

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

archief

244

HET SPINNEN VAN GLASDRADEN

M.A.P. VERWIJMEREN

AFSTUDEERVERSLAG

januari 1968

LABORATORIUM VOOR FYSISCH TECHNISCHE

LORENTZWEG

DELFT

H E T S P I N N E N V A N G L A S D R A D E N

Afstudeerverslag
M.A.P. Verwijmeren (N)
Januari 1968

Laboratorium voor Fysische Technologie
Technische Hogeschool Delft

SAMENVATTING

Bij het spinnen van glas uit een spinopening werd nagegaan welke invloed de treksnelheid op het debiet heeft. Het verband tussen treksnelheid en trekkracht werd afzonderlijk bepaald.

De metingen werden verricht bij spinplaattemperaturen tussen 1100°C en 1300°C en bij treksnelheden tot ongeveer 50 m/s.

Het debiet bleek vrijwel niet van de treksnelheid af te hangen, zodra deze groter werd dan 5 m/s.

De drijvende kracht, die het debiet bepaalt, is samengesteld uit de statische druk (hoogte van het glasniveau) en uit een term, die afhangt van de oppervlaktetension van het glas en de kromming van de glasstraal, bij het verlaten van de spinopening. Door het opmeten van deze insnoering werden kwantitatieve gegevens verkregen van de hierdoor veroorzaakte onderdruk. Uit deze gegevens volgt met welk bedrag het debiet toeneemt, zodra aan de glasdraad een trekkracht wordt opgelegd. Aldus is bij gegeven treksnelheid, de uiteindelijke diameter van de glasdraad te voorspellen.

Tevens volgt uit de gemeten trekkracht bij welke treksnelheid de breuksterkte van de glasdraad wordt overschreden. De maximale treksnelheid is des te hoger, naarmate de spintuittemperatuur wordt verhoogd.

Bij hoge spintuittemperaturen koelt het glas niet snel genoeg tot zijn stolpunt af, zodat niet de vaste draad maar de vloeistofstraal breekt (Rayleigh-instabiliteit).

De konsekwenties hiervan voor de capaciteit van een spinmachine en voor de dunste draden welke te spinnen zijn, worden uitvoerig besproken in de discussie.

<u>INHOUDSOPGAVE</u>	pagina
SAMENVATTING	1
INHOUDSOPGAVE	2
I. INLEIDING	3
II. FYSISCH KOSTANTEN VAN HET GEBRUIKTE GLAS	5
III. DE MEETOPSTELLING	6
A. De oven	6
B. De spinplaat	6
C. De hoogtemeting van het glasniveau	7
D. Het trekken van de glasdraad	7
E. De trekkrachtmeter	8
IV. DE MEETRESULTATEN	9
A. Het massadebiet als funktie van de hoogte van het glasniveau	9
B. De vorm van de draad	10
C. Het massadebiet als funktie van de treksnelheid	11
D. Het verband tussen treksnelheid en trekkracht	11
V. TEORETISCHE BESCHOUWINGEN	12
A. Berekening van de drukval over de spintuit uit de debietmetingen	12
B. Berekening van de trekkracht	13
VI. KONKLUSIES EN DISKUSSIE	15
VII. LITERATUUR	17
VIII. SYMBOLENLIJST	18
IX. TABELLEN EN GRAFIEKEN	19

I. INLEIDING

Glas is een onderkoelde vloeistof. In de loop der jaren zijn zeer vele glassoorten ontwikkeld, verschillend in mechanische en optische of andere fysische eigenschappen. De toepassingsgebieden variëren van vensterglas tot lenzen voor wetenschappelijke precisieinstrumenten en van huishoudelijke artikelen tot glasdraden.

Reeds in 1713 schreef de veelzijdige fysicus de Réaumur voor de Académie des Sciences een verhandeling over het vervaardigen van zeer dunnen glasdraden. Toch heeft het tot de jaren veertig moeten duren, voordat de industriële produktie van zeer dunne glasdraden (20 - 100 μm) een feit werd.

Vanwege de aantrekkelijke mechanische eigenschappen worden glasdraden tegenwoordig vooral gebruikt als versteviging van polymeerprodukten. Dank zij bepaalde optische eigenschappen kunnen voorts bundels glasdraden gebruikt worden voor velerlei -skopieën in de medische techniek, terwijl er ook militaire toepassingen zijn.

Weinig is tot nu toe bekend over de wijze waarop de verschillende variabelen het proces van het glasspinnen beheersen.

Deze variabelen zijn:

1. de fysische konstanten van het glas, zoals viskositeit, dichtheid en oppervlaktetensioning,
2. de afmetingen en de geometrie van de spinopening,
3. de temperatuur van het glas, dat de spinopening verlaat,
4. de (statische) druk op de spinplaat,
5. de kracht waarmee aan de spindraad wordt getrokken,
6. de mate van koeling van het glas, nadat het de spinopening juist heeft verlaten.

Om te trachten een beter inzicht te krijgen in de invloed en samenhang van de procesvariabelen zijn aan experimentele glasovens metingen verricht.

In hoofdstuk II worden de fysische konstanten gegeven, zoals deze uit metingen werden verkregen.

In hoofdstuk III wordt de meetopstelling beschreven. Achtereenvolgens worden de oven, de spinplaat, de hoogtemeter, het opwikkelmecanisme en de trekkrachtmeter behandeld.

De meetresultaten zijn in hoofdstuk IV samengevat. In § IV A worden de massadebietmetingen als funktie van de hoogte van het glasniveau gegeven. In § IV B volgen de metingen aan de ^{verm} van de draad. In § IV C wordt het massadebiet als funktie van de treksnelheid gegeven en in § IV D het verband tussen treksnelheid en trekkracht.

In hoofdstuk V worden teoretische beschouwingen gegeven over de drukval over de spintuit en over de trekkracht aan de draad.

Vervolgens worden in hoofdstuk VI de konklusies en een diskussie gegeven.

Hierna volgen nog een literatuuropgave, een symbolenlijst en de tabellen en grafieken.

II. FYSISCH KONSTANTEN VAN HET GEBRUIKTE GLAS

Voor het spinnen van de draden werd z.g. E-glas gebruikt. Dit is een borosilikaatglas met de volgende oxydengehalten:

SiO_2 55%, B_2O_3 8,5%, $\text{CaO}+\text{MgO}$ 20,5%, Al_2O_3 13,5%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 1% en Fe_2O_3 0,5%.

De verwerkingstemperatuur ligt in de buurt van 840°C .

Het glas was voorhanden in de vorm van knikkers van ongeveer 10 gr. die een konstante samenstelling hadden.

Ter bepaling van de fysische konstanten van het glas werd een kleine oven gebouwd. De smeltruimte van de oven bestond uit een holle cilindrische Purox-buis (recrystallized alumina) welke werd verhit met behulp van een cilindrische SiC-verwarmingsselement, dat zich rondom de Purox-beschermhuis bevond. In de smeltruimte kon een stempel op en neer bewogen worden. Op deze stempel werd een platina kroesje geplaatst waarin zich het glas bevond. Het verwarmingsselement werd door chamottesteent en superecs (een stampmassa) geïsoleerd. De temperatuurregelaar van de oven werd gestuurd door een Pt/Pt13%Rh-termokoppel. De temperatuur van de oven kon tot op enkele graden Celsius konstant gehouden worden.

De dichtheid werd bepaald door met een gevoelige balans de opwaartse kracht te meten, die een platina cilindertje in het glas ondervond [1]. Figuur 1 geeft de resultaten van de meting.

De dynamische viscositeit werd bepaald met een rotatieviskosimeter en een draaistaaf van zirkoonoxyde [1]. De draaistaaf was tevoren geijkt in een vloeistof van bekende viscositeit. De resultaten van deze metingen zijn in figuur 2 weergegeven. De viscositeit bleek onafhankelijk te zijn van de rotatiesnelheid van de draaistaaf. Het reologisch gedrag van het glas mag dus in het meetgebied als Newtons beschouwd worden.

Tenslotte werd de oppervlaktespanning bepaald, door met een balans de extra kracht te meten, welke nodig was om een cilindervormige platina ring van het glasoppervlak los te maken [1]. Deze resultaten staan weergegeven in figuur 3.

III. DE MEETOPSTELLING

A. De oven

De smeltruimte van de glasoven bestond uit zirkoonsilikaatsteen. Dit materiaal is gedurende niet te lange tijd bestand tegen het biezonder korrosieve E-glas. Omdat de mechanische sterkte van zirkoonsilikaat bij hogere temperaturen aanzienlijk afneemt werd deze smeltruimte verstevigd met silimanitesteen. Het geheel werd met een vuurvaste specie gemetseld. Als warmteisolatie werd hieromheen een losse stapeling aangebracht van chamottestenen. De ruimte tussen deze stapeling en het ovenframe werd opgevuld met glaswol. De oven was gebouwd op een metalen grondplaat waarin kanalen waren aangebracht voor waterkoeling. Het glas werd verwarmd door een tiental SiC-verwarmingsstaven met een totaal vermogen van ongeveer 3 kW.

Wat de standtijd betreft werden de gunstigste ervaringen opgedaan met een verwarmingsmethode, waarbij de stookstaven boven het glasbad waren aangebracht. Eventuele lekken in de metselvoegen zijn zelfdichtend, omdat het glas uiteindelijk zal stollen. Ook in de industrie worden glasspinovens van bovenaf verwarmd (met olie- en/of gasbranders). De voordelen van een zijdeling verwarmde, smalle smeltruimte zijn o.a. geen verticale temperatuurgradiënt in de smelt, aanzienlijk minder warmteverlies en een instelbare hoogte van het glasniveau. Een nadeel van zijdelingse verwarming is het lekken van glas van de smeltruimte naar de verhittingsruimte, wat leidt tot uitvallen van de oven. Overigens konden met de zijdeling verwarmde oven een groot aantal metingen verricht worden.

Voor de regeling van de glastemperatuur werd een mV-meter met valbeugelmechanisme gebruikt, welke bediend werd door een Pt/Pt10%Rh-termokoppel. Het termokoppel was, beschermd door een huls van Pt10%Rh, in het glasbad aangebracht. Hierdoor werden een viertal stookstaven in- of uitgeschakeld.

B. De spinplaat

De spinplaat bestond uit een ondiep bakje van Pt10%Rh (zie figuur 4). Samen met een roestvrij stalen koelleiding was deze spinplaat in een

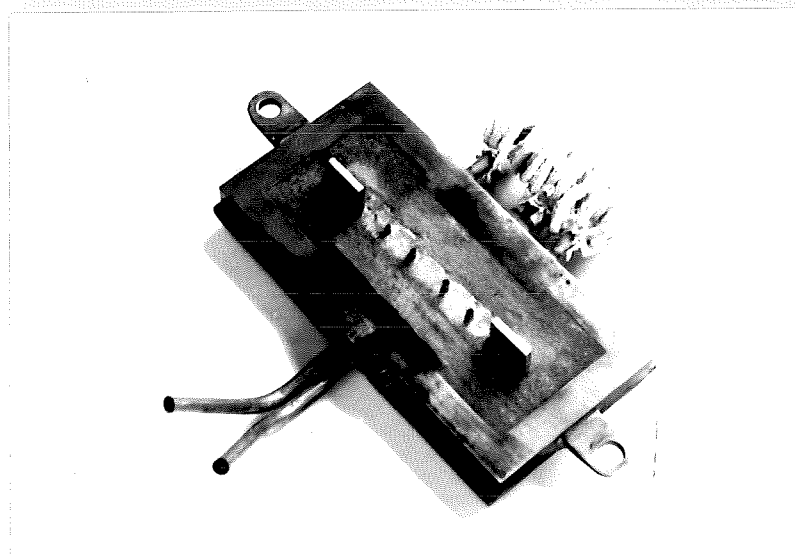
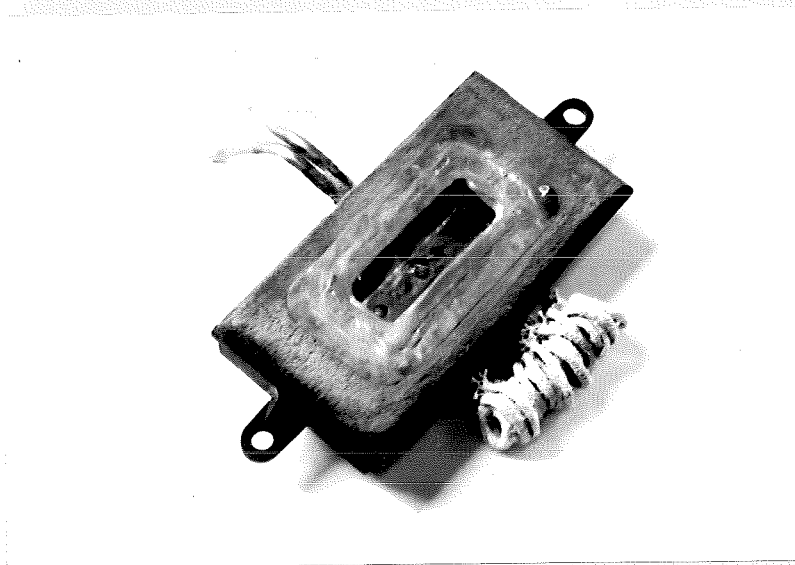


FIGURE 4

bronzen frame gekit. Het geheel werd tegen de onderkant van de oven-grondplaat gemonteerd en hierop werd de smeltruimte gebouwd.

De spinplaat had 4 spintuiten van verschillende diameters en lengten. De diameters variëerden van ongeveer 1,5 tot 2,5 mm en de lengten van ongeveer 4 tot 8 mm. In de spinplaat waren vlakbij de tuiten Pt/Pt13%Rh-termokoppels aangebracht voor meting en regeling van de temperatuur.

De spinplaat werd verwarmd door Ohmse warmteontwikkeling. Het benodigde vermogen (ongeveer 3000 A bij 1,5 V) werd geleverd door een lastransformator. In de koperen aansluitklemmen bij de spinplaat waren kanalen voor waterkoeling geboord. De temperatuurregeling van de spinplaat werd verwezenlijkt met behulp van een PI-regelaar ($K_p = 2$, $T_i = 0,9$ s), welke een transduktor met stuurstroomgever stuurde.

De spinplaat was zowel tegen een te hoge stroom van de lastransformator als tegen uitvallen van het koelwater beveiligd.

Wenste men geen glas te laten stromen uit bepaalde spintuiten dan werden deze met een luchtstraaltje gekoeld. Hierdoor stelde het glas en de tuitjes werden afgesloten.

C. De hoogtemeting van het glasniveau

Voor de werking van de hoogtemeter, die op de elektrische geleidbaarheid van het glas berust, wordt verwezen naar W.H. van Houwelingen en W.J. Beek [2].

D. Het trekken van de glasdraad

Om het glas uit de spinopening te trekken, werd de draad op een roterende trommel van bekende diameter gewikkeld. De trommel werd voor snelheden tot 5 m/s aangedreven door een gelijkstroomshuntmotor en voor hogere snelheden (tot 50 m/s) door een kleine perslucht-turbinemotor. Het toerental van de trommel (en daarmee de treksnelheid) werd als volgt gemeten. In de vlakke zijden van de trommel waren gaten geboord. Bij draaiing van de trommel werd een lichtstraal afwisselend onderbroken en doorgelaten. De lichtstraal was gericht op een fotocel. Van de pulsen, die door de fotocel werden afgegeven, werd de frekwentie gemeten.

Om een regelmatige bewikkeling van de trommel te verkrijgen werd de opwikkelstellige met een sinusgenerator heen en weer bewogen (change-ring).

F. De trekkrachtmeter

Het meten van de trekkracht berust op het ontstaan van reaktiekrachten bij het buigen van een gesponnen draad. In figuur 5 is de trekkrachtmeter weergegeven. De pennen B zijn op een draaibare spoel bevestigd. De reaktiekrachten op de pennen veroorzaken, bij draaiing van de spoel, een resulterend koppel op het juk, terwijl de momenten tengevolge van wrijvingskrachten elkaar opheffen. Bij draaiing van het juk schermt een vlinder een lichtbundel meer of minder af, waardoor de stroom door een fototransistor en (versterkt) door de spoel toe- of afneemt. Er ontstaat nu een evenwicht waarbij het koppel veroorzaakt door de stroom, en dat tengevolge van de trekkracht in de draad, gelijk zijn. De stroom in de spoel is een maat voor de trekkracht. De meter is volgens een statische methode geijkt, namelijk door een vertikaal hangende glasdraad te belasten met gewichten. Omdat bij het buigen van de draad niet alleen reaktiekrachten optreden door de spanning in de draad, maar ook tengevolge van de stijfheid van de draad, zijn bij de ijking draden van verschillende diameters gebruikt. Voor een uitvoeriger beschrijving wordt verwezen naar H. Bonne, W.J. Beek [3].

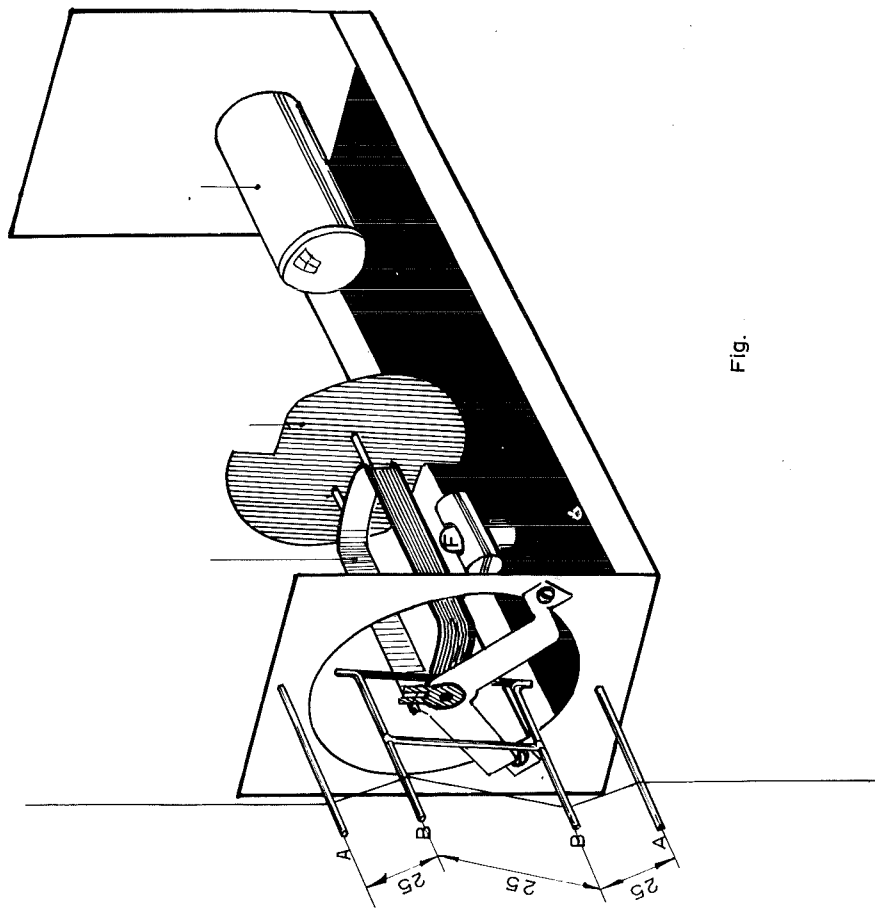


FIGURE 1

IV DE MEETRESULTATEN

A. Het massadebiet als functie van de hoogte van het glasniveau

Bij een spintuit met diameter 2,0 mm en lengte 6,0 mm werd het debiet bepaald, waarbij het glasniveau gevarieerd werd van 70 tot 150 mm boven de spinplaat. De temperatuur, gemeten met het termokoppel in de spinplaat, vlakbij de spintuit, was 1250°C. De resultaten van de metingen zijn in figuur 6 weergegeven. Zoals later zal blijken is bij treksnelheden > 5 m/s het debiet onafhankelijk van de treksnelheid, zodat Φ_m in deze figuur bij één treksnelheid (20 m/s) is opgenomen. Door de meetpunten is een rechte getrokken, die na extrapolatie voor $h = 0$ geeft: $\Phi_{m0} = 2,0 \cdot 10^{-6}$ kg/s. Het verband debiet-hoogte van figuur 6 kan weergegeven worden als:

$$\Phi_m = (2,0 + 49 h) \cdot 10^{-6} \text{ kg/s} \quad (1)$$

Hieruit valt af te lezen, dat de drijvende kracht van de stroming gedeeltelijk wordt gegeven door de statische druk (hoogte van het glasniveau) en gedeeltelijk door een andere (konstante) kracht, waarvan we later zullen zien dat hij met de oppervlaktespanning samenhangt.

Nemen we aan, dat de relatie van Hagen-Poiseuille geldt voor de stroming in de spintuit en vullen we voor de lengte de effectieve lengte in volgens Holmes [4]: $L_{\text{eff}} = L + \frac{1}{2} n D$, met $n = 0,589$, dan krijgen we voor de verandering van het debiet met de hoogte van het glasniveau:

$$\frac{d\Phi_m}{dh} = \frac{\pi D^4 \rho g}{128 \eta L_{\text{eff}}} \quad (2)$$

Bepaalt men hieruit de viskositeit die bij de gemiddelde spintuittemperatuur behoort, dan vindt men $\eta = 94 \text{ Ns/m}^2$. De temperatuur waarbij deze viskositeit werd gemeten met de oven waarin we de fysische konstanten bepaalden, was 1215°C (zie figuur 2). Dit houdt in dat de gemiddelde spintuittemperatuur lager is dan die welke het termokoppel in de spinplaat aangeeft (in het gegeven voorbeeld 1250°C). Ook bij andere spinplaattemperaturen is op

dezelfde wijze dit verschil tussen spintuit- en spinplaat-temperatuur vastgesteld. Daarom zullen we in het vervolg de spintuittemperatuur (T_c) opgeven als de gekorrigeerde spinplaat-temperatuur (T):

$$T_c = T - 35^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

B. De vorm van de draad

Bij verschillende temperaturen werden fotografische opnamen gemaakt van de contouren van de glasdraad en wel bij twee treksnelheden (10,5 en 31,5 m/s). De opnamen zijn gemaakt met een Leica-kamera ($f = 135$ mm).

Uit de opnamen zijn de draaddiameters opgemeten als functie van de afstand tot de spintuit. In figuur 7 is de dimensieloze draaddiameter r/R als functie van de dimensieloze afstand tot de spintuit $x/2R$ op halflogaritmisch papier uitgezet. De draaddiameter blijkt exponentieel met de afstand tot de tuit af te nemen. De treksnelheid bleek nauwelijks invloed te hebben op het contour van de draad. De mate van insnoering wordt alleen bepaald door de temperatuur. Dat wil zeggen dat in de betrekking

$$\frac{r}{R} = \exp - \left(K \frac{x+x_0}{2R} \right) \quad (4)$$

de konstanten K en x_0 alleen afhankelijk van de temperatuur zijn. Daarom nemen we aan, dat alleen de oppervlaktetension, de viscositeit en de traagheidskrachten het proces bepalen. Uit dimensionele overwegingen volgt dan, dat K en x_0/R een eenduidige functie moeten zijn van de volgende dimensieloze groep:

$$\frac{\eta^2}{\rho \gamma R}$$

Het verband tussen K en deze groep is in tabel I weergegeven voor 2 spintuiten. Uit deze tabel blijkt, dat

$$K \left(\frac{\rho \gamma R}{\eta} \right)^{\frac{1}{4}} = \text{konstant} \quad (5)$$

Dit betekent ook, dat de kromtestraal R' van de draadcontour in axiale richting moet voldoen aan:

$$\frac{R'}{R} \left(\frac{\eta^2}{\rho \gamma R} \right)^{\frac{1}{4}} = \text{konstant} \quad (6)$$

Van deze relatie zullen we in het vervolg nog gebruik maken.

C. Het massadebiet als functie van de treksnelheid

Omdat de treksnelheid wél en de trekkracht op zichzelf niet een experimenteel onafhankelijke variabele is, wordt steeds het debiet als functie van v_0 gegeven.

Figuur 8 geeft de resultaten van metingen aan een spintuit met diameter 2,0 en lengte 6,0 mm ($L_{\text{eff}} = 6,59$ mm).

Soortgelijke resultaten werden verkregen bij metingen aan spintuiten met andere afmetingen.

De interpretatie van deze metingen stellen we uit tot § VA.

D. Het verband tussen treksnelheid en trekkracht

Figuur 9 geeft het verband tussen de treksnelheid v_0 en de trekkracht F . De metingen werden verricht aan dezelfde spintuit met diameter 2,0 mm en lengte 6,0 mm.

Wederom werden soortgelijke resultaten verkregen bij andere spintuiten. Ook de interpretatie van deze metingen volgt in het volgende hoofdstuk (§ VB).

V TEORETISCHE BESCHOUWINGEN

A. De berekening van de drukval over de spintuit uit de debietmetingen

Als er niet aan het glas getrokken wordt, is er geen insnoering en dan geldt voor de stroming in de spintuit de wet van Hagen-Poiseuille:

$$\Delta p = \frac{128 \eta L_{eff} \Phi_m}{\pi D^4 \rho} \quad (7)$$

De drijvende kracht Δp bestaat uit:

- de statische druk op de spinplaat: $\Delta p_o = \rho g h$
- de overdruk aan de mond van de spintuit, veroorzaakt door de oppervlaktespanning: $2\gamma/R$

De resulterende drijvende kracht is dus: $\Delta p = \rho g h - 2\gamma/R$

Zodra er evenwel aan de draad getrokken wordt, neemt het debiet sterk toe. Onze verklaring hiervoor is, dat een negatieve kromming van de draad in de x-richting een onderdruk onder de spinopening veroorzaakt. Deze mogelijke verklaring zullen we nu eerst nader onderzoeken. De totale drukval over het capillair wordt in dat geval:

$$\Delta p = \rho g h - \gamma \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right) = \Delta p^* - \frac{\gamma}{R'} \quad (8)$$

Deze totale drukval is met behulp van de wet van Hagen-Poiseuille te berekenen uit het gemeten debiet. Verder is Δp^* ($= \rho g h - \gamma/R$) bekend, maar γ/R' niet. Wel weten we reeds dat:

$$R' \propto R \left(\frac{\rho R \gamma}{\eta^2} \right)^{1/4}$$

Daarom zetten we $\frac{\Delta p}{\Delta p^*}$ uit tegen $\frac{\gamma}{\Delta p^* R} \left(\frac{\eta^2}{\rho \gamma R} \right)^{1/4}$ en verwachten op grond van vergelijking (6) een lineaire relatie.

Verder verwachten we dat deze relatie door het punt (0 ; 1) gaat, omdat voor een draad, die niet insnoert ($R' \rightarrow \infty$) reeds fysisch is in te zien, dat de oppervlaktespanning aanleiding geeft tot een overdruk γ/R . In dat geval is $\Delta p = \rho g h - \gamma/R = \Delta p^*$ zoals ook direkt uit vergelijking (8) volgt.

Uit figuur 10, waarin de metingen aan één spintuit op deze wijze

zijn uitgezet, blijkt, dat redelijk aan de verwachting wordt voldaan:

$$\frac{\Delta p}{\Delta p^*} = 1 + 0,7 \frac{\gamma}{\Delta p^* R} \left(\frac{\eta^2}{\rho \gamma R} \right)^{1/4} \quad (9)$$

Dit betekent eveneens:

$$\frac{R'}{R} = - \frac{1}{0,7} \left(\frac{\rho \gamma R}{\eta^2} \right)^{1/4} \quad (10)$$

Berekenen we nu - als proef op de som - het debiet ϕ_{mo} uit het voorbeeld van § IVA (figuur 6), dan vinden we:

$$\begin{aligned} \phi_{mo} &= \frac{\eta D^4 \rho}{128 \eta L_{eff}} \left\{ 0,7 \frac{\gamma}{R} \left(\frac{\eta^2}{\rho \gamma R} \right)^{1/4} - \frac{\gamma}{R} \right\} \\ &= 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s} \end{aligned} \quad (11)$$

Dit komt goed overeen met de gemeten waarde: $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}$.

B. De berekening van de trekkracht

De trekkracht F kunnen we samengesteld denken uit 2 gedeelten:

- F_o compenseert de kracht op de draad tengevolge van de onderdruk aan de spinopening.
- F_d levert het vermogen, dat door inwendige wrijving wordt gedissipeerd.

Nu is F_d wél afhankelijk van de treksnelheid en F_o niet.

F_o moet evenredig zijn met $R^2 \gamma / R'$, dus

$$F_o = C' \frac{\gamma}{R'} R^2 = C'' \frac{\gamma}{R} \left(\frac{\eta^2}{\rho \gamma R} \right)^{1/4} R^2 \quad (12)$$

In tabel II is dit voor verschillende temperaturen en twee spintuiten berekend. De waarde van F_o wordt verkregen door in figuur 9 te extrapoleren naar $v_o = 0$. Uit deze tabel blijkt, dat inderdaad aan (12) wordt voldaan, waarbij dan C'' ongeveer 2,2 en 3,2 is voor de verschillende spintuiten.

Berekenen we nu de kracht F_o , die op de spintuit aangrijpt, op

basis van de in de vorige paragraaf gevonden kromtestraal R' , dan vinden we:

$$F_o = \pi R^2 \frac{\gamma}{R'} = 0,7 \pi R \left(\frac{\eta^2}{\rho \gamma R} \right)^{1/4} \quad (13)$$

Dit is in overeenstemming met (12), mits $C'' = 0,7$. $\pi = 2,2$. De konklusie is dus, dat zowel uit de debietmetingen als uit de metingen van de trekkracht, tot dezelfde onderdruk in de draad bij de uitgang van de spintuit moet worden besloten. Dit wordt nog eens aangetoond in tabel III, waarin de gemeten trekspanning $F_o / \pi R^2$ wordt vergeleken met de uit de meting van het debiet berekende waarde van γ / R' .

VI KONKLUSIES EN DISKUSSIE

1. Voor treksnelheden, die in de praktijk voorkomen (> 5 m/s), is het debiet onafhankelijk van de treksnelheid.
2. In die gevallen wordt het debiet gegeven door vergelijking (1), waarin de term voor de onderdruk aan de spintuit, tengevolge van insnoering van de draad, niet onaanzienlijk is (zie ook figuur 6).
3. Uit de voorspelling van het debiet volgt bij gegeven treksnelheid v_o de uiteindelijke draaddiameter d :

$$\rho v_o \frac{\pi}{4} d^2 = \Phi_m$$

Verhoging van de treksnelheid doet de uiteindelijke draaddiameter afnemen, waarbij een evenredigheid met $1/\sqrt{v_o}$ bestaat.

4. Het spinnen van nog dunnere draden dan in de praktijk gebruikelijk is (d.w.z. $< 10 \mu\text{m}$) kan niet gezocht worden in het ongelimiteerd opvoeren van de treksnelheid. Bij toenemende snelheid neemt de trekkracht op de draad toe (zie figuur 9), zodat de maximale treksnelheid wordt bepaald door de breuksterkte van de draad.
5. Door de temperatuur van de spintuit te verhogen is de trekkracht op de draad te verlagen (zie figuur 9) en kan de maximale treksnelheid worden opgevoerd. Tevens neemt dan het debiet toe, zodat de draaddiameter niet sterk wordt verkleind, maar wel wordt hierdoor de capaciteit van de spinmachine vergroot.
6. De maximale temperatuur, waarbij gesponnen kan worden, wordt bepaald door de instabiliteit van de vloeistofstraal tussen de spintuit en de plaats waarop het glas zijn stolpunt heeft bereikt. Deze straal is instabiel indien hij langer is dan zijn omtrek (Rayleigh). Bij een gegeven spintuitdiameter neemt de lengte van de vloeistofstraal toe bij verhoging van de temperatuur, zodat dit breukmechanisme de maximale spintemperatuur vastlegt.

7. Het blijkt dat de koeling van de vloeistofstraal, vlak onder de spinplaat, moeilijk te beïnvloeden is, indien er veel draden naast elkaar worden gesponnen. In de praktijk betekent dit, dat voor een spintuit van 2 mm diameter, de maximale spintemperatuur ongeveer 1290°C is.
8. Dunnere draden kunnen ook worden gesponnen uit een kleinere opening. Omdat echter in dit geval de lengte, waarover de draad stolt, niet evenredig met de verkleining van de spinopening afneemt, worden voor kleinere spinopeningen de maximale spintemperaturen veel lager. Dit betekent in de praktijk, dat met openingen kleiner dan 1 mm diameter de capaciteit van de machine drastisch afneemt.

Dankbetuiging

Zeer veel dank is verschuldigd aan directie en medewerkers van de N.V. Silenka, AKU-Pittsburgh, te Hoogezand, die door het ter beschikking stellen van verschillende materialen het onderzoek in belangrijke mate hebben gesteund.

VII LITERATUUR

1. J.D. Mackenzie Simultaneous Measurements of Density,
Viscosity and Electric Conductivity of Melts.
The review of Scientific Instruments
Vol. 27, no. 5, May 1956.
2. W.H. v. Houwelingen De ontwikkeling en beproeving van enkele
W.J. Beek niveaumeters voor glasovens.
Wetenschappelijke mededeling op het 36e
Internationale Congres voor Industriële
Chemie. September 1966, Brussel.
3. H. Bonne De invloed van de trekkracht op het debiet
W.J. Beek en de diameter bij het spinnen van glasdraden.
Wetenschappelijke mededeling op het 36e
Internationale Congres voor Industriële Chemie,
September 1966, Brussel
4. D.B. Holmes Dissertatie Technische Hogeschool Delft
Juni 1967

LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN

C'	konstante	(-)
C''	konstante	(-)
d	einddiameter van gesponnen glasdraad	(m)
D	inwendige diameter van de spintuit	(m)
F	trekkracht op de draad	(N)
F_o	trekkracht voor $v_o = 0$	(N)
F_d	$(F - F_o)$	(N)
g	versnelling van de zwaartekracht	(m/s ²)
h	hoogte van het glasniveau boven de spinplaat	(m)
h'	insteekdiepte draaistaaf bij viskositeitsbepaling	(m)
K	konstante	(-)
K_p	proportionele versterkingsfaktor	(m)
L	inwendige lengte van de spintuit	(m)
L_{eff}	effektieve lengte van de spintuit	(m)
Δp	totale drukval over spintuit	(N/m ²)
Δp_o	statische druk op de spinplaat	(N/m ²)
$\Delta p_{\frac{o}{2}}$	$(\Delta p_o - \gamma/R)$	(N/m ²)
r	straal van de glasdraad ter plaatse x	(m)
R	inwendige straal van de spintuit	(m)
R'	kromtestraal van de draad bij de tuit	(m)
T	gemeten temperatuur	(°C)
T_c	gecorrigeerde temperatuur ($= T - 35^\circ\text{C}$)	(°C)
T_i	tijdkonstante van integrator	(s)
v_o	treksnelheid	(m/s)
x	axiale afstand tot spintuit	(m)
x_o	konstante afstand	(m)
γ	oppervlaktespanning	(N/m)
η	dynamische viscositeit	(Ns/m ²)
Φ_m	massadebiet	(kg/s)
Φ_{mo}	massadebiet voor $h = 0$	(kg/s)
ρ	dichtheid	(kg/m ³)

TABEL I

spintuit	T_c (°C)	K	$\left(\frac{\rho \gamma R}{\eta^2}\right)^{\frac{1}{4}}$	$K\left(\frac{\rho \gamma R}{\eta^2}\right)^{\frac{1}{4}}$
D= 2,0 mm L= 6,0 mm	1155	2,50	0,063	0,16
	1185	1,93	0,082	0,16
	1215	1,75	0,101	0,18
	1245	1,45	0,122	0,18
	1270	1,07	0,145	0,16
	1290	0,96	0,166	0,16
D= 2,0 mm L= 8,0 mm	1200	2,39	0,091	0,22
	1225	2,12	0,109	0,23
	1255	1,84	0,131	0,24
	1285	1,71	0,160	0,27
	1310	1,27	0,186	0,24

TABEL II

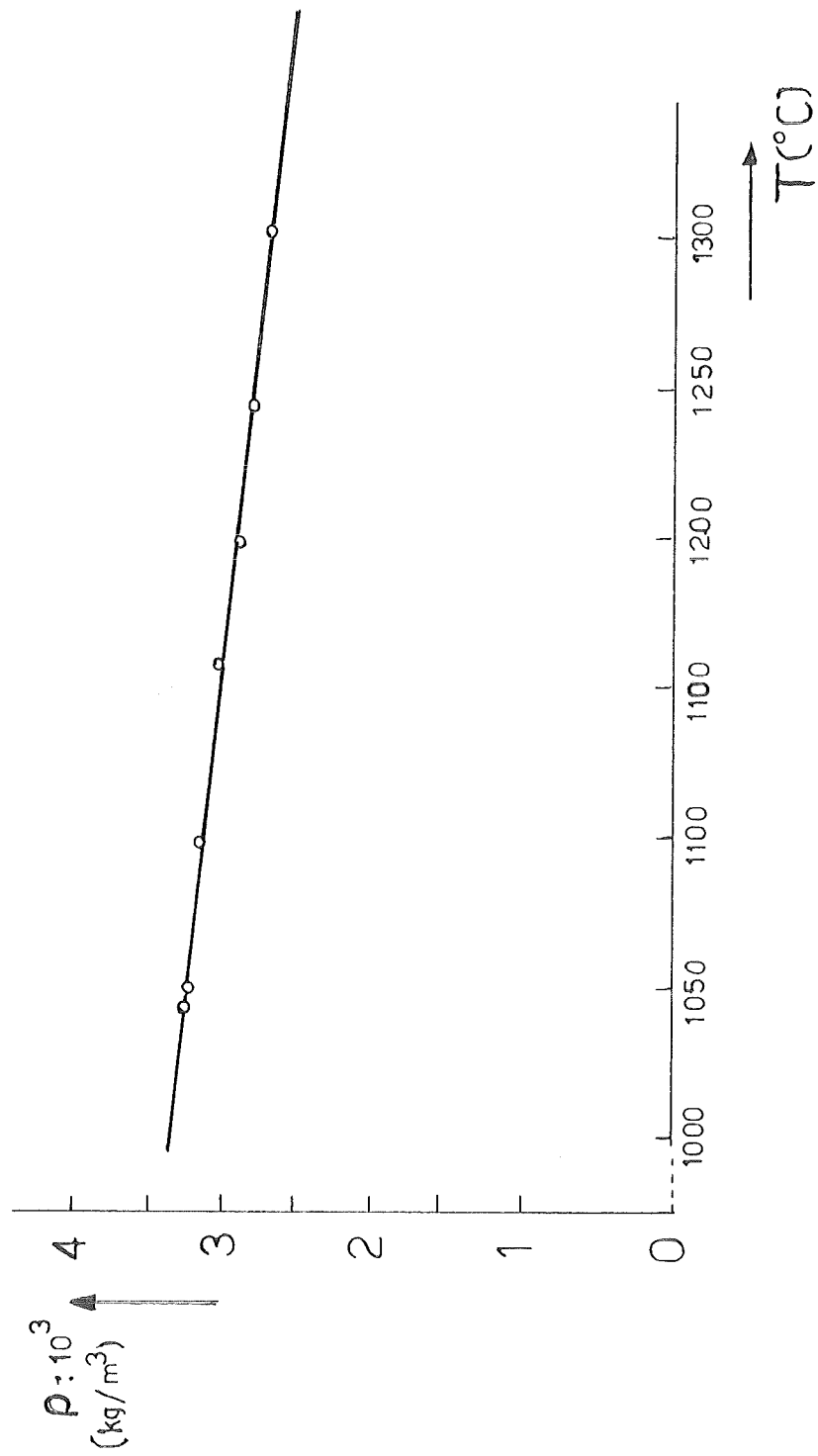
spintuit	T_c (°C)	F_o (10^{-2} N)	$\left(\frac{\rho \gamma R}{\eta}\right)^{\frac{1}{4}}$	$\frac{F_o}{R} \left(\frac{\rho \gamma R}{\eta}\right)^{\frac{1}{4}} \equiv C''$
D= 2,0 mm L= 6,0 mm	1115	1,30	0,042	1,8
	1155	1,08	0,063	2,2
	1185	0,96	0,082	2,5
	1215	0,80	0,101	2,6
	1245	0,61	0,122	2,4
	1270	0,46	0,145	2,2
	1290	0,36	0,166	1,9
D= 2,0 mm L= 8,0 mm	1215	0,98	0,101	3,2
	1225	0,93	0,109	3,3
	1245	0,80	0,122	3,2
	1285	0,57	0,160	3,0

TABEL III

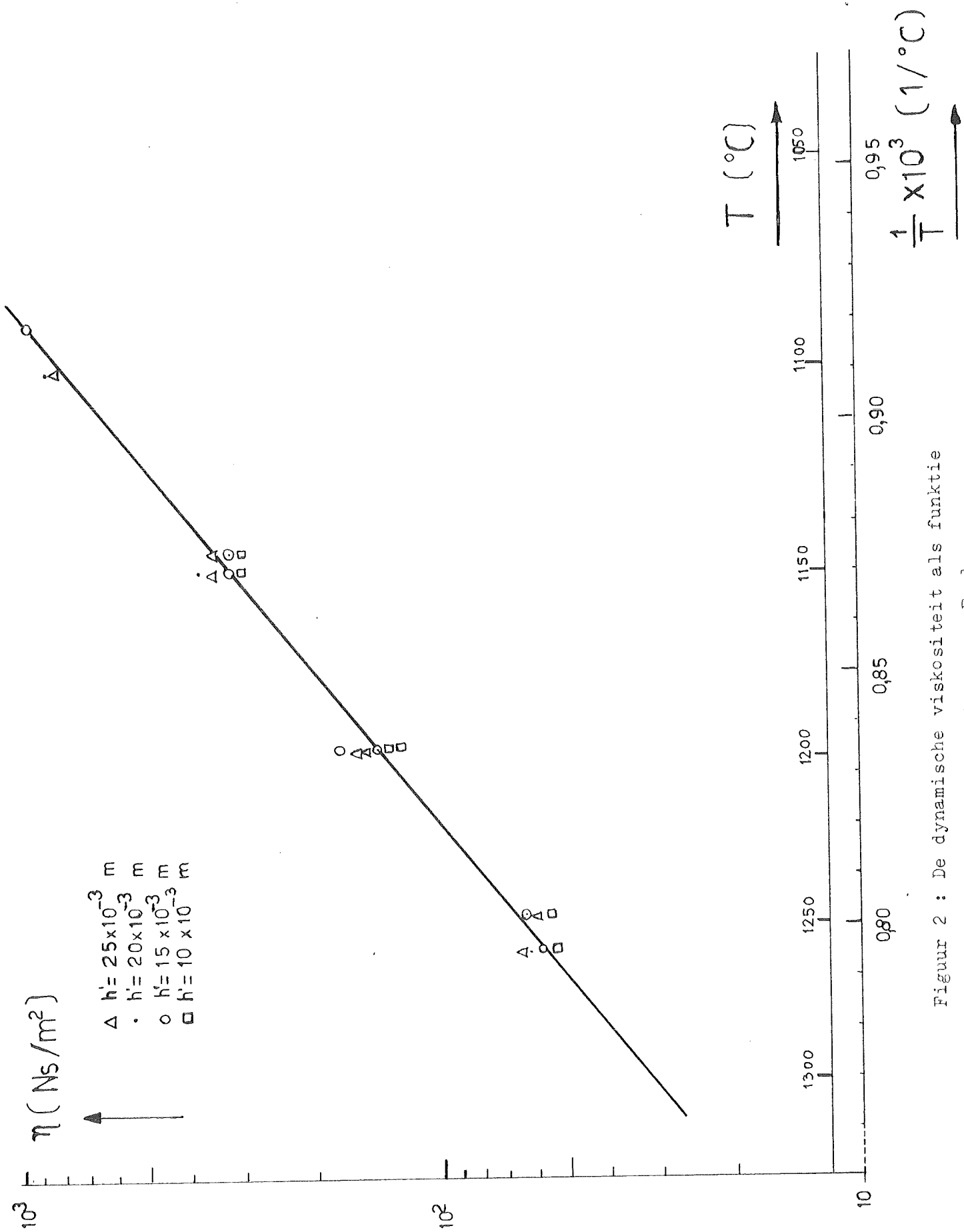
$$D = 2,0 \text{ mm}$$

$$L = 6,0 \text{ mm}$$

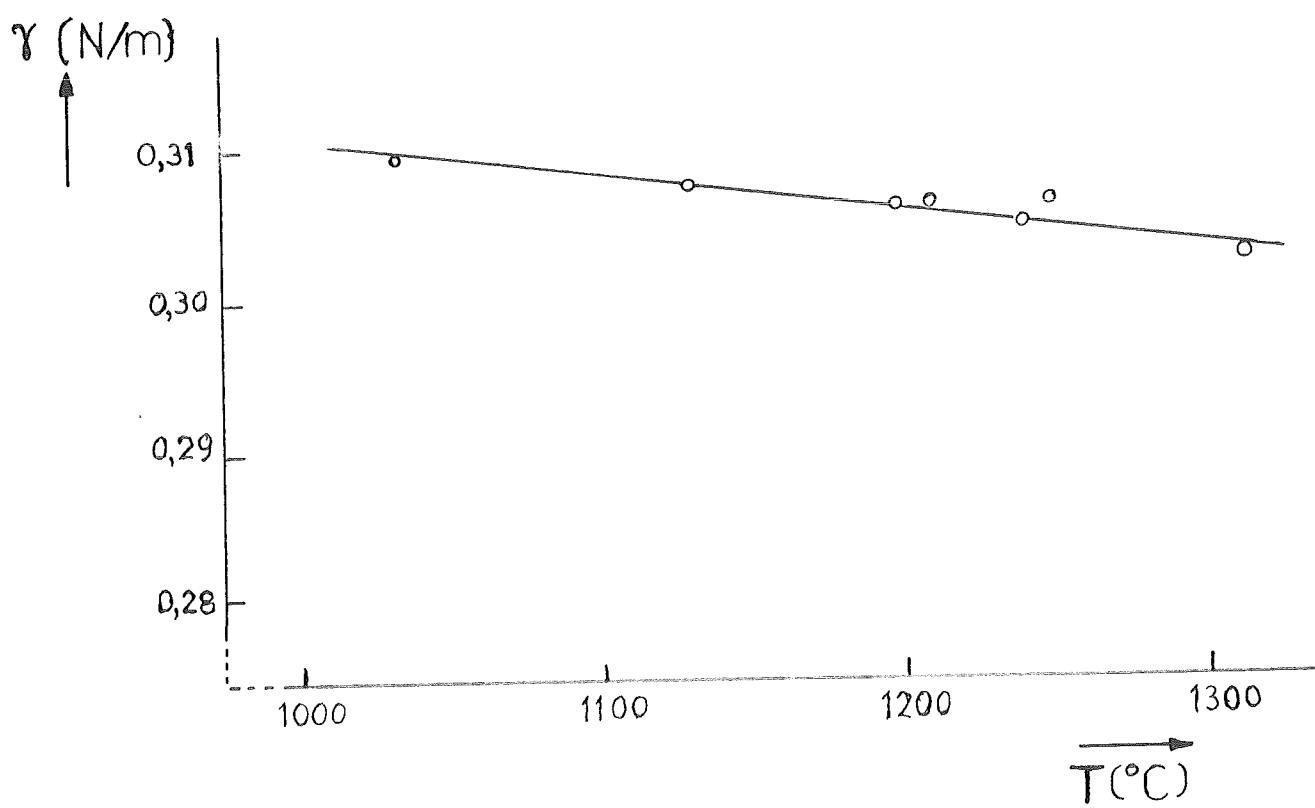
T_c ($^{\circ}\text{C}$)	F_o (10^{-2}N)	$-(\frac{Y}{R'})_T$ (10^3N/m^2)	$-(\frac{Y}{R'})_D$ 10^3N/m^2
1115	1,30	4,14	5,20
1155	1,08	3,44	3,44
1185	0,96	3,06	2,64
1215	0,80	2,55	2,15
1245	0,61	1,95	1,78
1270	0,46	1,46	1,49
1290	0,36	1,15	1,29



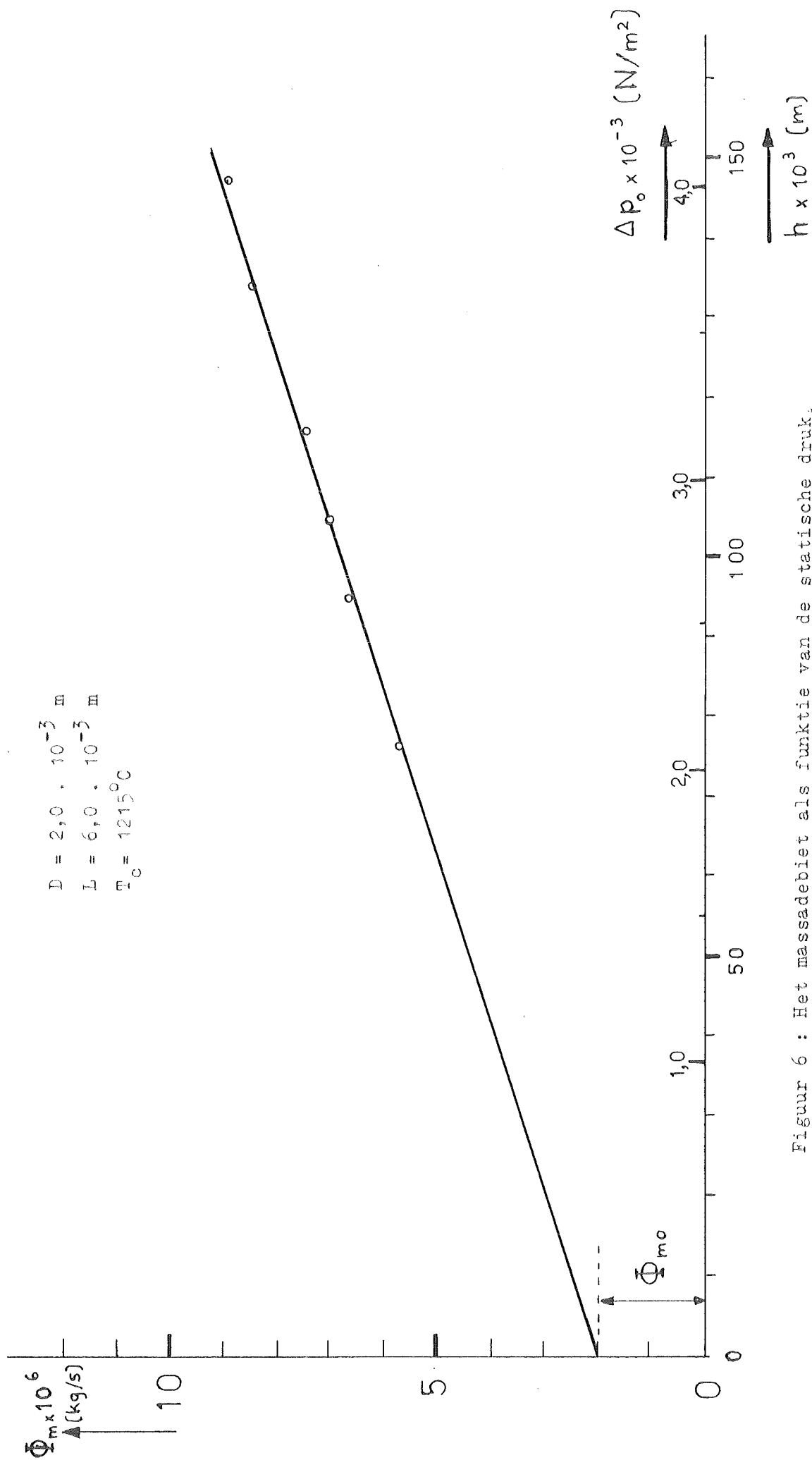
Figuur 1 : De dichtheid als functie van de temperatuur van E-glas.



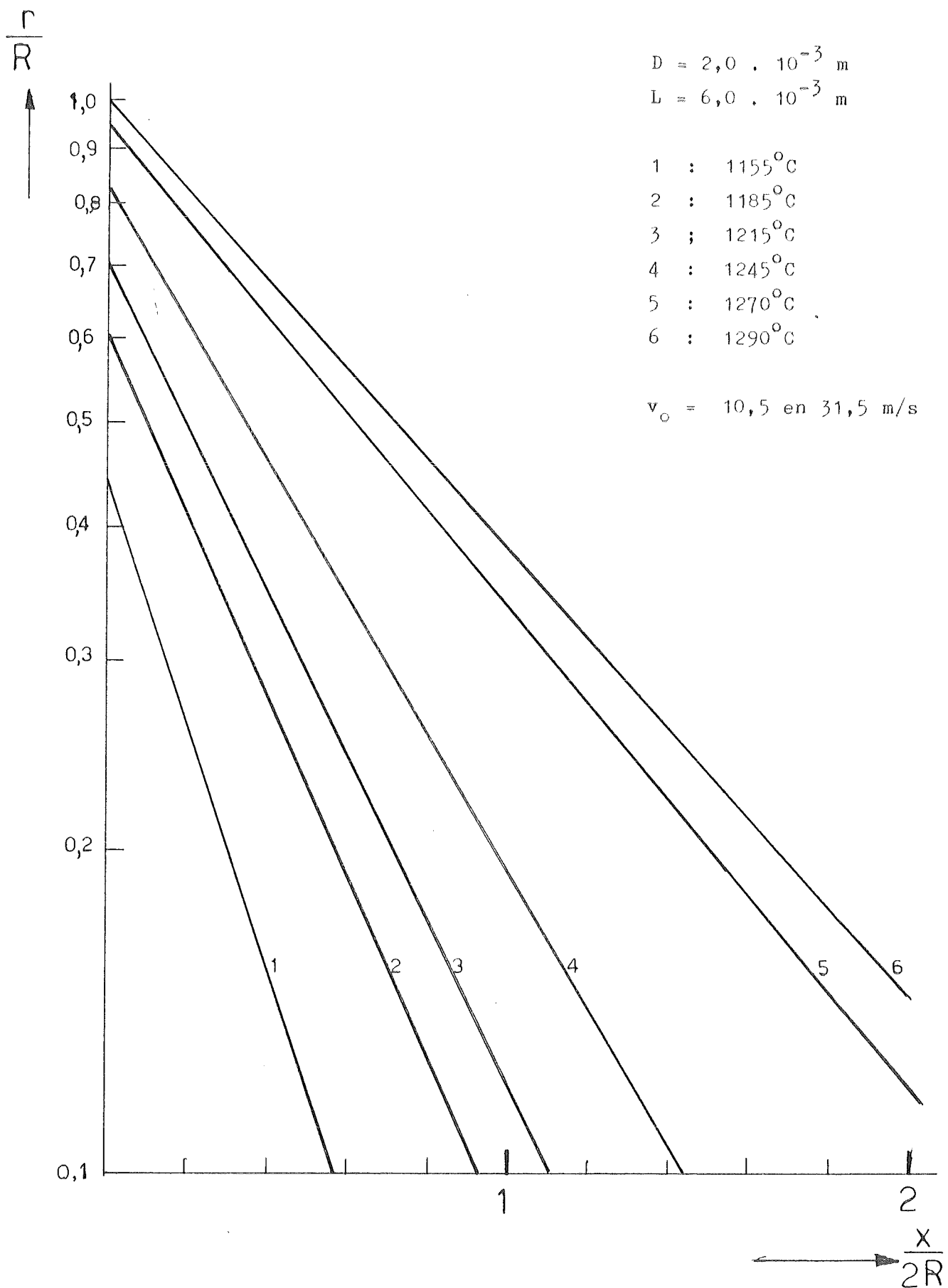
Figuur 2 : De dynamische viscositeit als functie
 van de temperatuur van E-glas.



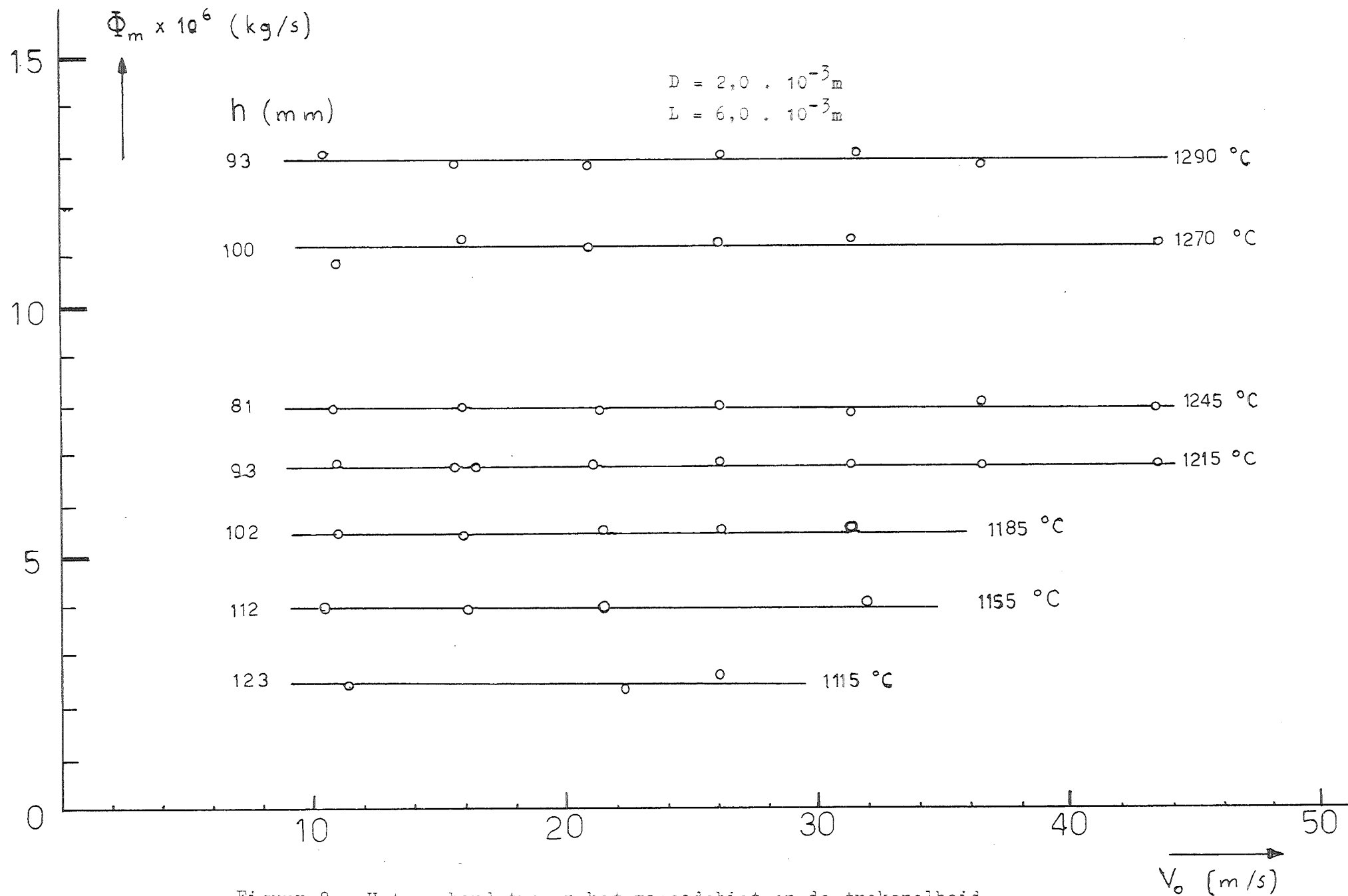
Figuur 3 : De oppervlaktespanning als functie van de temperatuur van E-glas.



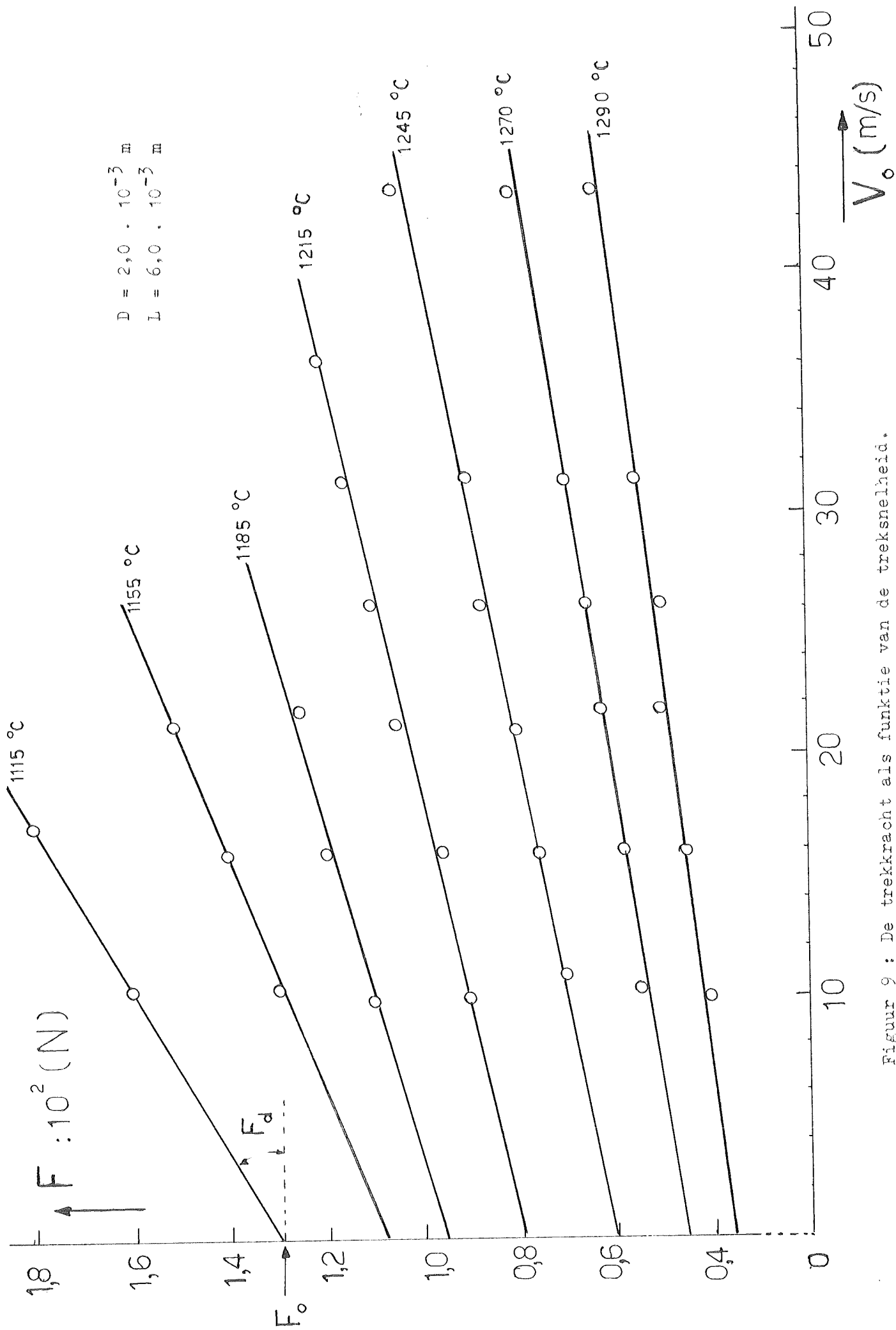
Figuur 6 : Het massadebiet als functie van de statische druk.



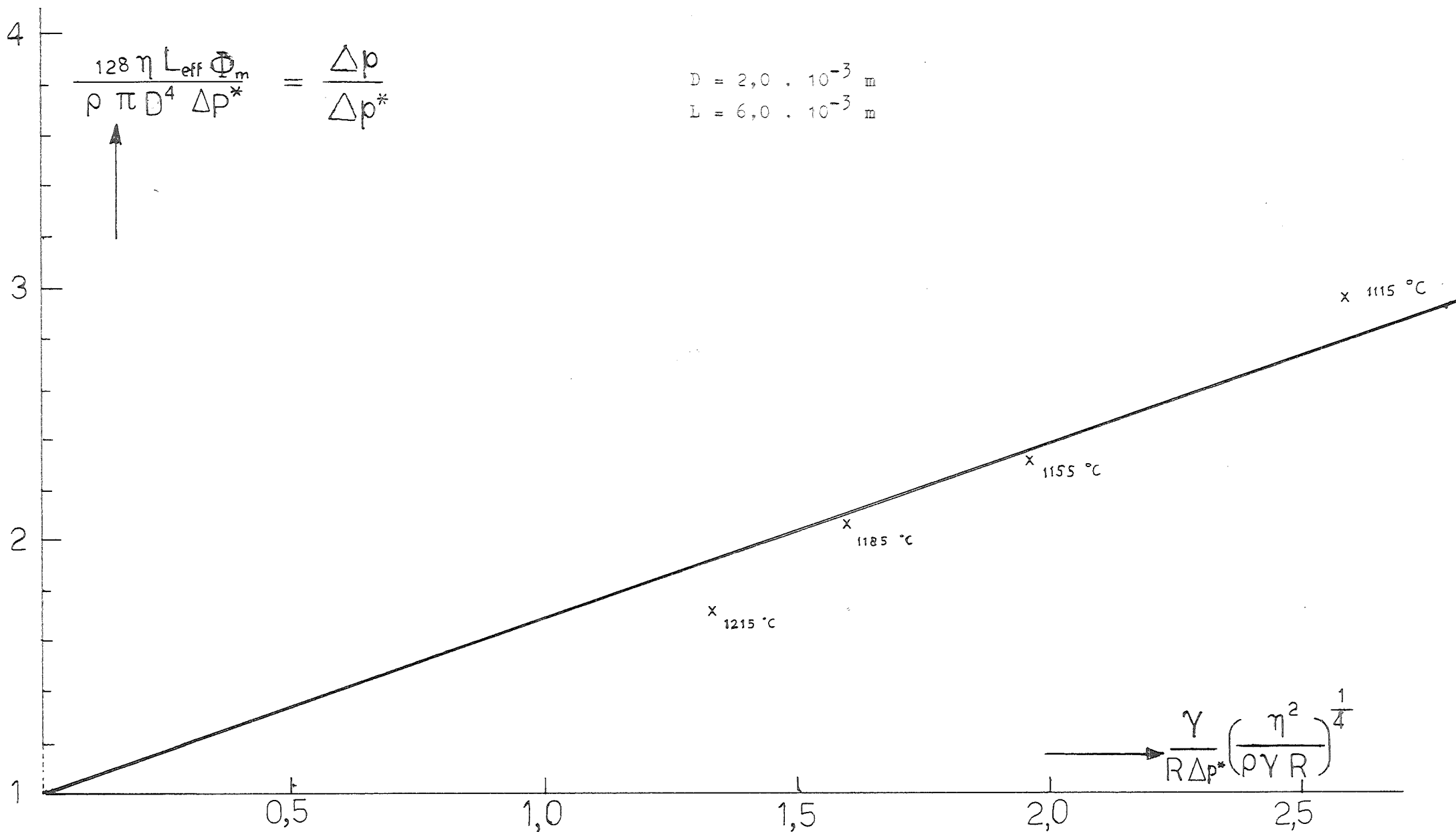
Figuur 7 : De dimensieloze draaddiameter als functie van
 de dimensieloze spintuitafstand.



Figuur 8 : Het verband tussen het massadebiet en de treksnelheid



Figuur 9 : De trekkracht als functie van de treksnelheid.



Figuur 10 : De toename van het debiet.

29-1-68

W. J. B.

spreeken over

- pyrometer

- afk draad in
licht (ook theme)

-- A P P E N D I X bij afstudeerverslag

M.A.P. Verwijmeren

januari 1968

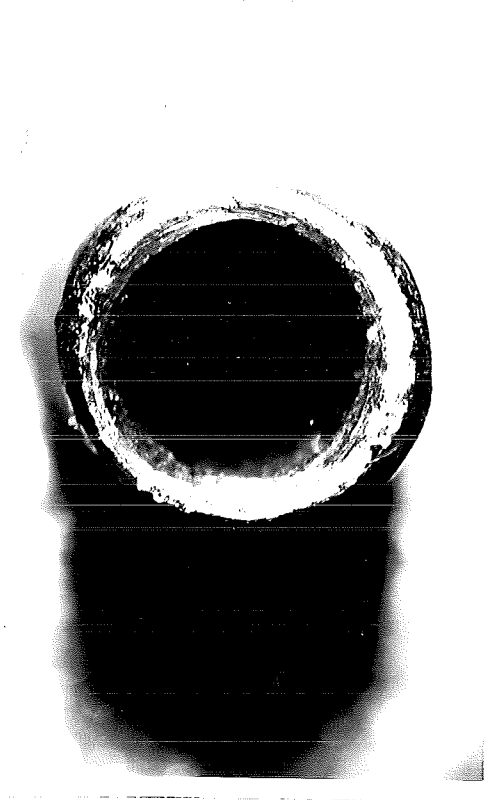


Figure A1

APPENDIX

A. De temperatuurmeting van de spintuit

Tijdens de experimenten zoals beschreven in het afstudeerverslag, was reeds duidelijk geworden, dat de bepaling van de spintuittemperatuur een probleem bleef. De bezwaren tegen de toegepaste correctie volgens de methode van § IVA zijn de volgende

1. Voor de berekening van η uit

$$\frac{d\phi_m}{dh} = \frac{\pi D^4 \rho^2 g}{128 \eta L} \quad \text{wordt 9 maal een gemeten grootheid gebruikt}$$

(4 maal D , 2 maal ρ en 1 maal L , h en ϕ_m). Hierdoor wordt een nogal grote fout geïntroduceerd in de aldus verkregen waarde van η . Door terugzoeking in de $\eta = \eta(T)$ -karakteristiek (figuur 2), komt daar nog eens een onnauwkeurigheid bij. Daar staat evenwel tegenover, dat de viscositeit zeer sterk temperatuurafhankelijk is. Een fout in η komt dus veel minder sterk tot uiting in T_c .

Figuur A1 laat een opname zien van een spintuitopening. Bij het beschouwen van deze opname, zal het duidelijk zijn, dat men de diameter van de spintuit hoogstens op 0,1 mm ($\approx 5\%$!) kan opgeven; dit als gevolg van onrondheid en minder gladde afwerking.

Westerling [1] geeft echter als diameters van de spintuiten:

1,50; 2,00; 2,00 en 2,50 mm. Voor industrieel gebruik doet een onnauwkeurigheid van deze orde niet ter zake, maar bij een correctieberekening zoals toegepast in § IVA beslist wel. Hierbij dient nog vermeld te worden, dat de diameters van de spintuiten een konisch verloop hadden van ongeveer 1 : 25. Een juiste waarde van D (of eigenlijk D^4) voor een bepaalde spintuit kan worden verkregen, door deze tuit te laten doorstromen met een viskeuze vloeistof met bekende fysische konstanten. Door dan het debiet en de drijvende kracht te meten, is uit de relatie van Hagen-Poiseville een "effektieve" diameter van de spintuit te berekenen.

2. De gegevens over de dichtheid, die bij de korrektieberekening gebruikt zijn, zijn genomen uit de metingen van Blokland [2]. Deze resultaten stemmen echter in het geheel niet overeen met de gegevens van Shartsis [3] en van Houwelingen [4] (ongeveer 600 kg/m³ te hoog). Het is dus zeer de vraag of de gebruikte waarden korrekt zijn.
3. Tenslotte kan men zich afvragen of de wet van Hagen-Poiseuille van toepassing verklaard mag worden. Temperatuurverschillen van enkele graden celsius veroorzaken reeds een ernstige verstoring in de snelheidsverdeling. Verder kwamen tijdens de metingen regelmatige temperatuurschommelingen van 15° à 20°C voor.

Getracht moet worden de temperatuur van de spintuit met een andere methode te bepalen. Pogingen om dit te doen, door een zeer klein termokoppel tegen het uiteinde van een tuitje te drukken, leidden niet tot een bevredigend resultaat. Daarom werd gedacht aan een meetmethode waarbij geen fysisch contact plaatsvindt (pyrometer). Vooropgesteld werd daarbij, dat het in feite belangrijker is de temperatuur van het glas te kennen op het moment waarop het de spintuit verlaat, dan de temperatuur van^{de} buitenwand van de spintuit te kennen. Het bleek mogelijk de kleur van de gloeidraad van de pyrometer te vergelijken met het bovenrandje van het uitstromende glas. Dit is ook daarom gunstiger dan het meten van de spintuittemperatuur, omdat de emissiecoëfficiënt van glas aanzienlijk hoger ligt dan die van platina (0,94 tegen 0,04 - 0,16). De hiervoor nog toe te passen correctie zal dus veel kleiner zijn. Om deze meetmethode toe te kunnen passen werd een mikropyrometer (fabrikaat Pyro-werk, Hannover) geijkt, waarbij gebruik werd gemaakt van het daarbij aanwezige roodfilter (6500 Å). Bij deze ijking werd een instelnauwkeurigheid bereikt van 2°C. Voor de correctie, vanwege de niet-volledige emissie van het glas, mag volgens Bezemer [5] de formule van Planck worden gebruikt, en wel als volgt:

$$\rho(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{a}{e^{\frac{c_2}{\lambda T} - 1}} = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T} - 1}} \quad (1)$$

Hierin is

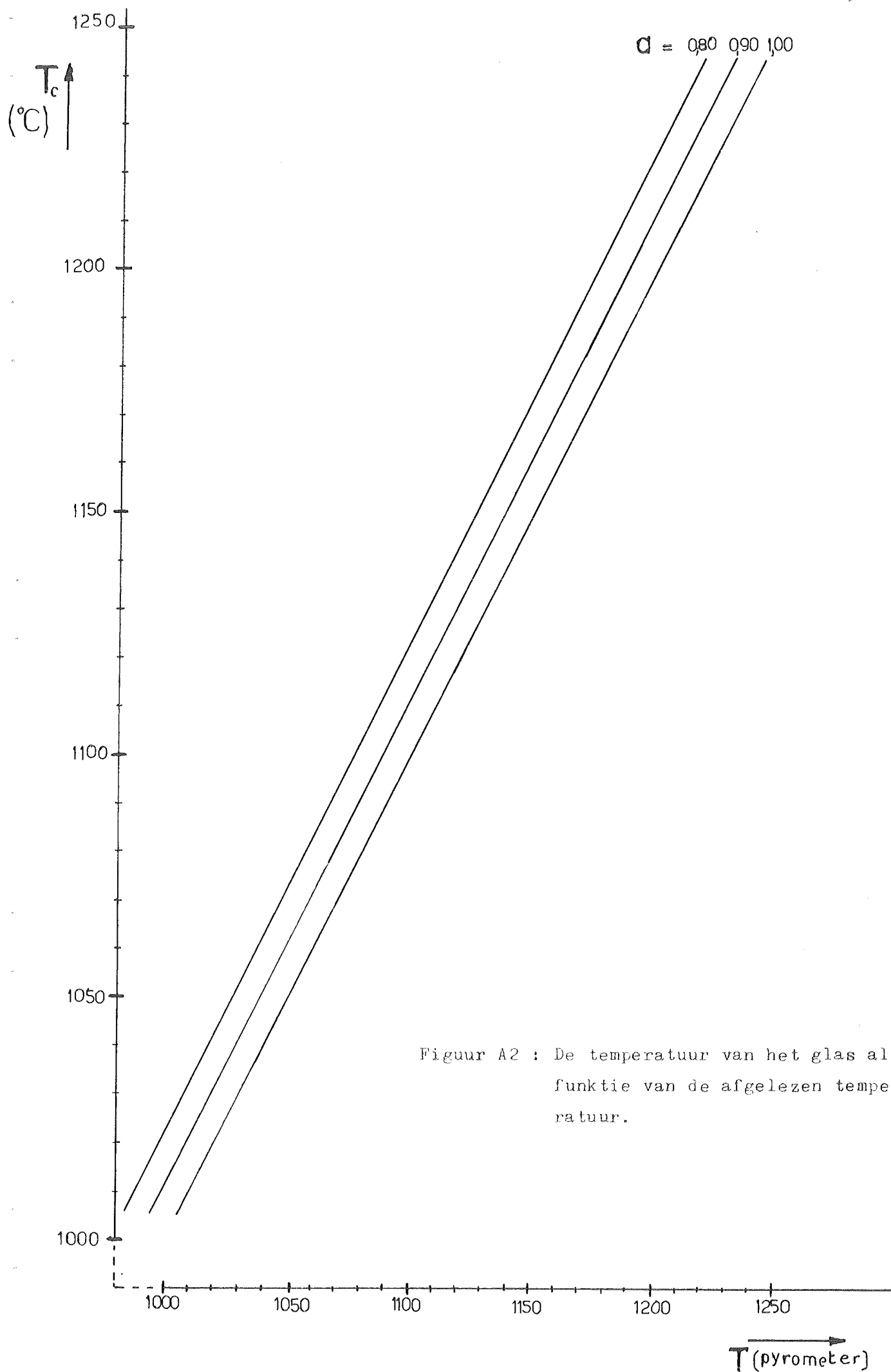
a	de emissiecoëfficiënt van het glas
c_1	een konstante ($= 4,99 \cdot 10^{-24} \text{ Jm}$)
c_2	een konstante ($= 1,4385 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C m}$)
T	de gemeten temperatuur ($^\circ\text{K}$)
T_c	de gekorrigeerde temperatuur ($^\circ\text{K}$)
λ	de golflengte (m)
ρ	de stralingsenergie

De factoren c_1/λ^5 vallen weg, omdat aangenomen mag worden, dat, door gebruikmaking van het roodfilter golflengte onafhankelijk wordt gemeten. Na substitutie van $\lambda = 6500 \text{ \AA}$ en bepaalde waarden voor a en T kan T_c berekend worden.

De berekening is voor enkele waarden van a en T uitgevoerd. Na verwerking met de ijkgrafiek geeft dit resultaten zoals in figuur A2 zijn weergegeven. Hieruit kan worden afgelezen, dat voor emissiecoëfficiënten tussen 0,8 en 1,0 de correctie in het gebied van 1000°C tot 1250°C ongeveer $1\frac{1}{4}^\circ\text{C}$ per procent transmissie ($=1-a$) bedraagt. Na toepassing van deze correctie zal bij gebruik van deze pyrometer de totale maximale meetfout nog ongeveer 5°C bedragen.

Het berekenen van de temperatuurval over de spintuit wordt bemoeilijkt door het feit, dat de stralingswarmte die de spintuit ontvangt van de spinplaat zeer moeilijk te bepalen is. Stelt men een warmtebalans op voor de spintuit zonder de term van de ontvangen stralingswarmte mee te nemen, dan volgt daaruit een temperatuurval van ongeveer 500°C over de tuit (diameter 2 mm, lengte 6 mm). Voor α is daarbij 100 genomen. Een dergelijk temperatuurval moet natuurlijk voor onmogelijk gehouden worden.

Ofschoon de orde grootte van de volgens § IV A aangebrachte correctie alleszins redelijk lijkt, kan men toch wel enige bedenkingen aanvoeren tegen de manier waarop deze correctie is verkregen.

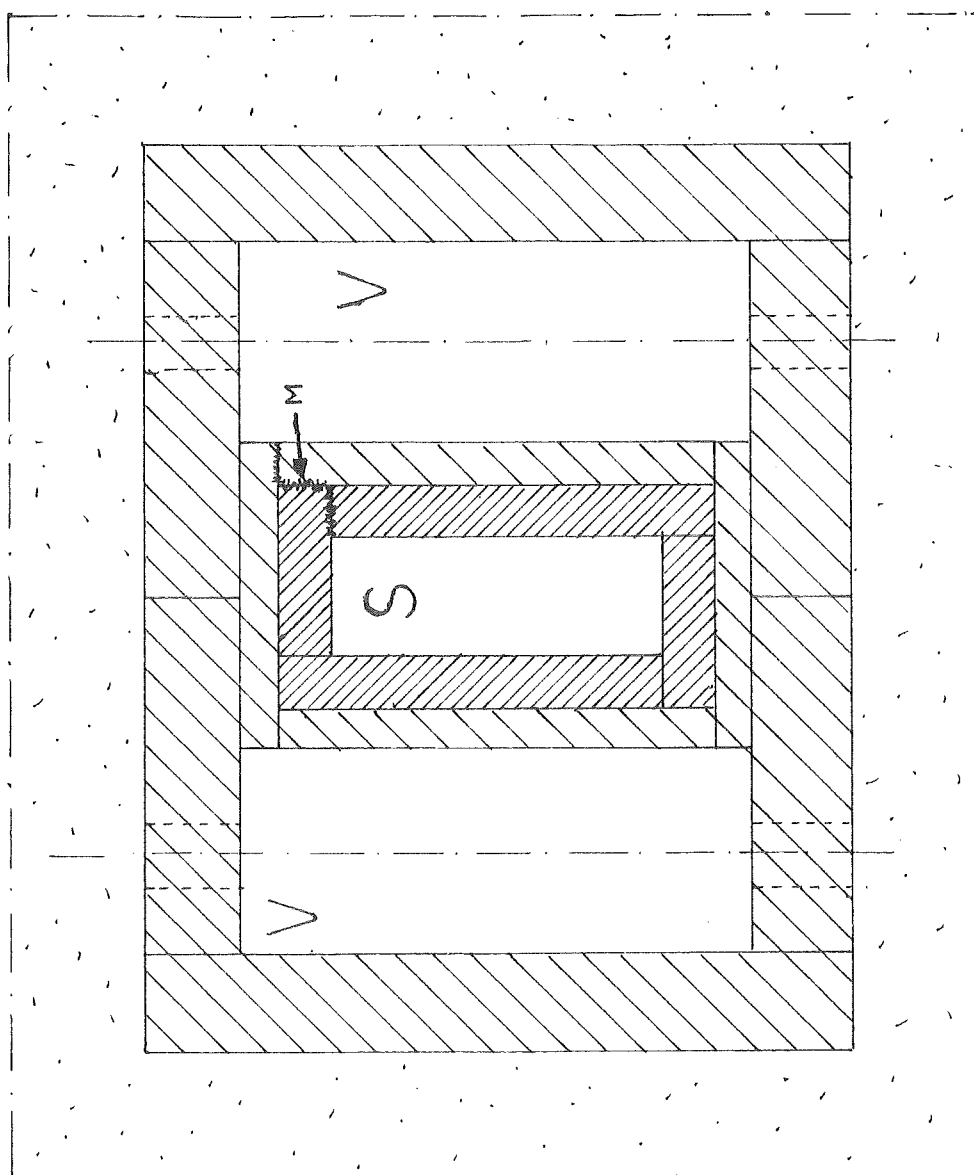
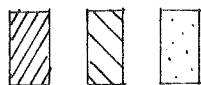


B. Problemen bij de bouw van de oven

De meeste metingen uit het afstudeerverslag werden verkregen met een gemetselde smeltoven. Figuur A3 geeft een horizontale doorsnede van de smeltruimte (S) en de verhittingsruimte (V). De smeltruimte werd zijdelings verwarmd, aan beide zijden door 5 horizontale stookstaven. Op de bodem van de verhittingsruimte was een chamottesteen van 2 cm dik gelegd. Het geheel is omgeven door een stapeling van chamottestenen. Volgens deze methode werden 2 ovens gebouwd. Bij beide ovens begon na enige tijd glas door de metselvoegen (M, figuur A3) van de smeltruimte in de verhittingsruimte te lekken. Als dan het glasniveau in de verhittingsruimte tot aan de onderste stookstaaf reikte, viel de oven na korte tijd uit. Geruime tijd voor het uitvallen van de oven, trad veelvuldig draadbreuk op. Het was dan niet meer mogelijk metingen te verrichten. In figuur A4 is nog een gedeelte van een stookstaaf te zien. De zwarte massa is glas waarin SiC van de stookstaaf is opgelost.

Volgens het principe van figuur A5 werden eveneens 2 ovens gebouwd. De smeltruimte bestond hier uit een zirkoonsilikaatsteen (z.g. Dense Zircon, $\rho = 3900 \text{ kg/m}^3$) waarin een smeltruimte werd geboord (3 doorlopende gaten). Bij deze oven werd niets gemetseld. Een van deze ovens viel uit, omdat er weer glas lekte van de smeltruimte naar de verhittingsruimte, maar nu omdat het zeer korrosieve E-glas zich snel door enkele haarscheurtjes in de steen heenvrat. Deze steen was afkomstig uit een oude, industriële glasoven en de scheurtjes waren waarschijnlijk bij het slopen van de oven ontstaan.

Een tweede (nieuwe) zirkoonsilikaatsteen is gedurende de (zeer voorzichtige) opwarming gescheurd (zie figuur A6). Het rechtse gedeelte van deze smeltruimte werd geboord in de slijperij van de werkgroep Optica van het Laboratorium voor Technische Natuurkunde. De twee andere gaten werden, met een veel geringere precisie en voorzichtigheid, geboord door een partikuliere onderneming. Misschien is, als gevolg van mechanische beschadiging tijdens dit boren, het blok juist in dit gebied gescheurd. De staaf die op de foto (figuur A6) in de smeltruimte staat is de beschermhuls (Pt 10% Rh) van het termokoppel waarmee de temperatuur gemeten werd.



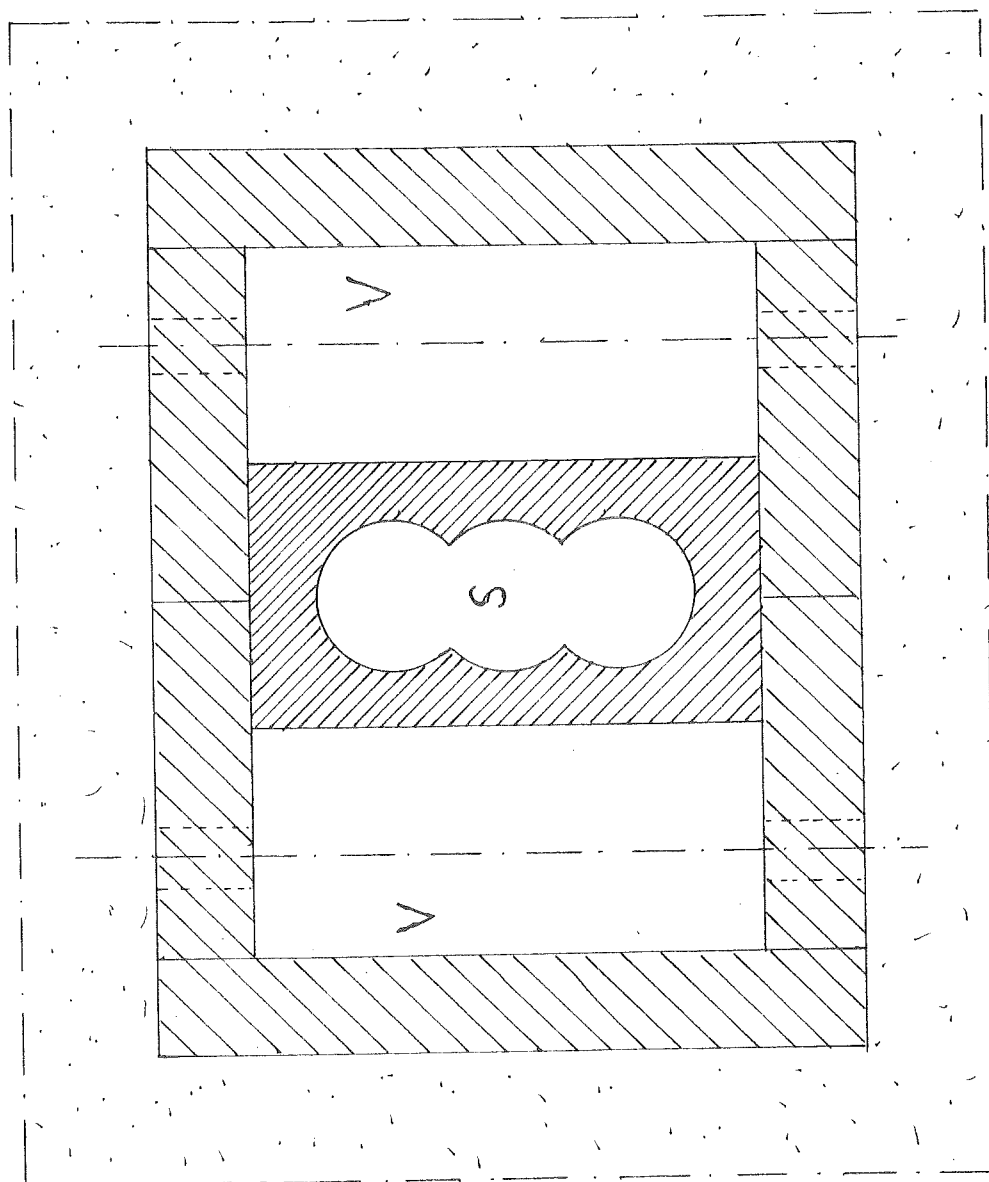
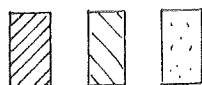
Figuur A3 :

Horizontale doorsnee-
de van een gemetsel-
de smeltoven.

SCHAAAL 1:2



Figure A4



Figuur A5:

Horizontale doorsnede
van een niet-gemetselde
smeltoven

SCHAAAL 1:2

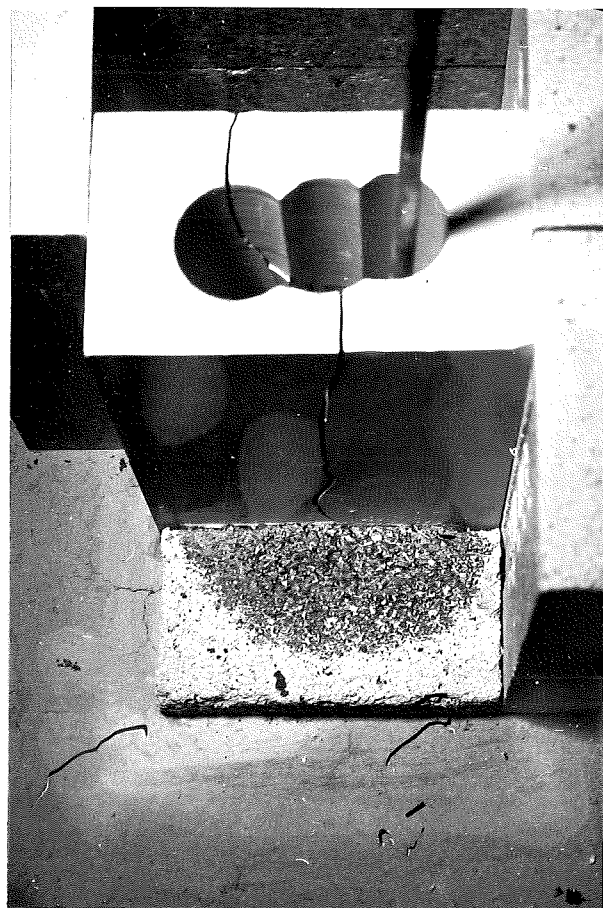


Figure A6

Vast staat, dat bij beide niet-gemetselde ovens geen glas via de onderkant van de smeltruimte in de verhittingsruimte is gelekt. Het metselen kan dus achterwege gelaten worden. Het voordeel hiervan is ook, dat het geheel zich beter kan zetten bij de opwarming. Getracht zou moeten worden om de oven zo te konstrueren, dat de temperatuur ter plaatse van eventuele lekwegen (gemetseld of niet-gemetseld) beneden het smeltpunt van het glas liggen. Daarvoor zullen deze lekwegen verder van het gloeigedeelte van de stookstaven gebracht moeten worden, wat tot een langwerpige smeltruimte zal leiden.

C. De afkoeling van de draad

Na het verlaten van de spintuit zal de glasdraad gaan afkoelen.

Verwaarlozen we, ter vereenvoudiging van het probleem, het axiale warmtetransport, dan leidt dit tot de volgende beschouwing.

De warmtegeleidingscoëfficiënt van het glas is $2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ bij 1200°C en $0,8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ bij 25°C [6]. De warmteoverdrachtscoëfficiënt ten gevolge van warmtetransport door straling is $225 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ bij 1200°C , $55 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ bij 600°C en $15 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ bij 200°C [7]. Bij 600°C is het glas echter al gestold en zal het konvektief warmtetransport (vuistregel ($\alpha = 2 + 6 \sqrt{v}$) het afkoelingsproces gaan bepalen. Het kental van Nusselt, betrokken op de warmteoverdrachtscoëfficiënt van glas naar lucht en de warmtegeleidingscoëfficiënt van het glas, is maximaal ter plaatse $x = 0$ (vlak onder de spintuit):

$$\text{Nu}' = 0,2.$$

hoe berekend?

We mogen dus uitgaan van het limietgeval van uniforme temperatuurverdeling over de doorsnede van de draad. De afkoeling verloopt dan volgens de afkoelingswet van Newton:

$$Y = \exp - (Fo \cdot \text{Nu}') \quad \text{Fo} \rightarrow \infty \quad (2)$$

Hierin is Fo het kental van Fourier at/r^2

Y de dimensielloze temperatuur ter plaatse x

Omdat vr^2 konstant is ($= \Phi_m / \rho \pi$) mogen we voor Fo schrijven:

$$Fo = \frac{\pi \rho a x}{\Phi_m} = \frac{\pi \lambda}{C_p \Phi_m} x \quad (3)$$

Vergelijking (2) gaat dan over in:

$$Y = \exp - \left(\frac{2\pi}{C_p \Phi_m} \alpha r x \right) \quad (4)$$

Hierin is α nogal sterk temperatuurafhankelijk. Het zal dus niet eenvoudig zijn het temperatuurverloop in axiale richting uit te rekenen. Men dient daarvoor een iteratieproces toe te passen.

Anderson [8] heeft een verhandeling geschreven over het afkoelen van glasdraden, na het punt waarop deze de uiteindelijke diameter bereikt hebben. Hierbij wordt de treksnelheid geïntroduceerd door het Nu' -kental als een functie van Re (voor de luchtstroming om de glasdraad) voor te stellen. Deze Re -afhankelijkheid is experimenteel bepaald voor zeer dunne koperdraden in een windtunnel. Samenvattend kan hierover worden gezegd dat $Nu' < 1$ voor $Re < 10$.

Voor een glasdraad van $10\ \mu m$, die met een snelheid van $50\ m/s$ getrokken wordt, is uitgerekend, dat de tijd nodig om van $1100^{\circ}C$ af te koelen tot $600^{\circ}C$ voor het oppervlak van de draad 10^{-4} s bedraagt en voor de as van de draad 10^{-5} s later.

LITERATUUR

1. N.A.J. Westerling Metingen aan een spinoven voor glas.
Afstudeerverslag, januari 1967
2. A.A. Blokland Een oven voor het bepalen van stof-
konstanten van vloeibaar glas.
Afstudeerverslag, januari 1967
3. L. Shartsis, S. Spinner Viscosity and density of molten opti-
cal glasses.
J. Res. National Bureau of Standards
Vol. 46, (3), 1951
4. W.H. van Houwelingen N.V. Silenka, Hoogezand
Persoonlijke mededeling
5. J. Bezemer Fys. Lab., Rijks Universiteit Utrecht
Persoonlijke mededeling.
6. M. Jacob Heat transfer
7. Grüber, Erk, Grigull Wärmeübertragung
8. C.L. Anderson Cooling time of strong glass fibers.
J. Appl. Physics, Vol. 29 (1), 1958.