

8

# METINGEN

OVER DEN INVLOED VAN DE TEMPERATUUR OP DE  
INWENDIGE WRIJVING VAN VLOEISTOFFEN  
TUSSEN HET KOOKPUNT EN DEN KRITISCHEN TOESTAND.

PROEFSCHRIFT

DOOR

L. M. J. STOEL.

LEIDEN. — EDUARD IJDO.  
1891.

Diss Leiden

1891 nr 8

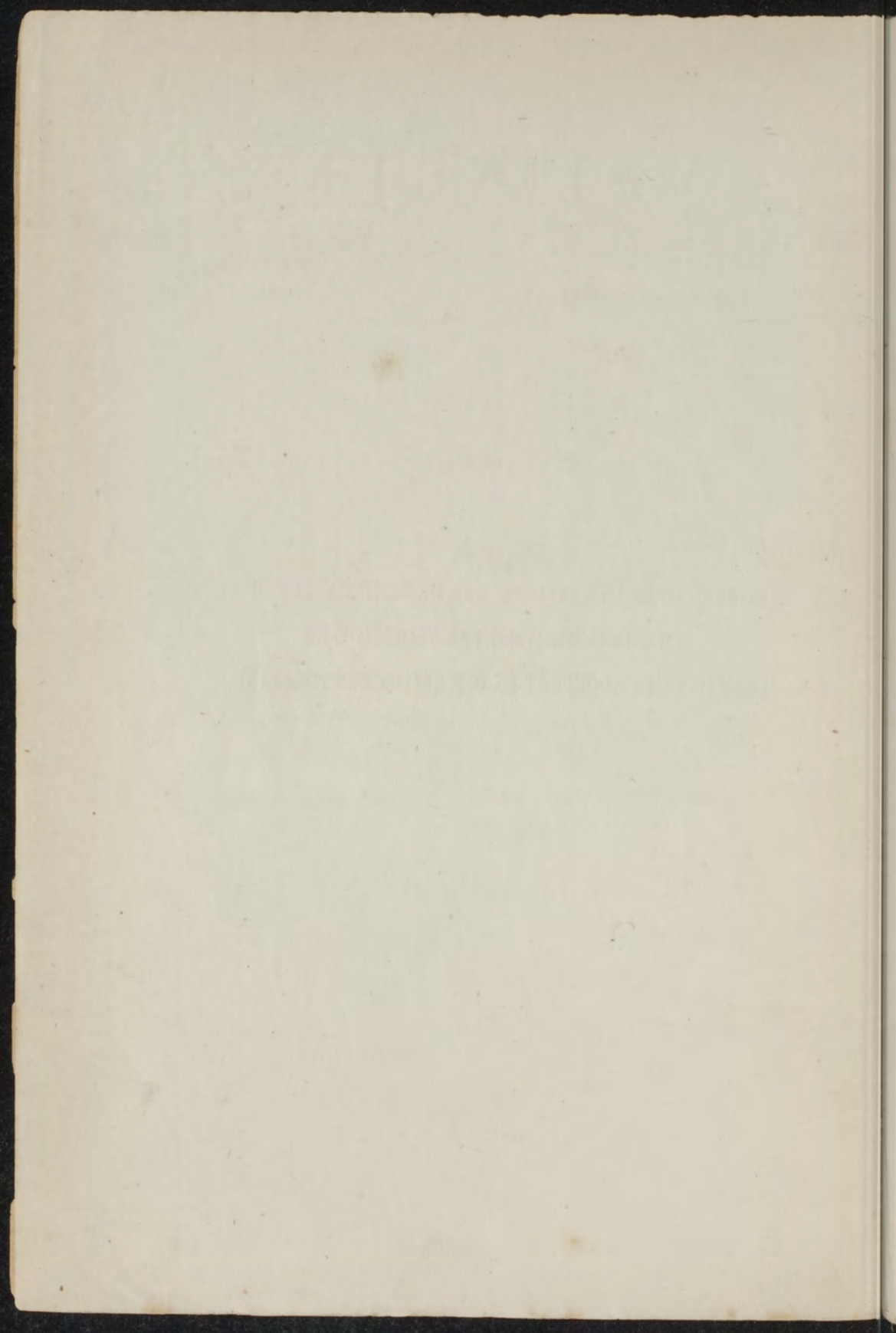
Universiteit Leiden



1 503 942 8



METINGEN OVER DEN INVLOED VAN DE TEMPERATUUR OP DE  
INWENDIGE WRIJVING VAN VLOEISTOFFEN  
TUSSCHEN HET KOOKPUNT EN DEN KRITISCHEN TOESTAND.



# M E T I N G E N

OVER DEN INVLOED VAN DE TEMPERATUUR OP DE  
INWENDIGE WRIJVING VAN VLOEISTOFFEN  
TUSSCHEN HET KOOKPUNT EN DEN KRITISCHENTOESTAND.

---

**PROEFSCHRIFT**

TER VERKRIJGING VAN DEN GRAAD VAN

**DOCTOR IN DE WIS- EN NATUURKUNDE,**

AAN DE RIJKS-UNIVERSITEIT TE LEIDEN

OP GEZAG VAN DEN RECTOR MAGNIFICUS,

**Dr. C. K. HOFFMANN,**

HOOGLEERAAR IN DE FACULTEIT DER WIS- EN NATUURKUNDE,

VOOR DE FACULTEIT TE VERDEDIGEN

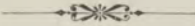
op Zaterdag den 21<sup>sten</sup> Februari 1891, des namiddags te 3 uren,

DOOR

**LEENDERT MARIUS JOHANNES STOEL,**

GEBOREN TE KAMPEN.

---



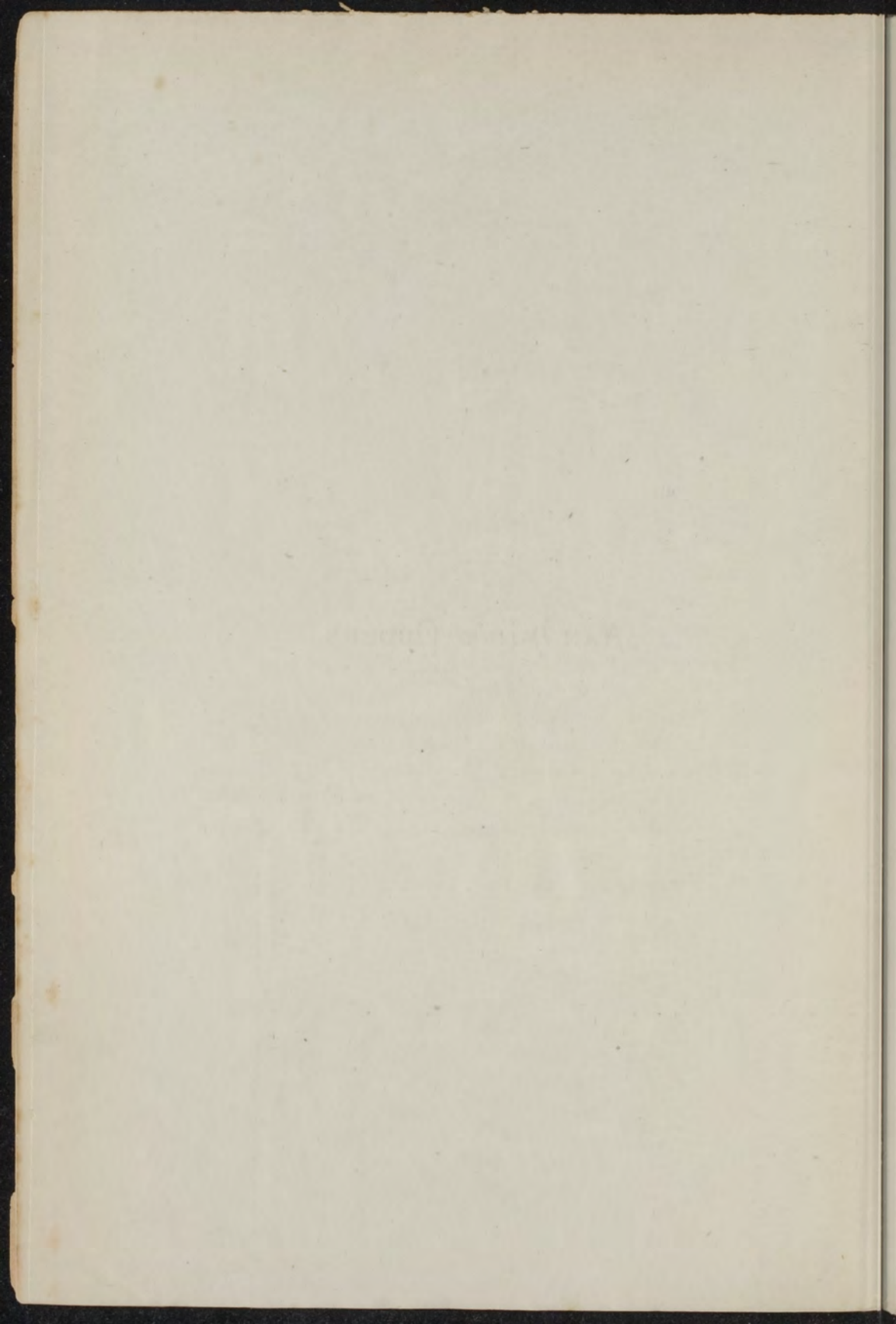
LEIDEN. — EDUARD IJDO.

1891.





AAN MIJNE OUDERS.





## INHOUD

---

	Bladz.
Inleiding . . . . .	1
§ 1. Beginsel der proeven en inrichting van den hoofdtoestel. . . . .	5
§ 2. De inrichting voor het oppersen van het kwik . . . . .	11
§ 3. Toestel voor het meten van den druk. Het brengen van kwik in den luchtledigen toestel . . . . .	13
§ 4. Het vloeistofbad . . . . .	16
§ 5. De aflezingstoestellen. . . . .	19
§ 6. Het vullen van den toestel met chloormethyl . . . . .	21
§ 7. Het verloop der proeven . . . . .	23
§ 8. Berekening der proeven. . . . .	26
§ 9. De afwijkingen van de wet van POISEUILLE en de correcties, welke daarvoor moeten worden aangebracht	38
§ 10. De proeven . . . . .	45
§ 11. Bespreking der resultaten . . . . .	52
Stellingen . . . . .	61

CONTENTS

1. Introduction ..... 1

2. The first part of the book ..... 10

3. The second part of the book ..... 20

4. The third part of the book ..... 30

5. The fourth part of the book ..... 40

6. The fifth part of the book ..... 50

7. The sixth part of the book ..... 60

8. The seventh part of the book ..... 70

9. The eighth part of the book ..... 80

10. The ninth part of the book ..... 90

11. The tenth part of the book ..... 100

## INLEIDING.

---

Sedert Prof. VAN DER WAALS <sup>1)</sup> de verklaring gaf van de continuïteit, die er bestaat tusschen den gas- en vloeistof-toestand, zijn er op dit gebied der natuurkunde belangrijke onderzoekingen gedaan. Voornamelijk zijn bepalingen verricht van kritische temperaturen, drukken en volumina <sup>2)</sup>, dampspanningen enz. Deze proeven waren de aanleiding, dat vele wijzigingen in de toestandsvergelijking van Prof. VAN DER WAALS zijn voorgesteld met het doel deze beter aan de waarnemingen te doen aansluiten zonder dat dit echter tot nu toe volkomen gelukt is.

Waar nu de kinetische gastheorie zich reeds in een vrij groote ontwikkeling verheugt, is het geen wonder, dat meer en meer een vraag op den voorgrond treedt, wier beantwoording misschien nog in een ver verschiet ligt, de vraag: „Wat is eigenlijk een vloeistof; welke zijn de moleculaire werkingen, en welke de bewegingen, waaraan de vloeistofdeeltjes zijn onderworpen?”

Hoewel deze vraag in den tegenwoordigen stand der

---

<sup>1)</sup> Over de continuïteit van den gas- en vloeistof-toestand. Leiden 1873.

<sup>2)</sup> Zie een overzicht in het »Annuaire Bureau des Longitudes» 1891, p. 566.



natuurkundige wetenschap nog niet volledig te beantwoorden is, werden pogingen in die richting reeds aangewend.

Onder de middelen, waardoor men op dit gebied een schrede verder kan komen, biedt zich na het onderzoek van de toestandvergelijking in de eerste plaats aan, het onderzoeken van die eigenschappen der vloeistoffen, die wel het meest van de moleculaire afmetingen afhangen, zooals b. v. inwendige wrijving en warmtegeleiding.

Het verloop der coëfficiënten moet worden nagegaan voor een groot aantal stoffen en moet de meest uiteenlopende toestanden omvatten.

Daar de inwendige wrijving der vloeistoffen, zij het dan ook middellijk door de verandering van de dichtheid, zulk een groote afname met de temperatuur vertoont, is het vooral zeer de moeite waard deze te onderzoeken van het smeltpunt af tot de kritische temperatuur; doordat de gemakkelijk te verkrijgen constante temperaturen slechts loopen tot  $180^{\circ}$  C. en het werken bij temperaturen ver onder  $0^{\circ}$  groote bezwaren oplevert, is echter de keuze der stoffen zeer beperkt.

In dit proefschrift zijn medegedeeld waarnemingen omtrent den inwendigen wrijvingscoëfficiënt van chloormethyl, welks kookpunt en kritische temperatuur liggen bij  $-23^{\circ}$  C. en  $143^{\circ}$  C. Het smeltpunt kon ik bij deze stof niet bereiken, maar zij tast geen der bij de toestellen gebruikte bestanddeelen aan en dit besliste ten haren gunste; mijne proeven loopen van  $-28^{\circ}$  C. tot  $123^{\circ}$  C.

Onder de zeer vele waarnemingen over den inwendigen wrijvingscoëfficiënt van vloeistoffen, zijn er slechts enkele bij temperaturen boven het kookpunt. De meeste waarnemers onderzochten den samenhang van dezen coëfficiënt met de concentratie o. a.

POISEUILLE <sup>1)</sup>, G. WIEDEMANN <sup>2)</sup>, GRAHAM <sup>3)</sup>, HÜBENER <sup>4)</sup>, SPRUNG <sup>5)</sup>, GROTRIAN <sup>6)</sup>, WIJKANDER <sup>7)</sup>, SCHÖTTNER <sup>8)</sup>, SLOTTE <sup>9)</sup>, WAGNER <sup>10)</sup>, E. WIEDEMANN <sup>11)</sup>, PAGLIANI en BATTELLI <sup>12)</sup>, NOACK <sup>13)</sup>, TRAUBE <sup>14)</sup>, PAGLIANI en ODDONE <sup>15)</sup>.

Daarbij was het G. en E. WIEDEMANN en GROTRIAN tevens te doen om het verband na te gaan met den electricchen geleidingsweerstand dier oplossingen.

De invloed van de temperatuur werd behalve door eenigen der reeds genoemden nagegaan door RELLSTAB <sup>16)</sup>, GUEROUT <sup>17)</sup>, PRIBRAM en HANDL <sup>18)</sup>, en DE HEEN <sup>19)</sup>; allen bleven echter steeds beneden het kookpunt.

<sup>1)</sup> POISEUILLE. *Ann. de Chim. et de Phys.* (3) XXI, p. 76, 1847.

<sup>2)</sup> G. WIEDEMANN. *Pogg. Ann.* IC, p. 216, 1856.

<sup>3)</sup> GRAHAM. *Phil. Trans.* (London) CLI, p. 373, 1861.

<sup>4)</sup> HÜBENER. *Pogg. Ann.* CL, p. 248, 1873.

<sup>5)</sup> SPRUNG. *Pogg. Ann.* CLIX, p. 1, 1876.

<sup>6)</sup> GROTRIAN. *Pogg. Ann.* CLVII, p. 130 en 237, 1876, en CLX, p. 238, 1877. *Wied. Ann.* VIII, p. 529, 1879.

<sup>7)</sup> WIJKANDER. *Lunds Physiogr. Sällsk. Jubelskrift. Beibl.* III, p. 8, 1878.

<sup>8)</sup> SCHÖTTNER. *Wien. Ber.* LXXVII, p. 682, 1878.

<sup>9)</sup> SLOTTE. *Wied. Ann.* XIV, p. 13, 1881; XX, p. 257, 1883.

<sup>10)</sup> WAGNER. *Wied. Ann.* XVIII, p. 259, 1883.

<sup>11)</sup> E. WIEDEMANN. *Wied. Ann.* XX, p. 537, 1883.

<sup>12)</sup> PAGLIANI en BATTELLI. *Beibl.* X, p. 81 en 221.

<sup>13)</sup> NOACK. *Wied. Ann.* XXVII, p. 289 en XXVIII, p. 666, 1886.

<sup>14)</sup> TRAUBE. *Beibl.* XI, p. 309, 1886.

<sup>15)</sup> PAGLIANI en ODDONE. *Beibl.* XI, p. 415, 1887.

<sup>16)</sup> RELLSTAB. *Ueber Transpiration homologer Flüssigkeiten. Inaugural-dissertation.* Bonn 1868.

<sup>17)</sup> GUEROUT. *Comptes Rendues* LXXXIII, p. 1291, 1876.

<sup>18)</sup> PRIBRAM en HANDL. *Wien. Ber.* LXXVIII, p. 113, 1878; LXXX, p. 17, 1879; LXXXIV, p. 717, 1881.

<sup>19)</sup> DE HEEN. *Physique comparée* I, p. 103.

In den laatsten tijd toonden RÖNTGEN <sup>1)</sup>, WARBURG en SACHS <sup>2)</sup>, en DE HEEN <sup>3)</sup> den invloed aan, dien in den gewonen vloeistofoestand de druk oefent.

WARBURG en VON BABO <sup>4)</sup> waren, voor zoover mij bekend, de eenigen, welke de wrijving onderzochten in de nabijheid van de kritische temperatuur; zij maakten daartoe gebruik van koolzuur.

Uit hunne proeven blijkt, dat in de nabijheid van deze temperatuur, als dus de vloeistof sterk samendrukbaar is, de wrijvingscoëfficiënt, dien wij evenals zij door een  $\mu$  zullen voorstellen, met den druk toeneemt.

Wil men dus  $\mu$  geheel bepalen, dan zou men deze moeten kunnen opgeven als functie van temperatuur en druk, of van temperatuur en dichtheid.

Mijne waarnemingen zijn beperkt tot de verandering van den wrijvingscoëfficiënt met de temperatuur, als de vloeistof zich bevindt onder den druk van haar eigen damp, maar zij vullen de leemte aan tusschen het onderzoek van den vloeistofoestand beneden het gewone kookpunt (verscheiden waarnemers) eenerzijds en dat van den kritischen toestand (WARBURG en VON BABO) anderzijds.

---

<sup>1)</sup> RÖNTGEN. *Wied. Ann.* XXII, p. 510, 1884.

<sup>2)</sup> WARBURG en SACHS. *Wied. Ann.* XXII, p. 518, 1884.

<sup>3)</sup> DE HEEN. *Physique comp.* II, p. 96.

<sup>4)</sup> WARBURG en VON BABO. *Wied. Ann.* XVII, p. 390, 1882.



### § 1. Beginsel der proeven en inrichting van den hoofdtoestel.

Nadat KÖNIG <sup>1)</sup> aangetoond heeft, dat de waarden, welke met COULOMB'S methode worden verkregen, in overeenstemming zijn met die, welke het resultaat zijn van POISEUILLE'S wijze, verdient de laatste methode ter bepaling van den wrijvingscoëfficiënt in 't algemeen de voorkeur, omdat ze ongetwijfeld het geschiktst is om onder zeer uiteenlopende omstandigheden te worden toegepast.

De bezwaren, welke deze methode aankleven, zooals de invloed van het niet zuiver cilindrisch en cirkelvormig zijn der buisopeningen, verliezen bovendien grootendeels hunne beteekenis, waar het er om te doen is relatieve waarden te verkrijgen; ik kon dus bij doorstrooming door capillairen op voldoende resultaten rekenen, indien er slechts voor gezorgd werd, dat de afwijkingen van POISEUILLE'S wet niet te groot werden.

Daar ik de verandering wilde nagaan over een groot temperatuursverloop, stelde ik mij tevreden met het onderzoek van de wrijving, wanneer de vloeistof zich bevindt onder den druk van haar eigen damp. Daardoor kon ik

---

<sup>1)</sup> KÖNIG. *Wied Ann.* XXXII, p. 493. 1887.

gebruik maken van een aan het eene einde gesloten, glazen toestel, waarin het chloormethyl is opgesloten en waarin het stroomen van die vloeistof door een capillair wordt waargenomen.

Hij heeft den vorm, aangegeven door fig. 1 van  $a$  tot  $m$ ; tusschen  $m$  en  $n$  toch wordt hij na vulling met de te onderzoeken vloeistof afgesmolten.

De vervaardiging geschiedde op de volgende wijze: Aan de capillair  $gh$ , lang 55 c.M., worden aan beide zijden stukjes buis van 0,05 c. M<sup>2</sup>. doorsnede en van ongeveer 2 m. M. wanddikte aangesmolten. Van deze buis zijn de stukken  $bd$ ,  $edih$ ,  $ik$  en  $lmno$ .

Aan het reservoir  $ef$  met een doorsnede van 0,410 c. M<sup>2</sup> en 2,5 à 3 m. M. wanddikte worden ook dergelijke stukjes verbonden, evenals aan het even wijde reservoir  $kl$ . Hierbij wordt nu steeds de voorzorgsmaatregel genomen, dat de gloeiende smeltingsplaats terstond in heete asch wordt gelegd en dus langzaam afkoelt. Dit is onnoodig, wanneer men nu de in gereedheid gebrachte stukken aan elkander hecht, en na ombuiging het O vormige stuk  $ihgfedi$  vormt, waaraan dan  $iklmno$  wordt verbonden. Tusschen  $m$  en  $n$  wordt de buis uitgetrokken, zoodat ze daar later kan worden afgesmolten, en daarboven wordt voorloopig nog een smeltingsplaats gemaakt, die we bij het persen noodig hebben.

Het groote reservoir  $ab$  wordt later geplaatst in een met kwik gevulde bus zooals deze door DUCRETET geleverd wordt bij zijn bekende perspomp tot het herhalen van de proeven van CAILLETET, en daar het dus nooit aan éénzijdigen druk onderhevig is, kan het van dun glas vervaardigd worden. De dikwandige buis  $bcd$ , die er aan vastzit, wordt bij  $b$  tot een bolletje opgeblazen, zoodat het

stalen stuk *bc* hiertegen stuit. Dit moet aan de glazen buis bevestigd worden en wel zoodanig, dat het grooten druk en tevens hooge temperatuur kan doorstaan. Eerst werd hiervoor de gewone kit van DUCRETET gebruikt, maar daar deze in de absolute alkohol, die voor de lage temperaturen noodig was, oploste, moest een andere wijze van verbinding gezocht worden. Het werd nu ingericht, als aangeduid is in fig. 2.

De stalen buisvatter *a* wordt over de buis geschoven en daarna een ringetje van caoutchouc *b*, dat zooveel mogelijk om de buis en in den buisvatter paste; hierop wordt een stalen ringetje gelegd, waarover het doorboord dubbel tapstuk *c* kan draaien, om te voorkomen dat het caoutchouc bij het aanzetten daarvan scheurt. Als greep voor het aanzetten dienen twee vlakke kanten. Op deze wijze werd een sluiting verkregen, die aan de hoogste drukkingen en temperaturen, welke noodig waren, weerstand bood.

Op den schroefdraad van *c* wordt nu de moer van plaat *r* bevestigd met behulp van den caoutchoucing *v*. Bij het aandraaien wordt de zoo even vermelde greep weder gebruikt om het dubbel tapstuk vast te houden. (Een opgehoogde ring op plaat *r* is voorzien van twee schroefdraden *s* en *t*, welke dienen om later het vloeistofbad op te bouwen, terwijl een zijbuisje *u* in de gelegenheid stelt de vloeistof dan af- of aan te voeren).

Is het onderste gedeelte van fig. 1 tot zoover gereed dan wordt het aan de twee reeds tot een uitgerekte O vereenigde buizen vastgesmolten. Intusschen zijn hierop eenige merkteekens geëetst, namelijk:

1°. Op het reservoir *ef* drie merkteekens op ongeveer 3 c. M. afstand van elkander verwijderd, en waarvan het



onderste door  $1$ , het middelste door  $0$  en het bovenste door  $-1$  wordt aangeduid;

2°. op de buis  $di$  twee merkteekens  $q$  en  $r$ .

Nu moet de toestel geperst worden en daartoe wordt er water ingezogen, dat, ten einde onnoodig vuil worden te voorkomen, met bijzondere zorg is gezuiverd (stofvrij gedistilleerd), en dan de bovenste smeltingsplaats dichtgesmolten. Hij wordt vervolgens gezet in de persbus van een perspomp van DUCRETET  $d$  (fig. 2). De sluiting van den buisvatter in de bus wordt iets anders dan gewoonlijk gemaakt, namelijk zoodanig, dat het stuk  $a$  over een stalen ringetje  $e$  grijpt en rust op een caoutchoucing  $f$ , die daaromheen sluit. Deze kan dus niet in de bus dringen, wanneer  $a$  er tegen wordt gedrukt door het doorboord ijzeren tapstuk met vierkanten kop  $g$ . Dit tapstuk is als bij v. WROBLEWSKI en OLSZEWSKI <sup>1)</sup> doorgezaagd, en de stukken zijn weer door twee schroeven aan elkander verbonden.

De bus is gevuld met water en dit wordt nu met een perspomp van DUCRETET geperst tot op 110 atmosferen.

Heeft de toestel deze proef doorstaan, dan moet er nog een verlengstuk aan; de buis wordt even boven  $n$  (fig. 1) afgebroken en er nu nog een stuk  $osptz$  opgezet, waarvan  $s$  en  $tz$  bestaan uit korte stukjes van de fijnste capillair, die het laboratorium ter beschikking had, en  $p$  een glazen kraan is. Deze moet eenige atmosferen druk kunnen weerstaan en is daartoe omgeven met een koperen monteering, zooals beschreven en afgebeeld werd in de Travaux Chimiques des Pays-Bas Tome V p. 368.

Over de buis wordt een caoutchouckurk  $w$  geschoven en

---

<sup>1)</sup> v. WROBLEWSKI en OLSZEWSKI. *Wied Ann.* XX 1883, p. 243.

daarop een reageerbuisje met zijbuisje *u* gezet; door watten *v* wordt de opening van *u* nog beveiligd.

Een dergelijke inrichting wordt ook voor het reservoir *ab* gemaakt en bij het reinigen gebruikt.

Dit moet met de grootst mogelijke zorg geschieden.

Het fleschje *u* wordt weggenomen en de geheele toestel onderste boven geplaatst in schuinen stand; de vloeistof, die tot zuivering dient, wordt dan door de haarbuisjes *z t* en *s* opgezogen, vult achtereenvolgens de geheele ruimte tot *i* en stijgt dan in *id* op. Even beneden *d* moet men haar laten staan om te zorgen, dat door den overdruk zich ook *ih*, de capillair en *gf* vult. Is ze eens zoover, dan kan men bij *d* voorzichtig over laten loopen en met zuigen voortgaan; ten slotte loopt ze dan uit *a* weg. Is op deze wijze al het vuil verdreven, waarvoor soms plaatselijk met BUNSEN-brander of alcoholvlam wordt verhit, dan keeren we den toestel om, zetten snel het fleschje *u* er op en laten alles wegvloeien. De lucht, die er indringt, wordt dan door de watten en de twee haarbuisjes voldoende van stof ontdaan.

Om uit het gedeelte, waarin zich de capillair *gh* bevindt, de vloeistof te verwijderen, moet dit steeds verwarmd worden; vandaar, dat als zuiveringsstof het geconcentreerde zwavelzuur, dat weinig dun vloeibaar is, niet bijzonder voldeed; de buizen sprongen bij het verwarmen dikwijls. Zeer goed echter wordt het doel bereikt met scheikundig zuiver geconcentreerd salpeterzuur.

Het schoonmaken bestaat dus in: tweemaal salpeterzuur er door zuigen, daarna water, alcohol en nog eens water; ten slotte wordt alles zorgvuldig gedroogd.

Het gedistilleerde water en de alcohol uit den handel, worden beide, daar ze niet volkomen stofvrij zijn, eerst nog eens overgehaald. Bij het schoonmaken, overschenken, vullen,



enz. wordt telkens weder op het zorgvuldigst er voor gewaakt, dat geen stofjes in deze zuiveringsvloeistoffen kunnen komen.

Door al deze voorzorgsmaatregelen, welke natuurlijk zeer veel tijd kostten, mocht het mij gelukken alles zoo zuiver te krijgen, dat na vulling met chloormethyl en afsmelting (zie § 6), ver over de honderd proeven konden worden gedaan, zonder dat uit elkaar genomen behoefde te worden; den 13<sup>en</sup> Maart 1890 geschiedde de vulling en nu nog, den 26<sup>en</sup> Januari 1891, bevindt de inrichting zich in den besten staat. Dit is een voordeel, dat zeer groot mag genoemd worden, daar o. a. WARBURG en VON BABO vermelden, dat zij van stofjes veel last hadden.

Voorzichtig wordt eindelijk de buis beneden zoolang met een blaasvlam verwarmd tot zij iets gebogen kan worden, en dan zooveel mogelijk loodrecht op de plaat *r* (fig. 2) gesteld; bij de groote lengte toch, ongeveer 1.90 M. boven die plaat, is het anders onmogelijk het vloeistofbad er om te zetten.

De hoofdtoestel is nu gereed en wordt in de persbus geplaatst, die tot even onder de zijbuis *B* (fig. 3) met zuiver kwik gevuld is. Het doorboord tapstuk *g* wordt vastgeschroefd en daarna wordt de bus luchtledig gepompt en geheel met kwik gevuld, zonder dat dit op kan stijgen in de capillair, zooals aan het eind van § 3 zal worden uiteengezet. Vervolgens wordt, terwijl het kwik niet weg kan stroomen, de proefbuis met chloormethyl gevuld en afgesmolten. Tot goed verstand van deze beide later (§ 6) te beschrijven bewerkingen, moeten wij echter eerst vermelden hoe de proeven geschieden. Wij stellen ons dus voor, dat genoemde bewerkingen verricht zijn en het chloormethyl van onderen wordt afgesloten door het kwik, dat het onderste deel van den toestel en de persbus vult.

Voor een proef staat nu het kwik in de buizen tot even



boven  $d$  (fig. 1), en zijn deze tot even boven  $i$  gevuld met vloeibaar chloormethyl; daarboven, tot waar de buis bij  $m$  is afgesmolten, bevindt zich slechts damp. Door middel van een nog te beschrijven drukinrichting (§ 2) kan door het zijbuisje  $B$  (fig. 3) kwik in de bus gevoerd en op dit kwik een druk uitgeoefend worden. Is de voortgebrachte druk een paar atmosferen grooter dan die van den damp, dan stijgt het kwik, en wel het snelst in de buis  $di$ , daar aan de andere zijde zich de capillair bevindt. Het kwik wordt omhoog gebracht tot een van de merkteekens  $r$  of  $q$  en met behulp der kranen  $a$  en  $e$  (zie § 2 en fig. 3) steeds op die hoogte gehouden; intusschen worden de tijden bepaald, waarop het kwikniveau in de andere buis de merkteekens  $1$ ,  $0$ , en  $-1$  voorbijgaat. Het drukverschil, dat het chloormethyl door de capillair perst, is dus gemakkelijk te meten.

Bij de stijging van het kwik is natuurlijk ook het vloeistofvormig chloormethyl omhoog gegaan, en het reservoir  $kl$  dient om dit op te nemen, zoodat de geheele proef verloopt onder de drukking van den damp bij de temperatuur van het bad. Is het merkteeken  $-1$  bereikt, dan laten we snel het kwik weer zakken, ten einde te voorkomen, dat het in de capillair geraakt.

Het wijde reservoir  $ab$  dient deels om te zorgen, dat bij plotselinge daling het chloormethyl niet terstond zou ontsnappen, deels om het vuil, dat zich op het kwik mocht verzamelen, niet in den toestel te laten komen.

---

## § 2. De inrichting voor het oppersen van het kwik.

Aan den zijkant van de persbus is met behulp van een moer en leersluiting een stalen buis  $B$  verbonden, die een

weinig omgebogen omhoog loopt naar een kranentafel, en wel naar kraan *a*, te zien in figuur 3. Deze figuur is schematisch, gedeeltelijk perspectief, gedeeltelijk zij aanzicht, gedeeltelijk doorsnede, zooals gemakkelijk zal zijn na te gaan. Kraan *a* stelt ons in de gelegenheid bij een voorkomend lek in het overige gedeelte, den hoofdtoestel daarvan terstond af te sluiten en het chloormethyl veilig te bewaren. Zij staat in gemeenschap met een stalen *T* stuk *d*, waarvan de eene arm naar de druinrichting leidt langs kraan *e*.

Teneinde den kwiktoevoer te kunnen regelen is de spil van deze neerschroefpuntkraan voorzien van een wijzer *c*, die over een vaste schijf *b* met cirkelverdeling beweegt. Met behulp van deze inrichting kan men dus de kraan snel de juiste opening geven, en daardoor uit de buis *f* kwik naar de persbus *A* laten gaan.

De omgebogen buis *f* is, evenals alle tot nu toe genoemde buizen en kranen, geheel met kwik gevuld, en reikt tot onder in den langen stalen cilinder *g*, waarin ook tot bij de zijopening kwik staat.

Hoe deze er in gebracht wordt, is aan het einde van de volgende paragraaf beschreven.

Door middel van de kraan *h*, die van koper kan zijn, omdat ze niet met kwik in aanraking komt, wordt nu het een of ander gas op hooge drukking boven het kwik gebracht, terwijl van de kranen *i* en *k*, ook van koper vervaardigd, de eene dient tot afblazen, dus wegvoeren van den druk, de andere naar de luchtpomp en een luchtledig gepompt reservoir voert.

Van deze kraan wordt gebruik gemaakt bij de proeven beneden  $-23^{\circ}$ ; de spanning van den damp is dan kleiner dan een atmosfeer en men zou dus door het in verbinding te stellen met de buitenlucht, het kwik niet voldoende kunnen

laten dalen. Men blaast dan eerst door *i* af en stelt vervolgens door *k* de bus in gemeenschap met de groote luchtledig gepompte ruimte; het kwik wordt dan naar beneden gezogen.

Tot het aanbrengen van druk staat *h* meestal in verbinding met een koolzuurbus; bij hooge temperaturen echter gaat de spanning van den damp die van het koolzuur bij kamertemperatuur te boven, en dan wordt er een granaat aangezet, die met kranen voorzien is en waarin met een perspomp, die bij een andere gelegenheid zal worden beschreven, lucht tot 100 atmosferen is samengeperst.

### § 3. Toestel voor het meten van den druk. Het brengen van kwik in den luchtledigen toestel.

Voor de proeven bij lagere temperaturen achtte ik het onnoodig den druk te meten; mocht er toch eenige lucht in den toestel gedrongen zijn, dan zou deze wel de drukking iets verhoogen, maar de invloed van die vermeerdering op den wrijvingscoëfficiënt zou zeer gering zijn. Daar echter bij hoogere temperaturen  $\mu$  aanmerkelijk met den druk verandert en bovendien de ruimte, die er boven in den toestel voor het gas overblijft, tengevolge van de uitzetting van het chloormethyl sterk vermindert en daardoor de invloed van de lucht op den druk veel grooter wordt, meende ik dan eene inrichting niet te kunnen missen om dezen na te gaan en om mij te verzekeren, dat hij gedurende een proef dezelfde was gebleven.


Het andere uiteinde van het *T* stuk *d* (fig. 3) werd daarom in verbinding gebracht met een metaalmanometer. Deze mocht geen lucht bevatten, want in de eerste plaats



zou daardoor bij het inlaten van druk het kwikniveau voortdurend aan schommelingen onderhevig zijn en niet zuiver op het merkteeken kunnen gehouden worden, ten tweede zou het kwik er bij hoogen druk indringen, het koper aantasten en zelf vuil worden.

De manometer *l* is daarom geheel met olie gevuld, de kraan *m* dient om hem af te sluiten, en met behulp van het *T* stuk *n* heeft de vulling plaats gehad.

Het gedeelte *o* is afzonderlijk afgebeeld in fig. 4.

Dit bestaat uit een stuk van een geweerloop *A*, waaraan van boven een koperen schroef *B* en het *T* stuk is bevestigd. Aan de onderzijde bevindt zich een contact; het  gestreepte gedeelte bestaat uit eboniet, en wanneer dus in den toestel tot *H* kwik staat en er boven olie, dan is het mannetje [*C* geïsoleerd van *A*. Slaat men nu om *A* een draad, die langs een paar Leclanché's en een elektrische schel met *C* in verbinding staat, dan zal, als door een lek het kwik tot de platinapunt *D* stijgt, de bel klinken. We kunnen dan voorkomen dat het kwik het koper bereikt.

Aan den zijkant is met een wartel en dubbel tapstuk de buis *p* (fig. 3) bevestigd. Het tapstuk sluit op de cilindrische buis door middel van een van binnen cilindrisch en van buiten vlak stalen aanvullingsstuk *F* (fig. 4), dat tusschen twee platen caoutchouc is opgesloten. De buis *p* loopt met een bocht langer dan 76 c.M. naar beneden om zeker te zijn dat door samenloop van omstandigheden de olie niet overslaat.

Om de persbus, alle stalen buizen en kranen met kwik en het zooeven beschreven gedeelte met olie te vullen, werd als volgt te werk gegaan.

De beide bussen *A* en *g* werden tot even beneden de zijopeningen voorzien van zorgvuldig in 't luchtledige gedistilleerd kwik en daarna werd alles in elkander gezet, be-

halve de in deze paragraaf beschreven inrichting, die zooals wel reeds begrepen is, later werd aangebracht.

Terwijl nu de kranen *i* en *k* gesloten en *a* en *e* open waren, bracht ik kraan *h*, die ook open stond, het *T* stuk *d*, waaraan de buis *p* nog niet doch wel een naar boven loopende stalen buis was bevestigd, en het bovineinde van den glazen toestel (nog als in fig. 1 voorzien met het stuk *m-z* en het buisje *u*) tegelijkertijd in verband met een kwikluchtpomp en pompte langzaam de lucht weg. Langs *h* werd nu de lucht boven het kwik in de lange bus *g* weggezogen, maar langs *d* tevens die in buis *f*, zoodat het kwikniveau daar niet veranderde; hetzelfde geschiedde bij de persbus *A*, maar de twee capillairen, die bovenaan den glazen toestel zitten, noodzaakten toch langzaam te pompen, daar anders de lucht aan de buitenzijde sneller werd weggevoerd en het kwik in den toestel naar beneden zou slaan. Nadat alles zorgvuldig leeggepompt was, werden *h* en *e* gesloten en nu door *i* te openen lucht boven het kwik in bus *g* toegelaten. Tengevolge daarvan kwam het kwik in buis *f* tot kraan *e*. Voorzichtig opende ik nu deze, liet tot de vereischte hoogte het kwik in den toestel stijgen, sloot *a* en *e* en liet de lucht nu weer bij *d* en boven in den glazen toestel toe. De aan *d* bevestigde, naar boven loopende stalen buis, welke slechts diende om te voorkomen dat het kwik in de caoutchouebuizen zou dringen, werd weggenomen en terwijl nu door overdruk kwik uit *d* uitstroomde, werd het *T* stuk met een stalen dopje afgesloten.

Toen met de proeven bij hoogere temperatuur zou worden aangevangen, nam ik, nadat *a* en *e* gesloten waren, dit dopje er weer af, ontdeed de buizen tot aan deze kranen toe van kwik en zette er toen het deel *p o m l* (fig. 3) aan.

Bij *n* werd nu leeggepompt en door *e* te openen het kwik



tot in den geweerloop toegelaten; daarna werd *e* weer gesloten. Ik maakte nu den loop van boven los, bracht het kwik op de gewenschte hoogte en sloot hem weer af. Om het overige deel er van en den manometer van olie te voorzien, werd *n* weer in verband gebracht met een kwikluchtpomp, maar nu langs een glazen driewegkraan, die in beenderolie stond. Nadat nu *l*, *o* enz. leeggepompt was, werd de driewegkraan zóó gesteld, dat de olie er in liep. Bij *n* werd de verbinding losgemaakt en terwijl door een weinig overdruk in *g* er wat olie uitliep, sloot ik *n* met een koperen dopje af.

Ten einde zoo weinig mogelijk koolzuur en saamgeperste lucht te verbruiken, werd ten slotte langs de zijopening de bus *g* met kwik bijgevuld.

---

#### § 4. Het vloeistofbad.

Op de plaat *q* (fig. 3) zijn twee koperen ringen geschroefd, hoog 5,5 c.M.; de binnenste daarvan sluit op een reep caoutchouc af; een glazen buis, lang 1.41 M. en wijd 5,5 c.M., werd hierin bevestigd met behulp van een breeden caoutchoucing *r*, die nog met koperdraad werd vastgekneld.

Zet men de buis met gips vast, dan dringt de absolute alcohol zelfs door een laag van 5,5 c.M. lengte heen en maakt men een dubbelen koperen ring, dan springt de buis bij hooge temperatuur tengevolge van de uitzetting van den binnensten. Vandaar dat bovenstaande sluiting werd verkozen. Bovendien hebben we dan het gemak, dat de buis iets bewogen kan worden en zich dus beter om den glastoestel voegt.

Zij dient tot het opnemen van de vloeistof en staat dus



in verband met het buisje *s*. Ze is omgeven door een wijdere, (10,1 c.M. wijd) en ongeveer even lange buis, die met gips in den tweeden koperen ring is vastgezet.

Het doel daarvan is in de eerste plaats de warmtegeleiding te verminderen, maar tevens om de ruimte tusschen beide buizen droog te houden en aldus te voorkomen, dat bij de lagere temperaturen water tegen de buis befrist en het aflezen onmogelijk wordt; vandaar dat deze ruimte van boven is afgesloten met een stuk caoutchoudbladd, en dat er in zijn gehangen eenige mandjes van draadgaas, gevuld met chloorcalcium.

Op de binnenste glazen buis is met een tweeden caouting een *T* stuk *v* geplaatst, dat bij de proeven, niet bij het vullen met chloormethyl (zie § 6), los gedekt wordt door een koperen dop *w*, waarin kurken met thermometers *t*.

Het zijbuisje staat langs de koperen spiraal *u* in gemeenschap met een zuig- en perspomp, welke tevens in verbinding is met den onderkant van het vloeistofbad.

Indien bij het pompen het bad onderin warmer wordt dan boven, wordt beneden damp gevormd en slaat het vloeibare chloormethyl met kracht omhoog. Bij de lage temperaturen wordt dus de absolute alcohol door de spiraal onderin gedreven en om dan te verhinderen, dat er lucht in het pompje komt, is de buis *y* verwijld.

Bij de hoogere temperaturen daarentegen wordt het water of de glycerine er boven in gestuwd.

De twee zijstukjes *z* zijn voorzien van een caoutchoubuisje met klemmetje en dienen om het bad te ledigen, terwijl de vulling geschiedt door de vloeistof er boven in te schenken en vervolgens te pompen.

Zooals reeds bleek, werd bij hoogere temperaturen glycerine gebruikt, en wel omdat dit niet zoo sterk caoutchouc

aantast als olie, en geen brandgevaar oplevert; bij iedere nieuwe reeks van proeven moest het echter worden gefiltreerd en uitgekookt tot  $150^{\circ}$  om het zooveel mogelijk van water te bevrijden; ook kon het slechts een paar malen gebruikt worden, omdat het spoedig bruin werd.

De spiraal *u* werd bij de lagere temperaturen geplaatst in absolute alcohol, die met behulp van vast koolzuur werd afgekoeld, bij de proeven tusschen  $14^{\circ}$  en  $94^{\circ}$  in water, en bij hooge temperaturen werd evenals voor het bad glycerine gebruikt.

Als thermometers dienden:

- 1<sup>o</sup>. twee alcoholthermometers voor de lage temperaturen;
- 2<sup>o</sup>. twee kwikthermometers voor de proeven met water als vloeistofbad;
- 3<sup>o</sup>. twee andere kwikthermometers voor die met glycerine als vloeistofbad.

Alle zijn in graden verdeeld en gecorrigeerd. Ze werden zoo opgehangen, dat de bol van den eenen even boven, die van den anderen even beneden de capillair zich bevond.

De koperen zuiger van het pompje, voorzien van twee leeren hoedjes, voldeed ook bij de hoogere temperaturen, maar voor kleppen moesten twee platte stukjes caoutchouc gebruikt worden, die door een paar koperen kruisdraden waren opgesloten; ook deze lieten niets te wenschen over.

Het spreekt van zelf, dat alle buizen evenals het pompje en de bus zorgvuldig met wol waren omgeven om ze tegen warmtegeleiding te beschutten.

Bij de meeste proeven verschilden de waargenomen temperaturen steeds minder dan een graad, bij enkele der uiterste werd dit iets grooter.

### § 5. De aflezings toestellen.

De proeven verliepen zoo snel, dat een aflezing met het bloote oog niet altijd voldoende en ook het schatten met behulp van een chronometer te onnauwkeurig was. De proef duurde toch soms slechts weinig meer dan een minuut en er moest dus tot in tiende secunden nauwkeurig worden afgelezen. Daartoe diende een registreertoestel van KNOBLICH<sup>1)</sup>, dat Prof. VAN DE SANDE BAKHUIJZEN de welwillendheid had mij gedurende eenigen tijd ten gebruike af te staan.

Op een zwart gemaakte rol, welke door middel van een uurwerk regelmatig wordt rondgedraaid, beschrijven twee aan de ankers van electromagneten verbonden stiften evenwijdige schroeflijnen, doordat zij op een slede zijn geplaatst, welke door het uurwerk in de richting van de as der rol wordt verschoven.

Door de eene electromagneet wordt door een pendule met stroomsluiter iedere twee secunden een stroom gezonden, zoodat het anker en dus ook de stift de eene secunde heen en de volgende weer terug beweegt.

Door de tweede electromagneet loopt een stroom, welke met een sleutel in handen van den waarnemer gesloten wordt op het oogenblik, dat het kwik een merkteeken passeert en hierdoor krijgt dan de andere stift een tijdelijke afwijking. Om den tijd af te lezen wordt de rol later uit den toestel genomen en voor een afleeskijvertje met oculair-micrometer<sup>2)</sup> geplaatst, dat door KAISER bedacht is. Bij vergelijking der twee lijnen zijn tiende deelen van secunden zeker te bepalen en zelfs honderdste deelen vrij nauwkeurig te schatten.

<sup>1)</sup> Beschreven in de »Annalen der Sternwarte in Leiden.» Bd. II, pag. 6, 1870.

<sup>2)</sup> Beschreven *ibid.* pag. 15.



Om den doorgang van den bewegenden kwikspiegel in de proefbuis goed te kunnen waarnemen werden op de merkteekens  $-1$ ,  $0$  en  $1$  (zie fig. 1) drie microscopen  $D$  gericht, welke evenwijdig opgesteld waren en bevestigd aan een dubbele slede, zoodat de kijkers gezamenlijk in de beide richtingen loodrecht op hun as konden worden verplaatst.

Dit toestel stond op hetzelfde tafeltje als de persbus en dit tafeltje was ter voorkoming van trillingen op een vasten pijler gezet. De microscopen hebben natuurlijk een vrij grooten brandpuntsafstand (ongeveer 7 cM.) en vergrooten 23 maal. Van den middelsten was het objectief niet achromatisch, wat nog al hinderde, zoodat de middelste aflezingen niet zoo nauwkeurig zijn.

Van enkele proeven bij zeer lage temperatuur moesten door het onduidelijk worden der strepen de aflezingen met het bloote oog worden gedaan, wat door het langzame verloop dan met voldoende nauwkeurigheid kan geschieden.

Om het kwik in de buis  $drqi$  (fig. 1) steeds op dezelfde hoogte te kunnen houden en eenigzins een maat te hebben, welke afwijking de druk gedurende een proef onderging, werd om de buitenste buis een ring bevestigd, waarin een kijkertje  $C$ , dat slechts bestond uit een lens en een nauwe opening en zoo ingericht was, dat het veld  $\pm 8$  m. M. van de buis besloeg. Een helper kon nu gemakkelijk zorgen, dat de druk niet meer dan 1 % veranderde. Was dit een enkele maal het geval, dan werd de proef niet in aanmerking genomen.

### § 6. Het vullen van den toestel met chloormethyl.

Om den toestel met vloeibaar chloormethyl te vullen werd hij, zooals hij in fig. 1 is afgebeeld, in de persbus geplaatst en omgeven met het vloeistofbad, ingericht als in § 4 is beschreven, uitgenomen de koperen dop *w* en de toestellen, welke bij de proeven voor aan- en afvoer dienen.

Ten einde de toch al zoo breekbare inrichting wat te steunen, en de beweging van de glaskraan mogelijk te maken, werd een houten ring met behulp van drie latten aan de buitenste buis vast gemaakt, zoodat deze even beneden de kraan kwam; met twee stukjes kurk werd nu de toestel hierin bevestigd.

Het buisje *u* (fig. 1) stond in verband met een glazen *T* stuk, waarvan de eene arm naar een kwikluchtpomp voerde, de andere gemeenschap had met een koperen buis en aanvoerkraan, die naar de met chloormethyl gevulde koperen flesch leidden. Aan de eerstgenoemde zijde stond bovendien een verticale, 90 c. M. lange, zijbuis in een molglas met kwik om den druk aan te geven.

Eerst werd nu leeggepompt, waarbij kraan *a* (fig. 3) gesloten was, zoodat het kwik in den toestel niet steeg; vervolgens liet ik uit de chloormethylflesch de vloeistof toestroomen tot de aanvoerkraan en opende deze voorzichtig, waardoor langzamerhand de geheele ruimte met het gas gevuld werd. Dezelfde bewerking werd nog een paar maal herhaald.

Intusschen was door de helpers een groote hoeveelheid vast koolzuur gemaakt en daarmee alcohol tot ongeveer  $-70^{\circ}$  afgekoeld. Deze werd nu boven in het bad gegoten en van onderen weer afgetapt, totdat dit gekomen was op een temperatuur beneden  $-23^{\circ}$ . Dan werd voortdurend met behulp van de bovengenoemde aanvoerkraan chloormethyl toegelaten, dat dus overdistilleerde en strijkende door

watten en capillairen geheel stofvrij in den toestel kwam.

De spanning kon nooit grooter worden dan één atmosfeer; anders ontsnapte het gas uit het molglas.

Om het overdistilleeren toch zoo snel mogelijk te doen plaats hebben werd de temperatuur laag, op ongeveer  $-50^{\circ}$ , gehouden, waarbij dan wel het kwik bevroor, maar dit hinderde niet. Intusschen kon het door gebrek aan vast koolzuur gebeuren en het is ook wel eens geschied, dat de temperatuur boven  $-23^{\circ}$  kwam; dan werd de glaskraan met de reeds vermelde koperen monteering dichtgedraaid tot het bad weer koud genoeg was.

Door een ongeluk brak echter het kraanhuisje af en daar het gas toch nog door één capillair gezuiverd werd en de toestel bijna vol was, liet ik het bovenstuk maar weg en ging voort.

Er moest nu zooveel vloeibaar chloormethyl in zijn, dat als het kwik beneden even in de beide buizen stond, het chloormethyl zich juist in het reservoir *kl* bevond. Ik liet er iets meer in en pompte er dat met de luchtpomp uit; daarna werd tusschen *m* en *n* afgesmolten. Dit vereischte eenige zorg en geschiedde op de volgende wijze. Eerst werden de kurken, waarmede de toestel in den houten ring was vastgezet, verwijderd, vervolgens de ring zelf omhoog gebracht en opgehangen aan een dubbele ladder welke voor al deze bewerkingen blijvend over den toestel was opgesteld; daarna watten en wol, die tot dekking van het *T* stuk *v* (fig. 3) gediend hadden weggenomen en om nu zonder gevaar voor den zoo gemakkelijk breekbaren toestel ook dit te kunnen verwijderen wordt de caoutchoucring over de lengte doorgesneden; ook het *T* stuk wordt aan de ladder opgehangen.

De smeltingsplaats is nu vrij gekomen; om te zorgen



dat de alkoholdampen niet ontvlammen, laat ik het niveau dalen tot even boven het vloeibaar chloormethyl in de proefbuis, droog deze zorgvuldig af en bedek de buis van het vloeistofbad met kartonblaadjes. Terwijl nu binnen in den toestel de druk lager dan een atmosfeer is, wordt afgesmolten.

Voor de proeven wordt met behulp van een nieuwen caoutchoucing het *T* stuk *v* er weer opgezet en los gedekt door den dop *w* (fig. 3). Het zal nu wel duidelijk zijn dat *v* dient om het bad na het afsmelten te verhoogen, zoodat de geheele proefbuis er in staat; bij het vullen had het desnoods achterwege kunnen blijven, maar het was er opgezet omdat het plan bestond ook hierbij van een circulatie-inrichting gebruik te maken.

Het chloormethyl is geleverd door de firma P. J. KIPP EN ZONEN, (J.W. GILTAY, opvolger te Delft), en waarschijnlijk afkomstig uit la Plaine Saint-Denis (Dep. Seine).

### § 7. Het verloop der proeven.

In het hoofdstuk over het vloeistofbad is reeds medege-deeld, op welke wijze dit bij de verschillende temperaturen was ingericht. Om het geheel met vloeistof te vullen behoefde men deze er slechts in te schenken en door pompen de lucht te verwijderen.

Voorzichtigheidshalve werd steeds van de kamertempera-tuur uitgegaan en onder voortdurend pompen de spiraal en dus ook het bad verwarmd of afgekoeld. Het eerste ge-schiedde door een paar Bunsenbranders, het laatste door vast koolzuur.

Bij de proeven in het glycerinebad stond gedurende de

verwarming kraan *a* (fig. 3) open en *e* dicht, zoodat de toestel in verband was met den manometer. Om de 5 minuten werden nu temperaturen en drukken afgelezen.

Afzonderlijk is de druk bepaald bij temperaturen tusschen  $20^{\circ}$  en  $100^{\circ}$ . De aanwijzingen van den manometer geven wel veel vertrouwen, daar deze van het uitstekende fabrikaat van SCHÄFFER en BUDENBERG is, doch zijn niet gecorrigeerd; maar daar de proeven nog worden voortgezet, kunnen eerst later de misschien noodige correcties worden aangebracht. Het hoofddoel echter, te zien of de druk gedurende de proef ook verandert, is toch bereikt. Dit was nimmer het geval.

Wanneer nu de temperatuur gedurende 10 à 15 minuten minder dan een graad verschilde <sup>1)</sup>, kon ik met een proef beginnen. Het kwik stond dan even boven *d* (fig. 1); door het openzetten van de kranen *a* en *e* (fig. 3), terwijl de kwikbus *g* in gemeenschap was met de koolzuurflesch, steeg nu het kwik op en werd met behulp van de regelkranen door een helper steeds op één der merkteekens gehouden. Daartoe werd kraan *e* snel scherp gesteld en *a* beurtelings wat geopend en wat gesloten. Intusschen nam ik de doorgangstijden waar en teekende die met den sleutel aan. Om te verhoeden, dat het kwik in de capillair komen en deze vuil maken zou, werden, zoodra het het bovenste merkteeken —1 bereikt had, *a* en *h* gesloten, het koolzuur door kraan *i* afgeblazen en daarna de toestel, door *a* weer te openen, in verbinding gebracht met de buitenlucht, of bij lage temperatuur door kraan *k* met een leeggepompte ruimte.

Even voor en na, soms ook nog eens gedurende de proef, werd de temperatuur der beide thermometers afgelezen.

---

<sup>1)</sup> Het pompje (§ 4) werd voortdurend door een helper bediend.

Op deze wijze werden door mij 79 waarnemingen gedaan van  $-30^{\circ}$  C tot  $+120^{\circ}$  C.

De eerste hiervan geschieden bij de gewone temperatuur en daarna werd overgegaan tot afkoeling,

Nadat eenige goed geslaagde proeven tot bij  $-30^{\circ}$  waren gedaan scheen er zich bij de poging om lager te komen nu en dan een vast lichaampje in de capillair te vormen, dat natuurlijk hinderde. Waarschijnlijk is er een spoor bijmengsel in de vloeistof, waarvan het vriespunt iets hooger ligt dan  $-20^{\circ}$ .

Toen daarop weer de doorlooptijd bij gewone temperatuur werd onderzocht, bleek deze ongeveer 1 % kleiner geworden. Dit kan slechts hieraan worden toegeschreven, dat er een klein stofje in de buis zat en dit misschien tengevolge van de bovengencemde stoornis, die ik duidelijk heb waargenomen, verwijderd of van plaats veranderd is. Aan inwerking op het kwik toch kan moeilijk gedacht worden, want later gaven de nu en dan herhaalde proeven bij gewone temperatuur steeds dezelfde waarde. Bovendien nam ik op de plaats, waar zich het vaste lichaampje vormde in de buis een zeer klein glinsterend puntje waar. De proeven bij lage temperatuur moeten dus vergeleken worden met de hoogere waarden voor de gewone temperatuur, die eerst bepaald waren.

Tot nu toe was steeds gebruik gemaakt van het merkteken  $r$  en werden slechts eenige bij  $q$  gedaan om na te gaan in hoeverre aan POISEUILLE'S wet voldaan wordt.

Bij de waarnemingen boven de kamertemperatuur bleken de afwijkingen te groot te worden; daarom moest de overdruk geringer gemaakt worden. Toevallig stond er op geschikte hoogte op de binnenste buis van het vloeistofbad een kras en nu werd er met behulp van een kathetometer op dezelfde hoogte ook een op de buitenste aangebracht; deze is ongeveer 0,2 m.M. te hoog uitgevallen.



Het kijkertje werd nu over de beide krassen gericht.

Bij de hooge temperaturen was het chloormethyl zoo sterk uitgezet, dat het niet meer mogelijk was tot aan het merkteeken — 1 te gaan, daar dan de buis geheel met vloeistof gevuld was. Daardoor kon ik voorloopig slechts tot bij 120° waarnemen. De proeven zullen echter tot nog dichter bij de kritische temperatuur worden voortgezet. Het onderzoek zal dan besloten worden met eenige waarnemingen over water met denzelfden toestel om daardoor de relatieve waarden tot absolute te kunnen overbrengen; tevens zal dan de capillair worden gemeten, ten einde een tweede onafhankelijke absolute bepaling te verkrijgen, en de manometer, zoo noodig, gecorrigeerd.

De Heeren DE VRIES en MEERBURG, doctorandi aan de Universiteit alhier, hadden de welwillendheid de proeven voort te zetten, toen de tijd mij daartoe ontbrak. Ik breng hun daarvoor mijn warmen dank. Hunne resultaten stemmen met de mijne zeer goed overeen.

---

### § 8. Berekening der proeven.

Gedurende een proef verandert de drukking, waaronder het chloormethyl beneden de capillair staat, voortdurend en wel neemt ze tengevolge van de stijging van het kwik af, maar door het rijzen van het chloormethyl in het reservoir *kl* juist toe. De eerste verandering is de grootste; tengevolge daarvan zet het chloormethyl uit. Tevens verandert met den druk de waarde van den wrijvingscoëfficiënt en hierdoor ondergaat natuurlijk de doorstromingstijd ook een wijziging.

Er kan nog een tweede oorzaak zijn, waardoor deze gewijzigd wordt; indien namelijk de temperatuur gedurende

de proef niet constant blijft, zal daardoor ook de vloeistof uitzetten of inkrimpen. Dit is echter een toevallige fout. Is  $\alpha$  de uitzettingscoëfficiënt en  $t$  de toename in temperatuur en noemen we  $V_0$  het volume van het chloormethyl van het merkteeken  $-1$  af tot aan de opening van de capillair, dan is dit grooter geworden en wel  $V_0(1 + \alpha t)$  en dus is het kwik gezakt  $\frac{V_0 \alpha t}{q}$ , als  $q$  de doorsnede van *ef* voorstelt. Dientengevolge hebben we niet een rijzing van 6 c.M., maar van  $6 + \frac{V_0 \alpha t}{q}$  c.M. gemeten en we moeten dus den gevonden tijd deelen door  $1 + \frac{V_0 \alpha t}{6q}$ .

Nu is  $\frac{V_0}{q} = 2,1$  dus  $\frac{V_0}{6q} = 0,35$ .

Uit waarnemingen van den heer J. P. KUENEN, doctorendus aan deze Universiteit, bereken ik  $\alpha$  op ongeveer 0,009, zoodat bij  $130^\circ$

$$\frac{V_0 \alpha t}{6q} = 0,003 t.$$

Bij een verandering van  $t$  met ruim  $3^\circ$  hebben we dus eerst 1% afwijking. Bij mijne proeven liggen de grootste temperatuurverschillen ver beneden den graad, zoodat zij verwaarloosd kunnen worden.

De samendrukbaarheid en de verandering van den wrijvingscoëfficiënt met de dichtheid geven echter aanleiding tot constante fouten. Ten einde ons een oordeel te vormen over het maximum bedrag daarvan en ten minste het besluit te trekken of daarvoor een correctie dient te worden aangebracht, zal ik bij mijn toestel die correctie berekenen op de wijze, die door WARBURG is aangegeven. Bij het nawerken van zijne berekeningen vond ik ook voor de correctie van zijn eigen proeven een ander resultaat dan WARBURG zelf. Op blz 35 is deze uitkomst opgegeven. Met

het oog op dit verschil worden de formules iets uitvoeriger toegelicht. In den loop van onze beschouwingen zal dan tevens blijken, dat het bedrag van de correctie slechts mag dienen om over de orde van grootte te oordeelen, niet om dit bedrag als zoodanig in rekening te brengen.

We gaan bij deze beschouwing van de onderstelling uit, dat aan de wet van POISEUILLE wordt voldaan. Later zal blijken dat dit niet het geval is, maar dit heeft op deze correctie geen merkbaren invloed.

Noemen we:

- $s_0$  de dichtheid van het chloormethyl boven in den toestel, welke dus slechts afhangt van de temperatuur;
- $s_b$  de veranderlijke dichtheid boven aan de capillair;
- $s$  de veranderlijke dichtheid in het reservoir  $ef$ ;
- $h'$  de hoogte van het kwik, dat bij het merkteeken staat, boven een willekeurig aangenomen horizontaal vlak;
- $h$  die van het kwik in het reservoir  $ef$  boven hetzelfde vlak;
- $p_1$  den druk boven aan de capillair;
- $p$  " " onder " " " " ;
- $\gamma'$  de capillaire depressie in buis  $di$ ;
- $\gamma$  " " " " " "  $ef$ , met dien verstande, dat als we de buizen met twee andere, wier doorsneden aan elkander gelijk zijn, in gemeenschap brengen en het drukverschil in deze wordt aangegeven door  $h' - h + \gamma' - \gamma$ , het in onze buis wordt afgelezen als  $h' - h$ .

Door de beweging van de vloeistof ontstaat een kleine zuiging in buis  $di$ , die den druk vermindert; de beweging is echter zoo langzaam<sup>1)</sup>, dat ik meen deze te kunnen verwaarloozen.

We krijgen dan:

$$p - p_1 = (h' - h + \gamma' - \gamma)g(\sigma - s_0) + gls_0 = f + gls_0 \quad (1).$$

<sup>1)</sup> De grootste waarde, welke de snelheid in het reservoir  $ef$  bij de proeven bereikte, is 0.62 m.M. per sec.



We kunnen toch om het gewicht van een laag te vinden als gemiddelde dichtheid  $s_0$  nemen.

Naar KIRCHHOFF zijn de hydrodynamische differentiaalvergelijkingen voor een samendrukbare vloeistof

$$\left. \begin{aligned} s \frac{d^2x}{dt^2} &= sX - \frac{\delta p}{\delta x} + \mu Du + \mu \frac{\delta \Delta}{\delta x} \\ s \frac{d^2y}{dt^2} &= sY - \frac{\delta p}{\delta y} + \mu Dv + \mu \frac{\delta \Delta}{\delta y} \\ s \frac{d^2z}{dt^2} &= sZ - \frac{\delta p}{\delta z} + \mu Dw + \mu \frac{\delta \Delta}{\delta z} \\ \frac{\delta s}{\delta t} + \frac{\delta(su)}{\delta x} + \frac{\delta(sv)}{\delta y} + \frac{\delta(sw)}{\delta z} &= 0 \end{aligned} \right\} (2)$$

waarin  $Du = \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta z^2}$  en

$$\Delta = \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z}.$$

Nemen we de richting van de buis van onderen naar boven als  $x$  as aan en onderstellen we, dat de beweging slechts in die richting plaats heeft en stationnair is geworden, dan zijn de snelheden  $v = w = 0$  en  $u$  en  $s$  zijn onafhankelijk van den tijd  $t$ ,  $X$ ,  $Y$  en  $Z$  stellen de uitwendige krachten voor en daar we slechts te doen hebben met de zwaartekracht is  $X = -g$ ,  $Y = 0$  en  $Z = 0$ .

Gaan we over tot poolcoördinaten door  $y = r \cos \phi$  en  $z = r \sin \phi$  te stellen en beschouwen we  $p$  als onafhankelijk van  $r$ , dan worden de verg. (2)

$$\left. \begin{aligned} s u \frac{\delta u}{\delta x} &= -sg - \frac{dp}{dx} + \mu \left( 2 \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta u}{\delta r} \right) \\ \frac{\delta^2 u}{\delta x \delta r} &= 0 \\ \frac{\delta(su)}{\delta x} &= 0. \text{ Hierbij komt de voorwaarde } s = F(p) \end{aligned} \right\} (3)$$

Aan de tweede en derde vergelijking kan slechts worden voldaan door  $s$  onafhankelijk te nemen van  $x$  of  $u$  onafhankelijk van  $r$ , twee dingen, die ongerijmd zijn. Hieruit blijkt dus dat de hypothesen met elkander in strijd zijn, waarop O. E. MEIJER <sup>1)</sup> reeds wees. Het is ook duidelijk dat  $u$  zoowel van  $x$  als van  $r$  moet afhangen, want daar de dichtheid in de buis verandert, moet ook  $u$  veranderen, zal de toestand stationnair zijn.

Intusschen kan er wel ten naasten bij aan de vergelijkingen (3) worden voldaan. We zien toch uit de derde:

$$\frac{1}{s} \frac{\delta s}{\delta x} + \frac{1}{u} \frac{\delta u}{\delta x} = 0.$$

Is nu  $\frac{\delta s}{\delta x}$  klein ten opzichte van  $s$ , dan is ook  $\frac{\delta u}{\delta x}$  het ten opzichte van  $u$ . Is dus  $u$  klein, dan mogen we  $u^2$  en  $u \frac{\delta u}{\delta x}$  verwaarloozen, evenals  $\frac{\delta^2 u}{\delta x^2}$  en  $\frac{\delta^2 u}{\delta x \delta r}$ . De vergelijkingen (3) gaan dan over in:

$$\left. \begin{aligned} sg + \frac{dp}{dx} &= \mu \frac{\delta}{r \delta r} \left( r \frac{\delta u}{\delta r} \right) \\ \frac{\delta(su)}{\delta x} &= 0 \text{ en } s = F(p) \end{aligned} \right\} (4)$$

Vermenigvuldigen we de eerste met  $s$  dan krijgen we:

$$s^2 g + s \frac{dp}{dx} = \mu \frac{d}{r dr} \left( r \frac{d(su)}{dr} \right)$$

waarin het eerste lid onafhankelijk is van  $r$  en het tweede van  $x$ , wanneer men  $\mu$  als constant aanneemt, zooals W. en v. B. Eigenlijk moest de vergelijking luiden:

$$\frac{s^2 g + s \frac{dp}{dx}}{\frac{\mu}{\mu_0}} = \mu_0 \frac{d}{r dr} \left( r \frac{d(su)}{dr} \right) \quad (5)$$

<sup>1)</sup> O. E. MEIJER, *Pogg. Ann.* CXXVII, pag. 253 en 353, 1866.

waarin  $\mu_0$  de waarde van  $\mu$  is bij  $s = s_0$  en dan  $\frac{\mu}{\mu_0}$  een functie is van  $s$ . We stellen nu beide leden gelijk aan een constante  $m$ , en vinden uit het tweede lid door integratie:

$$s u = \frac{1}{4} \frac{m}{\mu_0} (r^2 - R^2)$$

als we aannemen, dat er geen glijding plaats heeft, zoodat voor  $r = R \dots \dots u = 0$ .

De hoeveelheid, die dus in den tijd  $dt$  door de buis stroomt is:

$$\Omega dt = \frac{-m\pi R^4}{8\mu_0 s} dt. \quad (6)$$

Noemen we nu de verandering  $\frac{ds}{dp}$  van de dichtheid met den druk  $\varepsilon$ , dan zal deze  $\varepsilon$  nog van  $p$  afhangen. Gedurende een proef kunnen we echter  $\varepsilon$  wel als constant aanmerken, en wanneer men  $\frac{\mu}{\mu_0} = 1$  stelt, wordt het eerste lid van verg. (5):

$$s \frac{ds}{dx} + s^2 g \varepsilon = m \varepsilon.$$

Of integreerende

$$s^2 = \frac{m}{g} + 2C e^{-2g\varepsilon x} = \frac{m}{g} + 2C(1 - 2g\varepsilon x + 2g^2\varepsilon^2 x^2 - \dots)$$

Strikt genomen mag niet zoo geïntegreerd worden, doch zoude door proeven of anderszins moeten berekend worden hoe  $\mu$  van  $s$  afhangt. WARBURG en SACHS <sup>1)</sup> geven bij benzol en aether de verandering van  $\mu$  resp. 10,2 en 4,2 maal zoo groot als  $\varepsilon$ ; bij koolzuur is ze 2,5 maal zoo groot en er worden dan door  $\mu = \mu_0$  te stellen grootheden van de orde van  $\varepsilon$  verwaarloosd. Daardoor kan natuurlijk aan de juiste waarde van de correctie geen betekenissen meer gehecht

<sup>1)</sup> WARBURG en SACHS. *Wied. Ann.* XXII, pag. 521, 1884.



worden. Gaan we echter als WARBURG en v. BABO verder.

Is nu de hoogte van het vloeistofniveau in het reservoir  $kl$ ,  $k$ , dan is voor:

$$\begin{aligned} x=0 & \quad s=s \\ x=l & \quad s=s_0(1+g\epsilon k), \end{aligned}$$

waarin  $l$  de lengte van de capillair,

dus:  $s^2 = s_0^2(1+g\epsilon k)^2 + 2C \cdot 2g\epsilon l(1-g\epsilon l + \dots)$

Uit verg. (1) volgt:

$$\begin{aligned} s - s_0(1+g\epsilon k) &= \epsilon(f+gls_0) \quad \text{dus:} \quad (7) \\ 2C \cdot 2gl(1-g\epsilon l + \dots) &= 2s_0(f+gls_0) + 2g\epsilon ks_0(f+gls_0) + \epsilon(f+gls_0)^2 \end{aligned}$$

We kunnen nu de hoogere machten van  $g\epsilon l$  ten opzichte van 1 verwaarloozen. Eerst merk ik nog op dat  $g\epsilon l$  werkelijk een getal is, want:

$$\epsilon = \frac{\text{Dichtheid}}{\text{Druk}} = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}} : \frac{\text{Gewicht}}{\text{Oppervl.}} = \frac{1}{\text{Lengte} \times \text{Versnelling.}}$$

Drukken we het uit in C. G. S., dan is voor  $130^\circ$ , een temperatuur hooger dan die, welke ik bij mijne proeven bereikte, ongeveer (zie blz. 37)

$$\epsilon = \frac{72}{10^7 \times g} \quad \text{dus} \quad g\epsilon l = \frac{72 \times 55}{10^7} = \frac{4}{10^4}.$$

Ik heb deze waarde gevonden door vergelijking met koolzuur volgens de wet der overeenkomstige toestanden, terwijl de heer KUENEN mij eenige drukken en volumina verschaftte voor chloormethyl.

Bovenstaande vergelijking wordt dus:

$$\begin{aligned} 2C \cdot 2gl(1-g\epsilon l) &= 2s_0(f+gls_0) + 2g\epsilon ks_0(f+gls_0) + \epsilon(f+gls_0)^2 \\ 2C \cdot 2gl(1-2g\epsilon l) &= 2s_0(f+gls_0) + \epsilon(f^2 - g^2 l^2 s_0^2) + 2g\epsilon ks_0(f+gls_0) \end{aligned}$$

en derhalve door invoering van de constante C:

$$-m = \frac{f}{l} \left( s_0 + \frac{\epsilon}{2} f - \frac{\epsilon g^2 l^2 s_0^2}{2f} - \frac{\epsilon g^2 k l s_0^2}{f} + g\epsilon k s_0 \right).$$

Hierin kunnen we de drie laatste termen verwaarloozen

en vinden dan  $-m = \frac{f}{l} \left( s_0 + \frac{\varepsilon}{2} f \right)$  of met (6)

$$\Omega dt = \frac{\pi R^4 f}{8 \mu s l} \left( s_0 + \frac{\varepsilon}{2} f \right) dt. \quad (8)$$

Men krijgt de waarde van  $C$  met een correctieterm in  $\varepsilon$  uit eene ontwikkeling van  $C$ , waarin de  $\varepsilon^2$  nog in aanmerking genomen wordt, terwijl  $s$  slechts tot op  $\varepsilon$  ontwikkeld is en ons omtrent de grootheden van de orde van  $\varepsilon^2$  in  $s$  niets bekend is. Dit met het opgemerkte omtrent  $\mu$  doet twijfel rijzen aan de betrouwbaarheid van de correctie. Laten we intusschen op de door WARBURG aangegeven wijze verder gaan.

Verstaan we onder  $V$  het volume boven het kwik in het reservoir  $ef$  tot aan de opening van de capillair en onder  $V_0$  hetzelfde, als het kwik het merkteeken bereikt heeft, waar de proef eindigt; noemen we verder de doorsnede van het reservoir  $ef$ ,  $q$ , wanneer dan de hoeveelheid  $\Omega dt$  in de capillair gestroomd is, is het kwik met  $dh$  gestegen en dus het volume  $V - q dh$  geworden.

Deze hoeveelheid chloormethyl heeft nu de dichtheid  $s + ds$  (waarin  $ds$  negatief is) en had even te voren het volume  $V - \Omega dt$  en de dichtheid  $s$ , dus:

$$\begin{aligned} (V - \Omega dt)s &= (V - q dh)(s + ds) \\ \Omega dt s &= q s dh - V ds. \end{aligned} \quad (9)$$

Nemen we een andere veranderlijke  $a$  aan, zoodanig, dat

$$\begin{aligned} a &= h' - h + \eta' - \eta \\ \text{en } a_0 &= h' - h_0 + \eta' - \eta, \end{aligned} \quad (10)$$

waarin  $a_0$  en  $h_0$  de waarden voor het laatste merkteeken, en nemen we verder in aanmerking, dat, omdat de reservoirs  $ef$  en  $kl$  even wijd zijn,

$$\left. \begin{aligned} dk &= dh = -da \\ \text{verder } dp_1 &= g s_0 dk = -g s_0 da \\ dp &= g(\sigma - s_0) da + dp_1 = g(\sigma - 2s_0) da \\ ds &= \varepsilon dp \\ V &= V_0 + q(h_0 - h) = V_0 - q(a_0 - a) \end{aligned} \right\} (11)$$

Wordt ten slotte de eindwaarde van  $k$ ,  $k_0$ , ingevoerd, dan is:  $k - k_0 = h - h_0 = a_0 - a$ , dus  $k = k_0 + a_0 - a$  en uit (7) volgt:

$$s = s_0 + \varepsilon \{g(\sigma - 2s_0)a + g s_0(l + k_0 + a_0)\}. \quad (12).$$

Vergelijking (9) gaat nu met behulp van (8), (1), (10), (11) en (12) over in:

$$\begin{aligned} \frac{\pi R^4}{8\mu l}(\sigma - s_0)g a \left( s_0 + \frac{\varepsilon}{2}(\sigma - s_0)g a \right) dt = \\ = -q da \left[ s_0 + \varepsilon \{(\sigma - 2s_0)g a + g s_0(l + k_0 + a_0)\} \right] - \\ - \left[ V_0 - q(a_0 - a) \right] \varepsilon g(\sigma - 2s_0) da \end{aligned}$$

een differentiaalvergelijking dus naar  $a$  en  $t$ .

$$\text{Nemen we } P = V_0 - q \left( a_0 - (l + k_0 + a_0) \frac{s_0}{\sigma - 2s_0} \right) \quad (13)$$

$$\psi = \frac{2s_0}{\varepsilon(\sigma - s_0)g} \quad (14)$$

$$\text{en } \phi = \frac{P \varepsilon(\sigma - 2s_0)g}{q s_0} \quad (15)$$

dan zal, indien we onder  $T$  den tijd verstaan, die noodig is als  $a$  overgaat van de waarde  $A$  tot  $B$ ,

$$\frac{\pi R^4(\sigma - s_0)g}{8\mu l q} T = - \int_A^B \frac{4 \frac{\sigma - 2s_0}{\sigma - s_0} a + (\phi + 1)\psi}{\psi a + a^2} da.$$

Werken we deze integraal uit, dan wordt:

$$\mu = \frac{\pi R^4(\sigma - s_0)g T \log e}{8 l q A} \quad (16)$$



$$\text{waarin } A = (1 + \phi) \log \frac{a_A}{a_B} + \left( \frac{3\sigma - 7s_0}{\sigma - s_0} - \phi \right) \log \frac{\psi + a_A}{\psi + a_B}. \quad (17)$$

$$\text{Stellen we } \frac{\pi R^4 g \log e}{8 l q} = C_1 \text{ dan is } \mu = \frac{C_1 (\sigma - s_0) T}{A} \quad (18)$$

en  $C_1$  daarin constant, daar de uitzetting van het glas niet in aanmerking komt. Voor vergelijking van proeven onderling hebben we dus slechts op te maken  $\frac{(\sigma - s_0) T}{A}$ .

Was  $\varepsilon = 0$ , dan zou  $A = \log \frac{a_A}{a_B}$  en we moeten nu eens nagaan, wat  $A$  wordt als  $\varepsilon$  een kleine grootheid is. Dan is  $\phi$  zeer klein en  $\psi$  groot, zoodat we al terstond kunnen schrijven:

$$A = (1 + \phi) \log \frac{a_A}{a_B} + \frac{3\sigma - 7s_0}{\sigma - s_0} \log \frac{\psi + a_A}{\psi + a_B}.$$

$$\text{We zagen, dat } \phi = \frac{P\varepsilon (\sigma - 2s_0) g}{q s_0} \text{ en}$$

$$P = V_0 - q \left( a_0 - (l + k_0 + a_0) \frac{s_0}{\sigma - 2s_0} \right)^1 \text{ dus:}$$

$$\phi = \left( \frac{V_0}{q} - a_0 \right) \frac{\varepsilon (\sigma - 2s_0) g}{s_0} + (l + k_0 + a_0) g \varepsilon.$$

<sup>1)</sup> Deze drie vormen komen in ons geval voor die van WARBURG in de plaats. In WARBURG's berekeningen is echter een onjuistheid ingeslopen, in verg. (5b) moet in plaats van

$$(1 - \phi) \log \frac{\psi - a}{\psi - a_0} \text{ staan}$$

$$(3 - \phi) \log \frac{\psi - a}{\psi - a_0}$$

Prof. WARBURG was zoo vriendelijk de waarde mede te deelen, welke  $V_0$  bij zijn toestel had en daardoor kon ik berekenen, welke waarde de correcties kregen, indien ik den door mij gevonden vorm toepaste. Ik vond nu  $\varepsilon$  steeds kleiner dan 1, terwijl het door WARBURG steeds grooter dan 1 was gevonden. Mijne uitkomst geeft dus dat het bij een druk  $p$  gemeten volume uitgestroomd koolzuur grooter is dan het zou zijn, indien het koolzuur niet samendrukbaar was, en dat dit de juiste uitkomst is, ligt, mijn inziens, duidelijk in verg. (2) zijner verhandeling:

Nu moet eerst  $\varepsilon$  berekend worden en, zooals ik reeds op blz. 32 vermeldde, heb ik dit gedaan bij  $130^\circ \text{C}$ , zoodat ik zeker ben een grooter waarde te krijgen dan voor mijne verschillende proeven geldt. Op groote nauwkeurigheid komt het niet op aan, daar we met een correctie te doen hebben. Vandaar ook, dat ik met gerustheid gebruik kan maken van de waarden welke de heer KUENEN zoo vriendelijk was mij te verschaffen, hoewel deze nog niet door hem gecorrigeerd zijn, en dat ik tevens gebruik kan maken van de wet der overeenkomstige toestanden.

De absolute kritische temperatuur van chloormethyl is  $415^\circ,9$ , die van koolzuur  $304^\circ$ . De temperatuur van  $130^\circ \text{C}$ . voor  $\text{CH}_3\text{Cl}$  komt dus overeen met  $21^\circ,6 \text{ C}$ . voor koolzuur.

De waarden voor koolzuur ontleen ik aan PLANCK. <sup>1)</sup>

De druk van chloormethyl bij  $130^\circ$  is  $53,3 \text{ Atm}$ .

" " " koolzuur "  $21^\circ,6$  is  $61,4$  " dus

$$\frac{p_{\text{koolz.}}}{p_{\text{chlm.}}} = 1,152.$$

Het volume, dat 1 Gr. chloormethyl als verzadigde vloeistof inneemt, is  $1,68 \text{ cM}^3$  bij  $130^\circ$

dat voor koolzuur  $1,34 \text{ cM}^3$  bij  $21^\circ,6$

$$\text{dus } \frac{V_{\text{koolz.}}}{V_{\text{chlm.}}} = 0,798.$$

$$\text{Nu staat dus } \frac{\varepsilon_{\text{chl. meth.}}}{\varepsilon_{\text{koolz.}}} = \frac{(pv)_{\text{koolz.}}}{(pv)_{\text{chlm.}}} = 1,152 \times 0,798 = 0,92.$$

$$\Omega dt = \frac{\pi r^4 f}{8\mu s l} \left( s^0 - \frac{\varepsilon f}{2} \right) dt.$$

waarin  $s = s^0 - \varepsilon f$ , afgezien van den term  $+\varepsilon g l s^0$ , en dus:

$$\Omega dt = \frac{\pi r^4 f}{8\mu l} \left( 1 + \frac{\varepsilon f}{2s^0} \right) dt.$$

Ik lees hieruit, dat de ruimtetheelheid, welke in een tijddeel uitstroomt, toeneemt als de vloeistof samendrukbaar is.

<sup>1)</sup> PLANCK, *Wied. Ann* XIII, pag. 542, 1881.

Uit de formule van CLAUSIUS vind ik, dat bij 21,°7 C en het verzadigde volume

de dichtheid toeneemt met 0,01 als er 1,34 Atm. bij komt en „ „ afneemt „ 0,01 „ „ 1,11 Atm. afgaat.

Nemen we eens het gemiddelde, dan is:

$$\varepsilon \text{ koolz.} = \frac{0,01}{1,22 \times 1033 g} = \frac{0,79}{10^5 \times g}$$

$$\text{en } \varepsilon \text{ chlm } 130^\circ \text{ ongeveer} = \frac{0,72}{10^5 \times g}$$

Bij de temperatuur van 130° is  $s_0 = 0,594$

$$\sigma = 13,28$$

$$\sigma - 2s_0 = 12,09$$

$$\frac{\varepsilon g (\sigma - 2s_0)}{s_0} = \frac{0,72}{10^5} \times \frac{12,09}{0,594} = \frac{0,146}{10^3}$$

Bij een correctie kan men wel stellen  $a_0 = h' - h_0$  en dus de capillaire depressies verwaarloozen:

Met behulp van een kathetometer was nu gevonden:

$q$	$r$	binnenste kras	-1	0	1
73,108	53,252	23,667	9,674	6,690	3,718
73,108	53,266	23,669	9,676	6,688	3,718
73,108	53,259	23,668	9,675	6,689	3,718

En de buitenste kras was ongeveer 0.02 te hoog. De afstand van de beide buizen van het vloeistofbad is ongeveer dezelfde als van de binnenste tot den toestel, dus moeten we nemen  $h' = 23,65$

en  $h_0 = 9,675$  dus  $a_0 = 14,0$  ongeveer

$$\frac{V_0}{q} \text{ wordt geschat op } 2,1$$

$$\left( \frac{V_0}{q} - a_0 \right) \frac{\varepsilon (\sigma - 2s_0) g}{s_0} = - 11,9 \times \frac{0,146}{10^3} = - 0,0017.$$

De hoogste waarde, die  $k_0$  kan bereiken, is  $k_0 = 50$ ; de kleinste  $k_0 = 18$ . Het eerste geeft:



$(l + k_0 + a_0) g \varepsilon = 0,00086$ ; het tweede  $0,00063$ ,  
zoodat de grootste waarde voor  $\phi = -0,0011$ .

Daar dit binnen de waarnemingsfouten ligt kan ik dus reeds nemen:

$$A = \log \frac{a_A}{a_B} + \frac{3\sigma - 7s_0}{\sigma - s_0} \log \frac{\psi + a_A}{\psi + a_B}$$

$$\text{Nu is } \psi = \frac{2s_0}{\varepsilon(\sigma - s_0)g} = 13000$$

$$a_A = 20$$

$$a_B = 14 \text{ zoodat } \frac{3\sigma - 7s_0}{\sigma - s_0} \log \frac{\psi + a_A}{\psi + a_B} = 0,0006$$

$$\text{en daar } \log \frac{a_A}{a_B} = 0,15 \text{ ongeveer}$$

$$\text{zoo is deze correctie } \frac{4}{1000} \text{ van dat bedrag.}$$

Ik herinner nogmaals aan de medegedeelde opmerkingen, waaruit wel reeds is gebleken, dat ik aan de ontwikkeling geen andere beteekenis hecht dan dat deze doet oordeelen over de grootte van de correctie in ons geval. Het is voldoende om ons te rechtvaardigen, wanneer wij voor onze proeven deze correctie verwaarloozen en de eenvoudiger formule gebruiken:

$$A = \log \frac{a_A}{a_B} \quad (19)$$

### § 9 De afwijkingen van de wet van Poiseuille en de correcties welke daarvoor moeten worden aangebracht.

Zooals reeds gemeld is, werden de proeven bij lagere temperatuur dan  $15^\circ$  gedaan met behulp van het merkteeken  $r$ . Om nu uit te maken in hoeverre aan P's wet wordt voldaan, zouden we eenige proeven bij gewone temperatuur en het merkteeken  $r$  moeten vergelijken met andere, ook bij de kamertemperatuur, maar met den kleineren overdruk.

We vonden naar (18) en (19):

$$\mu = \frac{C_1(\sigma - s_0)T}{\log \frac{a_A}{a_B}}$$

Hierin kunnen we ook  $\sigma - s_0$  als constant aanmerken, zoodat we voor alle proeven moeten opstellen:  $\frac{T}{\log \frac{a_A}{a_B}}$ , waarin, volgens (10).

$$a = h' - h + \gamma' - \gamma.$$

We moeten nu  $\gamma' - \gamma$  bepalen. Deze hangt natuurlijk af van de grootte van den meniscus, en gedurende een proef verandert de meniscus in de nauwe buis onophoudelijk. In de wijde buis hebben we bovendien een stijgenden meniscus, zoodat het zeer moeilijk is  $\gamma' - \gamma$  met juistheid te bepalen. We krijgen zeker een te kleine waarde voor  $\gamma$  en dus een te groote voor  $\gamma' - \gamma$ , indien we in plaats van bij stijgenden meniscus, de capillariteit bij stilstaanden meniscus bepalen. Men kan toch bij gewone temperatuur en nadat men gezorgd heeft, dat de toestel geruimen tijd in alle deelen dezelfde temperatuur vertoond heeft, het verschil in hoogte meten in reservoir en stijgbuis. Dit nu is een paar malen gedaan en zoo vond ik  $\gamma' - \gamma$  de eene maal 4,5 mM., een ander maal 4,9 mM., gemiddeld 4,7 mM.

$\gamma' - \gamma$  is dus zeker kleiner dan 4,7 mM., maar hoeveel de juiste waarde bij stijgenden meniscus bedraagt is, nu de toestel nog in elkander staat, in 't geheel niet en, als later de capillair door een wijde buis is vervangen, nog zeer lastig te bepalen, zooals wel blijkt uit de verhandeling van **WARBURG** en v. **BABO**, die in een dergelijk geval waarden vonden, uiteenlopende van 0,1 mM. tot 3,0 mM.

Men zal zich misschien afvragen hoe groot in dezelfde

buizen de capillaire depressie is voor kwik, indien er geen chloormethyl op staat. Dit kan uit de middellijnen van de buizen en de hoogten der menisci bepaald worden met behulp der tafels van POHL en SCHABUS.<sup>1)</sup> De wijde buis heeft tot middellijn 7,2 mM. en de nauwe 2,52 mM.; beide zijn door uitwegen met kwik bepaald. De meniscus is in de wijde buis 1,52 mM. en dus is daar de capillaire depressie 0,94 mM. In de nauwe buis is de meniscus 0,63 mM. en hieruit vindt ik door extrapolatie voor de capillaire depressie 4,09. Voor zuiver kwik zou dus  $\gamma' - \gamma = 3,15$  mM. zijn.

Omtrent den invloed van het chloormethyl is nu theoretisch niets bekend, maar daar bij deze waarnemingen van de menisci tevens het verschil in hoogte 4,5 mM. werd gevonden, blijkt wel, dat de invloed vrij groot is. Het was dus wel eenigszins gewaagd van WARBURG en V. BABO de bepaling maar te verrichten, terwijl er in plaats van koolzuur lucht in hun toestel was.

Omtrent de  $\gamma' - \gamma$ , welke voor onze proeven geldt, weten we nu nog slechts, dat het zeker kleiner is dan 4,7 mM.

Voeren we voor een oogenblik eens een waarde in  $\gamma' - \gamma = 2,7$  mM., dan is voor het merkteeken  $r$ :

$$\log \frac{a_A}{a_B} = \log \frac{53,259 - 3,718 + 0,27}{53,259 - 9,675 + 0,27} = 0,05532$$

en voor de krassen

$$\log \frac{a_A}{a_B} = \log \frac{23,650 - 3,718 + 0,27}{23,650 - 9,675 + 0,27} = 0,15173$$

In tabel I zijn nu de proeven bij gewone temperatuur opgenomen, gerangschikt naar de temperaturen. We kunnen daarbij afzien van  $\sigma - s_0$ , want uit tabel II blijkt, dat dit binnen het kleine temperatuursverschil, dat we beschouwen, niet merkbaar verandert.

<sup>1)</sup> POHL en SCHABUS. *Wien. Ber.* IX pag. 834, 1852.



TABEL I.

Nummer van de proef.	Waarnemer	Datum van Waarneming.	Gemidd. Temp.	Uitvloeiingstijd T.	$\log \frac{\alpha_A}{\alpha_B} = A$	$\frac{T}{A}$
49	Stoel	6 Juni 90	15,7	97,67	0,05532	1766
63	Stoel	16 Juni	15,7	97,375	0,05532	1760
46	Stoel	30 Mei	15,8	97,325	0,05532	1759
51	Stoel	7 Juni	16,25	97,095	0,05532	1755
117	De Vries	29 Sept.	16,95	264,54	0,15173	1743
111	De Vries	25 Sept.	17,0	263,91	0,15173	1739
118	De Vries	29 Sept.	17,15	264,11	0,15173	1741
42	Stoel	28 Mei	17,3	95,755	0,05532	1731
119	Meerburg	29 Sept.	17,4	263,79	0,15173	1739
120	De Vries	29 Sept.	17,6	262,89	0,15173	1733
88	Meerburg	30 Juli	17,7	95,78	0,05532	1731
121	De Vries	29 Sept.	17,8	262,60	0,15173	1731
112	Meerburg	25 Sept.	18,0	260,94	0,15173	1720
92	Meerburg	30 Juli	18,2	95,40	0,05532	1725
93	Meerburg	30 Juli	18,25	95,08	0,05532	1719
44	Stoel	28 Mei	18,35	95,28	0,05582	1722
94	Meerburg	30 Juli	18,4	95,14	0,05532	1720
95	Meerburg	30 Juli	18,45	95,10	0,05532	1719
45	Stoel	29 Mei	18,6	95,13	0,05532	1720
113	De Vries	25 Sept.	18,7	260,05	0,15173	1714
96	Meerburg	30 Juli	18,8	94,68	0,05532	1711
114	Meerburg	25 Sept.	19,0	259,81	0,15173	1712
115	De Vries	25 Sept.	19,1	258,73	0,15173	1705
97	Meerburg	30 Juli	19,2	94,56	0,05532	1709
98	De Vries	30 Juli	19,3	94,20	0,05532	1703
116	Meerburg	25 Sept.	19,5	257,98	0,15173	1700
82	Meerburg	29 Juli	19,6	94,18	0,05532	1702
107	De Vries	23 Sept.	19,8	258,82	0,15173	1706
108	De Vries	23 Sept.	19,9	259,26	0,15173	1709
99	De Vries	30 Juli	19,9	93,62	0,05532	1692
86	Meerburg	29 Juli	20,4	93,74	0,05532	1695
87	De Vries	29 Juli	20,4	93,51	0,05532	1690

Uit deze tabel zien we nu, dat  $\frac{T}{A}$  regelmatig verloopt, indien we voor  $\eta' - \eta$  2,7 invoeren. We mogen hieruit echter niet afleiden, dat  $\eta' - \eta = 2,7$  is. Het is toch zeer goed mogelijk en zelfs eenigszins waarschijnlijk, dat de waarde van  $\eta' - \eta$  iets grooter is, b. v. 4,0, en dat de afwijkingen, welke daardoor in de proeven komen, moeten worden toegeschreven aan het niet voldoen aan de wet van POISEUILLE. Bij een nieuw te maken toestel, zou om ons voor den invloed der capillariteit te vrijwaren, voor stijgbuis en reservoir dezelfde buis moeten genomen worden.

Laten we nu eens nagaan hoe groot de afwijking van P's wet zou wezen, indien we in plaats van 2,7 namen 4,7, een waarde die zeker te groot is. In dat geval is voor  $r$

$$\log \frac{a_A}{a_B} = \log \frac{53,259 - 3,718 + 0,47}{53,259 - 9,675 + 0,47} = 0,05508$$

en voor de krassen

$$\log \frac{a_A}{a_B} = \log \frac{23,650 - 3,718 + 0,47}{23,650 - 9,675 + 0,47} = 0,14995$$

Nemen we nu eens overeenstemmende proeven in het geval 2,7 b. v. Pr. 120 en 121 geven gemiddeld

$$\text{bij } 17,^{\circ}7, \quad T = 262,75 \quad \frac{T}{A} = 1732$$

en Pr. 88 onder hoogerer druk

$$\text{bij } 17,^{\circ}7, \quad T = 95,78 \quad \frac{T}{A} = 1731.$$

Dit wordt nu in 't geval  $\eta' - \eta = 4,7$ .

$$(120 \text{ en } 121) \text{ bij } 17,^{\circ}7 \quad T = 262,75 \quad \frac{T}{A} = 1752.$$

$$(88) \quad \text{„} \quad 17,^{\circ}7 \quad T = 95,78 \quad \frac{T}{A} = 1739.$$

en dus is dan de afwijking 0,8 %.

Indien dus de ware  $\eta' - \eta = 4,7$  was, zouden de proeven

bij den grooteren overdruk (47 cM.) een afwijking van POISEUILLE's wet vertoonen van 1,25 % en die bij den kleineren overdruk 0,45 %, daar de afwijkingen evenredig zijn aan de drukhoogten <sup>1)</sup>. De afwijking is dus zeker minder; nemen we aan 0,8 % en 0,3 %.

De proeven bij lagere temperatuur zijn nu steeds gedaan bij hoogerem overdruk en de afwijkingen, die we hier van POISEUILLE's wet hebben, dalen dus van 0,8 % tot lagere waarde, hoe lager de temp. wordt. Zoolang het ons dus slechts om relatieve waarden te doen is, is het aanbrengen van een correctie voorloopig onnoodig, terwijl we voor absolute bepaling van  $\mu$  een afwijking van zeker minder dan 1,25 % zouden vinden.

De waarnemingen bij hoogere temperaturen zijn verricht met behulp van den lageren overdruk en hier zal dus de afwijking opklimmen van 0,3 % af, (hoogstens van 0,45 % af.)

Gaan we van de onderstelling uit, dat de afwijkingen omgekeerd evenredig zijn aan de tweede machten der doorlooptijden (bij denzelfden overdruk), dan zouden we dus bij 123°, daar de doorlooptijd dan 2,5 maal kleiner is, een afwijking hebben van 2 % (hoogstens 3 %).

Intusschen is er nog een ander middel om ons van deze afwijkingen een beeld te vormen. Bij deze proeven toch zijn waarnemingen gedaan met behulp van 3 microscopen en we zouden dus de tijden, welke noodig waren voor een stijging van 1 tot 0 kunnen vergelijken met die van 0 tot -1. Geven deze steeds dezelfde verhouding dan kunnen we daaruit afleiden, dat voor een drukverschil van 3 cM. aan de wet van P. wordt voldaan.

<sup>1)</sup> Vergelijk HOUBA. Over de strooming van vloeistoffen door buizen; Leiden, 1883. p. 96



Ongelukkigerwijze liet, zooals reeds vermeld is, de middelste microscoop veel te wenschen over, zoodat de aflezingen daar niet zoo nauwkeurig zijn, en een fout daarin komt natuurlijk in het verhoudingsgetal dubbel te voorschijn. Vandaar dat deze getallen nogal uiteenloopen, nam. van 1,164 tot 1,198, zooals te zien is in tabel III. Hieruit blijkt wel, dat zoowel hooge als lage waarden onderaan voorkomen. Laten we nu echter eens gemiddelden nemen b.v.

De 11 waarnemingen v.  $16,^{\circ}95$  tot  $20^{\circ}$  geven 1,186 (fout 0,005)  
 " 9 " "  $27,^{\circ}5$  "  $65^{\circ},9$  " 1,185 (fout 0,008)  
 " 10 " "  $66,^{\circ}3$  "  $110^{\circ}$  " 1,179 (fout 0,011)

Hieruit blijkt, dat het aantal proefnemingen nog niet voldoende is om te besluiten, hoe groot de daling van dit verhoudingsgetal is; wel kunnen we er uit afleiden, dat er waarschijnlijk een afwijking bestaat. Drukten bovenstaande getallen die uit, dan zou de relatieve afwijking van proeven bij  $88^{\circ}$  en bij  $17^{\circ}$  zijn 0,6 % bij 3 cM. verschil in overdruk, dus bij den overdruk, dien we gebruiken, ongeveer 3,5 %.

Uit bovenstaande beschouwingen zijn we dus tot het resultaat gekomen, dat de afwijkingen van de wet van POISEULLE vallen buiten de grens van de toevallige fouten, die bij mijne proeven optraden, maar dat het aantal waarnemingen nog niet voldoende is deze met zekerheid te bepalen; dat we intuschen bij eene vergelijking der waarden onderling zeker kunnen zijn, dat deze slechts een fout kan opleveren, welke bij de hoogere temperaturen hoogstens 3 % bedraagt.

Daar echter omtrent het verloop van den wrijvings-coëfficiënt in het door mij onderzochte deel van den vloeistof-toestand nog niets bekend is, deel ik voorloopig de nog niet gecorrigeerde waarden mede, mij voorbehoudende later de noodige correctie nog aan te brengen, als er meer waarnemingen zijn verricht.

---

## § 10. De proeven.

In deze paragraaf deel ik de proeven mede en begin daartoe met die bij de gewone en hogere temperaturen, hoewel die bij lagere eerder verricht zijn. De waarnemingen van  $20^\circ$  tot  $123^\circ$  zijn allen gedaan met behulp van den kleinsten overdruk. Om tot een vergelijking der wrijvingscoëfficiënten te komen, behoeft dus slechts te worden opgesteld  $(\sigma - s_0) T$ .

Over de dichtheid van chloormethyl  $s_0$  geven VINCENT en DELACHANEL <sup>1)</sup> het volgende:

Temp.	$s_0$
$-23^\circ,7$	0,99145
$0^\circ$	0,95231
$13^\circ,4$	0,92830
$17^\circ,9$	0,91969
$23^\circ,8$	0,90875
$30^\circ,2$	0,89638
$39^\circ,0$	0,87886

Zij stellen er de formule bij op:

$$V_t = V_0 (1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3), \text{ waarin:}$$

$$\alpha = 0,00193929$$

$$\beta = 0,00000183121$$

$$\text{en } \gamma = 0,000000105916$$

Passen we dit toe op  $70^\circ$ , dus op een temperatuur, die buiten het gebied ligt, waarin zij waarnamen, dan wordt  $s_0 = 0,806$ .

Dit sluit voldoende aan de onderstaande waarden, mij door den Heer KUENEN welwillend verstrekt.

<sup>1)</sup> VINCENT en DELACHANEL *C. R.* LXXXVII. Pag. 987, 1878.

Temp.	$s_0$
70°	0,789
85°	0,776
115°	0,661
130°	0,593

Daar ik  $\sigma - s_0$  moet opstellen, behoef ik  $s_0$  slechts tot in twee decimalen nauwkeurig te kennen.

Door graphische interpolatie heb ik het uit bovenstaande waarden bepaald en geef nu in tabel II de waarden van  $\sigma$ ,  $s_0$  en  $\sigma - s_0$  bij verschillende temperaturen.

TABEL II.

Temp.	$\sigma$	$s_0$	$\sigma - s_0$
-30°	13,669	1,002	12,667
-20°	645	0,986	659
-10°	620	969	651
0°	595	953	642
10°	571	935	636
20°	546	915	631
30°	522	896	626
40°	497	877	620
50°	473	855	618
60°	449	832	617
70°	425	806	619
80°	400	779	621
90°	376	749	627
100°	352	717	635
110°	328	682	646
120°	304	640	664
130°	280	593	687

Mijne proeven loopen van  $-28^\circ$  tot  $+123^\circ$ ; indien ik



dus  $\sigma - s_0$  als constant aanneem, maak ik de laagste en hoogste waarden ongeveer 0,4 procent te klein. Daar deze afwijking veel kleiner is dan de door het niet voldoen aan P's wet veroorzaakte en ze deze bij de hogere temperaturen bovendien gedeeltelijk opheft, zal ik, nu de correctie voor die wet nog niet is aangebracht,  $\sigma - s_0$  voorloopig als constant in rekening brengen. De doorlooptijden T mogen we, met dit voorbehoud, als beeld van den wrijvingscoëfficiënt beschouwen.

In tabel III deel ik mede de waarnemingen bij hogere temperaturen en laat er aan voorafgaan die, welke bij kamertemperatuur en met den kleinsten overdruk zijn gedaan.

De kwikthermometers, welke bij de proeven met water en glycerine dienst deden, werden op het vriespunt en kookpunt geverifieerd.

TABEL III.

Nummer van de proef.	Waarnemer.	Datum.	Gecorr. Temperatuur Onderste Therm.		Gecorr. Temperatuur Bovenste Therm.		Gemidd. Temp.	T	T	Verhouding $\frac{T_{(0,-1)}}{T_{(1,0)}}$
			Begin	Einde	Begin	Einde		(1 tot -1)	(1 tot 0)	
								in sec.	in sec.	
117	V	29 Sept.	17,1	17,1	16,8	16,8	16,95	264,54	121,50	1,177
111	V	25 "	17,1	17,7	16,7	16,6	17,0	263,91	?	?
118	V	29 "	17,4	17,5	16,8	16,9	17,15	264,11	120,93	1,184
119	M	29 "	17,6	17,7	17,1	17,15	17,4	263,79	120,29	1,193
120	V	29 "	17,8	17,95	17,3	17,4	17,6	262,89	120,34	1,185
121	V	29 "	18,0	18,15	17,5	17,6	17,8	262,60	120,01	1,188
112	M	25 "	18,1	18,4	17,7	17,9	18,0	260,94	?	?
113	V	25 "	18,8	19,1	18,3	18,6	18,7	260,05	119,31	1,180
114	M	25 "	19,2	19,3	18,7	18,7	19,0	259,81	119,09	1,182
115	V	25 "	19,4	19,4	18,8	18,9	19,1	258,73	118,00	1,193
116	M	25 "	19,7	19,8	19,1	19,3	19,5	257,98	118,10	1,184
107	V	23 "	20,0	20,1	19,55	19,7	19,8	258,82	118,38	1,186
108	V	23 "	20,1	20,1	19,6	19,65	19,9	259,26	118,24	1,193
68	S	18 Juni	27,5	27,5	28,1	28,1	27,8	236,17	108,515	1,176
73	S	19 "	27,6	27,8	28,0	28,2	27,9	236,925	108,11	1,192
59	S	14 "	35,5	35,7	36,1	36,2	35,9	220,995	101,755	1,172
64	S	16 "	37,0	37,5	37,6	38,2	37,6	217,50	99,28	1,191
74	S	19 "	44,4	45,0	45,2	46,1	45,2	204,595	93,52	1,188
69	S	18 "	44,9	44,7	45,8	45,8	45,3	203,78	92,97	1,192
65	S	16 "	55,35	55,25	55,8	55,8	55,55	186,49	84,88	1,197
60	S	14 "	55,4	55,7	56,0	56,0	55,8	186,58	85,755	1,176
70	S	18 "	65,9	66,1	67,0	67,3	66,6	169,99	77,86	1,183
75	S	19 "	66,3	66,5	67,2	67,5	66,9	169,74	77,595	1,188
66	S	16 "	74,8	74,6	75,0	74,9	74,8	157,84	72,495	1,177
61	S	14 "	74,8	75,0	75,4	75,5	75,2	157,59	?	?
71	S	18 "	84,5	84,4	85,0	85,1	84,75	144,31	?	?
76	S	19 "	84,8	84,7	85,5	85,5	85,1	143,46	66,29	1,164
72	S	18 "	92,6	92,5	93,1	93,3	92,9	133,75	61,03	1,193
67	S	16 "	92,3	92,5	93,8	94,0	93,15	133,38	61,12	1,182
125	M	13 Oct.	102,9	101,9	101,7	102,0	102,1	122,14	55,87	1,186
124	V	13 "	104,4	103,9	104,7	104,2	104,3	120,88	55,78	1,167
123	M	13 "	108,1	108,1	108,7	106,9	107,95	114,04	51,88	1,198
77	S	9 Juli	109,3	110	111,3	112,1	110,7	112,68	52,04	1,165
78	S	17 "	110,0	110,3	111,1	111,7	110,8	111,71	51,43	1,172
79	S	17 "	122,4	122,6	123,3	123,5	122,95	97,06	44,46	?

De laatste rij bevat de verhouding der tijden  $T_{(0,-1)}$  en  $T_{(1,0)}$ , d. w. z. der tijden, welke noodig waren om het kwik-niveau van het merkteeken  $O$  tot  $-1$  of van  $1$  tot  $O$  te laten stijgen. Dat deze getallen nog ongeveer 3 procent uiteenloopen wordt veroorzaakt door de onduidelijkheid van den kijker bij  $O$ . Intusschen heb ik van deze verhoudingsgetallen reeds gebruik gemaakt bij de bespreking van POISEUILLE's wet. Nog zijn ze mij voor iets anders dienstig. Bij proef 79 was het vloeibaar chloormethyl zoo uitgezet, dat ik nog slechts tot het merkteeken  $O$  kon waarnemen. Uit het gemiddelde der verhoudingsgetallen 1,183 bereken ik nu  $T_{(1,-1)}$  op 97,06 sec.

De waarnemingen bij lage temperatuur zijn verricht met behulp van het merkteeken  $r$ , en om ze terstond met de andere te kunnen vergelijken, zou ik dus de doorlooptijden moeten vermenigvuldigen met de verhouding der beide vormen  $\log \frac{a_A}{a_B}$  (zie Tabel I), dat is dus met  $\frac{0,15173}{0,05532} = 2,743$ .

Intusschen heb ik er reeds opmerkzaam op gemaakt, dat na proef 34, nadat de meeste proeven bij lage temperatuur reeds gedaan waren, eene wijziging in den toestel kwam, die tengevolge had, dat bij de gewone temperatuur de uitstroomingstijd ongeveer 1% kleiner werd. Wil ik dit in aanmerking nemen, dan moet ik dus anders te werk gaan.

Van de eerste waarnemingen bij gewone temperatuur en het merkteeken  $r$  staan mij de volgende ten dienste:

TABEL IV.

Num- mer.	Datum.	Georr. Temp. ond. Therm.		Georr. Temp. Bov. Therm.		Gem. Temp.	T.
		Begin.	Einde.	Begin.	Einde.		
1	30 April	14,2	14,3	14,6	14,7	14,45	99,84
2	"	14,7	14,8	15	15	14,9	99,63
3	"	15,1	15,2	15,5	15,6	15,35	98,755
4	"	15,4	15,45	15,8	15,85	15,6	98,985



Hieruit vind ik gemiddeld bij  $15^{\circ},1$   $T = 99,3$ . De latere proeven beginnen bij  $15^{\circ},7$  en ik kan dus daar met gerustheid tot  $15^{\circ},1$  extrapoleeren. Ik vind dan voor het merkteken  $r$   $T = 98,3$ , zoodat blijkt, dat de tijd ongeveer 1% kleiner is geworden; en voor den laagsten overdruk vind ik bij  $15^{\circ},1$   $T = 269,5$ .

Wil ik dus de proeven bij lagere temperatuur met de andere rechtstreeks vergelijkbaar maken, dan moet ik de tijden vermenigvuldigen met  $\frac{269,5}{99,3} = 2,714$ .

In tabel V nu is dit gedaan; de laatste rij daarvan  $T'$  is verkregen door den waargenomen doorgangstijd  $T_{(1, -1)}$  met genoemden factor te vermenigvuldigen. Hierop maakt slechts proef 48 eene uitzondering. Deze is na de wijziging volbracht en hier is dus van den factor 2,743 gebruik gemaakt.

Bij enkele proeven werd, zooals uit de tabel blijkt, ook gedurende het verloop de temperatuur nog eens waargenomen.

Als thermometers dienden twee alcoholthermometers, welke een verificatie zeer noodig hadden, want de eene wees bij  $-28^{\circ}$ ,  $2^{\circ},3$ , de ander  $1^{\circ},5$  te laag. Om ze goed te kunnen corrigeeren, heb ik ze vergeleken met een tot  $-29^{\circ}$  loopenden gecalibreerden kwikthermometer van FASTRÉ, terwijl ik van dezen en van de gebruikte alcoholthermometers een paar malen het smeltpunt bepaalde.

De drie thermometers werden geplaatst in een dergelijk vloeistofbad als ik voor mijne proeven gebruikte; ze stonden echter niet direct in den alcohol, maar in een bakje met kwik, dat door dezen werd omspoeld. Op deze wijze verkreeg ik voldoende resultaten.

In tabel V zijn evenals vroeger slechts de gecorrigeerde

temperatuurwaarden vermeld. Deze proeven werden alle door mijzelfen gedaan.

TABEL V.

Nummer van de proef.	Datum.	Gecorr. Temp. Ond. Therm.			Gecorr. Temp. Bov. Therm.			Gemidd. Temp.	$T_{(1,-1)}$ in sec.	$T'$ in sec.
		Begin	Midden	Einde	Begin	Midden	Einde			
28	17 Mei	-28,7		-27,75	-28,3		-27,1	-28,0	150,515	408,50
29	17 Mei	-21,5		-21,1	-21,3		-20,3	-21,05	139,295	378,05
48	30 Mei	-21,3	-21,3	-20,6	-20,6	-20,4	-20,3	-20,75	138,505	379,91
30	17 Mei	-17,8		-17,2	-18,1		-17,2	-17,6	133,95	363,54
31	17 Mei	-11,3		-11,3	-11,2		-11,3	-11,3	125,06	339,41
32	17 Mei	-8,2	-7,8	-7,9	-7,9	-7,7	-7,6	-7,85	121,67	330,21
33	17 Mei	-5,0	-4,8	-4,7	-5,3	-4,9	-4,6	-4,9	118,35	321,20
27	16 Mei	-4,5		-5,0	-4,0		-4,9	-4,6	119,25	323,64
25	10 Mei	-3,2		-2,8	-2,5		-1,8	-2,6	116,375	315,84
34	17 Mei	-1,5	-1,3	-1,1	-1,7	-1,5	-1,2	-1,4	114,83	311,65
26	16 Mei	+1,0		+0,3	+1,0		+0,7	+0,75	112,645	305,72
24	10 Mei	1,8		1,3	2,1		2,3	1,9	111,59	302,86
48	9 Mei	3,4		3,8	3,8		4,3	3,8	109,67	297,64
14	7 Mei	5,9		6,3	6,2		6,5	6,2	107,38	291,43
19	9 Mei	7,4		7,6	7,5		7,9	7,6	106,3	288,50
15	7 Mei	8,5		8,8	8,9		9,2	8,85	104,975	284,90
20	9 Mei	8,9		9,4	9,2		9,5	9,25	104,555	283,76
21	9 Mei	10,5		10,7	10,8		11,2	10,8	103,245	280,21
16	7 Mei	10,6		10,9	10,7		11,0	10,8	103,12	279,87
22	9 Mei	11,7		12,0	12,2		12,3	12,05	102,445	278,04
17	7 Mei	11,8		11,9	12,2		12,3	12,05	102,29	277,62
23	9 Mei	12,9		13,2	13,2		13,3	13,15	101,58	275,69
1	30 Apr.	14,2		14,3	14,6		14,7	14,45	99,84	270,97
2	30 Apr.	14,7		14,8	15,0		15,0	14,9	99,63	270,40
3	30 Apr.	15,1		15,2	15,5		15,6	15,35	98,755	268,02
4	30 Apr.	15,4		15,45	15,8		15,85	15,6	98,985	268,65

## § 11. Bespreking der resultaten.

De uitkomsten in de tabellen III en V opgesteld, heb ik graphisch voorgesteld, zoodat de temperatuur abscis, de waargenomen doorstroomingstijd ordinaat was. De aldus verkregen lijn heeft zeer veel overeenstemming met een logaritmische, en ik heb nu de volgende formule opgesteld:

$$T = 896 - 250 \cdot \log T$$

waarin  $T$  de absolute temperatuur voorstelt.

Uit tabel VI blijkt dat het grootste verschil tusschen den waargenomen en berekenden tijd slechts 1,8% bedraagt, wanneer we afzien van de laatste waarneming, welke volgens vroeger vermelde gronden wat twijfelachtig is.

TABEL VI.

$T - 273.$	T (waargenomen)	T (berekend.)	Afwijking in proc.
-28	408,50	401,79	+1,7%
-21,05	378,05	376,88	+0,3
-20,75	379,91	375,84	+1,1
-17,6	363,54	365,09	-0,5
-11,3	339,41	344,51	-1,5
-7,85	330,21	333,73	-1,1
-4,9	321,20	324,79	-1,1
-4,6	323,64	323,89	-0,1
-2,6	315,84	317,98	-0,7
-1,4	311,65	314,49	-0,9
+0,75	305,72	308,32	-0,8
1,9	302,86	305,07	-0,7
3,8	297,64	299,78	-0,7
6,2	291,43	293,22	-0,6
7,6	288,50	289,47	-0,3
8,85	284,90	286,15	-0,4



$T - 273.$	T (waargenomen)	T (berekend).	Afwijking in proc.
9,25	283,76	285,10	-0,5
10,8	280,21	281,06	-0,3
10,8	279,87	281,06	-0,4
12,05	278,04	277,84	+0,1
12,05	277,62	277,84	-0,1
13,15	275,69	275,04	+0,2
14,45	270,97	271,77	-0,3
14,9	270,40	270,64	-0,1
15,35	268,02	269,53	-0,6
15,6	268,65	268,91	-0,1
16,95	264,54	265,58	-0,4
17,0	263,91	265,46	-0,6
17,15	264,11	265,09	-0,4
17,4	263,79	264,48	-0,3
17,6	262,89	264,00	-0,4
17,8	262,60	263,51	-0,3
18,0	260,94	263,03	-0,8
18,7	260,05	261,34	-0,5
19,0	259,81	260,62	-0,3
19,1	258,73	260,38	-0,6
19,5	257,98	259,42	-0,6
19,8	258,82	258,70	+0,0
19,9	259,26	258,46	+0,3
27,8	236,17	240,33	-1,7
27,9	236,925	240,10	-1,3
35,9	220,995	223,05	-0,9
37,6	217,50	219,58	-0,9
45,2	204,595	204,74	-0,1
45,3	203,78	204,55	-0,4
55,55	186,49	186,12	+0,2
55,8	186,58	185,69	+0,5

$T - 273.$	T (waargenomen)	T (berekend).	Afwijking in proc.
66,6	169,99	168,11	+1,1
66,9	169,74	167,65	+1,2
74,8	157,84	155,88	+1,3
75,2	157,59	155,31	+1,5
84,75	144,31	142,23	+1,5
85,1	143,46	141,78	+1,2
92,9	133,75	131,95	+1,4
93,15	133,38	131,64	+1,2
102,1	122,14	121,23	+0,8
104,3	120,88	118,80	+1,8
107,95	114,04	114,87	-0,7
110,7	112,68	112,00	+0,6
110,8	111,71	111,89	-0,2
122,95	97,06	100,04	-3,0

Wil ik de constanten zóó wijzigen, dat alle waarden, behalve de laatste binnen de uiterste lijnen vallen, dan krijg ik:

$$T = (896 \pm 1,9) - 250 \log T$$

of  $T = 896 - (250 \pm 0,9) \log T.$

De formule kan voor het door mij waargenomen deel, d. w. z. van den gewonen vloeistoftoestand af tot eenige graden beneden de kritische temperatuur een zeer voldoende beeld geven. Wanneer ik mijne proeven bij hoogere temperatuur voortzet, verwacht ik niet meer, dat ze zal gelden, hetgeen ik meen te mogen opmaken uit de waarnemingen door WARBURG en VON BABO medegedeeld in tabel 10a hunner verhandeling. Deze getallen voldoen niet aan eene logaritmische lijn.

De door GRAETZ <sup>1)</sup> medegedeelde formule  $\mu = A \frac{t_0 - t}{t - t_1}$

<sup>1)</sup> GRAETZ, *Wied. Ann.* XXXIV, pag. 25, 1888.

die voor den gewonen vloeistoestand een veel betere aansluiting geeft, geldt voor onze proeven evenmin als voor de waarnemingen van WARBURG en v. BABO. Ook de formule van SLOTTE <sup>1)</sup> is hier geheel onbruikbaar.

Ik maak er nog opmerkzaam op, dat de gevonden verschillen een zekere regelmaat vertoonen, dat nam.

van $-28^{\circ}$	tot $-20^{\circ},75$	de waargenomen waarde	groter is,
" $-20^{\circ}$	" $+ 50^{\circ}$	" "	" kleiner is,
" $50^{\circ}$	" $+ 105^{\circ}$	" "	" groter is,
daarboven	" "	" "	" kleiner is,

op een paar uitzonderingen na.

Intusschen zoude eerst de correctie voor de afwijking van POISEUILLE'S wet moeten worden aangebracht, voor we daaruit een gevolgtrekking zouden kunnen maken.

Of de door mij opgestelde logarithmische formule ook voor andere stoffen voldoet, zooals zou volgen uit de opvatting van de overeenkomstige toestanden als gelijkvormige bewegingstoestanden, door Prof. KAMERLINGH ONNES <sup>2)</sup> ontwikkeld, zal later moeten blijken; voor zoo ver mij bekend is, staan daarvoor nog geen waarnemingen ten dienste.

In aanmerking nemende, dat  $T = \text{Const} \times \mu$  is dus

$$l\mu = C - \frac{T}{250 \log e}$$

$$\mu = Ce^{-\frac{T}{108,6}}$$

Terwijl deze formule de waarnemingen vrij wel teruggeeft, kan ik nog wijzen op een eenvoudig verband, dat bij benadering bestaat tusschen den wrijvingscoëfficiënt en de dampspanning.

<sup>1)</sup> SLOTTE, *Wied. Ann.* XIV, pag. 21, 1881.

<sup>2)</sup> H. KAMERLINGH ONNES, *Theorie der vloeistoffen. Verh. der Kon. Akad. van Wetensch., Amst.*, 1881.



In tabel VII stelt de eerste rij de temperaturen voor; de tweede rij,  $\log p$ , is de logarithme van de dampspanning, uitgedrukt in atmosferen; de eerste daarvan zijn ontleend aan REGNAULT <sup>1)</sup>; van 70° af verschaft de Heer KUENEN ze mij.

De derde kolom zijn de logarithmen der door mij gevonden doorstroomingstijden, terwijl in de vierde zijn opgesteld de vormen  $\log T + \frac{1}{3} \log p$  en in de vijfde de daarbij behorende getallen G.

TABEL VII.

$T - 273$	$\log p.$	$\log T.$	$\log T + \frac{1}{3} \log p.$	G.
-26,77	9,94096-10	2,60477	2,58509	385
-24,84	9,97819-10	2,59605	2,58878	388
-22,95	0,01422	2,58715	2,59189	391
-21,78	0,03506	2,58149	2,59318	392
-19,51	0,07475	2,56996	2,59488	393
-14,29	0,17001	2,54469	2,60136	399
-11,12	0,22139	2,53084	2,60464	402
-8,02	0,27106	2,51917	2,60952	407
-4,39	0,32718	2,50515	2,61421	411
0	0,39763	2,48785	2,62039	417
4,56	0,46860	2,46982	2,62062	418
10,78	0,55739	2,44716	2,63295	430
16,59	0,63226	2,42325	2,63400	431
23,09	0,71773	2,39445	2,63369	430
30,53	0,82339	2,36455	2,63901	436
34,80	0,87152	2,34830	2,63881	435
70	1,22011	2,21617	2,62287	420
85	1,34830	2,15685	2,60628	404
100	1,48855	2,09517	2,59135	390
115	1,61278	2,02735	2,56494	359

<sup>1)</sup> REGNAULT. *Mémoire de l'Institut National*. Tome XXVI, pag. 595, 1862.

Nemen we dus  $G = 394$  dan bedragen de grootste afwijkingen minder dan 10 %.

De waarnemingen door WARBURG en v. BABO voor koolzuur vertoonen hetzelfde:

TABEL VIII.

$T - 273$	$\log p.$	$\log \mu.$	$\log \mu +$ $+\frac{1}{3} \log p.$	G.
5°	1,59660	9,96473	0,49693	314,0
10	1,65896	9,95182	0,50481	319,7
15	1,71600	9,93651	0,50851	322,5
20	1,77085	9,91751	0,50779	321,9
25	1,82575	9,89376	0,50234	317,9

Men krijgt dus een benaderd beeld door te nemen

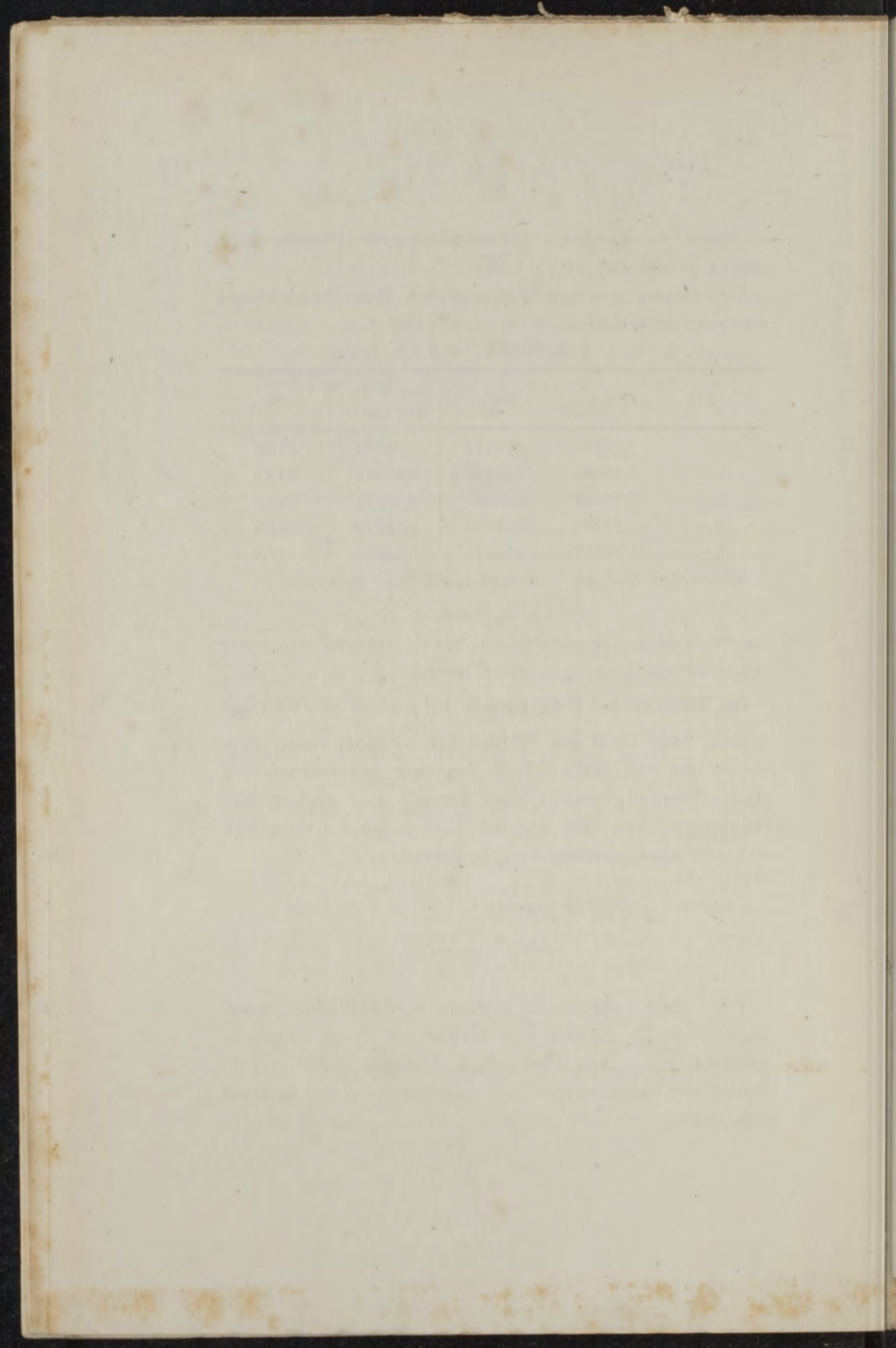
$$\mu p^{\frac{1}{3}} = \text{Const.}$$

waarin  $\mu$  de wrijvingscoëfficiënt, als de vloeistof zich onder den druk van haar eigen damp bevindt.

DE HEEN <sup>1)</sup> heeft de formule  $\log p = \frac{1}{\mu} \times \text{Const.}$  opgesteld, maar vindt dan beneden het kookpunt reeds afwijkingen tot van 30 %. Voor den door mij onderzochten vloeistofoestand vertoont zijne formule nog veel grooter afwijkingen. Van den anderen kant is mijne formule ook niet voor zijne waarnemingen te gebruiken.

<sup>1)</sup> *Physique comparée* II, pag. 221.

Ten zeerste waardeer ik de groote bereidwilligheid, waarmede Prof. H. KAMERLINGH ONNES mij bij dit onderzoek voorlichtte; ook van Prof. H. A. LORENTZ mocht ik vele blijken van welwillendheid ontvangen. Ik breng hun daarvoor mijn dank.





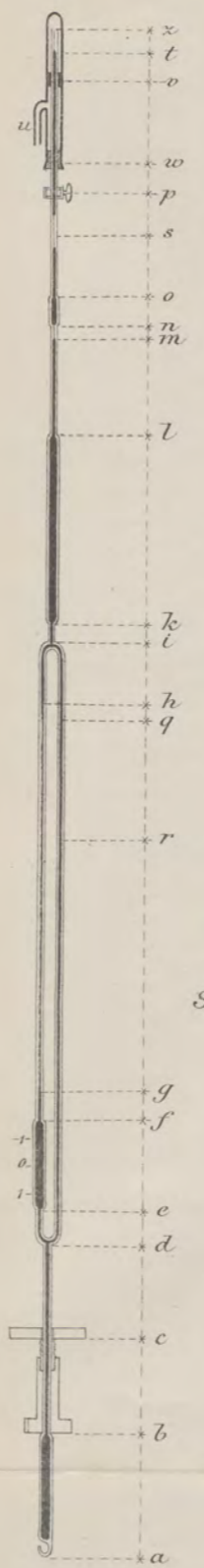


Fig. 1.  
Schaal 1/10.

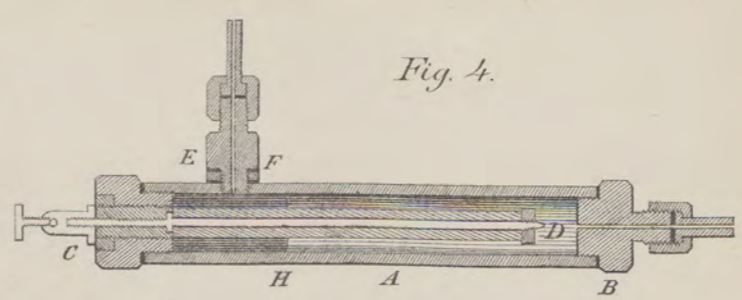


Fig. 4.

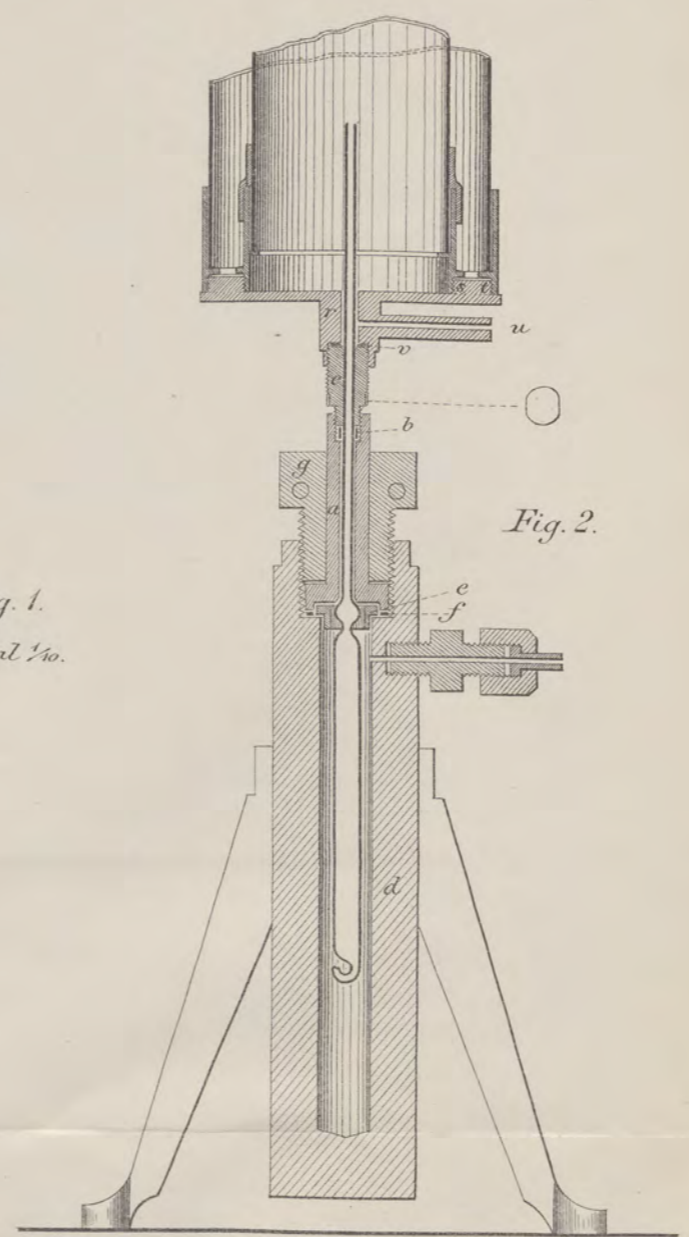


Fig. 2.

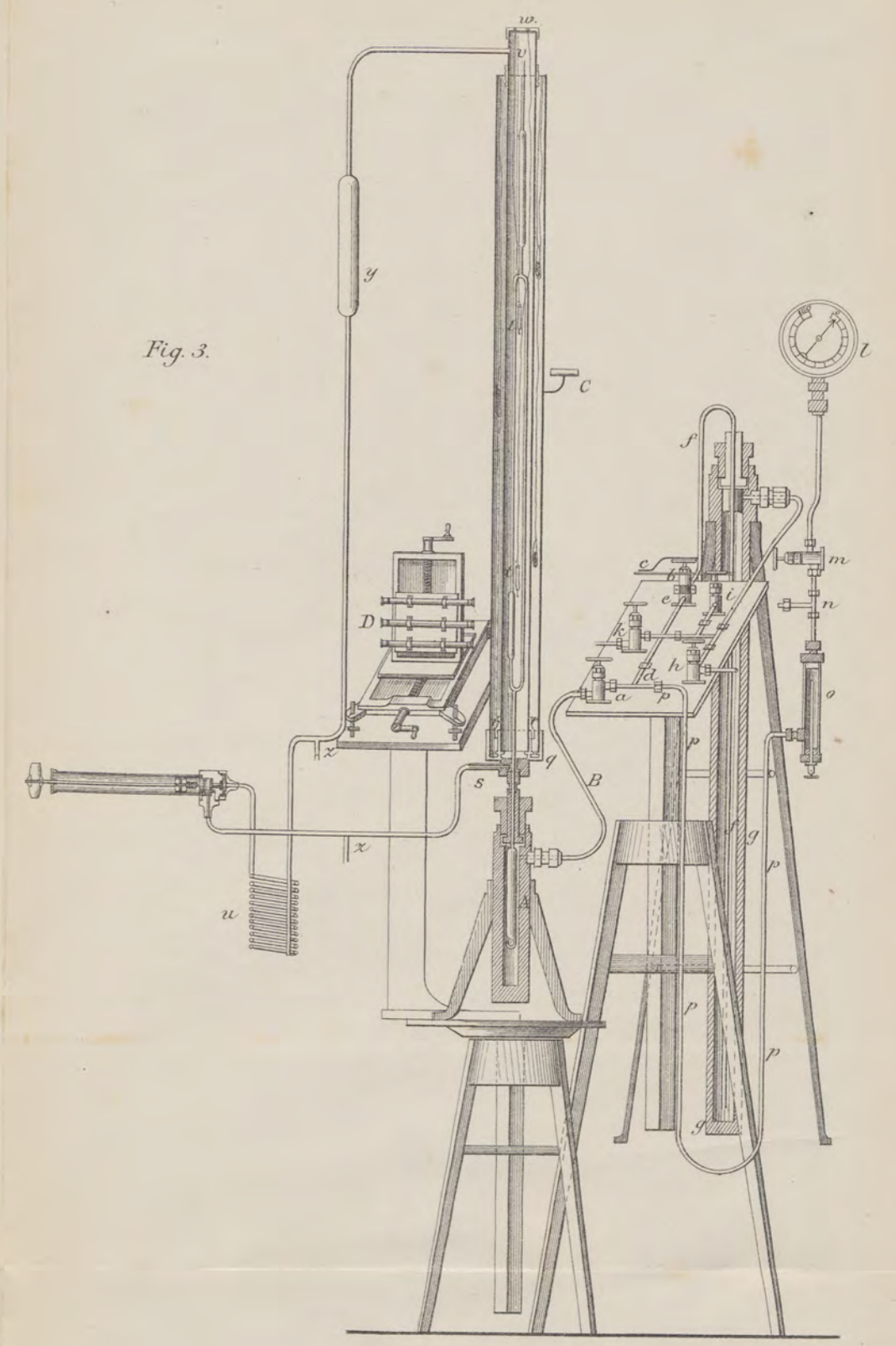
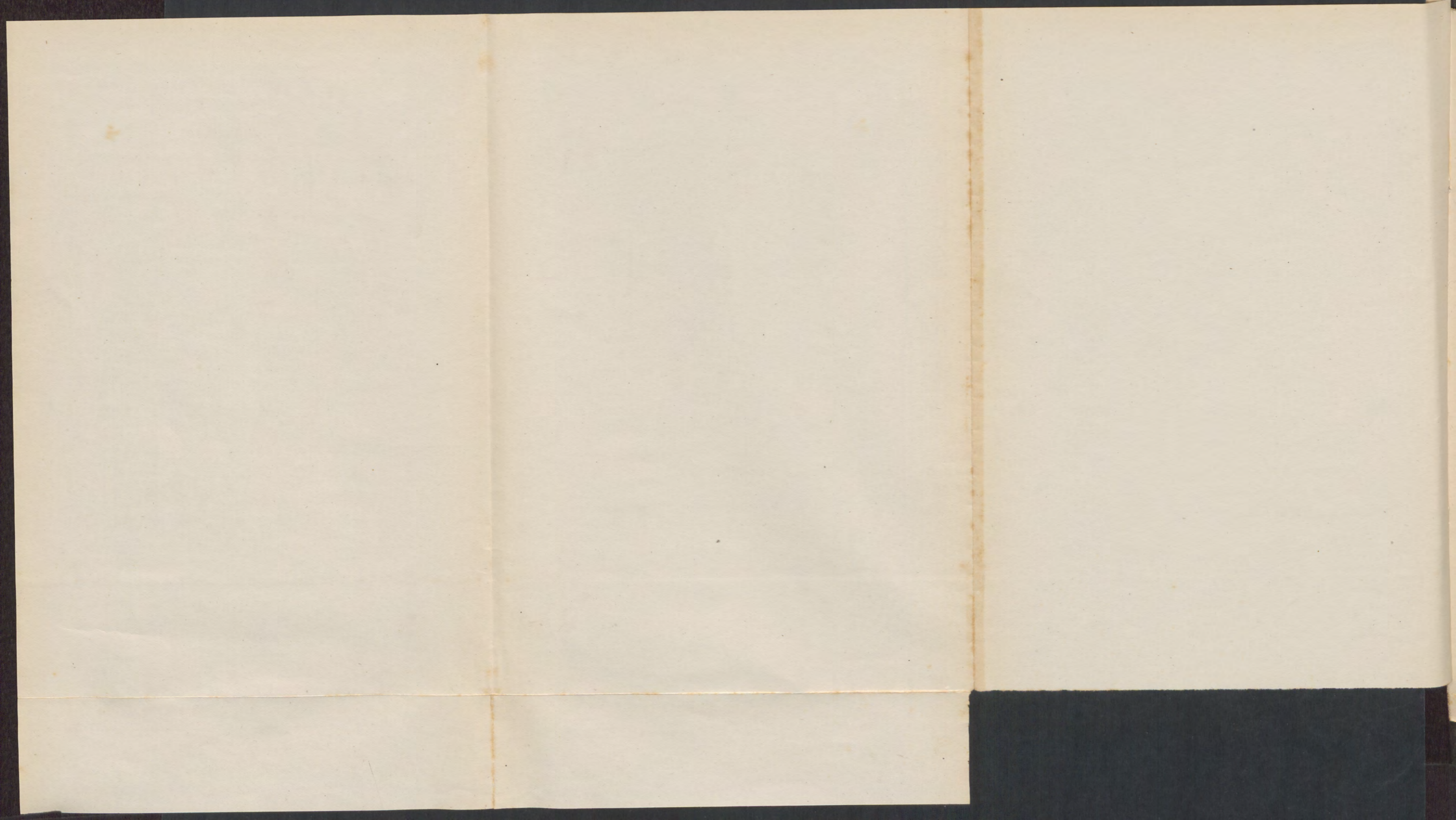


Fig. 3.

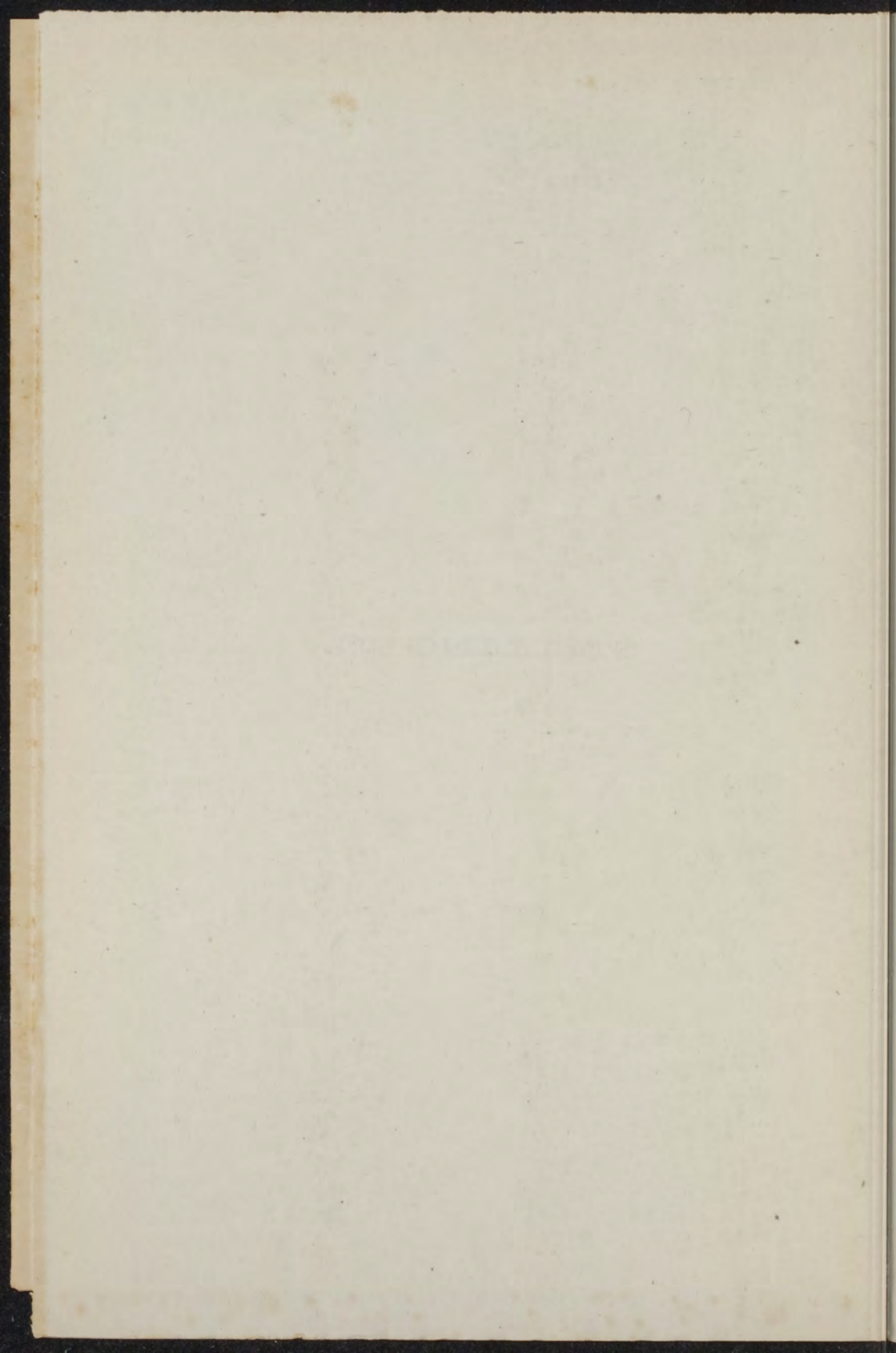






STELLINGEN.





## STELLINGEN.

---

### I.

Bij proeven ter bepaling van den inwendigen wrijvingscoëfficiënt van vloeistoffen of gassen verdient in het algemeen de methode van POISEUILLE de voorkeur boven die van COULOMB.

### II.

De correctie voor de samendrukbaarheid, welke WARBURG en v. BABO (*Wied. Ann.* XVII, p. 403) berekenen willen, kan, door de onderstellingen, welke zij omtrent  $\mu$  en  $\varepsilon$  invoeren, slechts dienen om een beeld te geven van de orde der fout, maar mag zóó niet worden gebruikt.

### III.

De correctiecoëfficiënt  $\alpha$ , welke WARBURG en v. BABO invoeren (*Wied. Ann.* XVII, p. 417), moet kleiner zijn dan 1 en wordt door een onjuistheid in hunne berekening grooter dan 1 gevonden.

## IV.

De wijze, waarop de inwendige wrijvingscoëfficiënt van een vloeistof onder eigen dampdruk, afhangt van de absolute temperatuur kan van het kookpunt tot in de nabijheid van de kritische temperatuur bij eerste benadering worden voorgesteld door een logarithmische lijn.

## V.

Ten onrechte beweert MAXWELL (*Phil. Mag.*(4) Bd. XXXV, p. 136 onderaan): „The doctrines that all matter is extended and that no two portions of matter can coincide in the same place, being deductions from our experiments sensible to us, have no application to the theory of molecules.”

## VI.

In de bekende verhandeling: „On the Dynamical Theory of Gases” zijn vele onjuistheden ingeslopen.

Vergelijking (43) moet luiden

$$\frac{\partial_1 \xi_1 V_1^2}{\partial t} = \left( \frac{K_1}{2 M_1^3} \right)^{\frac{1}{2}} M_1 N_1 A_2 \left\{ 4 \overline{\xi_1 V_1^2} - 2 \overline{\xi_1^2 V_1^2} - 2 \overline{\xi_1^2 \xi_1} - 2 \overline{\xi_1 \eta_1 \eta_1} - 2 \overline{\xi_1 \zeta_1 \zeta_1} \right\}$$

Vergelijking (54) is hieruit afgeleid en moet zijn

$$\frac{\partial}{\partial t} (\xi_1^3 + \xi_1 \eta_1^2 + \xi_1 \zeta_1^2) = -2 k_1 \rho_1 A_2 (\xi_1^3 + \xi_1 \eta_1^2 + \xi_1 \zeta_1^2)$$

Dientengevolge krijgt ook het laatste lid van vergelijking (143) den factor 2 in plaats van 3 en hierdoor wordt de opmerking van BOLTZMANN verklaard (*Wien. Ber.* Bd LXVI, p. 3), dat MAXWELL den warmtegeleidingscoëfficiënt  $1\frac{1}{2}$  maal te klein vindt.



In vergelijking (94) is bij den laatsten term van het eerste lid de factor  $\frac{1}{2}$  en in het tweede lid  $\beta_1$  vergeten waardoor de vergelijkingen (95), (97) en (98) moeten gewijzigd worden zooals door Dr. MENSINGA (*De warmtegeleiding in gassen*, p. 43, Groningen 1877) is aangegeven.

De onjuistheid in (94) is overgegaan in (118), waar het tweede lid den factor  $\frac{\beta_1 M_2 + \beta_2 M_1}{M_1 + M_2}$  moet hebben en daardoor krijgt (119) een term meer in het tweede lid:

$$+ k \rho_1 \rho_2 A_1 \frac{\{(\beta_1 - 1) M_2 + (\beta_2 - 1) M_1\}}{M_1 + M_2} \left[ (u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2 + (w_2 - w_1)^2 \right]$$

een term, die het warmteeffect van de diffusie aangeeft, veroorzaakt door de intramoleculaire beweging.

## VII.

De verandering, welke Dr. MENSINGA maakt in verg. (43) is onjuist; ook beweert hij ten onrechte, dat MAXWELL in (52) en (53) termen vergeten heeft, betrekking hebbende op de uitwendige krachten.

## VIII.

Ten onrechte meent MAXWELL door in vergelijking (70)

$$Q = \frac{1}{2} \beta (\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2)$$

te stellen de hoeveelheid warmte te vinden, welke door warmtegeleiding in de eenheid van tijd door de eenheid van doorsnede wordt aangevoerd, als  $u = u'$  is.

Deze vergelijking en de daaraan vastgeknoopte beschouwingen over warmtegeleiding verliezen hare beteekenis, wanneer er translatiebeweging is en wanneer dus  $u = u' \geq 0$ ; en zelfs als  $u = u' = 0$  is zij nog zeer hypothetisch.

## IX.

De wijze waarop in MEYER's *Kinetische Theorie der Gase* en in WÜLLNER's *Lehrbuch der Physik*, de formule voor den inwendigen wrijvingscoëfficiënt der gassen wordt afgeleid, is onlogisch.

## X.

Als nadere bevestiging van de door H. F. WEBER (*Wied. Ann.* X, p. 316) opgestelde wet, dat in

$$k = \eta \rho c$$

deze  $\eta$  slechts weinig verandert voor verschillende niet-metallische vloeistoffen kan de volgende bepaling dienen, volgens zijne methode verricht.

Voor geconcentreerd zwavelzuur ( $\rho = 1,825$ ) is  $k = 0,053$ .

## XI.

Niet GALILEÏ, maar HUYGENS is de uitvinder van het slingeruurwerk geweest.

## XII.

De door KIRCHHOFF in de 26<sup>e</sup> Vorl. zijner *Mechanik* opgestelde vergelijking (26) kan ook worden toegepast op verdunde gassen; de ontwikkeling, welke KÖNIG (*Wied. Ann.* XXXII, p. 193, 1887) er aan geeft verdient de voorkeur boven die van CLEMENČIČ (*Wien. Ber.* LXXXIV, p. 146, 1882) en van LAMPEL (*Wien. Ber.* XCIII p. 291, 1886).

