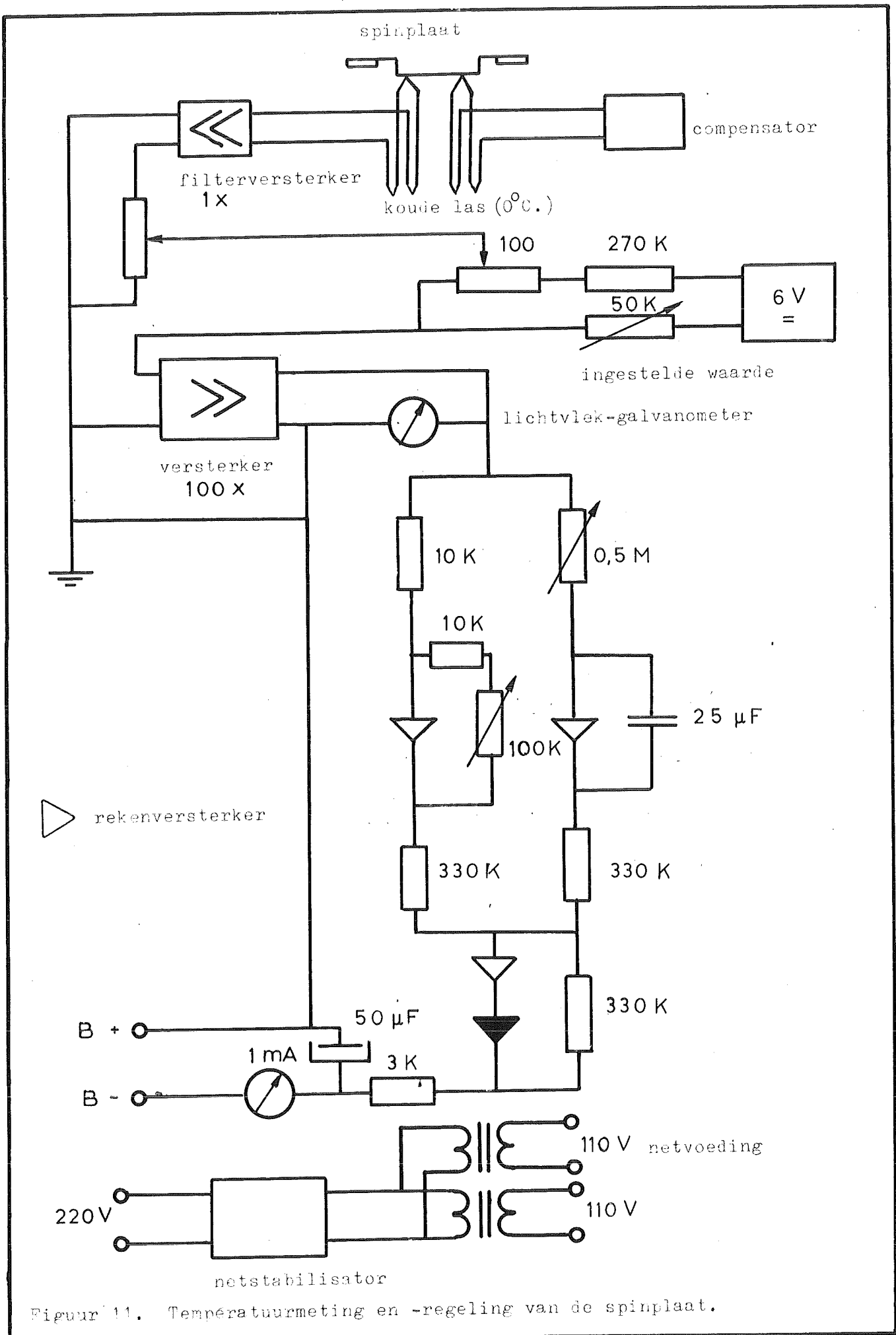
Figuur 2. Verwarming van de spinplaat.



Figuur 9. Beveiliging tegen oververhitting van de spinplaat bij uitvallen van de koelwatertoevoer.



Figuur 12. Meting van frequentieresponsie.



Figuur 11. Temperatuurmeting en -regeling van de spinplaat.

1.3 Het meten van de hoogte van het glasniveau in de glasoven.

a. Principe en constructie.

Het meten van het niveau in de glasoven berust op de elektrische geleidbaarheid van het vloeibare glas.

Drie pennen steken gedeeltelijk in het glas. De weerstanden tussen de buitenste pennen A, resp. B en de middelste pen C, die geaard is, vormen twee takken in een brug van Wheatstone.

Figuur 16.

De stroom tussen de pennen A en C is samengesteld uit een component evenredig met de indompeling h_1 en een component tengevolge van het "eindeffect" ($i_1 \neq 0$ als $h_1 = 0$).

Dus geldt :

$$i_1 = \frac{u_1 C \gamma h_1}{d} + U_1 \gamma A_1 \quad (10)$$

Hierin is : U_1 : spanning tussen de pennen A en C.

C : constante afhankelijk van de geometrie.

γ : geleidbaarheid van het glas.

h_1 : gedeelte onder het glasniveau van pen A.

d : afstand van de pennen.

A_1 : constante afhankelijk van de geometrie.

Voor de weerstand tussen de pennen A en C kunnen wij schrijven :

$$R_1 = \frac{u_1}{i_1}$$

evênzó voor de pennen B en C :

$$R_2 = \frac{u_2}{i_2} \quad (11)$$

Uit 10 en 11 volgt voor de verhouding van R_1 en R_2 :

$$a = \frac{\frac{C\gamma h_2}{d} + \gamma A_2}{\frac{C\gamma h_1}{d} + \gamma A_1} = \frac{Ch_2 + A_2 d}{Ch_1 + A_1 d} \quad (12)$$

Dus a is onafhankelijk van γ . a is eenduidig bepaald door h_1 , daar $h_2 - h_1$ constant is.

Wanneer geldt $a = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ is de brug in evenwicht.

a wordt met behulp van R_3 ingesteld.

De taster bestaat uit een houder van Al_2O_3 , waaruit aan de onderzijde drie pennen van ongelijke lengte steken. In verband met de corrosieve eigenschappen van het glas en de hoge temperatuur zijn de pennen gemaakt van Pt-10% Rh. Ze zijn door dunne draden, die in het Al_2O_3 liggen met de bovenzijde van de taster verbonden. Figuur 17 geeft de afmetingen van de taster.

De niveaumeter is zelfcompenserend. Het blokschema van het elektronische gedeelte is weergegeven in figuur 18. Dit is de schakeling, die Van Houwelingen gebruikt heeft voor de capacitieve niveaumeter (1). De kathodevolgers, die hij als ingang gebruikte, zijn weggelaten.

De brug wordt gevoed met een spanning van 10 Volt bij een frequentie van 40 kHz om polarisatieverschijnselen aan de elektroden te vermijden. Het brugsignaal wordt via een differentiaal-versterker toegevoerd aan een fasegevoelige detector. Deze vergelijkt de fase van het brugsignaal met die van de voedingsspanning van de brug, die via een symmetreerversterker wordt toegevoerd. De polariteit van het uitgaande detectorsignaal is een maat voor het te groot of te klein zijn van a . Dit signaal stuurt via een servoversterker een servomotor, die de stand van de taster zodanig verandert, dat de afwijking van a wordt opgeheven.

De waarde van a kan niet willekeurig groot worden gemaakt. Wanneer a boven een bepaalde waarde komt, d.w.z. h_1 klein, treedt een relaxatieverschijnsel op. Tengevolge van de oppervlaktespanning "kruipt" het glas tegen de pennen omhoog. Hierdoor neemt a af. De servomotor trekt de taster omhoog, waarbij de linker pen boven het glasniveau komt. Doordat het glas er afloopt, neemt a weer toe, waardoor de taster weer daalt. Dit proces herhaalt zich, waar-

bij het systeem oscilleert met een amplitude van ongeveer 2 mm. Figuur 19 laat de verschillende fasen van dit proces zien. De niveaumeter werkt goed bij een waarde van $a = 3$.

Voor de aanwijzing van de hoogte van het glasniveau wordt gebruik gemaakt van een zelfinstellende potentiometer. De servomotor, die de taster verstelt, drijft ook een potentiometer aan. De stand hiervan wordt aangegeven door een tot servo-potentiomotor omgebouwde Honeywell recorder. Figuur 20 geeft hiervan het prinsipeschema.

De fabricage van de taster wordt beschreven in appendix II.

b. IJking van de niveaumeter en invloed van de uitwendige parameters op de aanwijzing.

Voordat de taster gemaakt werd, zijn metingen gedaan aan een model van p.v.c. met messing pennen.

Als modelvloeistof werd rietsuikerstroop gebruikt, waarvan de geleidbaarheid op de gewenste waarde werd gebracht door het toevoegen van KCl.

Hieraan zijn de volgende metingen gedaan :

Verandering van de brugspanning met factor 2 (t.o.v. 10,0 Volt).
Geen meetbare invloed.

Verandering van de frequentie met ± 10 kHz (t.o.v. 40 kHz).
Geen meetbare invloed.

Verandering van de geleidbaarheid met factor 100, van 0,1 tot 10 Siemens.
Afwijking = 0,3 mm.

Hierna is de niveaumeter in de glasoven beproefd. De invloed van bovengenoemde veranderingen van de brugspanning en de frequentie bleek ook hier te verwaarlozen te zijn.

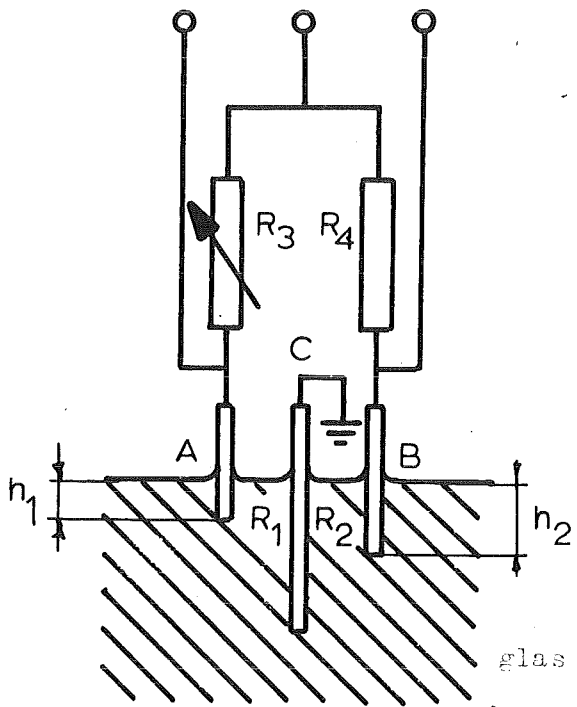
Verandering van de glastemperatuur van 1095 tot 1315⁰C gaf een verandering in de aanwijzing van 0,3 mm.

De schaalwaarde van de recorder kan op de volgende wijze bepaald worden :

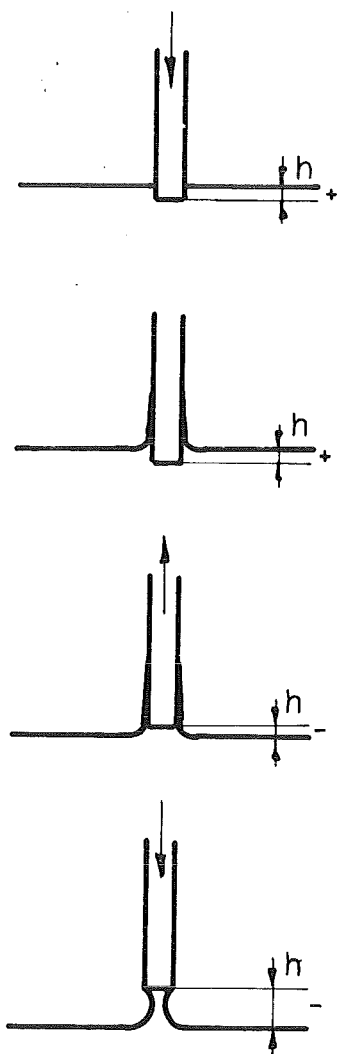
Spoed van de draadstang, waarmee de taster op en neer wordt bewogen : 1,35 mm.

Overbrengverhouding van draadstang naar potentiometer : 10 : 1.
Volle schaaluitslag (= 100 schaaldelen) van de recorder komt overeen met 10 omwentelingen van de potentiometer. Dus 100 schaaldelen op de recorder komen overeen met 135 mm hoogteverschil. 1 schaaldeel is dus 1,35 mm.

Voordat de oven werd gemetseld, is de plaat van het verstelmechanisme t.o.v. de spinplaat bepaald. Deze maten zijn uitgezet in figuur 21. Hieruit kan de stand van het glas bepaald worden. Aangezien de indompeling h van de pennen niet precies bekend is, is het nauwkeuriger om met een taster eenmaal de plaats van het glasoppervlak te bepalen bij een bekende stand van de hoogtemeter. Op deze wijze is een absolute hoogtemeting met een fout $\pm 0,5$ mm mogelijk. Hoogteverschillen zijn meetbaar met een fout $\pm 0,3$ mm.

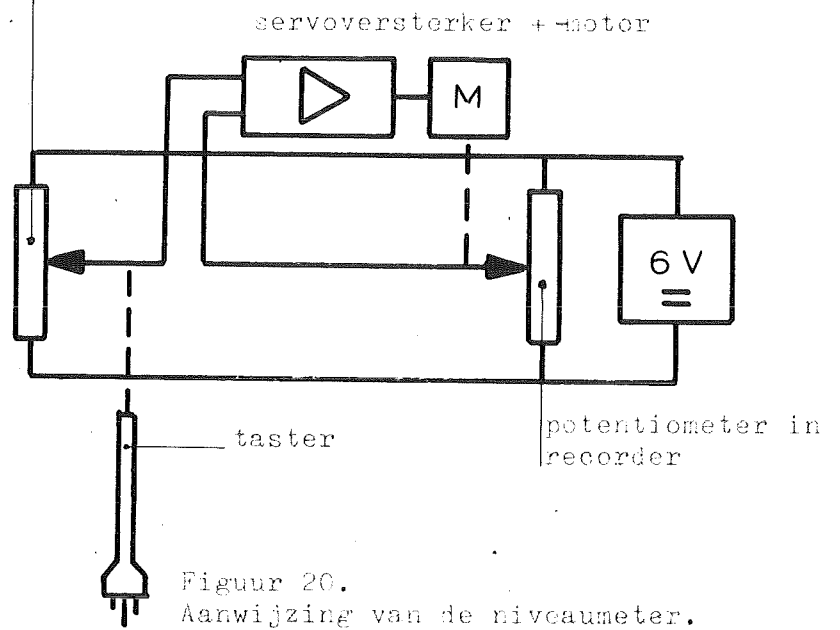


Figuur 16.
Principe van de niveaumeter.

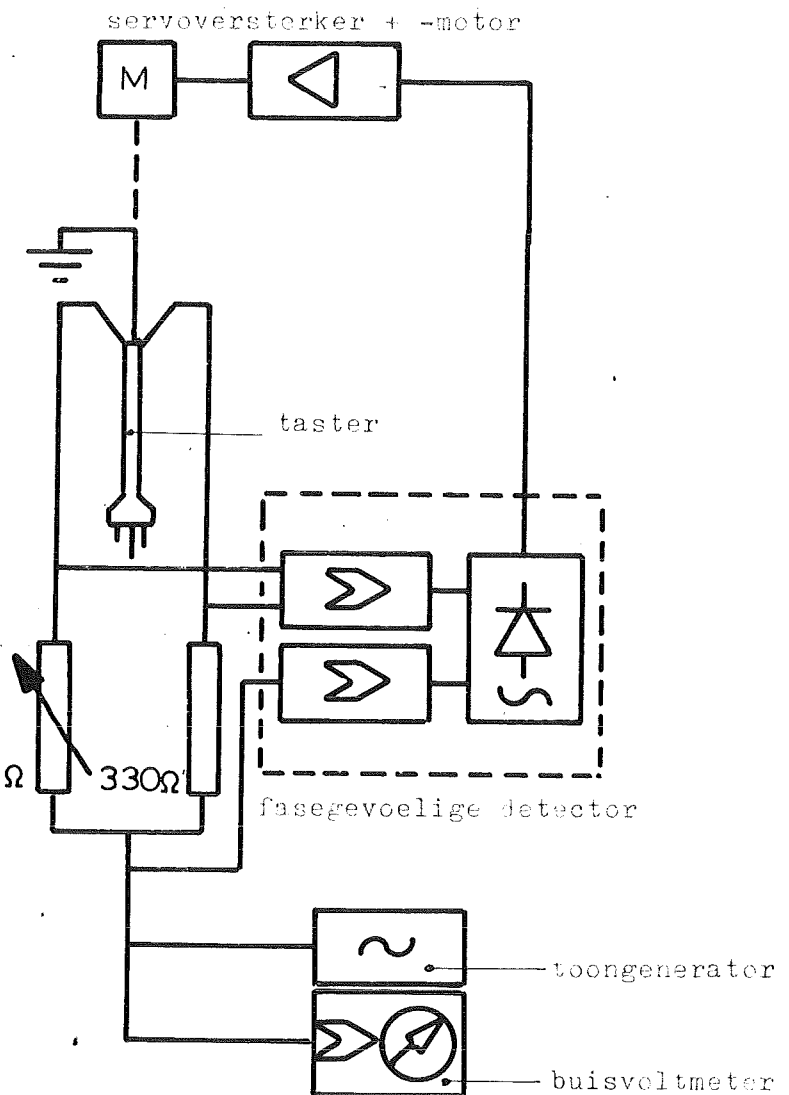


Figuur 19.
Het oscilleren van de
taster. (pen A)

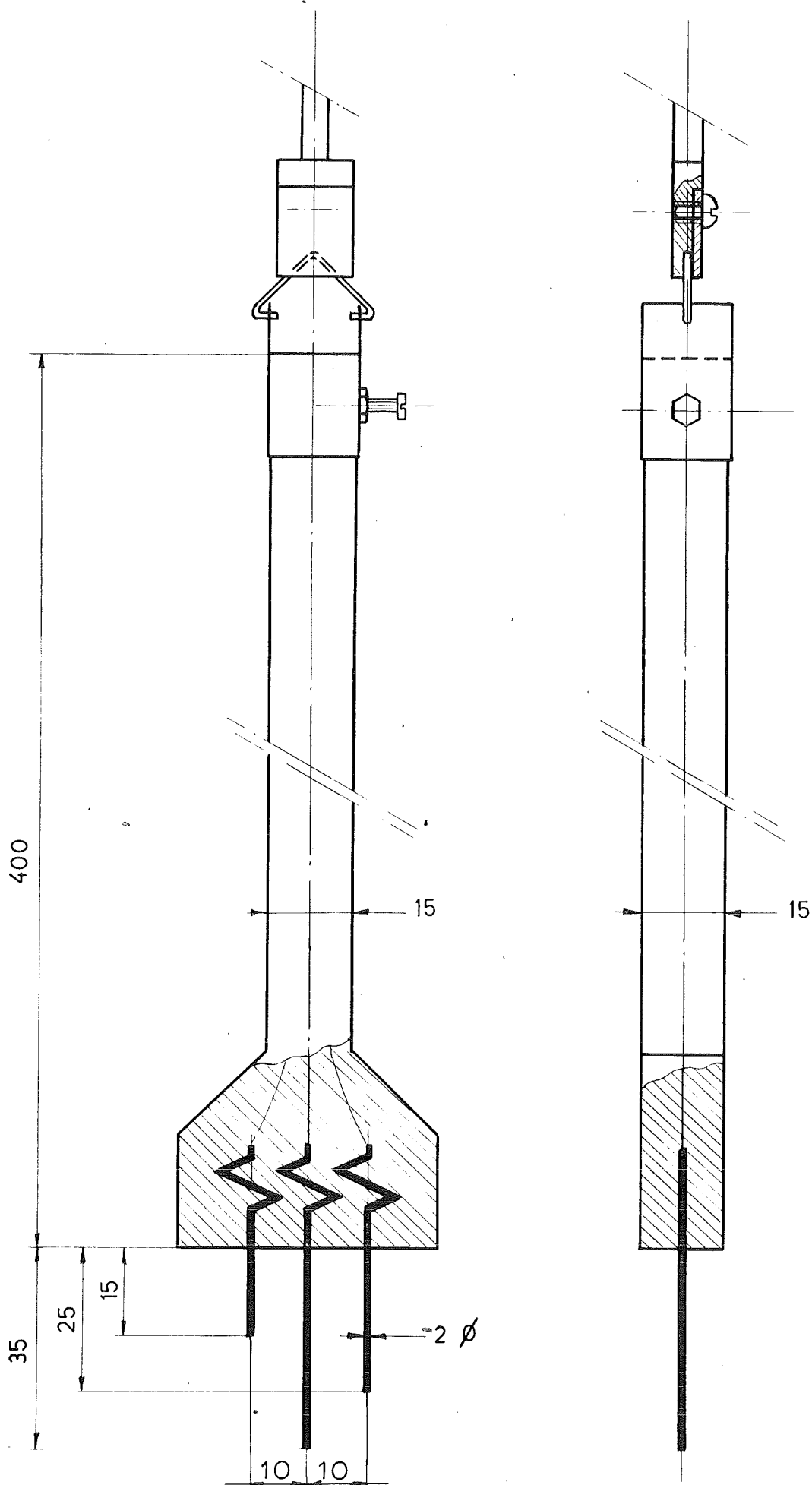
- 27 -
potentiometer op verstelmechanisme



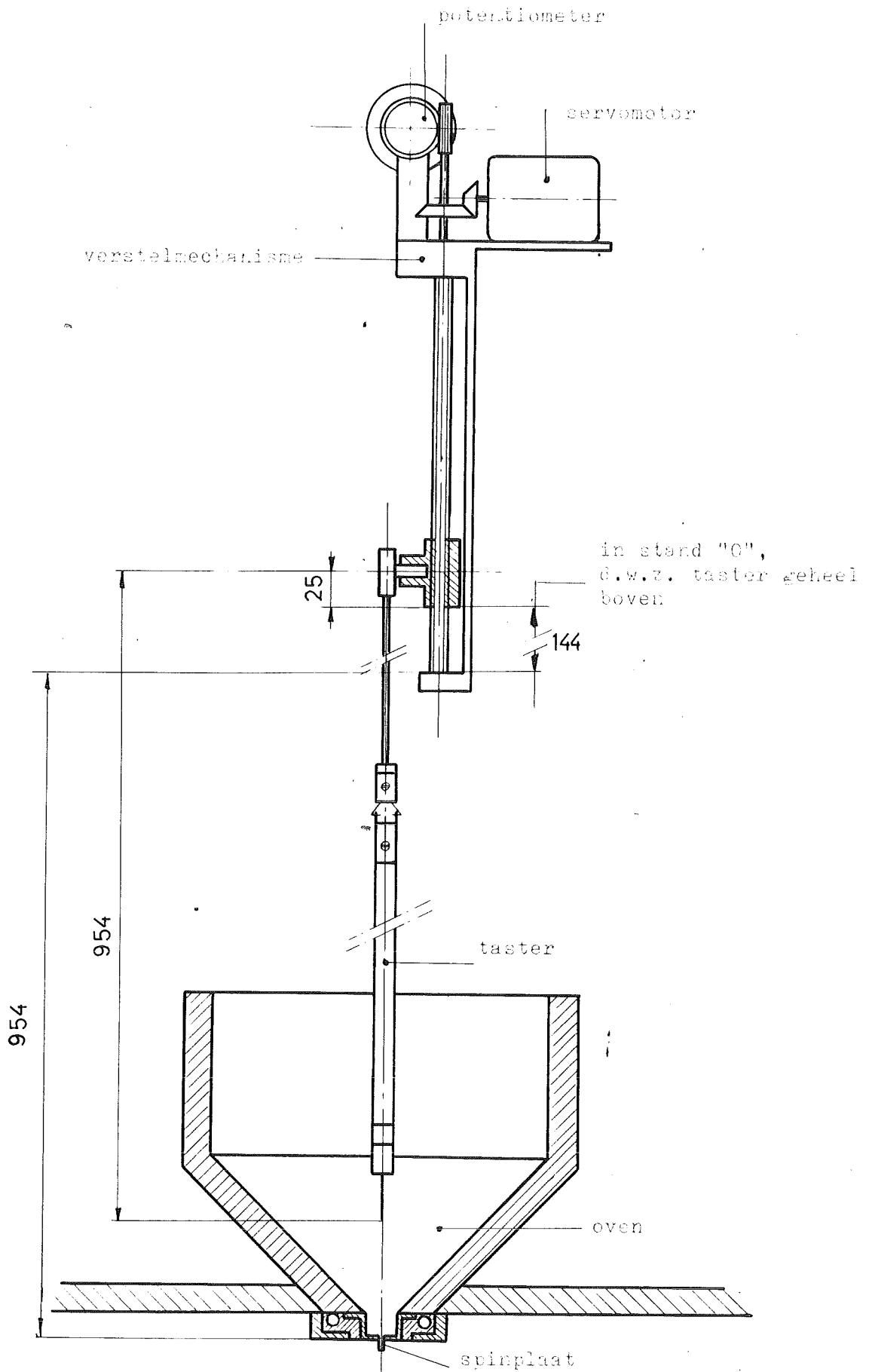
Figuur 20.
Aanwijzing van de niveaumeter.



Figuur 18. Blokschema van het elektrische
circuit van de zelfinstellende
niveaumeter.



Figuur 13. Constructie van de taster.



Figuur 21. Bepaling van de hoogte van het glasniveau uit de recorder-aanwijzing.

1.4 Het trekken van de glasdraad.

Om het glas met bekende snelheid uit de spinopening te trekken zijn twee methoden ontwikkeld :

1. De draad wordt tussen twee wrijvingswielen geleid, waarvan er één wordt aangedreven.
2. De draad wordt op een trommel gewikkeld.

a. Draadtrekmechanisme met wrijvingswielen (figuur 23).

Het voordeel van deze methode is, dat zowel aangrijppingspunt van de trekkracht als treksnelheid nauwkeurig bepaald zijn. Om het breken van de glasdraad tussen de wielen en het optreden van slip, zowel tussen de wielen onderling als tussen wiel en draad, te voorkomen, is het aangedreven wiel (A) voorzien van een rubber "O ring". Deze ring loopt in een halfcirkelvormige groef in het andere wiel.

De glasdraad wordt in een pijp geleid, die vlak onder het raakpunt van de wielen begint en uitmondt in een opvangtrommel, waarvan de deksels voorzien zijn van fijn gaas. De glasdraad wordt door de pijp getransporteerd door in de looprichting van de draad ingeblazen lucht. Deze luchtstroom veroorzaakt door ejecteurwerking een onderdruk aan de ingang van de pijp. Door de luchtstroom tangentieel in de opvangtrommel in te voeren, ontstaat een draaiende beweging, waardoor de glasdraad tot een kluwen wordt opgesponnen.

Tengevolge van het optreden van statische lading op glasdraad en rubber O ring en meesleuring door de luchtstroom, die veroorzaakt wordt door de met hoge snelheid draaiende wielen, heeft de draad bij hoge snelheden de neiging om de wielen te volgen, waardoor de draad naast de opvangpijp komt.

Om het ontstaan van statische lading te voorkomen, wordt de O ring met water bevochtigd. Het meesleuren wordt bestreden door een

luchtstroom, tegengesteld aan die, veroorzaakt door de wielen.

De instelling van deze luchtstroom is zeer kritisch, terwijl de uitstroomspleten verstopt raken met glas.

Daar met dit systeem de in de glasindustrie gebruikelijke treksnelheid van ca 60 m/sec. niet bereikt kan worden, werd een systeem met trommel ontwikkeld.

b. Draadtrekmechanisme, waarbij de draad op een trommel wordt gewikkeld.

Het opvangen van de draad is hier geen probleem; deze wordt op de trommel gewikkeld. De treksnelheid is niet constant door het toenemen van de diameter naarmate er meer glas wordt opgewikkeld. De trommel (zie figuur 24) is door opstaande randen in twee gedeelten verdeeld. Het linker gedeelte dient voor het aanlopen en op snelheid brengen. Wanneer het gewenste toerental bereikt is, wordt de trommel naar links verschoven, waardoor de draad op het rechter gedeelte van de trommel gaat lopen. Het begin van de draad wordt op de trommel geklemd door een met teflon beklede beugel. Om het naar buiten komen van de beugel bij hoge snelheden te voorkomen, is een tegenwicht aangebracht.

Met de trommel kan bij toerentalen van 100 tot 10000 omw/min. (ca 0,5 tot 50 m/sec.) gemeten worden.

Voor de aandrijving (zie figuur 25) wordt in het gebied van 100 tot 1000 omw/min. een gelijkstroomshuntmotor gebruikt, waarvan de ankerstroom met schuifweerstand kan worden ingesteld; voor toerentalen vanaf 2000 omw/min. wordt een persluchtmotor gebruikt.

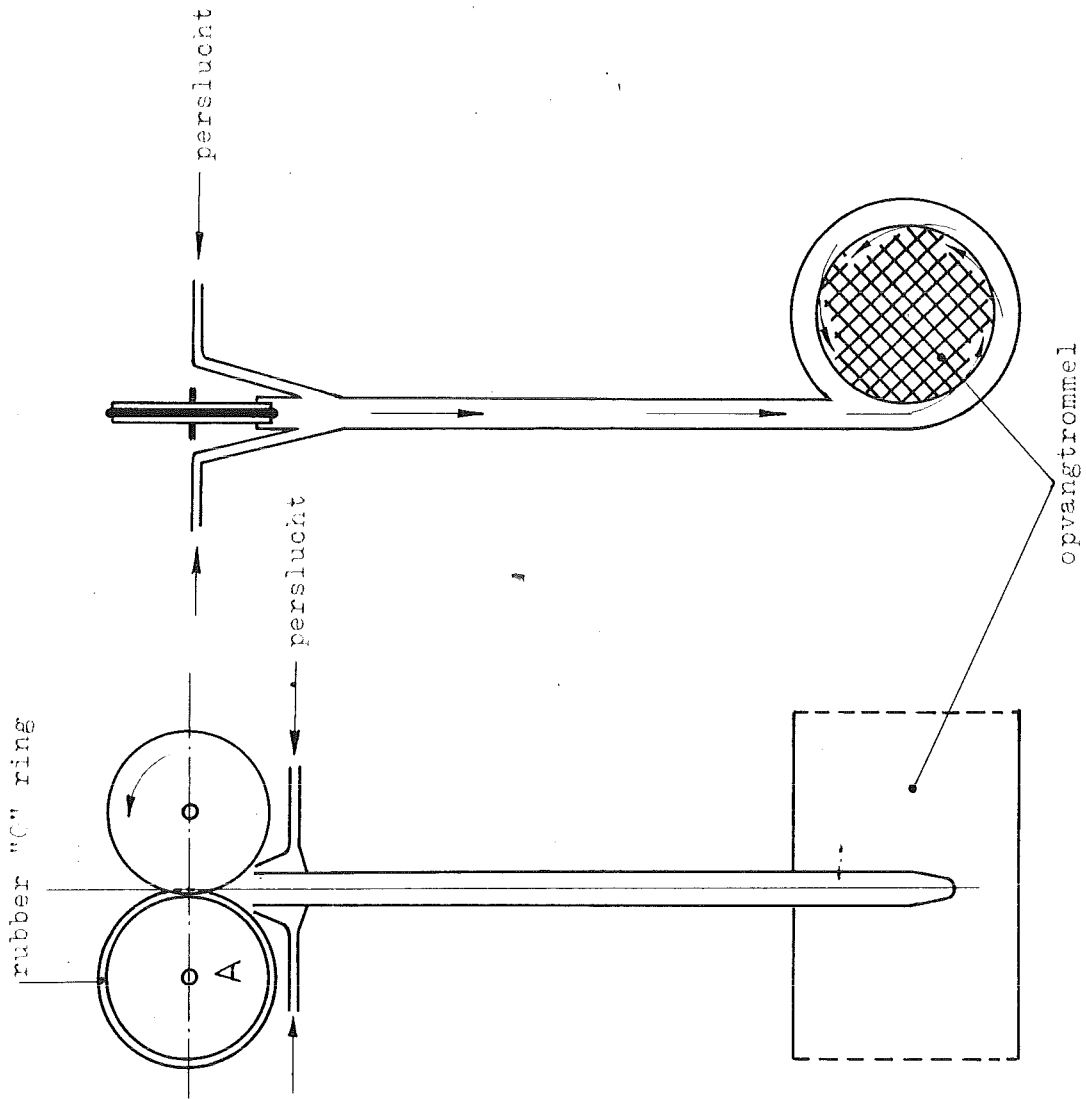
Het toerental wordt bepaald met een frequentiemeter, die de frequentie meet van de lichtpulsen, die ontstaan doordat de van gaten voorziene trommelbodem een lichtstraal onderbreekt. In de bodem van de trommel zijn 6 gaten aangebracht; hierdoor komt de afgelezen frequentie, vermenigvuldigd met een factor 10, overeen

met het toerental in omwentelingen per minuut.

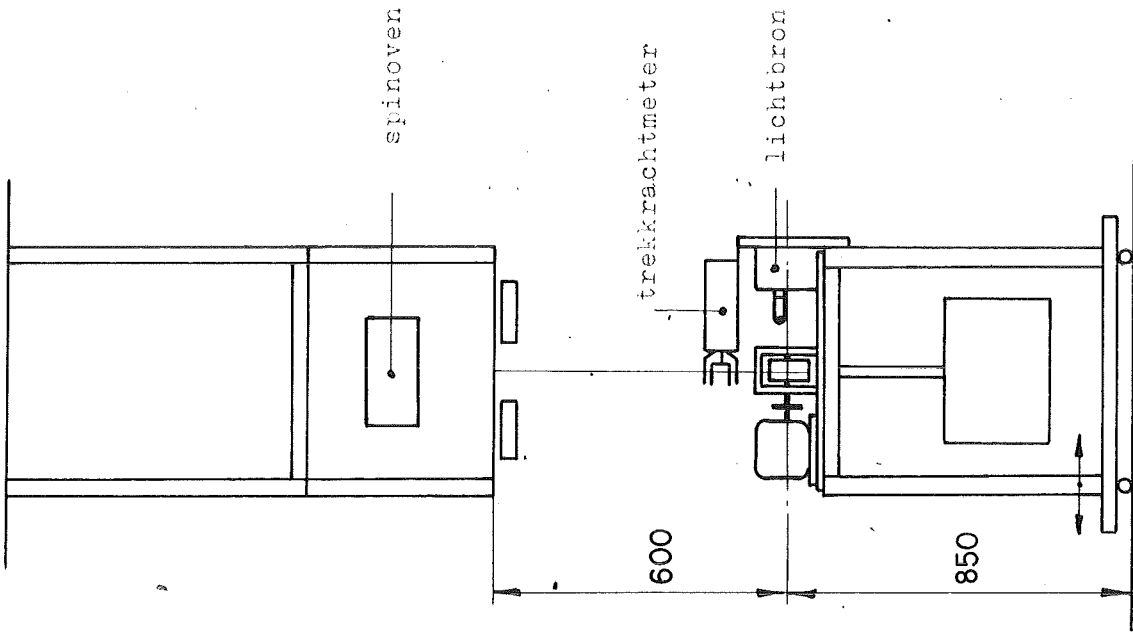
In figuur 26 zijn enkele afmetingen van het opwindmechanisme aangegeven. Om een regelmatige bewikkeling van de trommel te verkrijgen, wordt het opwindmechanisme, dat op rollen is opgesteld, heen en weer bewogen.

Wanneer niet wordt gemeten, zorgt de onder a beschreven afzuiginrichting ervoor, dat het uitstromende glas wordt afgevoerd.

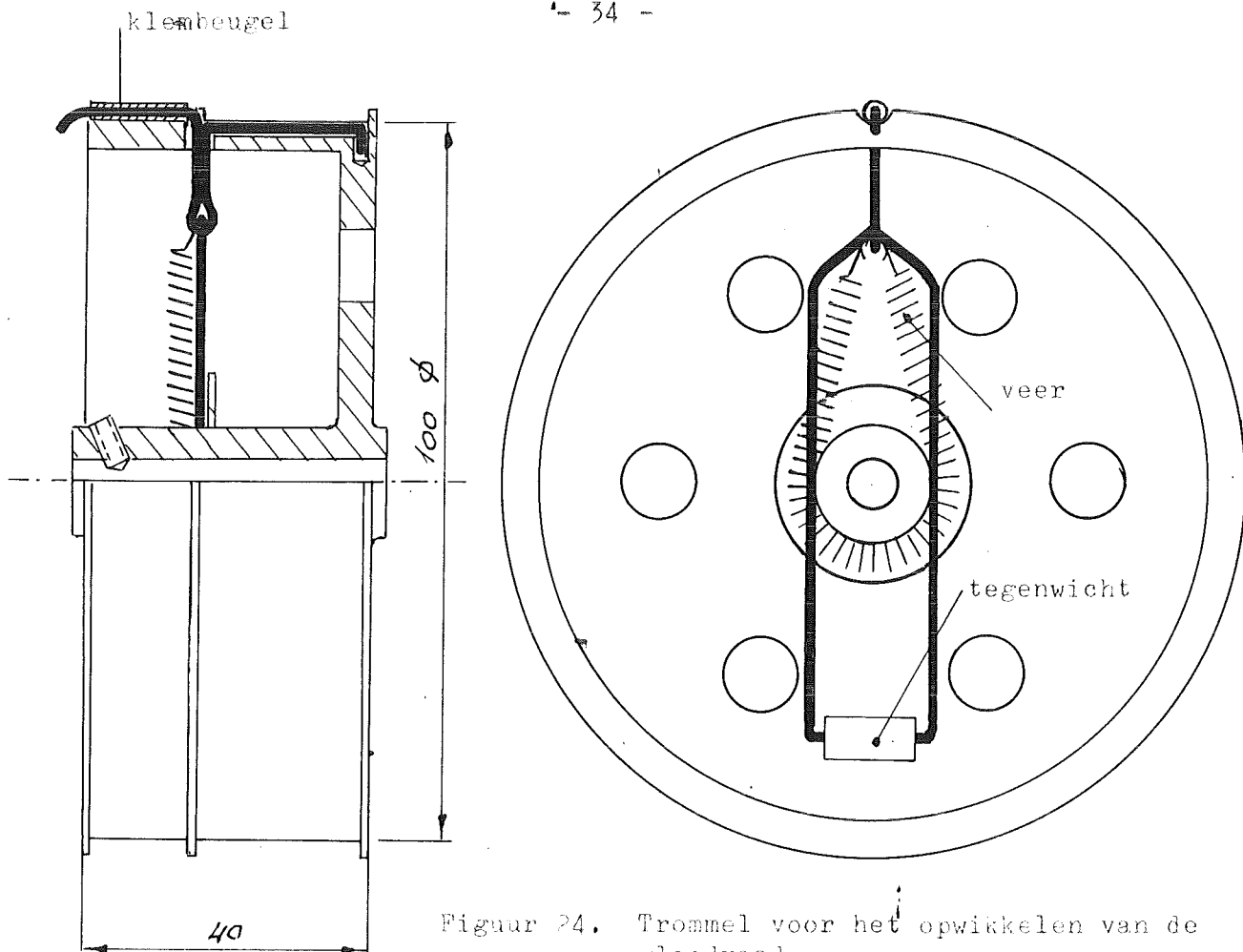
Ter vermindering van draadbreek en glasverlies, worden de niet in gebruik zijnde spinopeningen gekoeld door een luchtstroom.



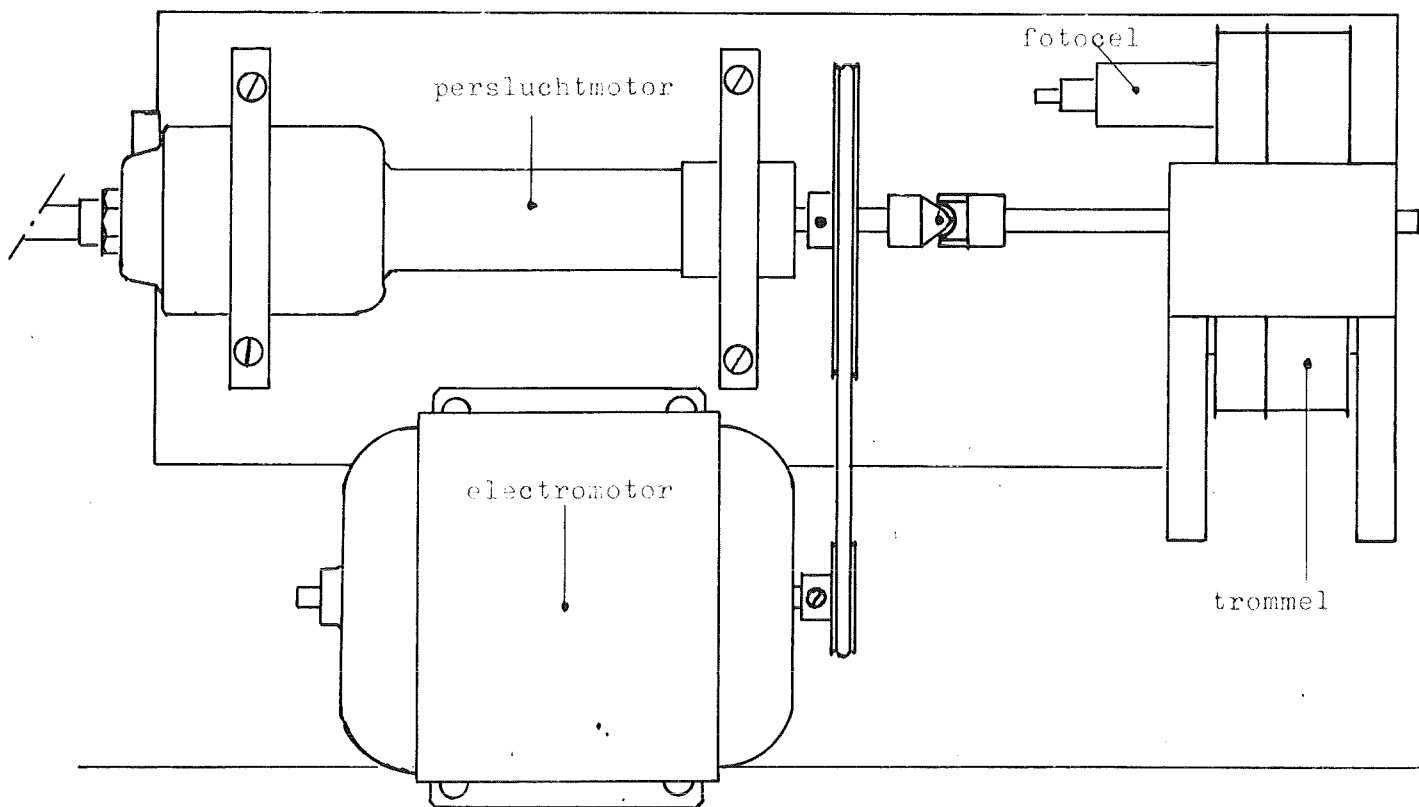
Figuur 23. Draadtrekmechanisme met wrijvingswielen.



Figuur 26. Opstelling van het draadtrekmechanisme.



Figuur 24. Trommel voor het opwickelen van de glasdraad.



Figuur 25. Aandrijving van het draadtrekmechanisme.

1.5 Het meten van de trekkracht in de draad.

a. Constructie van de trekkrachtmeter.

Het meten van de trekkracht berust op het optreden van reactiekrachten bij het buigen van een gespannen draad. De glasdraad wordt gebogen bij het doorlopen van een stelsel van vier pennen, waarvan het buitenste paar A vast en het binnenste paar B op een draaibaar juk is bevestigd. Figuur 27.

Door de symmetrische opbouw van het pennensysteem veroorzaken de reactiekrachten op de pennen, bij verdraaien van het juk, een resulterend koppel, terwijl momenten, tengevolge van wrijvingskrachten tussen pennen en glasdraad, elkaar opheffen.

Het juk is bevestigd aan de spoel van een draaispoelinstrument. Aan de andere zijde van de spoel bevindt zich een vlinder die, bij verdraaien van de spoel, de lichtbundel, die op een fototransistor valt, meer of minder afschermt.

De stroom door de fototransistor, die toeneemt bij grotere verlichtingssterkte, wordt versterkt en door de spoel geleid. In figuur 28 is het elektrische circuit van de trekkrachtmeter aangegeven.

Het systeem is zelfcompenserend. Een trekkracht in de draad, die op de aangegeven wijze om de pennen is gelegd, veroorzaakt een verdraaiing van het juk. Hierdoor verandert ook de stand van de vlinder en wel zodanig, dat meer licht wordt doorgelaten, waardoor de stroom door de spoel toeneemt. Deze stroom veroorzaakt een koppel, tegengesteld aan dat tengevolge van de trekkracht in de draad. Er stelt zich nu een evenwicht in, waarbij beide koppels gelijk zijn. De stroom door de spoel, die wordt aangegeven door een mA meter, is dus een maat voor de trekkracht in de draad.

Gevoeligheid en meetbereik zijn afhankelijk van de onderlinge stand van de pennen in onbelaste toestand (zonder draad) en de maximale stroom door de spoel. Deze mag in verband met de draaddiameter 200 mA niet overschrijden. De stroom door de fototran-

sistor is sterk afhankelijk van de helderheid van de lichtbron. Daarom wordt de stroom door de gloeidraad zodanig ingesteld, dat de stroom door de spoel bij volle opening van de vlinder 180 mA bedraagt.

b. IJking van de trekkrachtmeter.

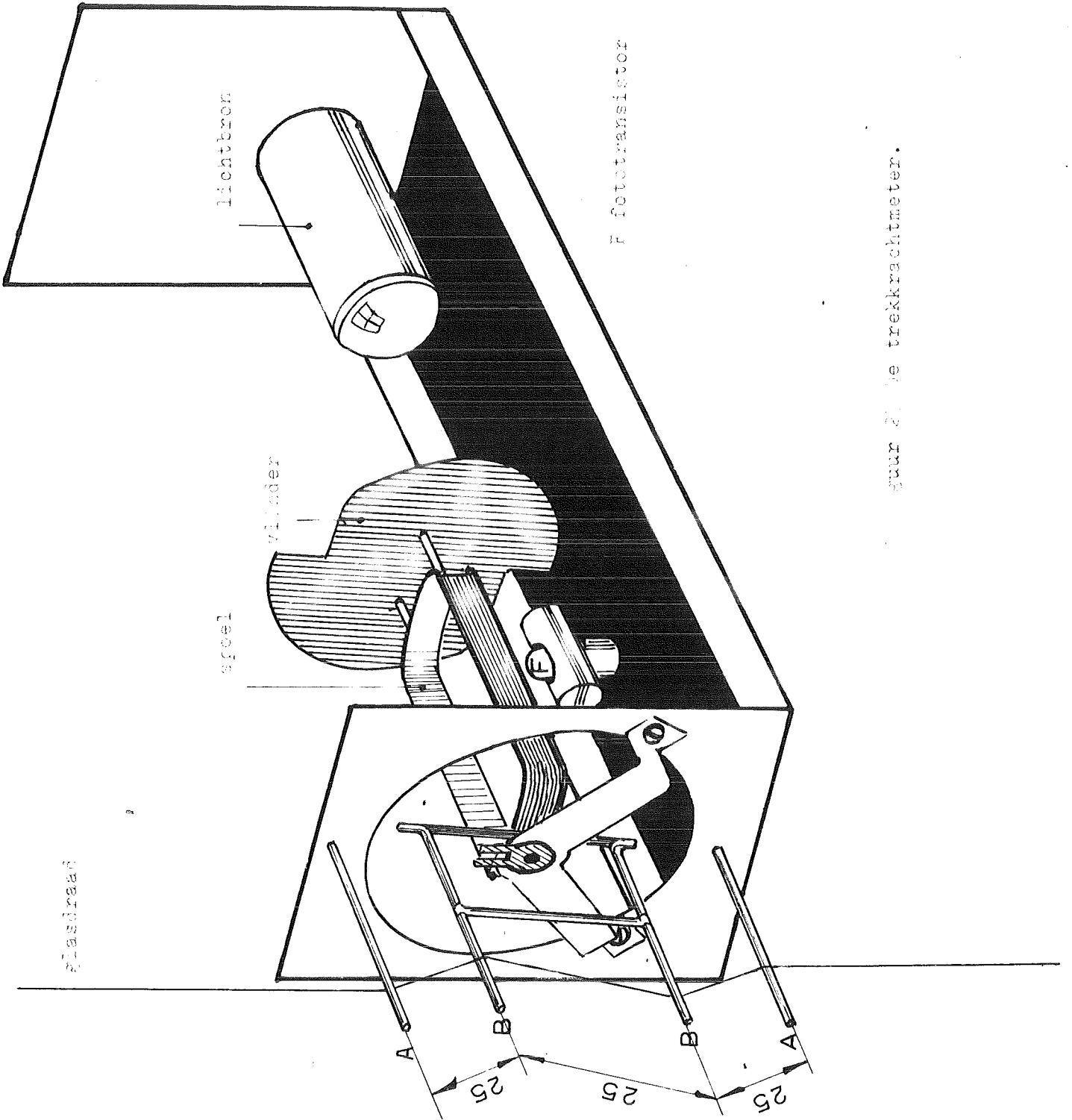
De meter is volgens een statische methode geijkt, nl. door een verticaal hangende glasdraad van bekende diameter te belasten met gewichten. Figuur 29.

Hierbij zijn draden van verschillende diameter gebruikt, omdat bij het buigen van de draad niet alleen reactiekrachten optreden tengevolge van de spanning in de draad, maar ook tengevolge van de stijfheid van de draad. Deze krachten zijn afhankelijk van de diameter.

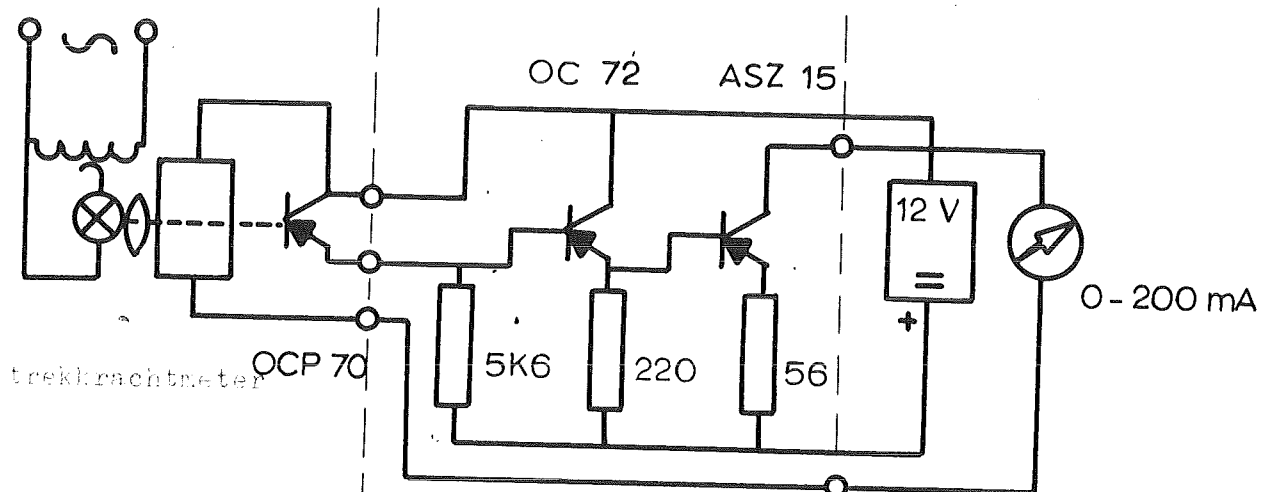
Het verband tussen trekkracht en stroom door de spoel met de draaddiameter als parameter is weergegeven in figuur 30. De gevonden krommen blijken voor krachten kleiner dan 5 gram door rechten benaderd te kunnen worden, die door één punt gaan.

Met behulp van figuur 31 kunnen deze krommen voor willekeurige draaddiameter bepaald worden. Hierin is de draaddiameter in micron uitgezet tegen de parameter q . q is de horizontale afstand in mm van een kromme voor bepaalde draaddiameter en het punt 180 mA bij een trekkracht van $0,1 \cdot 10^{-2}$ N.

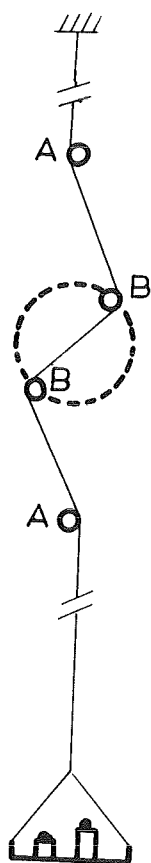
De trekkrachtmeter wordt boven het opwindmechanisme bevestigd, zoals in figuur 32 is aangegeven. Daar glas in schone toestand een zeer hoge wrijving geeft, moet de draad gesmeerd worden. Voor de trekkrachtmetingen, beschreven in 3.3 is een sterk verdunde, waterige oplossing van een amine gebruikt.



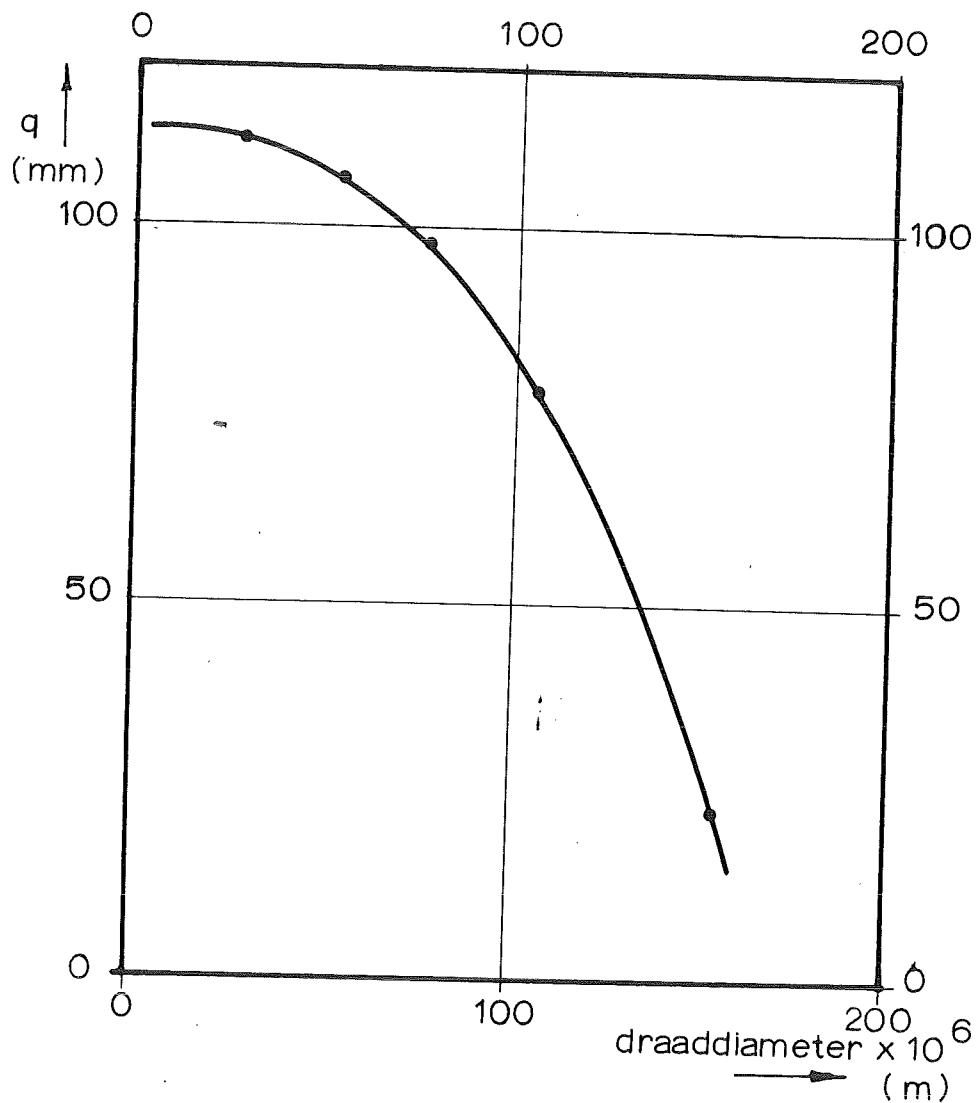
figuur 20 de trekkrechtmeter.



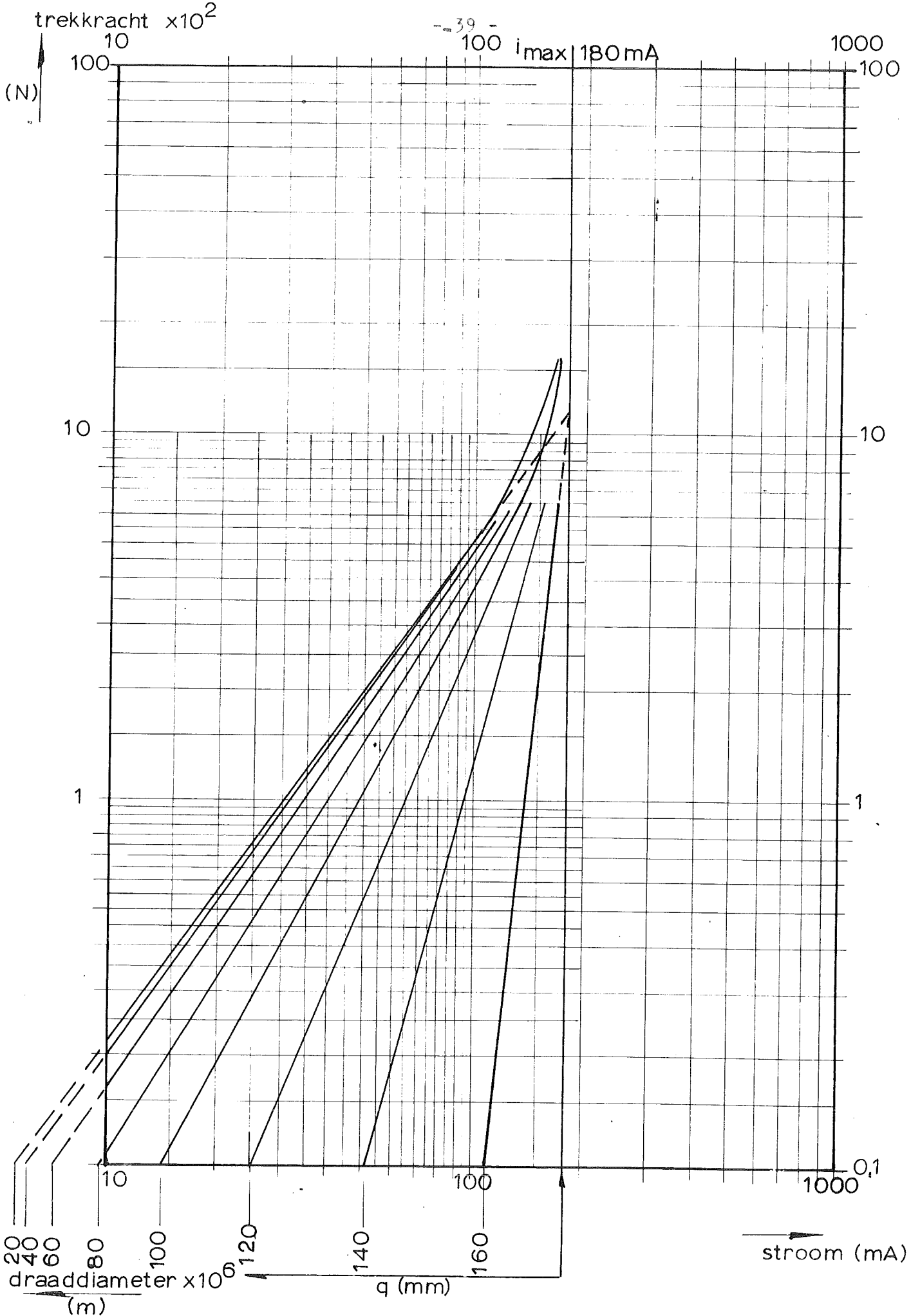
Figuur 28. Elektrisch circuit van de trekkrachtmeter.



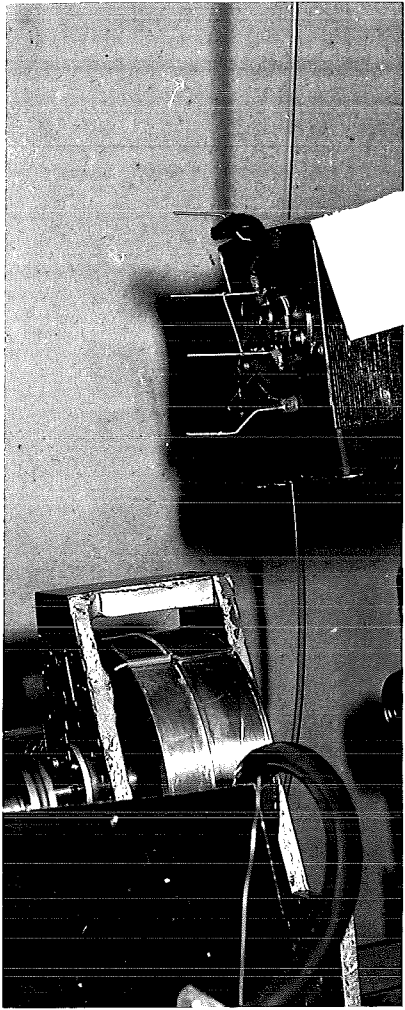
Figuur 29. Ophanging van de trekkrachtmeter.



Figuur 31. Parameter q als functie van de draaddiameter.



Figuur 30. IJkkromme van de trekkrachtmeter.



Figuur 32.

Opstelling van de trekkrachtmeter boven de opwikkeltrommel van het draadtrekmechanisme.

Hoofdstuk 2. Bepaling van de viscositeit en de oppervlaktespanning van "E" glas.

2.1 Het meten van de viscositeit. (5,7)

a. Meetmethode.

Voor het meten van de viscositeit is een rotatie viscosimeter gebruikt.

Voor het koppelen, nodig om een cilindrisch draailichaam (straal R_0) in een concentrisch vat (straal R_1) gevuld met een vloeistof (viscositeit η) met snelheid ω te doen ronddraaien, geldt :

$$M = 4\pi h\eta\omega \cdot \frac{R_0^2 R_1^2}{R_1^2 - R_0^2}$$

$$\text{Stel : } \frac{R_1}{R_0} = p \quad (13)$$

$$M = 4\pi h\eta\omega \cdot R_0^2 \cdot \frac{p^2}{p^2 - 1}$$

Bij de metingen in de experimenteeroven was het niet mogelijk de methode met concentrische cilindres te gebruiken; het omwentelingslichaam wordt hier vrij in het glasbad gehangen, dat een rechthoekige doorsnede heeft. (Diameter draailichaam : $10 \cdot 10^{-3}$ m.)

De kleinste afmeting van het glasbad bedraagt 100 mm, zodat de kleinste waarde van $p = 10$ is.

Voor $p \rightarrow \infty$ volgt uit (13) :

$$M_\infty = 4\pi h\eta\omega R_0^2 \quad (14)$$

zodat :

$$\frac{M}{M_\infty} = \frac{p^2}{p^2 - 1}$$

Voor $p = 10$ geldt dus :

$$\frac{M}{M_\infty} = 1,01, \text{ dus een fout van } 1\%.$$

Deze fout is te verwaarlozen, vergeleken met die in de temperatuurmeting en in de bepaling van de indompeling van het draailichaam.

Voor de metingen is een Rotovisko rotatieviscosimeter gebruikt. Het koppel kan uit de metervitslag S bepaald worden:

$$M = S \cdot 4,86 \cdot 10^{-5} \cdot 0,81 \text{ Nm} \quad (15)$$

Het toerental kan in stappen worden ingesteld en wordt aangegeven met het getal U , dat met het toerental samenhangt volgens :

$$\text{dus: } \omega = \frac{2\pi U}{60} = \frac{486 \cdot 2\pi}{60 \text{ H}} \quad (16)$$

Mit 14, 15 en 16 kan de viscositeit berekend worden :

$$\eta = \frac{SU}{hR_0^2} = 0,745 \cdot 10^{-6} \text{ Psec./m}^2 \quad (17)$$
$$\eta = \frac{SU}{hR_0^2} = 0,745 \cdot 10^{-3} \text{ cP}$$

b. Meetopstelling.

De meetkop van de Rotovisko, die door een flexibele kabel met de meet- en aandrijfeenheid is verbonden, wordt boven de oven gemonteerd en kan in verticale richting bewogen worden.

Als meetlichaam wordt een Crusilite verwarmingsstaaf gebruikt, waarvan de aluminium coating met zuur is weggeëetst. In de verbinding tussen staaf en meetkop (figuur 33) is een cardankoppeling opgenomen.

c. Verwerking van de waarnemingen.

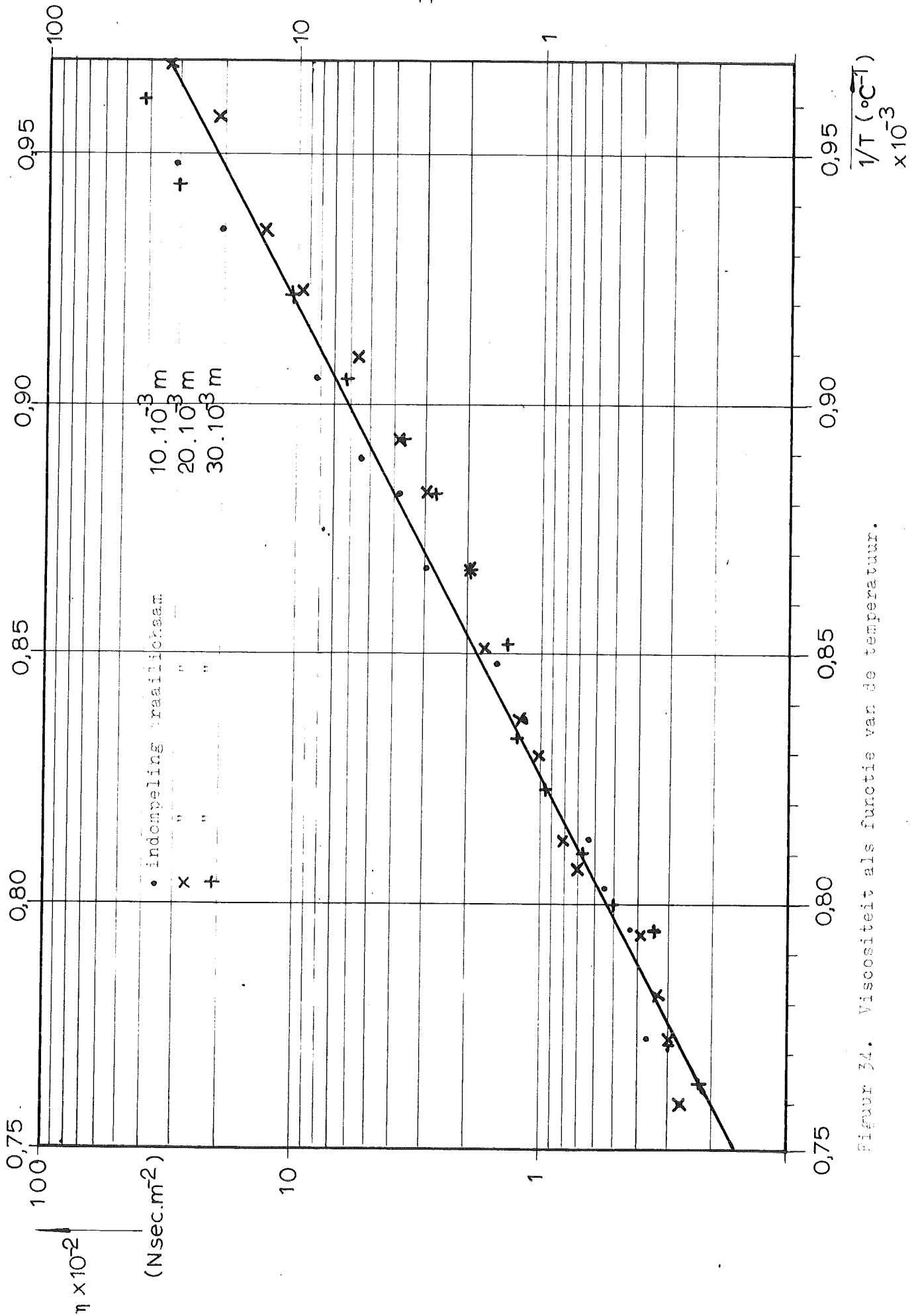
Om voor het eindeffect tengevolge van de vlakke onderzijde van het draailichaam te kunnen corrigeren, zijn metingen bij verschillende waarden van de indompeling h gedaan. De hieruit met behulp van (17) berekende waarden van de viscositeit zijn in figuur 34

logaritmisch uitgezet tegen de reciproke waarde van de temperatuur T .

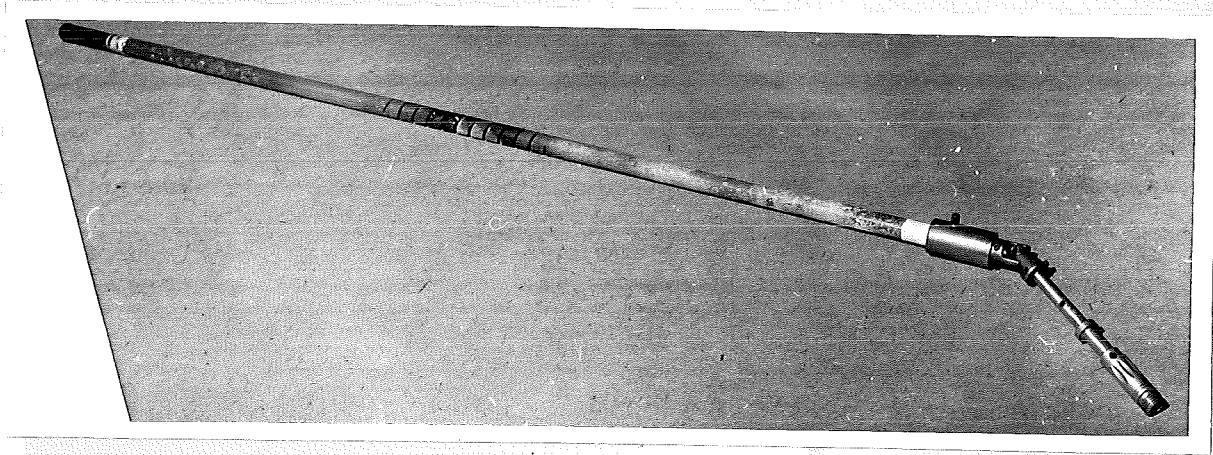
Van een systematisch verschil van de reeksen voor verschillende h is geen sprake, zodat het "eindeffect" binnen de meetnauwkeurigheid valt. Door de punten in figuur 34 kan met goede benadering een rechte getrokken worden, wat op een exponentieel verloop van de viscositeit duidt volgens :

$$\eta = A \exp. \left(+ \frac{B}{T} \right) \quad (18)$$

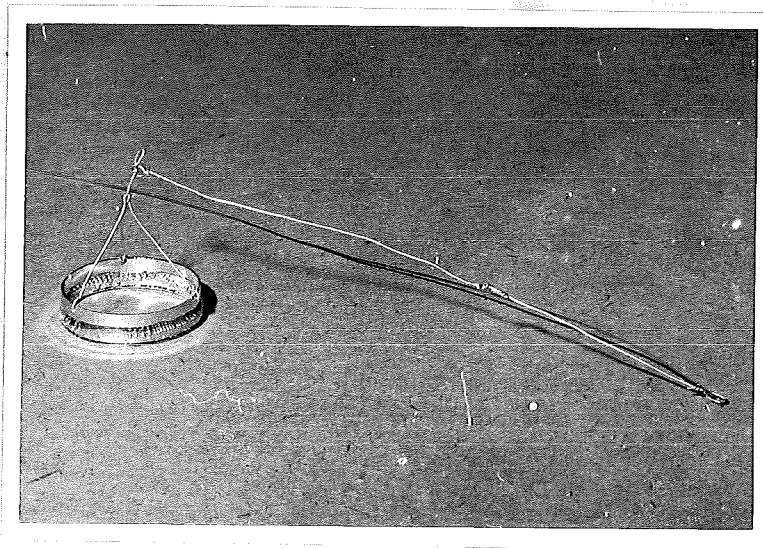
Met metingen bij verschillende toerentallen, dus verschillende schuifspanningen, is gebleken, dat het glas zich in het beschouwde temperatuurgebied Newton's gedraagt. Dit is in overeenstemming met de literatuurgegevens (5).



Figuur 34. Viscositeit als functie van de temperatuur.



Figuur 33. SiC. staaf, gebruikt als draailichaam bij de viscositeitsmetingen.



Figuur 35. Platinaring voor het meten van de oppervlakte-spanning.

2.2 Meting van de oppervlaktespanning. (5)

a. Meetmethode en opstelling.

Het meten van de oppervlaktespanning berust op de kracht, die het gevormde vloeistofvliës op een in de vloeistof gedompeld voorwerp uitoefent.

Het vlies wordt gevormd aan een platinaring (figuur 35), die aan een balans is opgehangen. De balans is zodanig getarreerd, dat er in lucht evenwicht is en opgesteld boven de experimenteeroven op een in verticale richting verplaatsbare tafel.

De ring wordt in het glas gedompeld en daarna opgetrokken tot de onderzijde ervan in het vlak van het ongestoorde vloeistofoppervlak ligt (figuur 36).

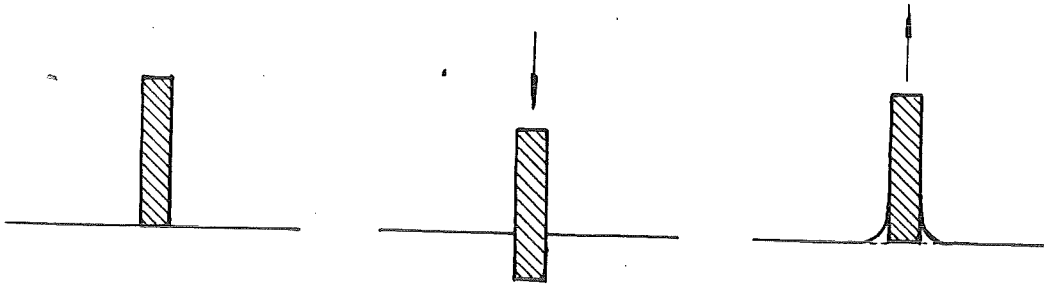
Nu wordt de balans door het bijplaatsen van gewichten weer in evenwicht gebracht.

Onder aannahme van volledige bevochtiging geldt nu :

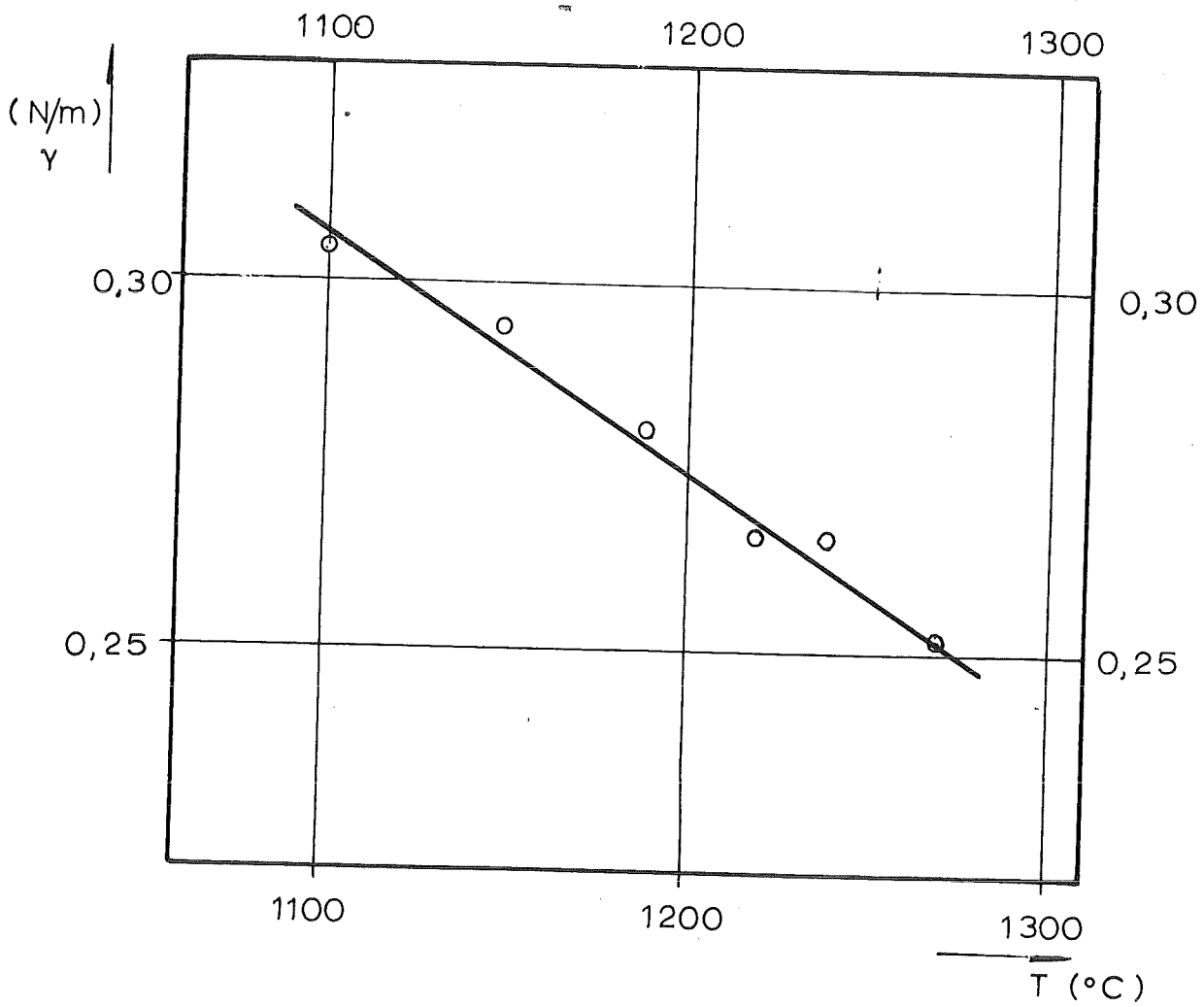
$$F = 2 L \gamma \quad (N) \quad (19)$$

b. Verwerking van de waarnemingen.

De lengte L van de omtrek van de ring bedraagt $L = 105 \cdot 10^{-3}$ m. In figuur 37 is de oppervlaktespanning als functie van de temperatuur uitgezet. Deze waarden zijn in goede overeenstemming met die in de literatuur (5).



Figuur 36. Meting van de oppervlaktespanning.



Figuur 37. De oppervlaktespanning als functie van de temperatuur.

Hoofdstuk 3

Metingen aan het uitstromen van glas uit een spinopening.

3.1 Inleiding.

Het massadebiet door de spinopening wordt bepaald door :

1. De temperatuur van de spinopening.
2. De afmetingen van de spintuit.
3. De statische druk op de spinplaat.
4. De trekkracht in de gesponnen glasdraad.
5. De fysische constanten van het gebruikte glas.

De invloed van de temperatuur is een gevolg van de temperatuursafhankelijkheid van de viscositeit van het glas.

Deze is in het beschouwde temperatuursgebied ca 5% / $^{\circ}\text{C}$.

Bij de in dit hoofdstuk beschreven metingen is aan één spintuit gemeten; de diameter hiervan is $2 \cdot 10^{-3}$ m, de lengte $4 \cdot 10^{-3}$ m.

De statische druk op de spinplaat is voor alle metingen dezelfde.

Voor de metingen zijn de volgende twee methoden toegepast :

- 1) Met het draadtrekmechanisme (1.4) is voor verschillende temperaturen het massadebiet als functie van de treksnelheid bepaald. De hierbij optredende trekkrachten in de draad zijn gemeten met de trekkrachtmeter (1.5).
- 2) Uit metingen aan pegels, die ontstaan door vrije uitstroming onder invloed van de zwaartekracht, is bij verschillende temperaturen het debiet als functie van de trekkracht bepaald. Tevens is hieruit de draaddiameter als functie van de trekkracht berekend.

Bij de metingen volgens 1) wordt in de eerste plaats een treksnelheid aan de draad opgelegd, terwijl bij de metingen volgens 2) de trekkracht, nl. het gewicht van de aangroeiende pegel, bepalend is.

Daar de metingen volgens 1) en 2) verschillende gebieden van debiet en treksnelheid bestrijken, kan het uitstroomverschijnsel door combinatie van de meetgegevens over een groot bereik bestudeerd worden.

3.2 Meting van het debiet met het draadtrekmechanisme (1.4).

Het debiet ϕ_m wordt gevonden door de massa van het gesponnen glas te delen door de meettijd.

De tijd, nodig voor het spinnen van ca $3 \cdot 10^{-3}$ kg glasdraad varieert van 900 sec. bij 1075°C . tot 300 sec. bij 1180°C .

Het toerental van de trommel (omw./min.) wordt gevonden door de aanwijzing van de frequentiemeter (1.4) met 10 te vermenigvuldigen.

De treksnelheid volgt dan uit :

$$v = \pi \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{n}{60} = 5,23 \cdot 10^{-3} \cdot n \text{ m/sec.} \quad (20)$$

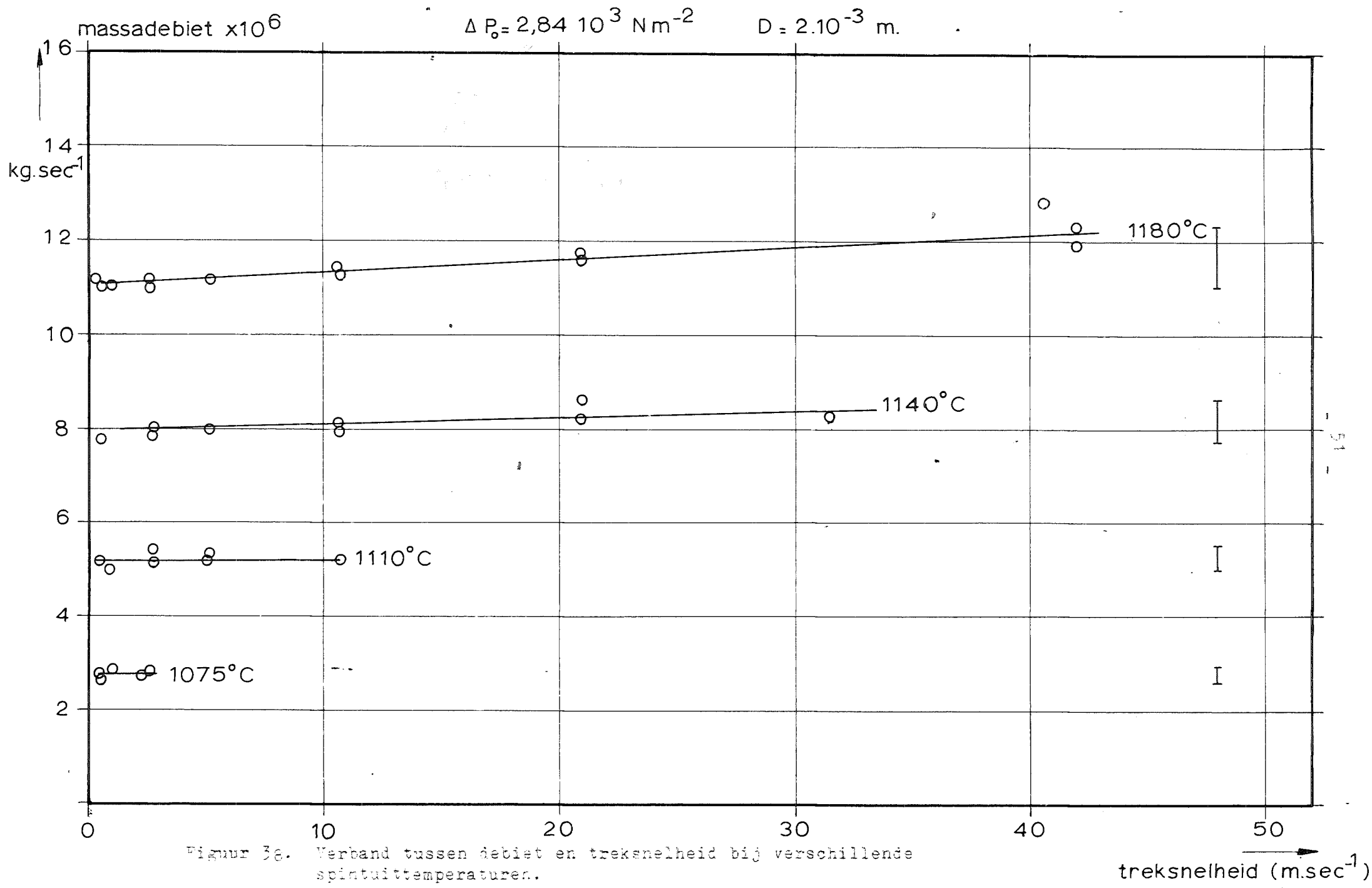
De draaddiameter kan worden bepaald uit het debiet ϕ_m en de treksnelheid:

$$d = \sqrt{\frac{\phi_m}{\frac{\pi}{4} \cdot v \cdot \rho}} = 0,305 \sqrt{\frac{\phi_m}{n}} \text{ m.} \quad (21)$$

Figuur 38 geeft het verband tussen debiet en treksnelheid met de spintuittemperatuur als parameter.

De kleinste draaddiameter, die bij deze metingen gesponnen wordt, bedraagt ca $10 \cdot 10^{-6}$ m. De oppervlakte van het glas is onder deze omstandigheden $150 \text{ m}^2 / \text{kg}$.

Om na te gaan of de adsorptie van water aan het glasoppervlak invloed heeft op de meetresultaten, zijn de monsters gedurende 24 uur bij 105°C gedroogd. Het massaverschil van de monsters voor en na het drogen bleek niet meetbaar te zijn. (meetnauwkeurigheid $\pm 1 \text{ mg}$)



Figuur 38. Verband tussen debiet en treksnelheid bij verschillende spintuitemperaturen.

treksnelheid (m.sec⁻¹)

3.3 Meting van de trekkracht in de draad als functie van de treksnelheid.

De metingen zijn uitgevoerd bij de zelfde spintuittemperaturen als bij de metingen volgens 3.2.

De trekkrachtmeter (1.5) kan over het volle toerenbereik van het draadtrekmechanisme gebruikt worden, mits voor een voldoende smering van de draad wordt zorggedragen.

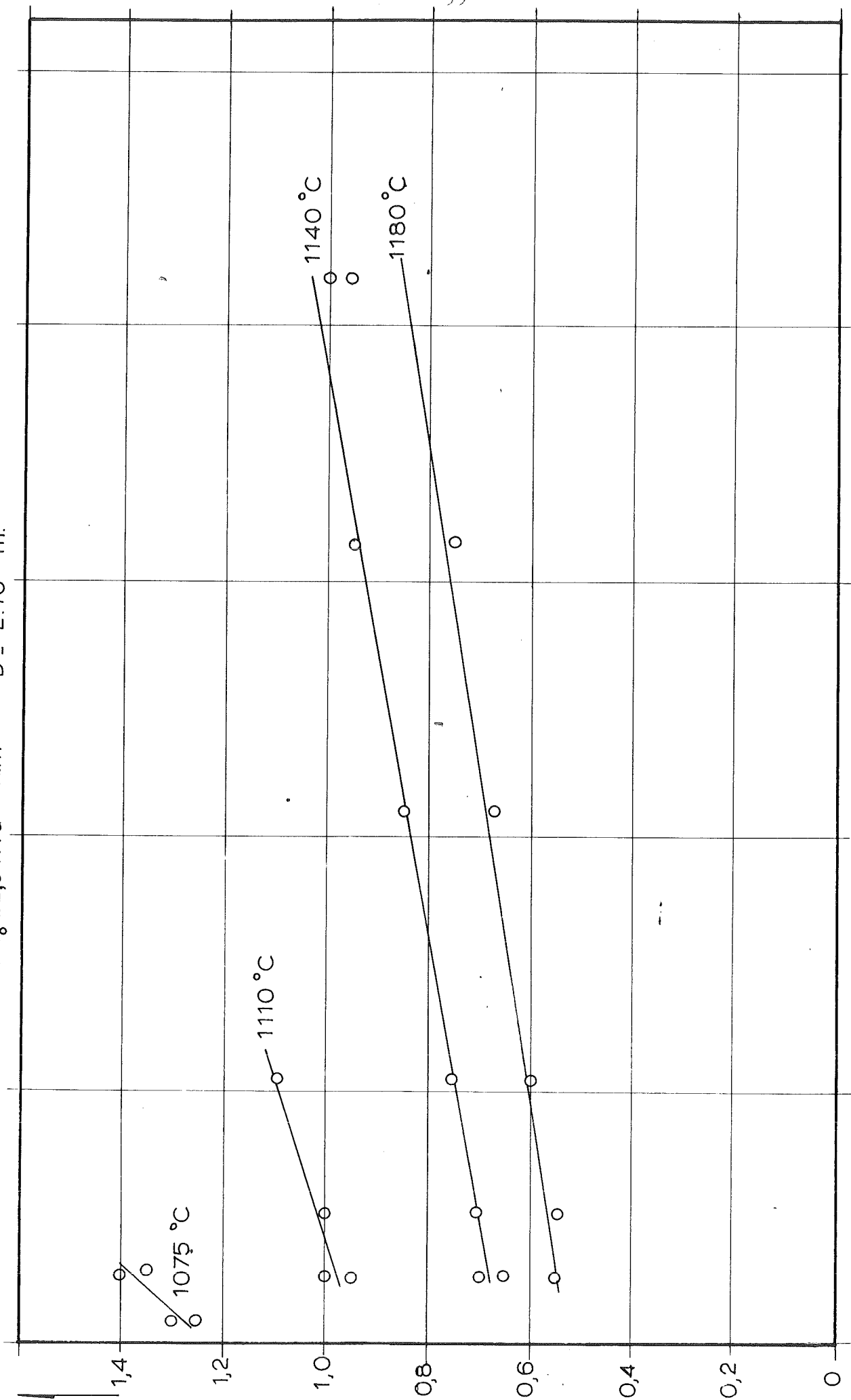
Hiertoe wordt de draad langs een viltblokje geleid, dat juist boven de pennen van de trekkrachtmeter is aangebracht.

Dit viltblokje wordt uit een hoger gelegen reservoir via een flexibele leiding van smeermiddel voorzien. De hoogte van dit reservoir wordt zo ingesteld, dat er tijdens het meten juist geen druppels van het blokje vallen.

De meetresultaten zijn uitgezet in figuur 39, met de temperatuur als parameter.

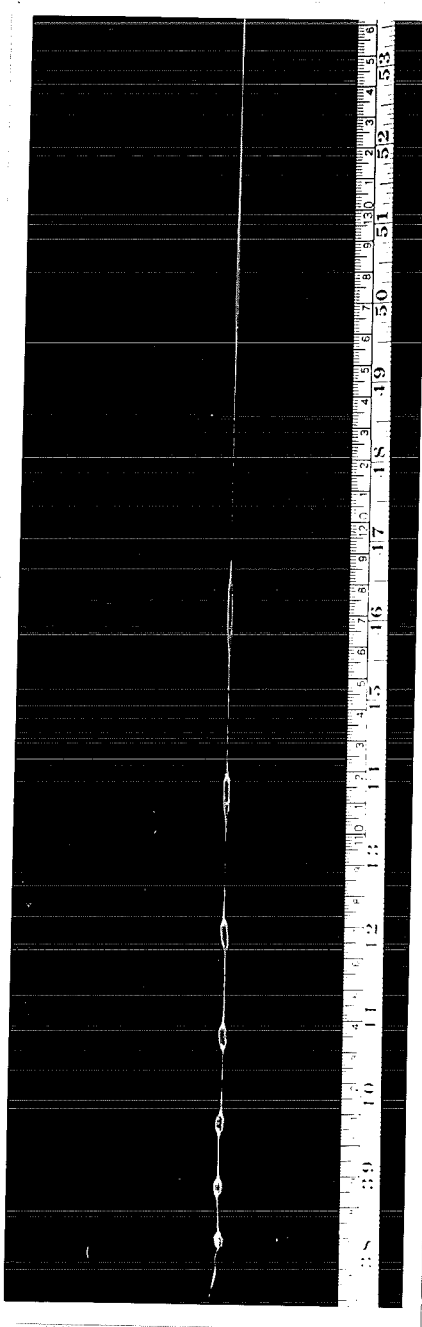
trekkracht $\times 10^{12}$ (N)

$\Delta P_0 = 2,84 \cdot 10^3 \text{ Nm}^{-2}$ $D = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.



Figuur 39. Verband tussen trekkracht en treksnelheid.

treksnelheid (m.sec⁻¹)



Figuur 40.

Glaspegel met contracties,
gebruikt voor het meten van
het massadebiet als functie
van de trekkracht.

$T = 1110^{\circ}\text{C}.$

$\Delta t = 30 \text{ sec}.$

3.4 Meting van het verband tussen debiet en trekkracht bij verschillende spinplaattemperaturen.

De metingen zijn gedaan aan pegels, die door vrije uitstroming onder invloed van de zwaartekracht aan de spinopening ontstaan. Door na bepaalde tijdsintervallen aan de pegel te trekken, ontstaan contracties, die de gedurende een interval uitgestroomde hoeveelheid glas markeren. Een dergelijke pegel is in figuur 40 afgebeeld.

Noemen wij de massa van de pegel tot de n^e contractie m_n en de massa van het glas tussen de $(n + 1)^e$ en de n^e contractie

$\Delta m_n = m_{n+1} - m_n$, terwijl steeds na een tijdsinterval Δt een contractie is gevormd, dan is het debiet :

$$\phi_m = \frac{\Delta m_n}{\Delta t} \text{ kg/sec.} \quad (22)$$

Dit is uitgestroomd onder invloed van een gemiddelde trekkracht

$$f = (m_n + \frac{1}{2} \Delta m_n) g \quad (N) \quad (23)$$

De volgens (22) en (23) bepaalde waarden van debiet en trekkracht zijn grafisch uitgezet in figuur 41.

Door extra-polatie kan hieruit het debiet voor $f = 0$ bepaald worden.

Het glas stroomt in de spinopening laminair ($Re < 10^{-4}$); het debiet voor $f = 0$ kan dus berekend worden met de relatie van Hagen-Poiseuille :

$$\phi_m = \frac{\pi \Delta p D^4}{128 \eta L} \rho \quad (\text{kg/sec.}) \quad (24)$$

$$\text{met } \Delta P = P_1 - P_2.$$

P_2 is de door de oppervlaktespanning veroorzaakte overdruk aan de mond van de spintuit :

$$P_2 = \frac{4Y}{D} \quad (\text{N/m}^2) \quad (25)$$

De statische druk P_1 boven de spinopening volgt uit :

$$P_1 = h \rho g \quad (\text{N/m}^2) \quad (26)$$

h is bepaald met de niveaumeter, (1.3)

Voor het drukverschil ΔP moet dus in (24) ingevuld worden :

$$\Delta P = g \rho h - \frac{4\gamma}{D} \quad (\text{N/m}^2) \quad (27)$$

De met (24) berekende waarden van ϕ_m zijn groter dan de gemeten waarden. Dit is toe te schrijven aan een foutieve meting van de temperatuur van de spintuit; het thermokoppel is namelijk niet op de spintuit, doch op een zijwand van het bakje, waarvan de spinplaat de bodem vormt, aangebracht. (1.2)

In tabel III zijn de gemeten en de uit (22), (24) en (27) berekende waarden van de spinplaattemperatuur met elkaar vergeleken.

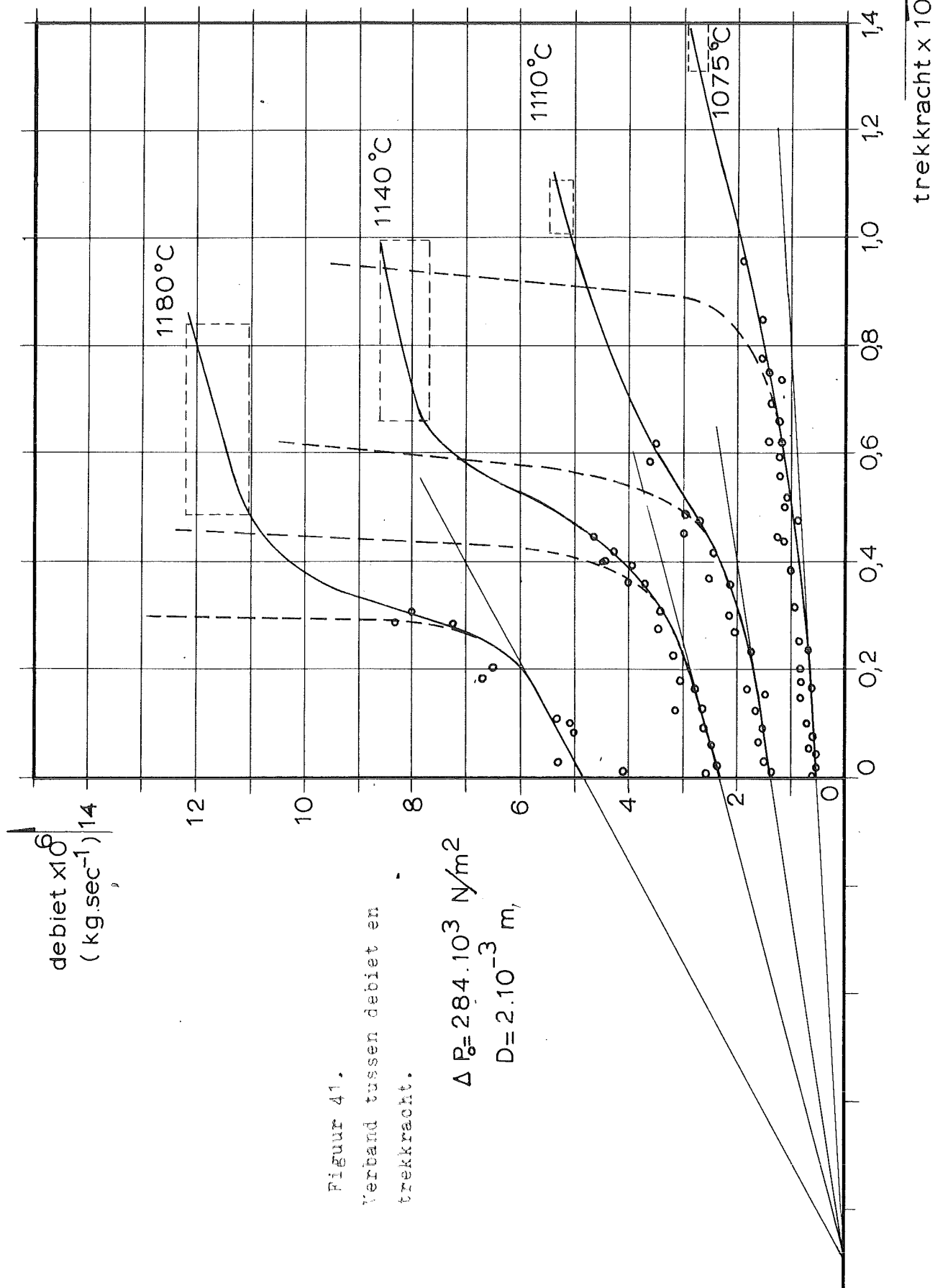
Tabel III

gemeten : mV	°C	berekend : °C
12,25 =	1130	1075
12,75 =	1170	1110
13,25 =	1205	1140
13,75 =	1240	1180

In dit verslag zijn de berekende waarden van de spinplaattemperatuur aangehouden.

De rechten in figuur 41, die aan de krommen raken voor $f = 0$, berusten op de theorie in Hoofdstuk 4,

Het gebied, waarin de volgens 3.(2 en 3) gemeten debieten en trekkrachten liggen, is omljnd.



Figuur 41.
Verband tussen debieten
trekkracht.

$\Delta P_g = 284 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$
 $D = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

3.5 Bepaling van het verband tussen draaddiameter en trekkracht.

De diameter van de glaspegels, die ontstaan door vrije uitstroming onder invloed van de zwaartekracht, neemt af, als de massa ervan, dus de trekkracht, toeneemt. Figuur 40.

Het verband tussen de trekkracht en de diameter is bepaald door het opmeten van pegels, waarin geen contracties zijn aangebracht. De trekkracht volgt uit het berekende volume van het gedeelte van de pegel onder de beschouwde diameter.

De resultaten zijn uitgezet in figuur 42.

De krommen in figuur 42 zijn naar kleine waarden van d geëxtrapoleerd aan de hand van de in 3.3 bepaalde trekkrachten bij hoge spinsnelheden.

Uit figuur 41 en 42 kan nu het verband tussen debiet en draaddiameter bepaald worden. De bijbehorende treksnelheid kan worden berekend met (21), die na omwerken geeft:

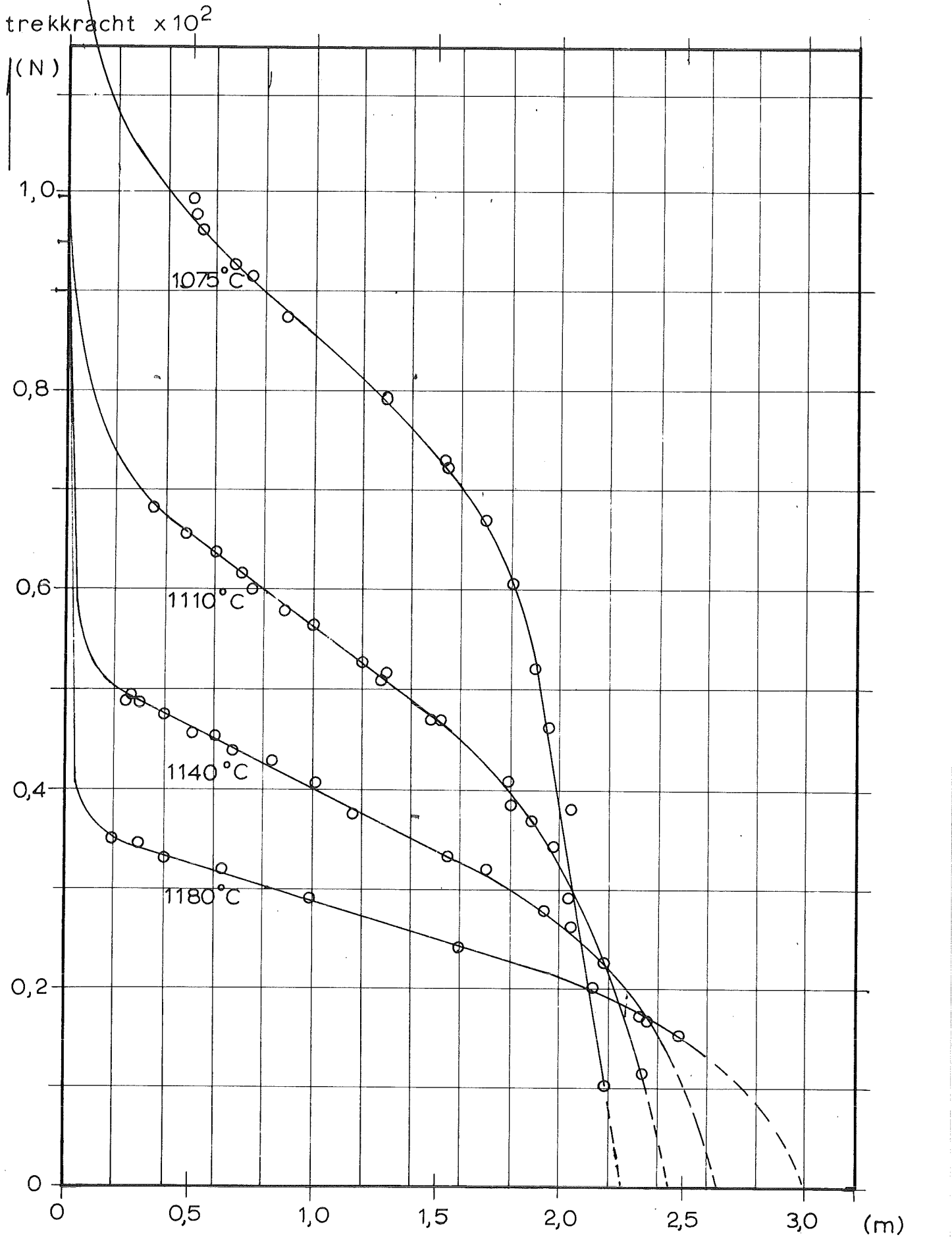
$$v = 4,87 \cdot 10^{-4} \frac{\phi^3}{d^2} \text{ m.sec.}^{-1} \quad (28)$$

In figuur 43 is het debiet tegen de treksnelheid uitgezet. Voor kleine debieten is de treksnelheid bepaald uit figuur 41 en 42 met (28), voor grote debieten zijn ze ontleend aan figuur 38.

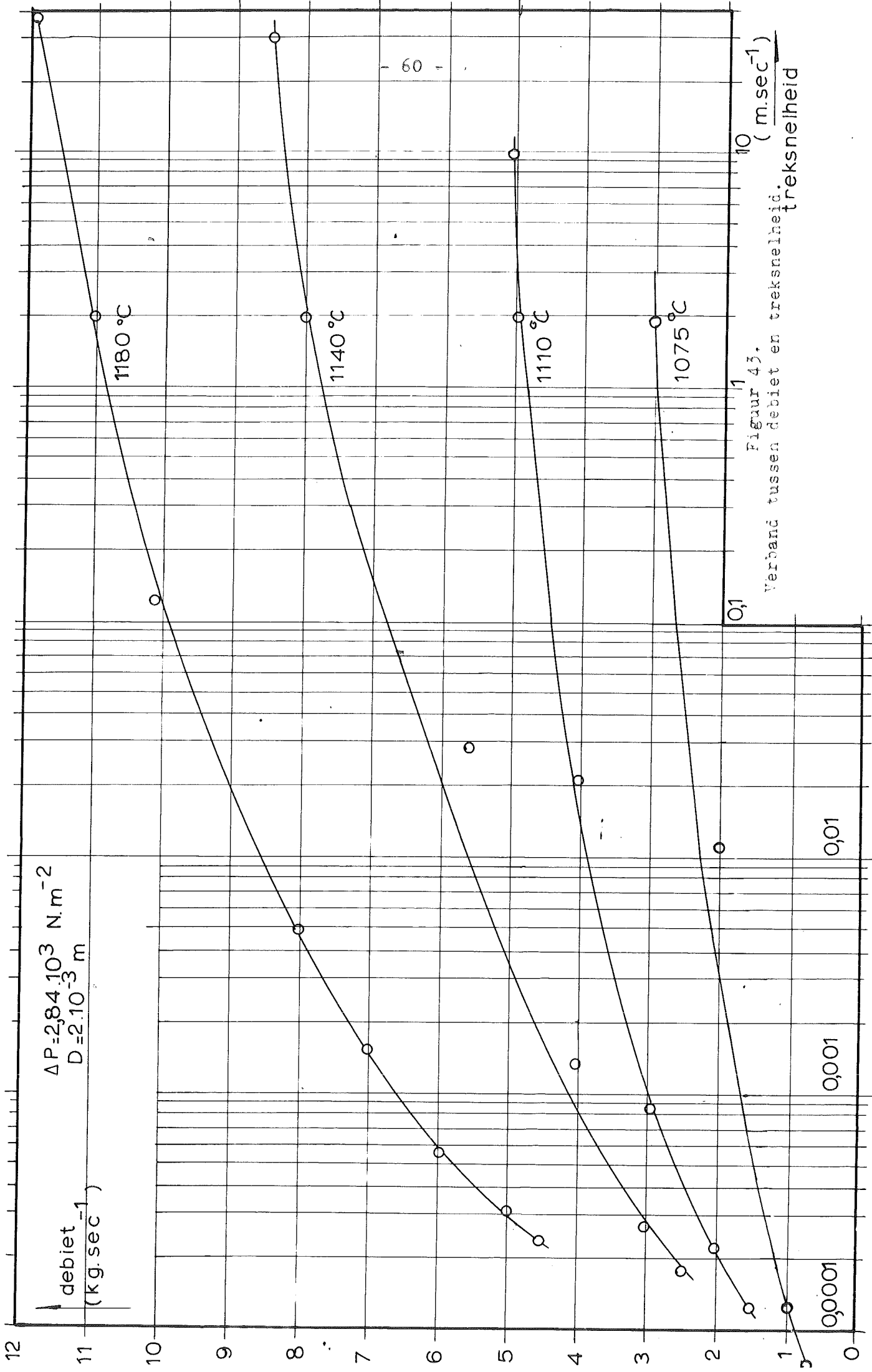
De snelheidsas is logaritmisch gekozen, omdat het debiet juist bij kleine treksnelheden snel toeneemt.

$$\Delta P = 2,84 \cdot 10^3 \text{ Nm}^{-2}$$

$$D = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$



Figuur 42. Verband tussen trekkracht en draaddiameter, bij verschillende spintuitemperaturen.



Figuur 43.
Verband tussen debiet en treksnelheid. (m.sec⁻¹)

Hoofdstuk 4

Theoretische achtergrond en discussie.

4.1 Energiebalans.

Voor het verband tussen de verschillende vormen van mechanische energie geldt volgens (3) :

$$0 = - \left[\int_1^2 \frac{1}{\rho} dp + g \Delta h + \frac{1}{2} \Delta \left(\frac{\langle v^3 \rangle}{\langle v \rangle} \right) \right] \phi_m - \phi_a - \phi_{wv} \quad (29)$$

Wanneer doorsnede 1 de mond van de spintuit voorstelt en doorsnede 2 een punt, waar de draad vast is (figuur 44) volgt uit (29):

$$0 = \left(\frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{1}{2} v_2^2 - \frac{1}{2} v_1^2 \right) \phi_m + f v_2 - \phi_{wv} \quad (30)$$

a
b
c
d

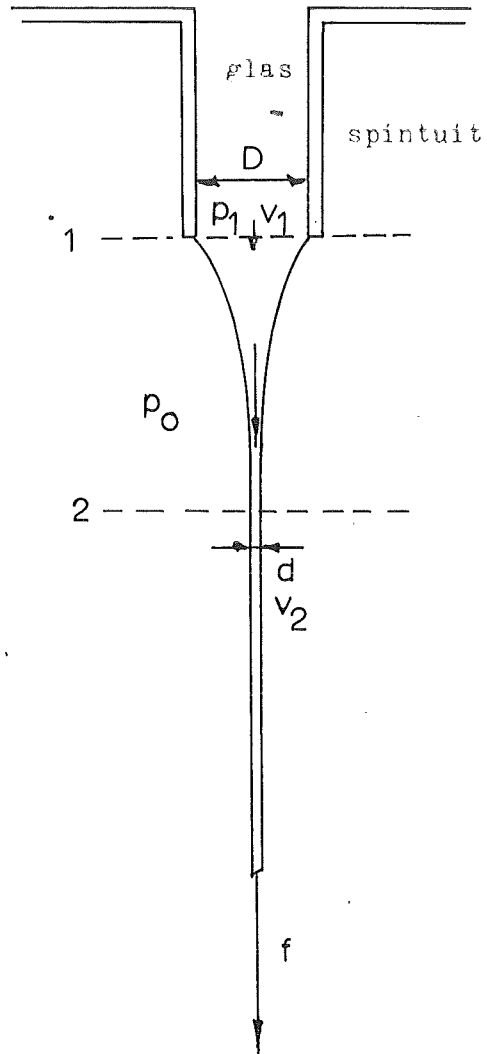
Hierin stelt term a het effectieve pompvermogen voor, b het vermogen, nodig om het uitstromende glas te versnellen tot snelheid v_2 , c het toegevoerde vermogen, geleverd door de trekkracht f , terwijl d het verlies ten gevolge van visceuze dissipatie is.

$$p_2 - p_1 = \rho \frac{f v_2}{\phi_m} - \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) - \rho \frac{\phi_{wv}}{\phi_m}$$

Volgens (4) mag voor de dissipatieterm worden geschreven :

$$\frac{\phi_{wv}}{\phi_m} = \frac{1}{2} \langle \bar{v} \rangle^2 C \quad \text{Stroming laminair!} \quad (31)$$

In (31) is $\langle \bar{v} \rangle$ een karakteristieke snelheid van het uitstroomverschijnsel, terwijl C de "wrijvingsverliesfactor" is. C is afhankelijk van Re en van de geometrie.



Figuur 44. De vorm van de uitstromende glasstraal.

Invullen van 30 in 31 levert :

$$(p_2 - p_1) = \rho \frac{f v_2}{\phi_m} - \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) - \frac{1}{2} \rho C \langle \bar{v} \rangle^2 \quad (32)$$

Uit opnamen van de meniscus, gemaakt tijdens de metingen met het draadtrekmechanisme (figuur 45), blijkt, dat de bovenzijde van de meniscus over een groot snelheidsbereik nauwelijks verandert.

Verhogen van de treksnelheid heeft dus alleen aan de onderzijde invloed, nl. het dunner worden van de draad. v_2 is dus de karakteristieke snelheid van het uitstroomverschijnsel.

Dus (32) wordt :

$$(p_2 - p_1) = \frac{f}{\frac{\pi}{4} d^2} - \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) - \frac{1}{2} \rho C v_2^2 \quad (33)$$

Met behulp van de meetresultaten kan worden aangetoond, dat

$$\frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \ll \frac{1}{2} \rho C v_2^2 \ll \frac{f}{\frac{\pi}{4} d^2},$$

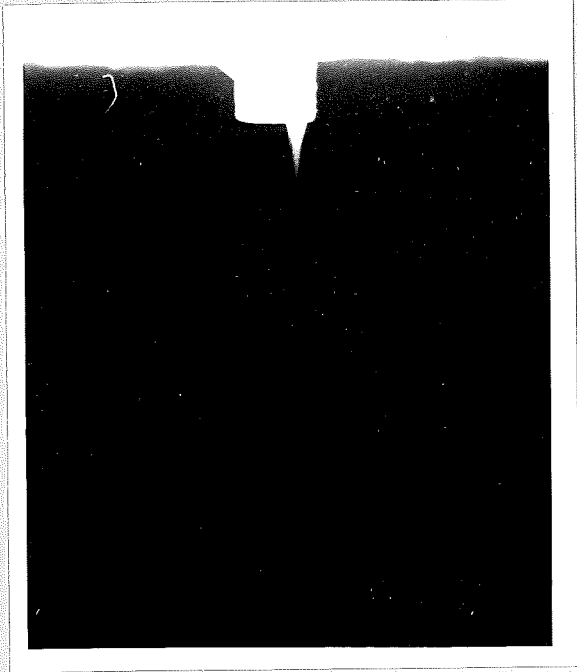
terwijl voor hoge snelheden geldt :

$$\frac{f}{\frac{\pi}{4} d^2} \approx \frac{1}{2} \rho C v_2^2 \quad (34)$$

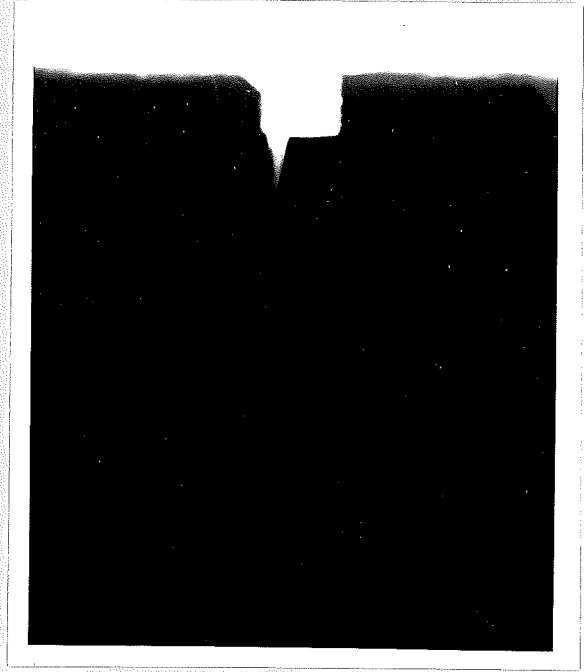
Dus voor de uitstromende glasstraal reduceert de energievergelijking tot :

$$(p_2 - p_1) = \frac{f}{\frac{\pi}{4} d^2} - \frac{1}{2} \rho C v_2^2 \quad (35)$$

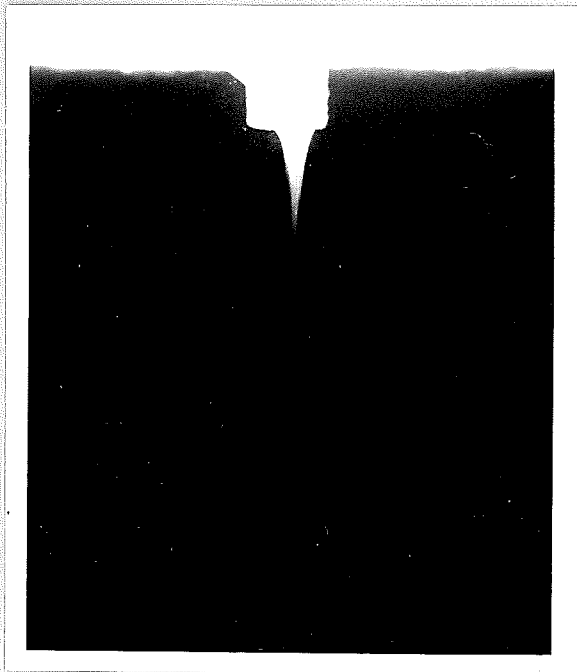
*f wordt
opplaat
2 gemaakt*



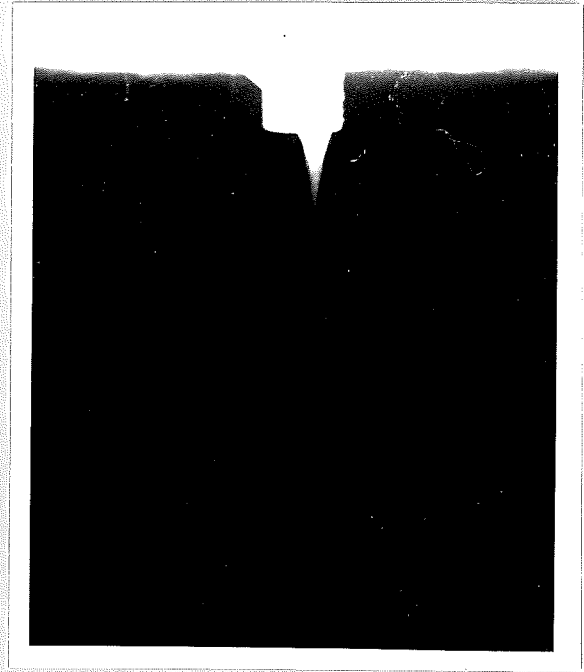
$T = 1075^{\circ}\text{C}$
 $v = 0,6 \text{ m/sec.}$



$T = 1075^{\circ}\text{C}$
 $V = 3 \text{ m/sec.}$

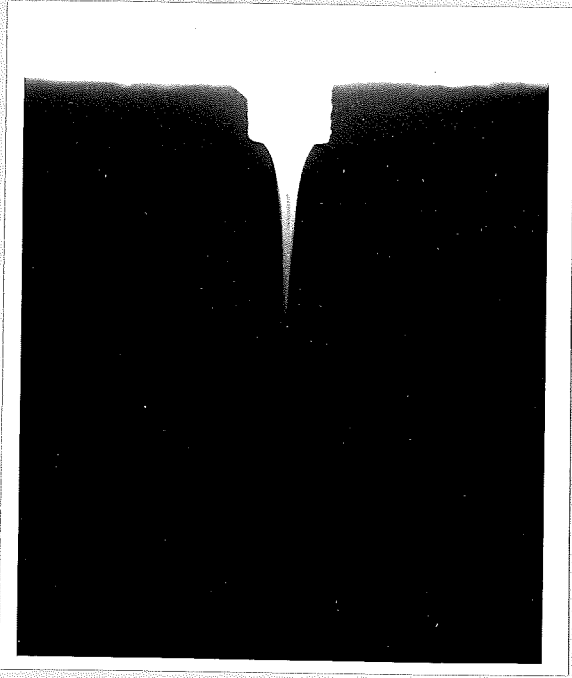


$T = 1110^{\circ}\text{C}$
 $V = 0,6 \text{ m/sec.}$

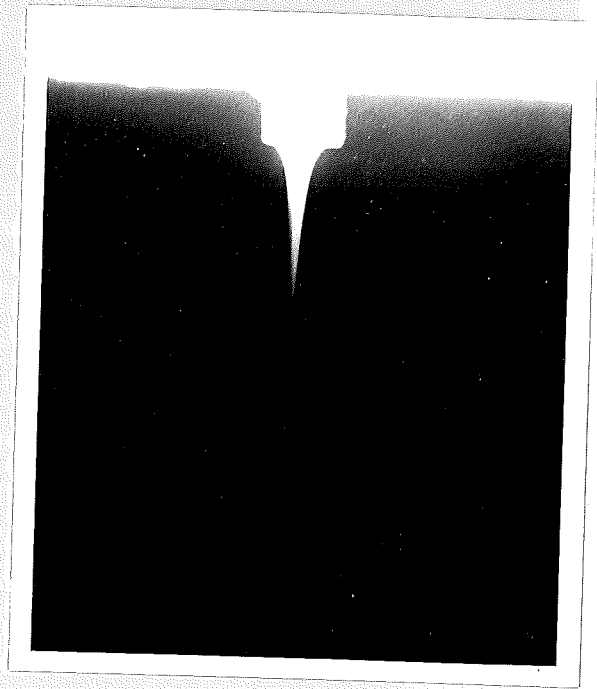


$T = 1110^{\circ}\text{C}$
 $V = 3 \text{ m/sec.}$

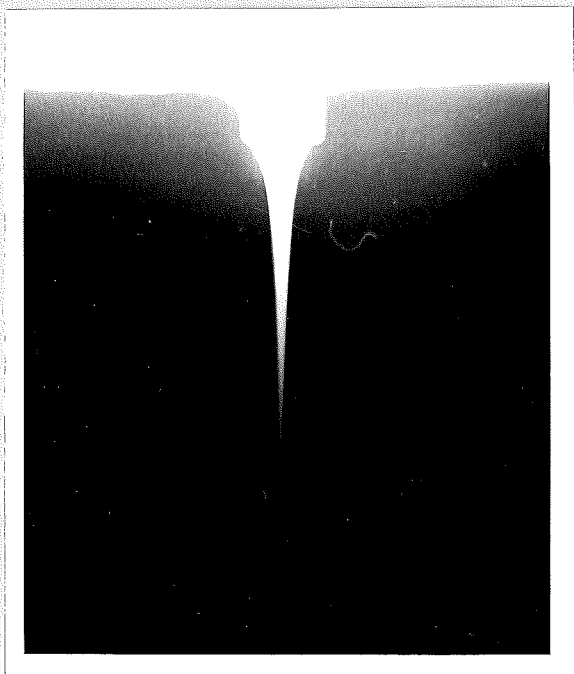
Figuur 5. Opnamen van de meniscus van de glasstraal.
(27 din; $F = 3,5; 1/25 \text{ sec.}$)



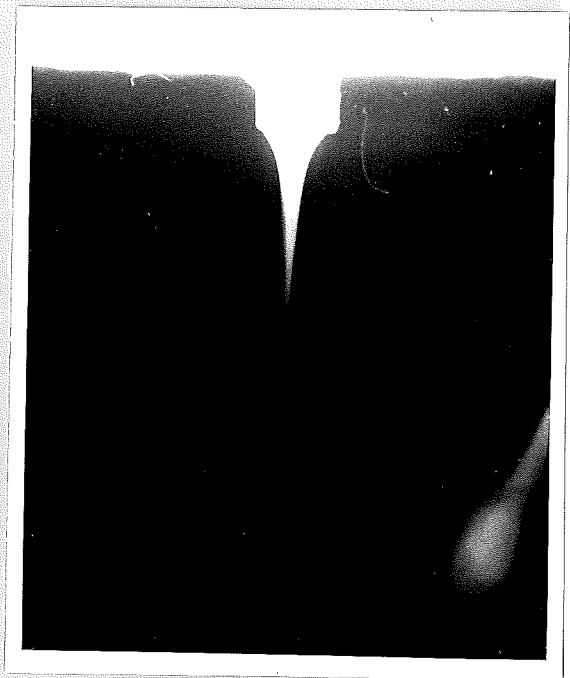
$T = 1140 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $V = 0,6 \text{ m/sec.}$



$T = 1140 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $V = 25 \text{ m/sec.}$



$T = 1180 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $V = 0,6 \text{ m/sec.}$



$T = 1180 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $V = 25 \text{ m/sec.}$

Figuur 45. Opnamen van de meniscus van de glasstraal.

4.2 Discussie.

Op grond van (35) kan voor lage snelheden een kwalitatieve en voor hoge snelheden een kwalitatieve verklaring worden gevonden voor het gemeten verband tussen debiet en trekkracht (figuur 38, 39 en 41).

Bij lage treksnelheden is de dissipatieterm klein.

Dan geldt :

$$(p_2 - p_1) = \frac{f}{\frac{\pi}{4} d^2} \quad (36)$$

Bij trekkrachten kleiner dan ca $0,2 \cdot 10^{-2}$ N is de pegeldiameter d groter dan de spintuitdiameter D (figuur 42).

Hier geldt dus :

$$(p_2 - p_1) = \frac{f}{\frac{\pi}{4} D^2} \quad (37)$$

De verklaring van het verschijnsel, dat $d \gg D$ voor $f < 0,2 \cdot 10^{-2}$ N moet gezocht worden in de oppervlaktespanning. Er zal nl. geen contractie optreden zolang geldt :

$$f = m \cdot g < \pi D \gamma \quad (38)$$

Met de waarden van D ($2 \cdot 10^{-3}$ m) en γ ($0,28$ N/m) wordt :

$$d \gg D \text{ voor } f < 0,176 \cdot 10^{-2} \text{ N.}$$

In figuur 42 blijken de krommen te snijden in de omgeving van het punt :

$$f = 0,2 \cdot 10^{-2} \text{ N; } d = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

Dit is, gezien de meetnauwkeurigheid, in goede overeenstemming met (38).

Het verband tussen $(p_2 - p_1)$ en de treksnelheid is lineair.

Door invoeren van (37) in (24) kan het debiet als functie van de trekkracht bepaald worden :

$$\phi_m = \frac{\pi \left(\Delta p + \frac{f}{\frac{\pi}{4} D^2} \right) D^4}{128 \eta L} \rho \quad \text{kg/sec.} \quad (39)$$

Het lineaire verband tussen debiet en trekkracht, dat uit (38) volgt is in figuur 41 als een getrokken lijn uitgezet.

De metingen blijken hieraan goed te voldoen, alleen voor de bij de hoogste temperatuur (1180°C) gemeten punten is de bepaling van de kromme door de grote spreiding vrij willekeurig.

*slacht
verval*

Voor trekkrachten, groter dan $0,2 \cdot 10^{-2} \text{ N}$ neemt het debiet meer dan evenredig met f toe. Dit is het gevolg van het optreden van contractie, dus $d < D$.

Dit gedeelte van de meetkromme kan worden beschreven door invullen van (36) in (24) :

$$\phi_m = \frac{\pi \left(\Delta p + \frac{f}{\frac{\pi}{4} d^2} \right) D^4}{128 \eta L} \rho \quad \text{kg/sec} \quad (40)$$

(40) is in figuur 41 uitgezet als een onderbroken lijn. Het gemeten debiet blijkt eerst volgens (40) toe te nemen met f , om daarna snel af te vallen.

Bij nog grotere trekkrachten blijkt het debiet vrijwel onafhankelijk van f te worden.

Hier geldt : (35)

$$0 = \frac{f}{\frac{\pi}{4} d^2} - \frac{1}{2} \rho C V_2^2 \quad (41)$$

(Het drukverschil is bij 1180°C en $V = 50 \text{ m/sec}$. een factor 10^4 kleiner dan de dissipatieterm)

Uit (41) volgt :

$$f = \phi_m \frac{1}{2} C V_2^2 \quad (42)$$

(ϕ_m is in dit gebied bij benadering constant).

Omdat $(p_2 - p_1)$ niet negatief kan worden, moet f evenredig met V_2 toenemen bij grote treksnelheden. Dit is in overeenstemming met de meetresultaten. (figuur 39)

Uit de waarden van debiet, trekkracht en snelheid kan met (41) een schatting gemaakt worden van de wrijvingsverliesfactor C . Ingevuld in (42) geeft dit :

Temp.	$\frac{df}{dV_2}$ gemeten	$\frac{df}{dV_2}$ berekend	
1180°C	$0,8 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	N sec./m
1110°C	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$11,0 \cdot 10^{-4}$	N sec./m

we zijn er nog niet

De ordegröte van berekende en gemeten waarden komt overeen. De afwijking is waarschijnlijk het gevolg van het niet geheel betrouwbaar zijn van de metingen ten gevolge van de kwaliteit van de regeling van de spintuittemperatuur ($\pm 5^\circ\text{C}$), die van grote invloed is op debiet en trekkracht, terwijl bij de berekening C constant verondersteld is.

Uit de meetresultaten kan de minimumdraaddiameter, die door trekken gesponnen kan worden, bepaald worden.

Wanneer we de treksterkte van glas σ_b stellen (2) geldt :

$$f_{\max} = \sigma_b \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \quad (43)$$

Hieruit volgt met (42) :

$$f_{\max} = \phi_m \frac{1}{2} C V_2 = \sigma_b \frac{\pi}{4} d^2$$

$$\phi_m \frac{1}{2} C \frac{\phi_m}{\rho \frac{\pi}{4} d^2} = \sigma_b \frac{\pi}{4} d^2$$

$$d^4 = \frac{1}{2} C \frac{\phi_m^2}{\left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \rho \sigma_b} \quad m^4$$

Hieruit volgt voor spinnen bij 1180°C , wanneer $\sigma_b = 50 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ wordt gesteld :

$$d_{\min} \approx 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

conclusie : de praktische uitdus aan de spindel!

Hoofdstuk 5

Conclusies en aanbevelingen.

5.a De spinoven.

Door de slechte isolatie aan de onderzijde van het glasbad, die te wijten is aan de relatief hoge warmtegeleidingscoëfficiënt van de dichte silimanitesteen, die als steunlaag voor de zirkoon-silikaatbekleding gebruikt is, is de temperatuursgradiënt in verticale richting groot. Bij niet-verwarmde spinplaat bedraagt de temperatuur aan de oppervlakte van het glasbad, bij een toegevoerd vermogen van ca 3,5 kW, 1300°C, terwijl de temperatuur van het glas in de spinplaat 650°C is.

Wanneer de spinplaat verwarmd wordt, loopt de temperatuur van het glas op. De maximumwaarde ervan wordt bepaald door de instelling van de regelaar; in verband met de levensduur van de verwarmingsstaven is deze zo ingesteld, dat de helft van de verwarming wordt uitgeschakeld, wanneer de temperatuur, gemeten op 0,1 m onder het glasniveau, 1250°C bedraagt.

Na het op temperatuur brengen van de spinplaat duurt het ca 3 uur tot de glastemperatuur in de oven constant is geworden.

Het verdient aanbeveling om, indien zich moeilijkheden met de verwarmingselementen voordoen, een zwaarder type te monteren, aangezien de toegepaste staven continu maximaal belast worden. (Tabel I).

5.b De spinplaat.

De kwaliteit van de gebruikte temperatuurregeling gedraagt $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Wanneer nauwkeurige debietmetingen bij hoge treksnelheden nodig zijn, dient een professionele regelaar gebruikt te worden, die speciaal voor dit doel wordt gefabriceerd. Voor de nauwkeurigheid hiervan wordt door de fabrikant $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ opgegeven.

Door de korte uitvoering (figuur 10) van de spinplaat, waardoor de buitenste spinopeningen dicht bij de aansluitlippen voor de stookstroom liggen, is het temperatuursverschil tussen de in het midden van de spinplaat aangebrachte en de meer naar buiten liggende spinopeningen groot (ca 100°C).

Tengevolge van de plaatsing van de thermokoppels kan alleen de temperatuur van de middelste spintuit nauwkeurig bepaald worden.

De buitenste spintuiten kunnen derhalve niet voor metingen gebruikt worden. Als vergelijkende metingen bij een andere spinopening nodig zijn, is het beter om de middelste spintuit van de bestaande spinplaat op de gewenste diameter te brengen, waardoor tevens de geometrie ongewijzigd blijft.

5.c De niveaumeter.

Zonder speciale ijking kan de stand van het glasniveau op $\pm 2 \cdot 10^{-3}$ m gemeten worden. Wanneer de hoogtemeter met behulp van een taster nauwkeurig wordt geijkt, is meting op $\pm 0,3 \cdot 10^{-3}$ m mogelijk. Dit is namelijk de maximale afwijking in de aanwijzing, die in het beschouwde temperatuurgebied (1.3) gemeten is. Dit is waarschijnlijk een gevolg van de temperatuurgradiënt in verticale richting.

5.d Het opwikkelmechanisme.

Met de trommel kan bij treksnelheden van ca 0,5 m/sec.-50 m/sec. gemeten worden. Bij nog lagere snelheden wordt de draad te dik, waardoor opwickelen op de trommel niet meer mogelijk is.

Voor het meten van debieten bij snelheden kleiner dan 0,6 m/sec. kunnen de wrijvingswielen gebruikt worden. Het opvangen van de draad is bij deze lage snelheden geen probleem. Om deze lage snelheden te kunnen bereiken, moet in de aandrijving een extra vertraging worden aangebracht.

5.e De trekkrachtmeter.

Deze heeft volledig aan de verwachtingen beantwoord.

5.f De viscositeit.

Bij terugberekening van de viscositeit uit de debietmetingen met de relatie van Hagen-Poiseuille blijkt, dat de viscositeit groter moet zijn dan die, behorende bij de gemeten spinplaattemperatuur. De meting van de viscositeit of de meting van de temperatuur van de spinplaat is dus niet juist.

In dit verslag zijn gecorrigeerde temperaturen gebruikt, terwijl de viscositeitsmetingen als juist zijn beschouwd. Deze zijn gedaan in de experimenteeroven. Hierin is een temperatuurgradiënt in verticale richting aanwezig, terwijl het glas gedurende ca 6 maanden in de oven is verwarmd, waardoor vreemde stoffen zijn opgelost, en vluchtige componenten zijn verdampt. Het is dus mogelijk, dat dit glas een andere viscositeit heeft dan dat in de spinoven.

Om de viscositeit nauwkeuriger te kunnen meten, wordt een kleine experimenteeroven ^{zal} gebouwd van cilindrische doorsnede, die gemakkelijk met nieuwe glasmonsters kan worden gevuld.

5.g De oppervlaktespanning.

De oppervlaktespanning neemt ^{af} toe met de temperatuur. De gemiddelde waarde is in goede overeenstemming met de in de literatuur (5) gevonden waarden voor borosilikaatglazen. Daar ook de oppervlaktespanning van glas door oplossen van vreemde stoffen en verdampen van vluchtige componenten wordt beïnvloed, verdient het aanbeveling deze eveneens in de nieuw te bouwen oven te meten.

5.h De meetresultaten.

Het aantonen van een duidelijk verband tussen massadebiet en treksnelheid in het gebied, waarvoor de apparatuur ontworpen is, stuit op meettechnische moeilijkheden, omdat het aan te tonen effect klein is t.o.v. dat, veroorzaakt door temperatuursveranderingen van de spintuit.

Alleen door middelen van een groot aantal waarnemingen, of door toepassing van een betere temperatuurregeling, zijn betrouwbare resultaten te verwachten.

Aangezien het effect klein is, zijn deze metingen op zichzelf niet geschikt om een inzicht te krijgen in de fysische achtergrond van het proces. Hierover geeft het verband tussen debiet en trekkracht, over een zo groot mogelijk traject gemeten, veel meer informatie. Dit kan bepaald worden uit metingen aan glaspegels, die ontstaan bij vrije uitstroming onder invloed van de zwaartekracht (3.2).

Door combinatie van de resultaten van de pegelmetingen en de metingen met het draadtrekmechanisme kan het uitstroomverschijnsel over een groot gebied bestudeerd worden.

Bij kleine trekkrachten wordt het debiet bij constante temperatuur en statische druk bepaald door de trekkracht. Hierbij is de pegeldiameter groter of gelijk aan de diameter van de spintuit.

Hierna volgt een overgangsgebied, waar het debiet bepaald is door de trekkracht en de draaddiameter, die hier kleiner is dan D . Voor grote treksnelheden wordt de trekkracht bepaald door de snelheid, terwijl het debiet dan vrijwel constant blijft.

Appendix I.

Dynamisch gedrag van het systeem bushing/lastrafo/transductor/stuurstroomgever.

Voor het dimensioneren en instellen van de temperatuurregelaar voor de spinplaat is enig inzicht in het dynamisch gedrag van het systeem nodig.

Daarom is van het systeem spinplaat-lastrafo-transductor-stuurstroomgever, zowel frequentie- als sprongresponsie bepaald.

I a Meting van de frequentieresponsie. (11,12)

Voor het meten hiervan is een mechanische sinusgenerator gebruikt met een frequentiebereik van 10^{-2} tot 10 rad./sec. Deze drijft een potentiometer aan. (figuur 12), waardoor een gelijkspanning u_0 met hierop gesuperponeerd een wisselspanning $u = \hat{u} \cos \omega t$ ontstaat.

Deze spanning levert de stuurstroom voor de transductor.

(0-1 mA volle regelbereik)

Op een tweepuntsschrijver worden de stuurstroom van de transductor en de spanning van een thermokoppel in de spinplaat gelijktijdig geregistreerd. Hieruit kunnen de versterking en de faseverschuiving als functie van de frequentie bepaald worden.

De meetgegevens zijn in een Bode- en een fase-diagram uitgezet (figuur 13 a en b).

I b Meting van de stapresponsie. (11,12)

Voor het meten van de stapresponsie wordt een stapvormige verandering in de stuurstroom van de transductor aangebracht. Voor de registratie is gebruik gemaakt van dezelfde apparatuur als bij de frequentieresponsie-metingen.

Uit de geregistreeerde krommen kan de versterking als functie van

de tijd bepaald worden. In figuur 14 a is de genormeerde versterking Y en in figuur 14 b $\log(1-Y)$ tegen de tijd uitgezet.

I c Bepaling van de tijdconstanten van het systeem.

Mit het verloop van Bode- en fase-diagram, nl. afval overal kleiner dan 6 dB per octaaf, faseverschil $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ en een stapresponsie, waarbij (Y) eerst te snel toeneemt om daarna als een bij een eerste ordesysteem naar 1 te gaan, volgt, dat we dit systeem kunnen beschrijven met de complexe overdrachtsfunctie (\underline{g}):

$$H(j\omega) = \frac{(1 + j\omega\tau_1)}{(1 + j\omega\tau_2)(1 + j\omega\tau_3)} \quad (1)$$

In figuur 15 is hiervan het elektrische analogon aangegeven.

Hierin in:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot C_2 \\ \tau_2 &= R_1 \cdot C_1 \\ \tau_3 &= R_2 \cdot C_2 \end{aligned} \quad (2)$$

Dit leidt tot een fysisch model, waarin C_1 de kleine warmtecapaciteit van de spinplaat is, die door de weerstand R_1 verbonden is met de grote warmtecapaciteit C_2 van het glasbad; hieruit lekt de warmte door R_2 weg naar de omgeving.

Voor de stapresponsie kan uit (1) met behulp van Fourier-transformatie worden afgeleid:

$$Y = 1 - \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_2 - \tau_3} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) - \frac{\tau_1 - \tau_3}{\tau_2 - \tau_3} \exp\left(-\frac{t}{\tau_3}\right) \quad (3)$$

Dus:

$$1 - Y = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_2 - \tau_3} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + \frac{\tau_1 - \tau_3}{\tau_2 - \tau_3} \exp\left(-\frac{t}{\tau_3}\right) \quad (4)$$

$$\tau_3 > \tau_1 > \tau_2$$

Voor grote t geldt bij benadering :

$$1 - Y = \frac{\tau_1 - \tau_3}{\tau_2 - \tau_3} \exp\left(-\frac{t}{\tau_3}\right) \quad (5)$$

$$\log(1-Y) = \log \frac{\tau_1 - \tau_3}{\tau_2 - \tau_3} - \frac{t}{\tau_3}$$

De helling in figuur 14 a is voor grote t :

$$\operatorname{tg} \beta = -\frac{1}{\tau_3} \quad (6)$$

De asymptoot voor grote t snijdt de $\log(1-Y)$ as (figuur 14 a) in het punt :

$$\log \frac{\tau_1 - \tau_3}{\tau_2 - \tau_3} \quad (7)$$

Differentiëren van (3) :

$$\begin{aligned} \frac{dY}{dt} = & \frac{1}{\tau_2} \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_2 - \tau_3} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \\ & + \frac{1}{\tau_3} \frac{\tau_1 - \tau_3}{\tau_2 - \tau_3} \exp\left(-\frac{t}{\tau_3}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

Uit (8) volgt :

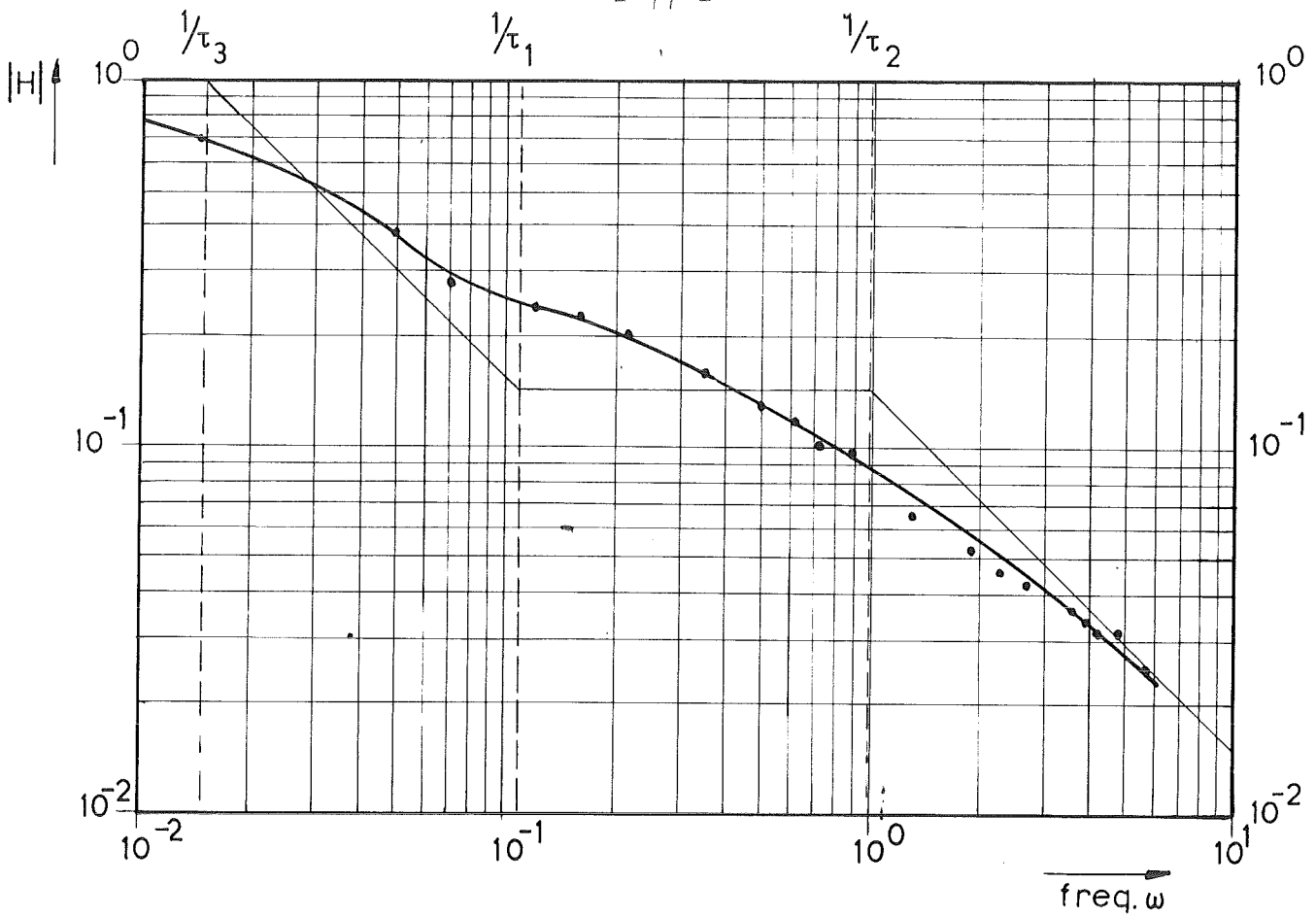
$$\left(\frac{dY}{dt}\right)_{t \rightarrow 0} = \frac{\tau_1}{\tau_2 \tau_3} = \operatorname{tg} \alpha \text{ zie figuur 14 b} \quad (9)$$

Uit 6, 7 en 9 kunnen de tijdconstanten bepaald worden. Deze zijn in tabel I vermeld :

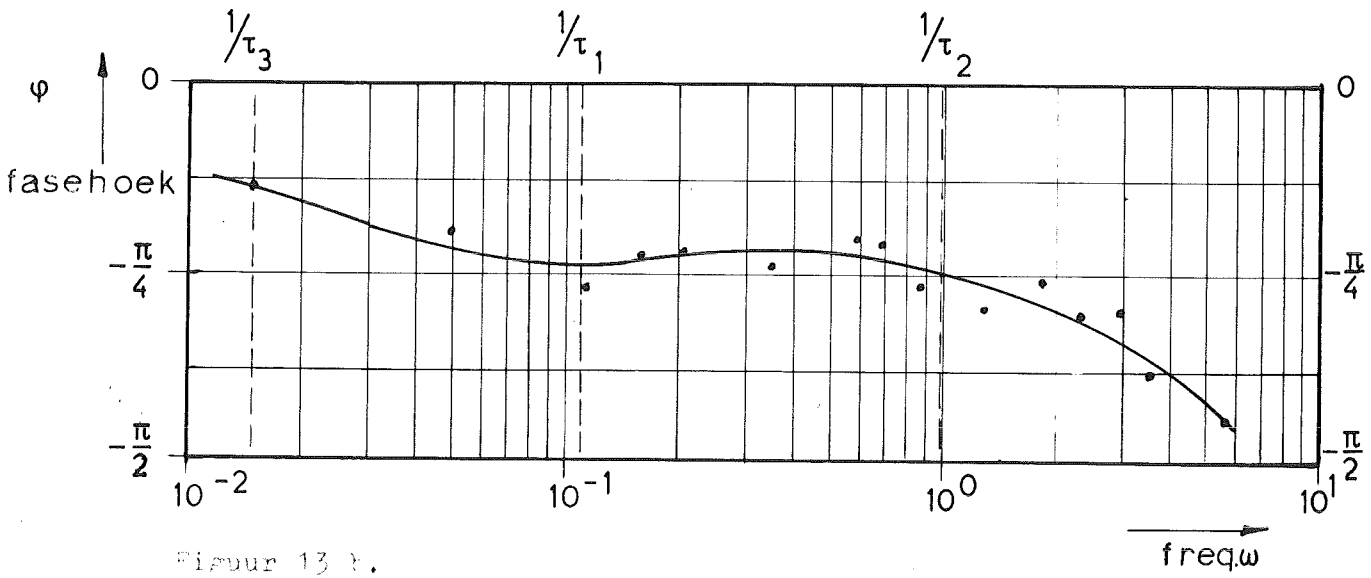
Tabel II.

$\tau_1 = 0,1$ sec.	$\omega_1 = 1,1$	10^{-1}	rad. sec. ⁻¹
$\tau_2 = 1,02$ sec.	$\omega_2 = 9,8$	10^{-1}	rad. sec. ⁻¹
$\tau_3 = 66,7$ sec.	$\omega_3 = 1,5$	10^{-2}	rad. sec. ⁻¹

In het Bode-diagram (figuur 13 a) zijn de met behulp van de tijdconstanten berekende asymptoten aangegeven. Hieruit blijkt, dat het gebruikte model een goede benadering is van het systeem.

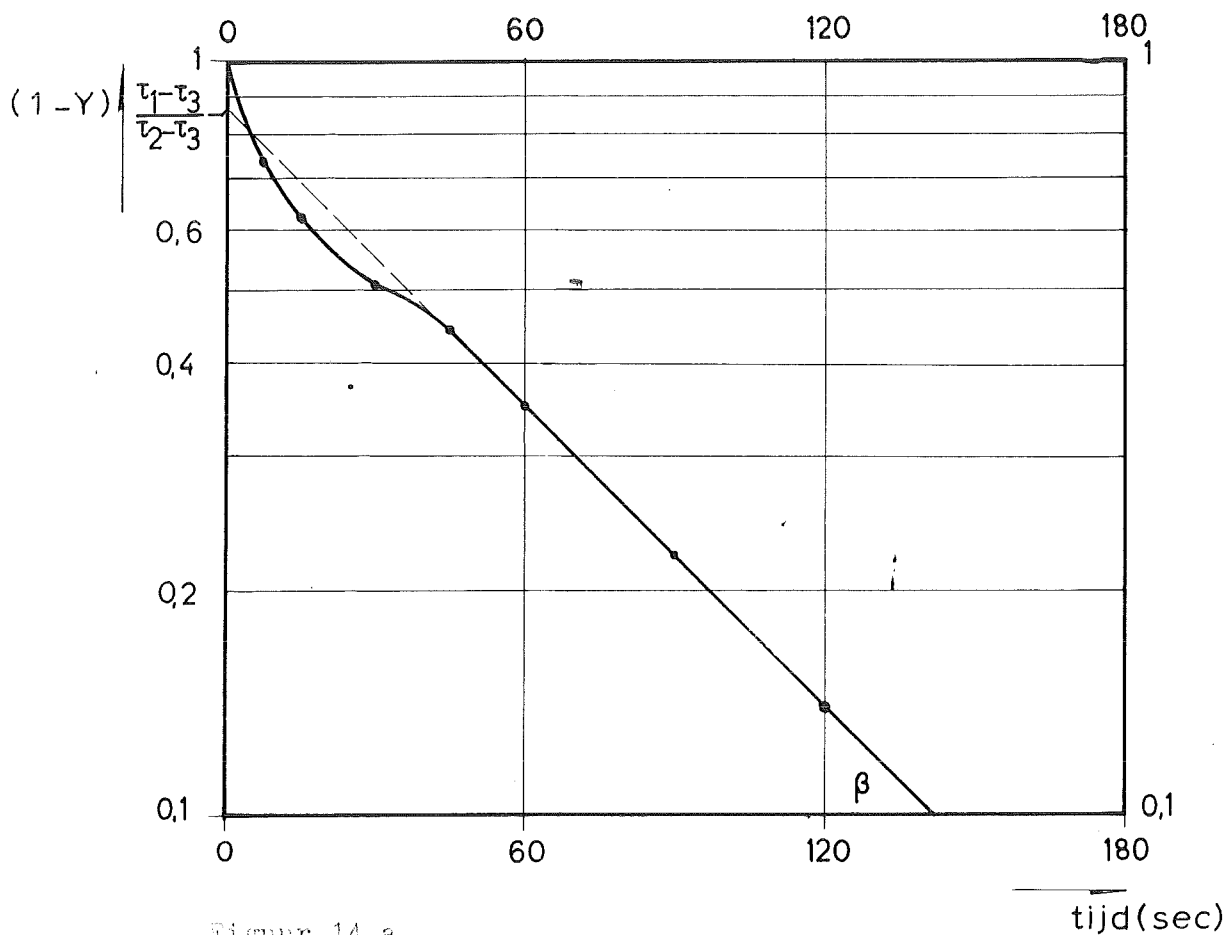


Figuur 13 a.

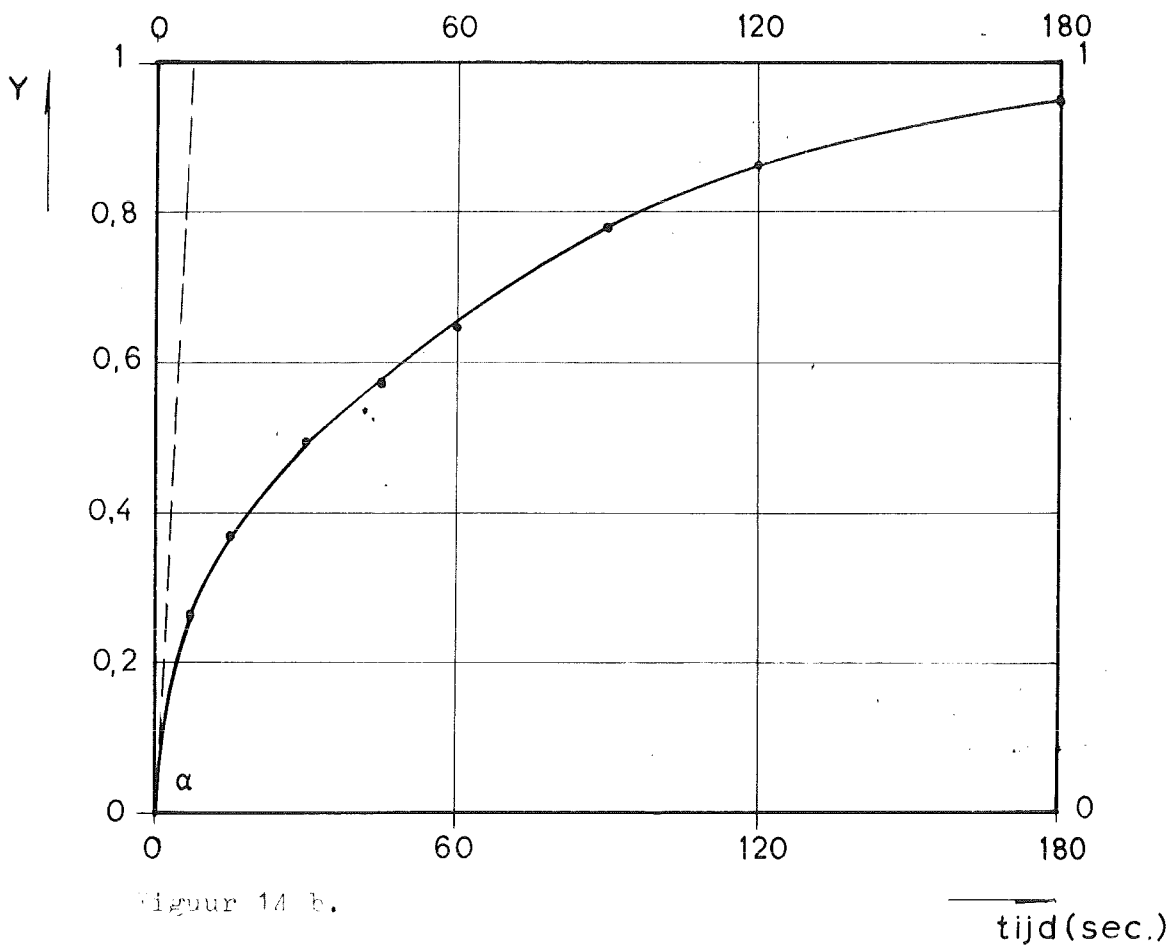


Figuur 13 b.

Figuur 13. Frequentieresponsie van het systeem spinplaat-lastrafo-transfactor-stuurstroomgever.

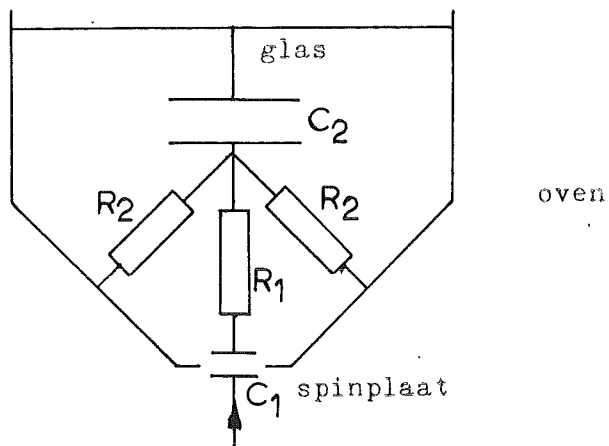
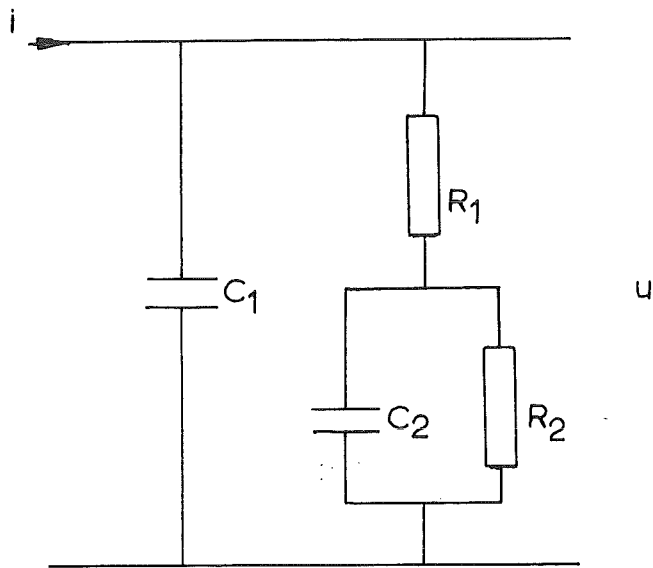


Figuur 14 a.



Figuur 14 b.

Figuur 14. Stapresponsie van het systeem spinplaat-lastrafo-transducer-stuurstroomgever.



Figuur 15. Electric analogon, gebruikt voor de beschrijving van het dynamische gedrag van het systeem spindel-lastrafo-transducer-stuurstroomgever.

Appendix II.

Fabricage van de taster van de niveaumeter.

De constructie van de taster, die bestaat uit een steel van vierkante doorsnede en een platte kop, waarin de meetpennen zijn aangebracht, is in figuur 17 aangegeven. In de steel liggen drie draden, die aan de pennen gelast zijn. Voor het maken van de taster is een contramal gebruikt, die uit vier delen bestaat. Op een onderplaat 1 van p.v.c. zijn met behulp van pennen twee strippen 2 en 3 en een blokje 4 bevestigd. Zie figuur 22. In het blokje, dat zich aan het uiteinde van de kop van de taster bevindt, zijn gaten geboord, waarin de platina meetpennen geschoven kunnen worden, zodat deze gedurende het vullen van de mal met stampmassa niet kunnen verschuiven.

De gebruikte stampmassa is Flitab-Rammix. Om een voldoende dicht materiaal te verkrijgen, moet dit zeer vast aangestampt worden. In ongebakken toestand mag dit materiaal niet in aanraking komen met onedele metalen.

Wanneer de mal gevuld is, worden de strippen verwijderd, en het blokje van de pennen geschoven. Hierna wordt de vorm op een plaat nikkel geschoven en in de oven geplaatst.

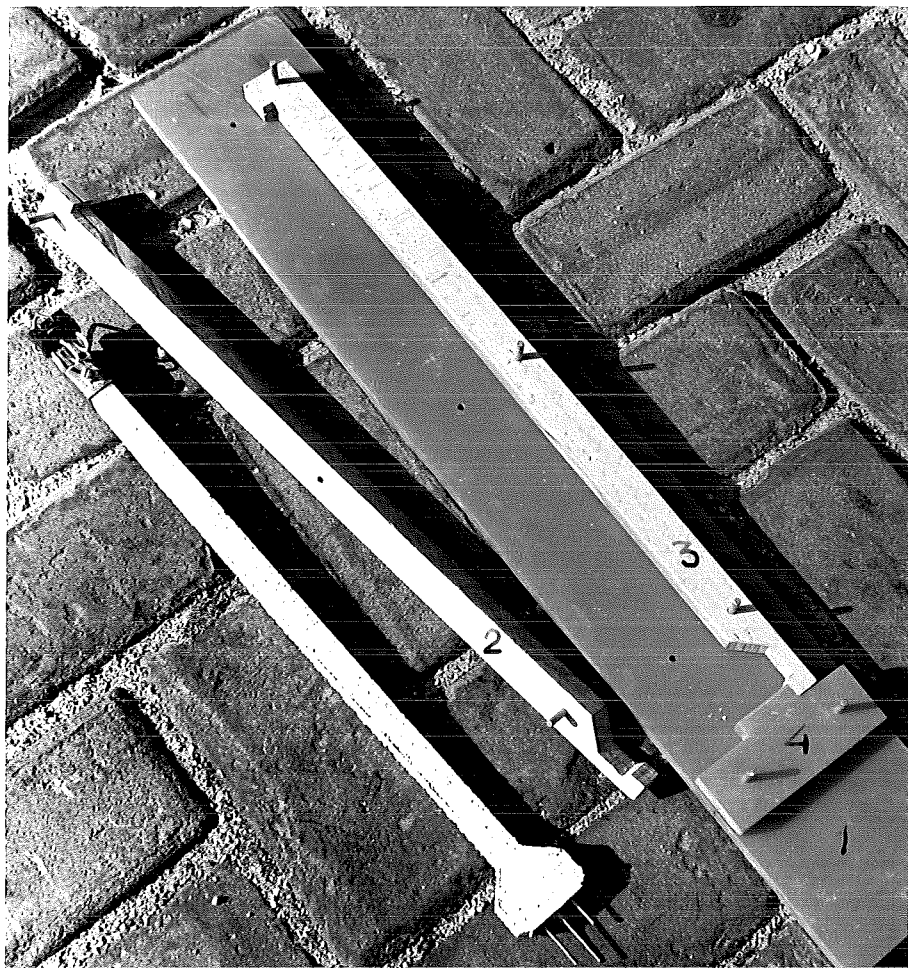
De temperatuur in de oven moet uniform zijn.

Na 2 uur drogen bij kamertemperatuur wordt de temperatuur met $50^{\circ}\text{C}/\text{uur}$ gebracht op 400°C . Bij deze temperatuur wordt vervolgens gedurende 3 uur gebakken. Hierna kan met $75^{\circ}\text{C}/\text{uur}$ opgewarmd worden tot de bedrijfstemperatuur (ca 1200°C). Het verdient aanbeveling het materiaal niet sneller op te warmen of af te koelen dan met $200^{\circ}\text{C}/\text{uur}$.

Mechanische eigenschappen van Pt en Pt-10% Rh.:

	Temp. °C.	Treksterkte	Treksterkte na 100 uur
Pt	20	13,5 kg/mm ²	12,28 kg/mm ²
	1250	1,4 " "	0,39 " "
	1500	0,94" "	--
Pt-10% Rh.	20	28,7 " "	26,5 " "
	1250	4,6 " "	0,78 " "
	1500	1,98" "	0,34 " "

Bij hoge temperaturen moeten de platina onderdelen in de oven dus zo min mogelijk mechanisch belast worden.



Figuur 25. Contramal, gebruikt bij het maken van de taster van de niveaumeter.
Naast de mal is de taster afgebeeld.

Literatuur.

1. W.H. van Houwelingen, Niveau-meting in een glasoven,
Afstudeerverslag, T.H. Delft 1965.
2. J.E. Stanworth, Physical Properties of Glass,
Clarendon Press, Oxford 1950.
3. H. Kramers, Fysische Transportverschijnselen,
Collegedictaat, T.H. Delft 1961.
4. R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, Transport Phenomena,
Wiley, New York 1960.
5. Bockris, White, Mackenzie, Physicochemical Measurements at
High Temperatures,
Butterworth Sc. Publ., London 1959.
6. Mackenzie, Modern Aspects of the Vitreous State,
London 1960.
7. J.R. van Wazer, J.W. Lyons, K.Y. Kim, R.E. Colwell,
Viscosity and Flow Measurements,
Interscience Publishers, 1963.
8. Nabin Kishore Das, Grundlagen für die Entwicklung eines
Betriebsviscosimeters,
Dissertatie, Berlin 1961.
9. Electronica II (Breedveld),
Collegedictaat, T.H. Delft.
10. P.M.E.M. v.d. Grinten, Control Engineering 1963,
vol.10 - No. 11 pag. 51.
11. Instruments and Control Systems, vol. 36 No. 11 pag 130.
N.A. Anderson,
12. A.J. Young, An Introduction to Process Control System Design,
Longmans, Green & Co, New York.
13. Transducer Control of Electric Heated Processes,
Smit, Nijmegen.
14. G.W. Morey, The Properties of Glass,
Reinhold Publ. Corp., New York 1954.

Lijst van gebruikte symbolen.

Symbool:	Omschrijving:	Dimensie:
τ	tijdconstante	sec.
ω	hoeknelheid	1/sec.
φ	hoek	-
γ	oppervlaktespanning <i>oppervlaktespanning</i>	N/m
ρ	dichtheid	kg/m ³
σ	treksterkte	N/m ²
η	dynamische viscositeit	Nsec/m ²
h	hoogte	m
d	diameter	m
D	"	"
L	lengte	m
R	weerstand	Ω
R	straal	m
C	capaciteit	F
f	kracht	N
p	druk	N/m ²
P	"	"
P	vermogen	watt
M	koppel	Nm
t	tijd	sec
T	temperatuur	°C
Φ	debiet	kg/sec
i	stroom	amp.
u	spanning	volt
H	genormeerde versterking bij frequentieresponsie.	
Y	" " " stapresponsie.	
$\langle \rangle$	gemiddelde over oppervlak,	