

14B  
157

38  
ANDRÉASCH CHEMISCH LABORATORIUM  
LEIDEN.

DE ELECTRISCHE WEERSTAND  
VAN ZUIVERE METALEN BIJ LAGE  
EN ZEER LAGE TEMPERATUREN

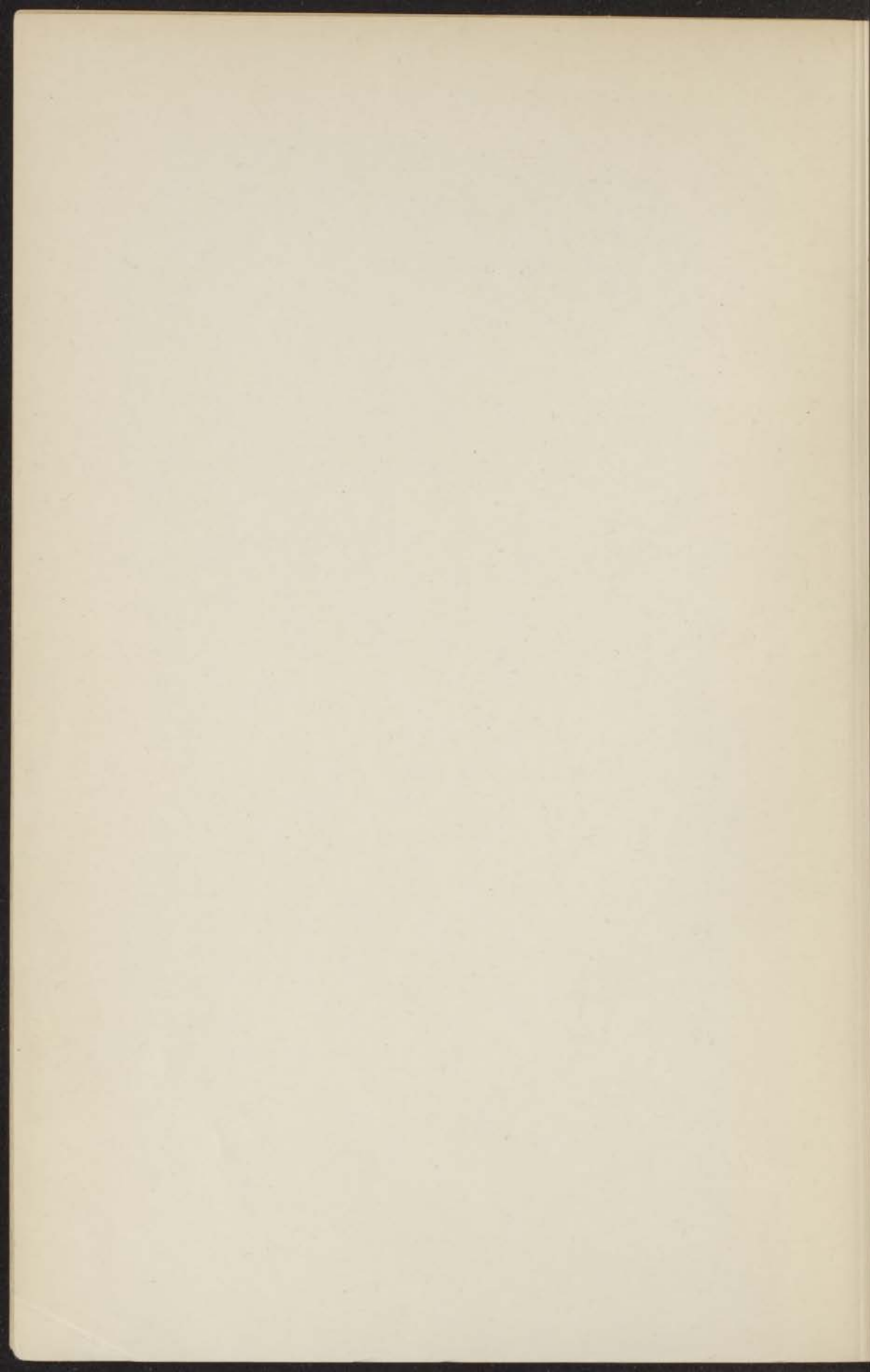
G. J. VAN DEN BERG

Universiteit Leiden



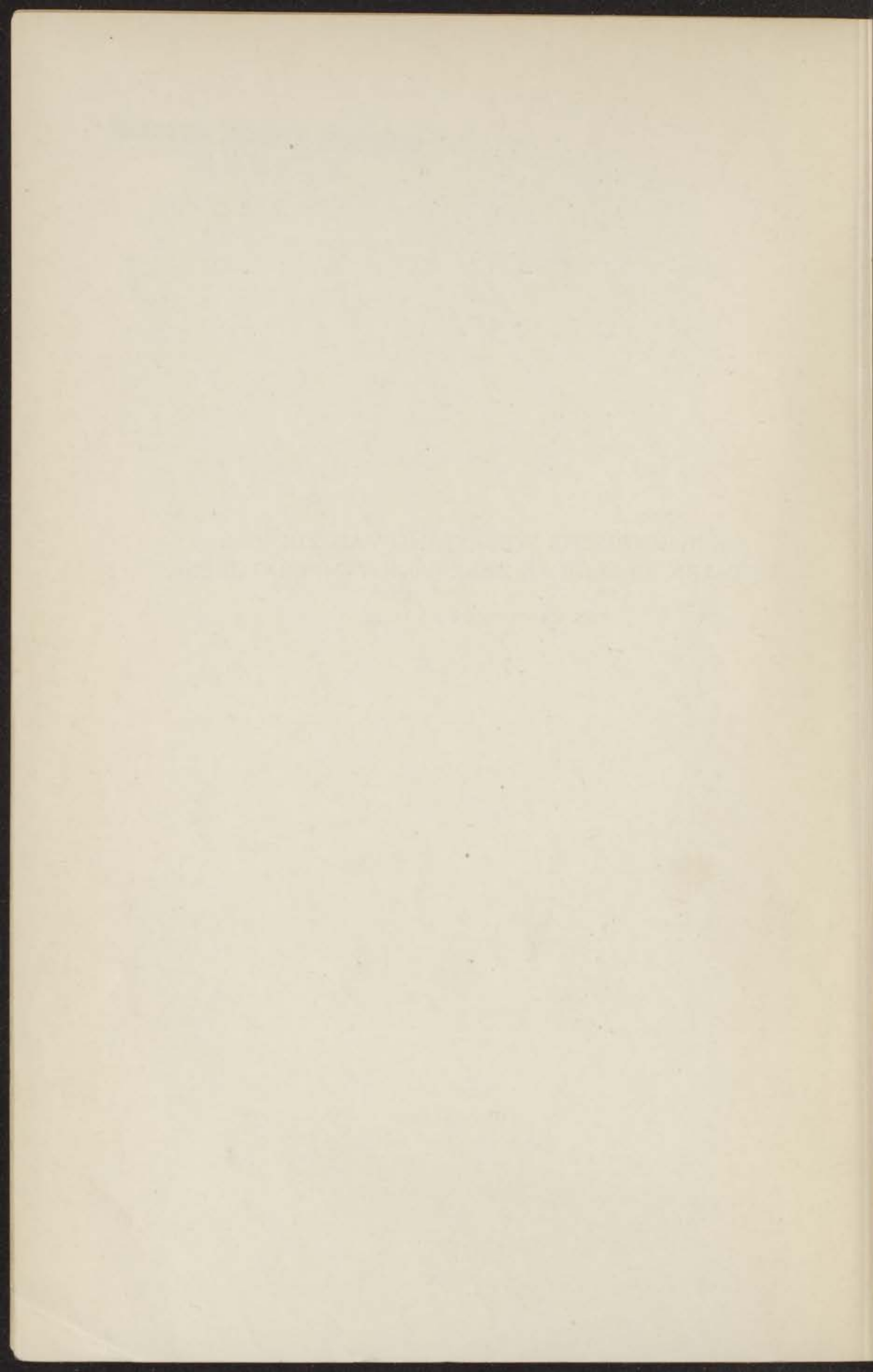
1 369 537 9

A. B. van Arkel



ANORGANISCH CHEMISCH LABORATORIUM  
LEIDEN.

DE ELECTRISCHE WEERSTAND VAN ZUIVERE  
METALEN BIJ LAGE EN ZEER LAGE TEMPERATUREN



DE ELECTRISCHE WEERSTAND  
VAN ZUIVERE METALEN BIJ LAGE  
EN ZEER LAGE TEMPERATUREN

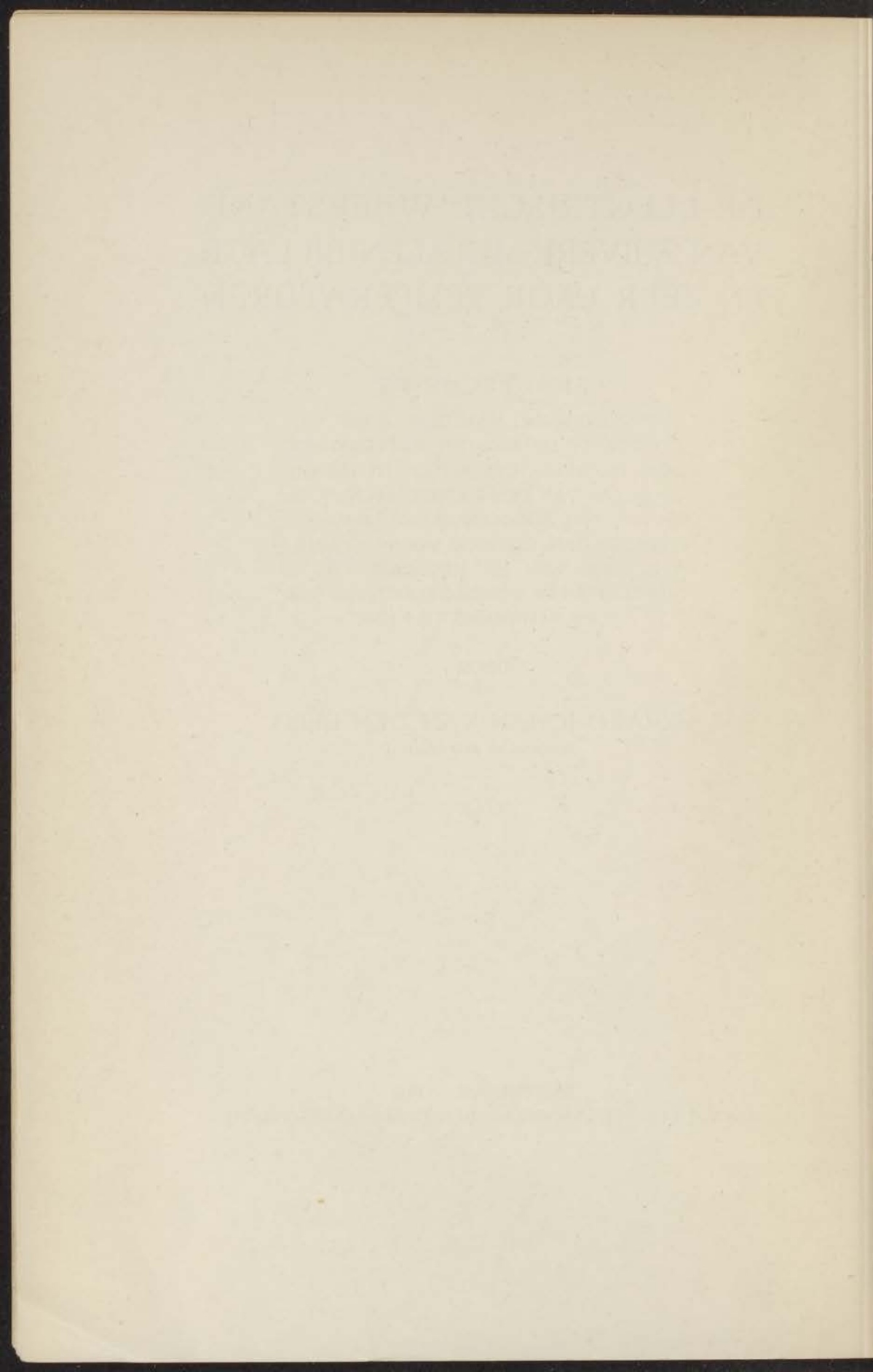
PROEFSCHRIFT

TER VERKRIJGING VAN DEN GRAAD VAN  
DOCTOR IN DE WIS- EN NATUURKUNDE  
AAN DE RIJKSUNIVERSITEIT TE LEIDEN,  
OP GEZAG VAN DEN RECTOR MAGNIFICUS,  
DR. P. C. FLU, HOOGLEERAAR IN DE FACUL-  
TEIT DER GENEESKUNDE, VOOR DE FACUL-  
TEIT DER WIS- EN NATUURKUNDE TE  
VERDEDIGEN OP DINSDAG 11 OCTOBER 1938,  
DES NAMIDDAGS TE 4 UUR

DOOR

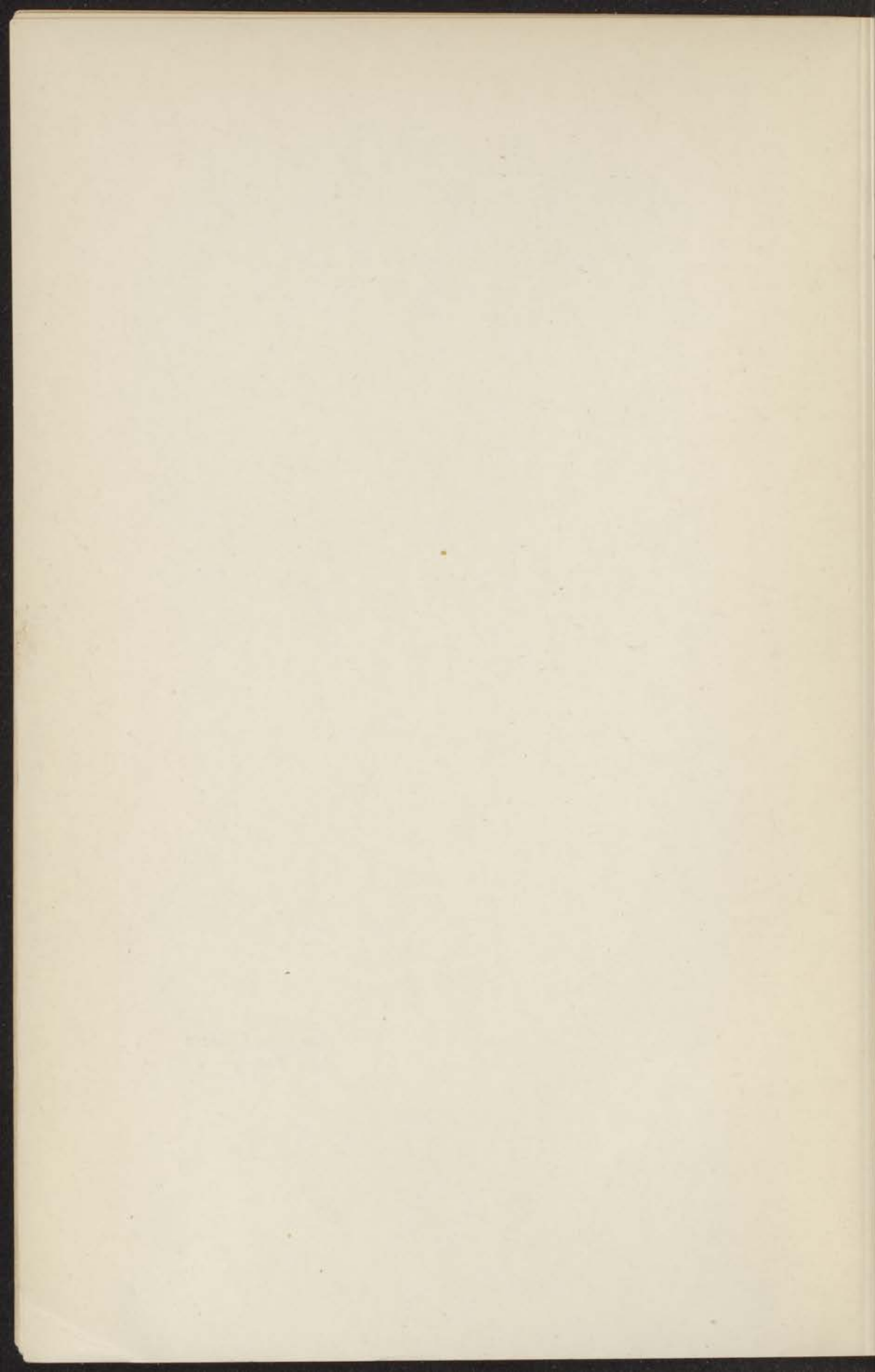
GERARD JOHAN VAN DEN BERG  
GEBOREN TE ROTTERDAM

AMSTERDAM — 1938  
N.V. NOORD-HOLLANDSCHE UITGEVERS MAATSCHAPPIJ

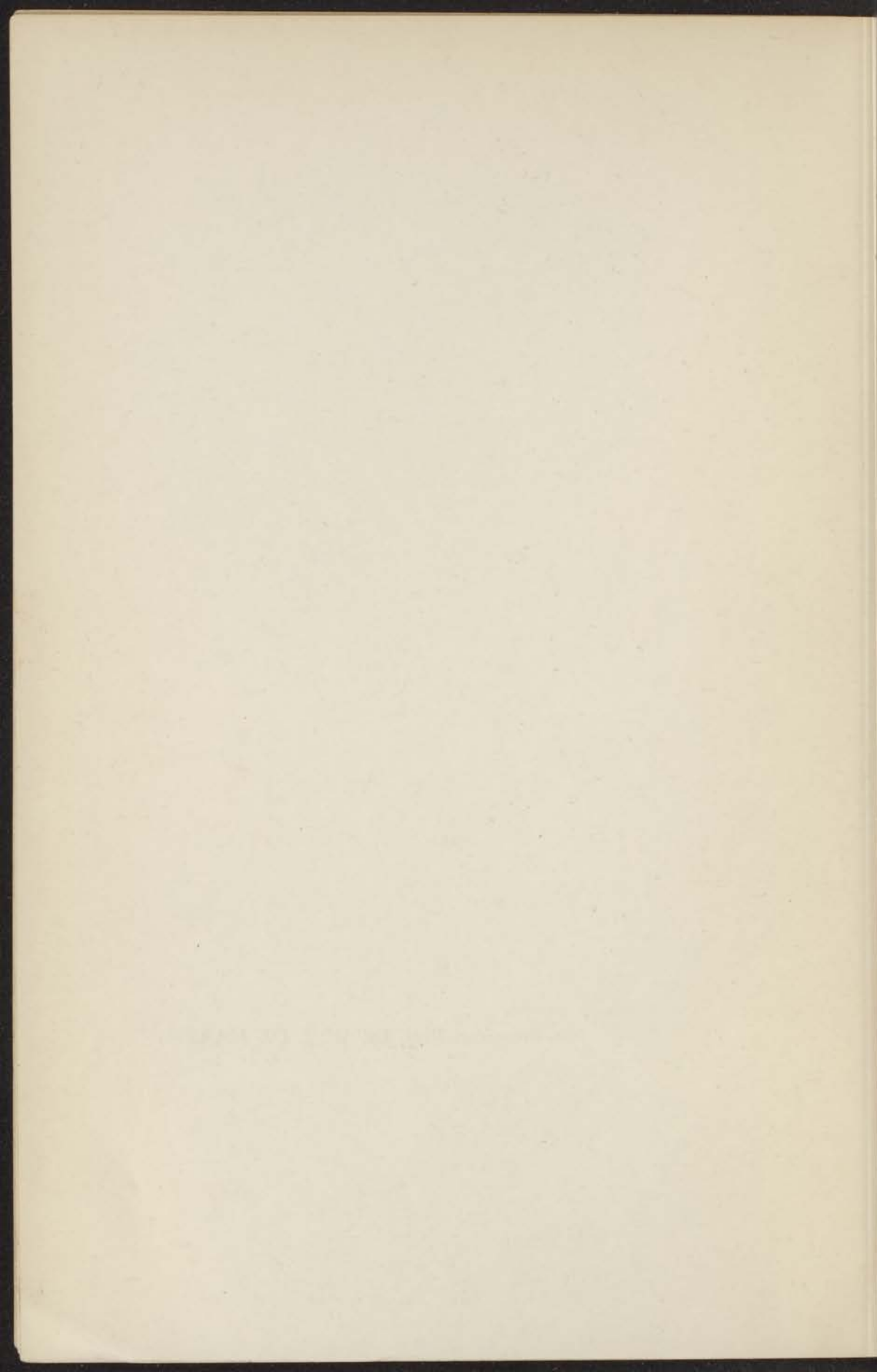




*Aan mijn Ouders*  
*Aan Tonny*



*Promotor: Prof. Dr. W. J. DE HAAS*



# INHOUD

	BLZ.
HOOFDSTUK I. Inleiding . . . . .	1
HOOFDSTUK II. Experimenteele methoden.	
§ 1. Inleiding . . . . .	14
§ 2. De vloeistofcryostaten . . . . .	14
§ 3. Het desorptie-apparaat . . . . .	14
§ 4. Beschrijving van een experiment in het desorptie-apparaat tusschen de tempera- turen van vloeibare waterstof en vloeibaar helium . . . . .	16
§ 5. Enkele experimenten in het desorptie- apparaat met andere adsorbeerende stof	18
§ 6. Beschrijving van een experiment in het desorptie-apparaat tusschen de tempera- turen van vloeibare zuurstof of stikstof en vloeibare waterstof . . . . .	20
§ 7. Bespreking van de experimenten met het desorptie-apparaat . . . . .	23
§ 8. Het demagnetisatie-apparaat . . . . .	25
§ 9. Het meten van den weerstand . . . . .	25
§ 10. De bepaling van $R_0$ . . . . .	25
HOOFDSTUK III. De weerstand van goud als functie van de temperatuur.	
§ 1. Overzicht van de metingen van den elec- trischen weerstand van goud beneden 21° K . . . . .	27
§ 2. Het materiaal . . . . .	35
§ 3. De behandeling van het materiaal en de montage van de draden . . . . .	36
§ 4. Invloed van den tempertijd . . . . .	38
§ 5. Invloed van het omringende gas . . . . .	40
§ 6. De weerstand-temperatuurkrommen tus- schen 1 en 21° K en het minimum in deze krommen . . . . .	45
§ 7. Het verband tusschen de temperatuur en $R/R_0$ van het minimum . . . . .	57
§ 8. Onderzoek naar den invloed van de draad- doorsnede . . . . .	61
§ 9. De regel van MATTHIESSEN en de bepa- ling van den restweerstand . . . . .	69

§ 10. De mogelijkheid om de weerstandskromme van goud voor te stellen met behulp van twee functies van de temperatuur . . . . .	75
§ 11. De weerstand van goud, gemeten bij temperaturen beneden $1^{\circ}$ K . . . . .	76
§ 12. Samenvatting . . . . .	81
<b>HOOFDSTUK IV. De weerstand van zilver als functie van de temperatuur.</b>	
§ 1. Inleiding . . . . .	85
§ 2. Het materiaal en de montage . . . . .	85
§ 3. De metingen en de resultaten . . . . .	86
<b>HOOFDSTUK V. De weerstand van koper als functie van de temperatuur.</b>	
§ 1. Inleiding . . . . .	93
§ 2. Het materiaal en de montage . . . . .	93
§ 3. De metingen en de resultaten . . . . .	94
<b>HOOFDSTUK VI. De weerstand van kalium als functie van de temperatuur.</b>	
§ 1. Inleiding . . . . .	97
§ 2. Het materiaal en de montage . . . . .	97
§ 3. De metingen en de resultaten . . . . .	98
<b>HOOFDSTUK VII. De weerstand van wolfram als functie van de temperatuur</b>	
§ 1. Inleiding . . . . .	105
§ 2. Het materiaal en de montage . . . . .	105
§ 3. De metingen en de resultaten . . . . .	106
<b>HOOFDSTUK VIII. De weerstand van lood als functie van de temperatuur.</b>	
§ 1. Inleiding . . . . .	112
§ 2. Het materiaal en de montage . . . . .	113
§ 3. De metingen en de resultaten . . . . .	113
§ 4. Critiek op de extrapolatie . . . . .	117
§ 5. Het toetsen van de formule van GRÜNEISEN van $7.2$ tot $90^{\circ}$ K . . . . .	119
<b>HOOFDSTUK IX. De weerstand van tin als functie van de temperatuur.</b>	
§ 1. Inleiding . . . . .	125
§ 2. Het materiaal en de montage . . . . .	125
§ 3. De metingen en de resultaten . . . . .	126
<b>SUMMARY . . . . .</b>	<b>131</b>

## HOOFDSTUK I.

### Inleiding.

Het doel van dit proefschrift is het verschaffen van eenige experimenteele gegevens omtrent de wijze, waarop de electricische weerstand bij lage temperaturen afhankelijk is van de absolute temperatuur. Hierbij wordt onder lage temperaturen verstaan die, welke gelegen zijn in het gebied beneden  $20.4^{\circ}$  K. Deze gegevens zullen dan worden vergeleken met de resultaten der theorieën over electriciteitsgeleiding.

WILSON<sup>1)</sup> \*) schrijft in zijn boek „Theory of metals”, aan het begin van het hoofdstuk over het mechanisme van de geleiding:

„It is perhaps unfortunate, that so much attention has been paid to the resistance of metals, since it is probably one of the least characteristic properties of the substance, and depends upon the electronic distribution and the elastic constants in a very complicated way.”

Nu is het juist, dat, wat betreft den specifieke weerstand, de huidige theorieën slechts kwalitatieve verklaringen geven en dat een quantitative berekening vooralsnog onmogelijk geacht moet worden. Zij leiden evenwel tot zeer bepaalde voorspellingen omtrent de afhankelijkheid van den weerstand van de temperatuur.

De eerste wiskundig volledige theorie der electriciteitsgeleiding was die van LORENTZ. Deze kon evenwel geen rekenschap geven van het verband tusschen weerstand en temperatuur; men heeft derhalve later zijn toevlucht genomen tot half-experimenteele formules. De eerste formule van dit type, die ongeveer het verloop van den weerstand bij lage temperaturen kon weergeven, luidde:

$$R \sim T C_p. \dots \dots \dots (1)$$

en werd opgesteld door GRÜNEISEN<sup>2a)</sup> naar aanleiding van op-

---

\*) Deze cijfers verwijzen naar de literatuurlijst, welke aan het eind van ieder hoofdstuk is opgenomen.

merkingen van KAMERLINGH ONNES<sup>3)</sup> en NERNST<sup>4)</sup>. Deze formule geeft bij lage temperaturen een afhankelijkheid van de 4<sup>e</sup> macht van de temperatuur, als men voor  $C_p$  de formule van DEBYE<sup>5)</sup> gebruikt.

De overeenstemming met het experiment werd beter bereikt voor de formule:

$$R \propto T F\left(\frac{T}{\theta}\right) \frac{C_p}{C_v} \quad (2), \quad (\text{GRÜNEISEN } 2b))$$

waarin  $F$  de functie van DEBYE is.

De formule (1) werd het eerst door BRILLOUIN<sup>6)</sup> afgeleid op een manier, die ontleend was aan de berekeningen van EINSTEIN en HOPF<sup>7)</sup> over den stralingsdruk uitgeoefend op een bewegend deeltje met bepaald absorptievermogen door een isotroop veld van zwarte straling. In plaats van dat stralingsveld kiest BRILLOUIN dan het trillingsveld van de atomen en in plaats van het deeltje een electron met gemiddeld absorptievermogen.

GRÜNEISEN<sup>8)</sup> trachtte door vermenigvuldiging met een factor

$$(1 + a_1 T + a_2 T^2)$$

de formule (2) met het experiment bij hooge temperaturen in overeenstemming te brengen.

Na het ontstaan van de nieuwe quantumtheorie werd door verschillende onderzoekers getracht tot een meer volledige theorie der electriciteitsgeleiding te geraken. In 1928 verschenen hierover verhandelingen van HOUSTON<sup>9)</sup>, van FRENKEL en MIROLUBOW<sup>10)</sup> en van BLOCH<sup>11)</sup>. BLOCH heeft getracht een consequent statistische theorie op te stellen, welke dus in zekeren zin als het quantummechanische analogon van de theorie van LORENTZ beschouwd kon worden en zijn verhandeling is het uitgangspunt van de hedendaagse theorie van de electriciteitsgeleiding.

Zooals BORELIUS<sup>12)</sup> kort daarna duidelijk in het licht stelde, waren de door bovengenoemde schrijvers opgestelde formules niet in overeenstemming met de experimenteele gegevens. Hij beschouwde daar echter, wat BLOCH betreft, de door laatstgenoemde oorspronkelijk afgeleide  $T^3$ -wet, welke evenwel op een onjuiste berekening berustte.

In zijn volgende publicatie vond BLOCH een  $T^5$ -wet en vergeleek die met de  $T^4$ -wet van GRÜNEISEN. De metingen van goud wijken



volgens zijn berekening evenver van de  $T^4$ -wet als van de  $T^5$ -wet af.

De bovengenoemde theorieën beperkten zich aanvankelijk tot een *ideaal* rooster en leidden tot het resultaat, dat de weerstand bij het absolute nulpunt nul zou zijn. Experimenteel vindt men in het algemeen, dat de weerstand bij zeer lage temperaturen tot een constante waarde, den z.g. restweerstand, nadert. Reeds MATTHIESSEN<sup>13)</sup> heeft gevonden, dat in het gebied tusschen 0 en 100° C voor draden van hetzelfde metaal, maar van verschillende zuiverheid, het product van specifieke weerstand  $\varrho$  en zijn temperatuurcoëfficiënt  $\beta$  bij een bepaalde temperatuur bij benadering constant is. Algemeener kunnen we schrijven:

$$\varrho\beta = f(T).$$

Door integratie krijgt men:

$$\varrho = F(T) + z,$$

hetgeen wil zeggen, dat de soortelijke weerstand is opgebouwd uit 2 deelen, n.l. een temperatuurafhankelijk deel, den „idealen” weerstand en een temperatuuronafhankelijk deel, dat te wijten zou zijn aan de fysische en chemische verontreinigingen.

Wanneer nu aan dezen regel voldaan is en wanneer men tevens *onderstelt*, dat de weerstand van een ideaal rooster nul wordt bij 0° K, dan is het mogelijk den „idealen” weerstand te berekenen.

In formule wordt deze regel:

$$[R/R_0] = \frac{R/R_0 - z}{1 - z}$$

waarbij  $[R/R_0] = R/R_0$  voor het ideaal zuivere metaal;

$z$  = de restweerstand =  $R/R_0$  voor 0° K;

$R/R_0$  = de verhouding tusschen den gemeten weerstand en den weerstand bij 0° C.

Zooals gezegd mogen we dezen regel eerst toepassen, indien werkelijk gebleken is, dat de weerstand-temperatuurkromme van verschillende draden, verschillend wat fysische en chemische verontreinigingen betreft, over een gelijk bedrag in de richting van de weerstandsordinaat verschoven liggen. Dit is echter zeker voor verschillende metalen niet het geval, bijvoorbeeld voor koper, zooals reeds aangegeven werd zoowel door GRÜNEISEN en GOENS<sup>14)</sup> voor 20° K en 90° K, als door DE HAAS, DE BOER en VAN DEN

BERG<sup>15</sup>) voor het gebied tusschen 14 en 20° K (zie echter hoofdstuk 5). In deze gevallen is het bepalen van een „idealen” weerstand dus niet streng mogelijk.

NORDHEIM<sup>16</sup>) heeft aangetoond, dat voor een niet ideaal rooster de weerstand bij afnemende temperatuur tot een constante waarde nadert en dat voor zeer lage temperaturen de regel van MATTHIESSEN geldt. Ook voor hooge temperaturen kan deze regel worden bewezen; voor het tusschengebied mag men evenwel volgens BETHE<sup>17</sup>) niet verwachten, dat de regel streng zal gelden.

Beschouwen we thans iets nader de afhankelijkheid van den „idealen” weerstand van de temperatuur.

De golfmechanische theorie van BLOCH<sup>11</sup>) geeft voor hoogere temperaturen een evenredigheid met de eerste macht van de temperatuur. Voor het gebied tusschen de lage temperaturen ( $T < \frac{1}{2} \theta$ ) en de hoogere temperaturen ( $T > \frac{1}{2} \theta$ ) werd door BLOCH geen temperatuurfunctie aangegeven. ( $\theta$  = karakteristieke temperatuur van DEBYE.)

In 1930 deelde GRÜNEISEN<sup>18</sup>) op het congres te Leipzig mede, hoe hij, de methode van BRILLOUIN<sup>6</sup>) gebruikende, er in geslaagd was een formule op te stellen, welke voor lage temperaturen aansloot bij de formule van BLOCH<sup>11</sup>) en welke ook voor het tusschengebied den weerstand behoorlijk kon voorstellen.

GRÜNEISEN vindt voor den soortelijken weerstand de uitdrukking:

$$\rho = C \frac{4}{x^5} \int_0^x \frac{\xi^5 d\xi}{(e^\xi - 1)(1 - e^{-\xi})}$$

waarin

$$C = \frac{3}{4} A \frac{N}{n} \left( \frac{k}{e} \right)^2 \theta^2.$$

Hierin is  $N$  = aantal atomen per  $\text{cm}^3$ .

$$\xi = \frac{h\nu}{kT}$$

$$x = \frac{h\nu_m}{kT} = \frac{\theta}{T}$$

$\nu_m$  = grensfrequentie volgens DEBYE.

$n$  = aantal geleidingselectronen per  $\text{cm}^3$ .

De in  $\varrho$  voorkomende integraal vindt men ook in de 2e mededeeling van BLOCH <sup>11)</sup> over het weerstandsverloop bij lage temperaturen, maar deze wordt daar slechts voor den overgang naar het gebied van de zeer lage temperaturen gebruikt.

Door partieele integratie krijgt men:

$$\varrho = C \left\{ \frac{20}{x^5} \int_0^x \frac{\xi^4 d\xi}{e^\xi - 1} - \frac{4}{e^x - 1} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

Voor hooge temperaturen of  $x \ll 1$  volgt hieruit:

$$\varrho = \frac{C}{x} = C \frac{T}{\theta}.$$

Voor lage temperaturen of  $x \gg 1$  volgt:

$$\varrho = 497.7 C \left( \frac{T}{\theta} \right)^5.$$

Bij de theorie van BLOCH krijgt men een dergelijke uitdrukking; alleen heeft C daar een andere beteekenis.

Voor het tusschengebiet kan men reeksontwikkelingen aangeven. GRÜNEISEN volgt daarbij de berekening van de atoomwarmtefunctie van DEBYE <sup>5)</sup>. Daarvoor voert hij in  $\sigma = \frac{\varrho}{T}$ , die voor hooge temperatuur ( $x \ll 1$ ) overgaat in  $\sigma_\infty = \frac{C}{\theta}$ .

Dan krijgt men uit (3):

$$\frac{\sigma}{\sigma_\infty} = \frac{20}{x^4} \int_0^x \frac{\xi^4 d\xi}{e^\xi - 1} - \frac{4x}{e^x - 1} \dots \dots \dots (4)$$

Voor  $x < 2\pi$  kan men schrijven:

$$\frac{\sigma}{\sigma_\infty} = 1 - 4 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{B_n}{(2n)!} \frac{2n-1}{2n+4} x^{2n}.$$

Hierin is  $B_n$  een getal van BERNOULLI, zoodat:

$$\frac{\sigma}{\sigma_\infty} = 1 - \frac{x^2}{18} + \frac{x^4}{480} - \frac{x^6}{15120} + \frac{x^8}{518400} - \frac{x^{10}}{18627840} \dots$$

Deze reeks kan men gebruiken tot  $x < 2.5$  om tot 1 0/100 nauwkeurig te rekenen.

In het gebied van de lage temperaturen krijgt men:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma}{\sigma_\infty} &= \frac{497.7}{x^4} - \frac{4x}{e^x - 1} \\ &- 20x \sum_{n=1}^{\infty} e^{-nx} \left[ \frac{1}{nx} + \frac{4}{(nx)^2} + \frac{12}{(nx)^3} + \frac{24}{(nx)^4} + \frac{24}{(nx)^5} \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

De eerste term van het tweede lid is alleen voldoende voor heel lage temperaturen (grootte waarde van  $x$ ).

Verwaarloozing van de volgende termen geeft voor  $x = 12$  een fout van 2 % en voor  $x = 13$  een fout van 1 % in de waarde van  $\frac{\sigma}{\sigma_\infty}$ .

De eerste term geeft:

$$\frac{\sigma}{\sigma_\infty} = \frac{497.7}{x^4}$$

of

$$\varrho = 497.7 C \left( \frac{T}{\theta} \right)^5.$$

Dit wil dus zeggen, dat men beneden  $\frac{1}{13} \theta$  een aansluiting aan de formule van BLOCH vindt met een onnauwkeurigheid van 1 %.

Dit laatste is van belang met het oog op de conclusies, die enkele theoretici hebben getrokken uit het vergelijken door GRÜNEISEN<sup>18)</sup> van experimenteële met theoretische waarden van  $[R/R_0]$ . Hierbij dienen onder theoretische waarden te worden verstaan die waarden, welke berekend zijn met behulp van formule (5).

WILSON<sup>1)</sup> schrijft namelijk, als hij de experimenteële met de theoretische waarden vergelijkt, in geval van het metaal goud:

„The agreement is really excellent and the  $T^5$ -law for the ideal resistance is in good accord with the measurements which have so far been made on non-superconductors.”

Het eerste deel van zijn bewering is te begrijpen, doch het laatste niet. Immers, de formule van GRÜNEISEN gaat pas beneden  $\frac{1}{13} \theta$  over in die van BLOCH. Dat is dus beneden ongeveer  $13.5^\circ \text{K}$ . De waarnemingen beneden die temperatuur leveren geen voldoende bewijs voor een  $T^5$ -wet.

TABEL 1

Goud ; $\theta = 175$			
$T$ °K	$[R/R_0]$ Meissner	$[R/R_0]$ K. Onnes en Clay	$[R/R_0]$ berekend
20.4	0.0057 <sup>2</sup>	0.0059	0.00604
18.0		0.0035	0.00346
14.3		0.00137	0.00117
12.1		0.00048	0.00051
11.1		0.00030	0.00033
4.2	0.00000 <sup>3</sup>		0.000002 <sup>6</sup>

TABEL 2

Koper ; $\theta = 333$		
$T$ °K	$[R/R_0]$ Meissner	$[R/R_0]$ berekend
20.4	0.00051	0.000553
4.2	0.00000	0.00000
1.3	0.00000	0.00000

GRÜNEISEN<sup>18)</sup> zelf merkte reeds op in zijn eerste mededeeling, dat tusschen  $4.2$  en  $20.4^\circ \text{K}$ . het gewichtigste temperatuurinterval voor de beslissing tusschen een vierde of een vijfde-macht wet, in dat jaar (1930) nog geen voldoende metingen verricht waren.

MOTT en JONES<sup>19)</sup> vergelijken ook de formule van GRÜNEISEN met het experiment en wel met de metingen van den weerstand van koper, besproken door MEISSNER<sup>20)</sup> in zijn artikel in het „Handbuch der Experimental Physik“. Dit zijn dezelfde metingen als die, welke GRÜNEISEN vergeleek met zijn formule; alleen gebruikte hij voor  $\theta$  de waarde 330, terwijl MEISSNER 333 koos.

Voor de lage temperaturen zegt dit evenmin veel, zooals blijkt uit tabel 2.

FRÖHLICH<sup>21)</sup> daarentegen schrijft:

„Die Temperaturabhängigkeit  $\sigma \propto T^{-5}$  \*) ist vermutlich in guter Uebereinstimmung mit der Erfahrung. Mit Sicherheit ist das  $T^5$ -Gesetz jedoch noch nicht nachgewiesen.“

Dit standpunt is wel het veiligste, gezien de experimenten, welke toen (1936) bekend waren.

Bij het toetsen van formule (3) van GRÜNEISEN bleken  $Pd$  en  $Pt$  een uitzondering te vormen. Het verloop van de weerstand-

\*)  $\sigma$  = geleidingsvermogen.

temperatuurkromme voor deze metalen was niet behoorlijk weer te geven met behulp van (3).

Voor het toetsen van (3) werden door GRÜNEISEN metingen uit Berlijn en Leiden gebruikt. De metingen uit Toronto, verricht door MC. LENNAN, HOWLETT en WILHELM<sup>22)</sup>, zijn niet te gebruiken voor een contrôle van een formule, daar de onderzochte metalen niet zeer zuiver waren en de weerstanden slechts bij het kookpunt van waterstof en 2 helium-temperaturen (tot 2.2° K) werden gemeten.

DE HAAS en VOOGD<sup>23)</sup> hebben in een rapport voor het „Congrès International d'Electricité" een overzicht gegeven van de metingen bij lage temperaturen betreffende den elektrischen weerstand van zuivere metalen als functie van de temperatuur. De resultaten van enkele ongepubliceerde metingen zijn hierbij gebruikt.

Zij zetten in dit overzicht de  $\log. R/R_\theta$  uit als functie van  $\log. \frac{T}{\theta}$  voor verschillende metalen, n.l. *Au, Ag, Cu, Pb, Pt* en *K, Na, W*. Het volgende valt uit dit overzicht op te merken:

10. Voor de tusschenliggende temperaturen kan men in het algemeen door het kiezen van een geschikte  $\theta$  (karakteristieke temperatuur) de krommen voor de verschillende metalen doen samenvallen.
20. Men kan dan tamelijk goed die krommen voorstellen met behulp van de formule (2) van GRÜNEISEN:  $\rho = TF \left( \frac{T}{\theta} \right) \frac{C_p}{C_v}$ .
30. De waarden van  $\theta$  zijn iets hooger dan die, welke volgen uit de soortelijke warmte-metingen.

DE HAAS en VOOGD bepalen voor de verschillende metalen de waarden van  $B$  uit de formule, die zou gelden beneden 0,1  $\theta$ :

$$\rho = A T^B,$$

Voor goud en zilver vinden zij een waarde van 4.2, voor platina een waarde tusschen 3.0 en 3.5 en voor kalium 2.8, terwijl ze voor koper een voorloopige waarde 4.5 vinden voor  $B$ .

Voor enkele metalen met anisotropooster geven zij een waarde voor  $B$  tusschen 2.1 en 3.8.

Uit dit rapport kan men zeker niet tot een  $T^5$ -wet besluiten.

Daar de formule (3) van GRÜNEISEN niet goed het verloop bij hoge temperaturen weergaf, trachtte hij dit te verbeteren door vermenigvuldiging met een term  $[1 + a_1 T + a_2 T^2]$  <sup>24)</sup>. Wat goud betreft, laten we in tabel 3 zien wat de invloed is van dezen term.

TABEL 3.

$T$ °K	$[10^4 R/R_0]$ berekend I	$[10^4 R/R_0]$ Meissner	$[10^4 R/R_0]$ K. Onnes en Clay	$[10^4 R/R_0]$ berekend II
20.4	60.4	57.2	59.0	57.7
18.0	34.6		35.0	33.1
14.3	11.7		13.7	11.1
12.1	3.3		3.0	3.2
4.2	0.02 <sup>6</sup>	0.0 <sup>3</sup>	—	0.02 <sup>5</sup>

berekend I wil zeggen, dat de formule (3) van Grüneisen werd gebruikt.  
berekend II wil zeggen, dat vermenigvuldigd werd met den correctieterm.

Deze bleek voor de lage temperaturen ook nog een betere overeenstemming tengevolge te hebben.

Een theoretische achtergrond was er niet, al trachtte GRÜNEISEN zijn methode aannemelijk te maken door de opmerking, dat volgens BORN en BRODY <sup>25)</sup> de energie-inhoud van het metaal bij hoogere temperatuur een factor  $(1 + bT)$  krijgt tengevolge van het anharmonische karakter van de atoomtrillingen.

De karakteristieke temperatuur  $\theta$ , noodig voor een goede overeenstemming met de experimenteele gegevens, kwam volgens GRÜNEISEN nu beter overeen met die uit de soortelijke warmte.

De weerstandskrommen van  $Pd$  en  $Pt$  bleken ook nu niet aan de GRÜNEISEN-formule te voldoen. Volgens GRÜNEISEN zouden ze veeleer de  $T^4$ -wet volgen.

Uit het hierboven besprokene ziet men, dat het aanbeveling verdiende weerstandsmetingen te verrichten in het temperatuurgebied tusschen vloeibaar helium en vloeibare waterstof, daar overduidelijk gebleken was, dat het experimenteel materiaal veel te schraal was om de theoretische en half-theoretisch-empirische formules te kunnen verifiëren. De eerste metingen werden verricht in het Kamerlingh Onnes-Laboratorium. Door DE HAAS en DE BOER <sup>26)</sup> was de mogelijkheid geopend in dit temperatuurgebied te meten.

Het eerst werd door hen <sup>27)</sup> platina gemeten met een kleinen

restweerstand ( $\approx 4 \times 10^{-4}$ ). De „ideale” weerstand, berekend volgens MATTHIESSEN, bleek echter geen functie van  $T^5$  te zijn, maar een functie van  $T^2$  bij de lage-, van ongeveer  $T^3$  bij iets hogere temperaturen en van  $T^4$  bij ongeveer  $20^\circ$  K.

BABER<sup>28)</sup> heeft zich met deze metingen nader bezig gehouden en den „idealen” weerstand voorgesteld als een functie van  $T^2$  en van  $T^5$ .

$$[R/R_0] = A T^2 + B T^5.$$

Hij berekende de bijdrage van de onderlinge werking der electronen tot den weerstand in het geval van *Pt* en toonde aan, dat die bijdrage evenredig was met  $T^2$ . Tot  $10^\circ$  K zou die  $T^2$  domineeren.

Algemeener zou men den weerstand van *Ni*, *Pd* en *Pt* (die niet aan de formule (3) van GRÜNEISEN voldoen) volgens MOTT en JONES<sup>19)</sup> kunnen voorstellen door een formule van den vorm:

$$[R/R_0] = A T^2 + R_G.$$

waarbij  $R_G$  de weerstand is volgens de formule (3) van GRÜNEISEN.

De eerste weerstandsmeting in het gebied tusschen de temperaturen van helium en waterstof en in deze beide vloeistoffen, heeft dus, gelijk men boven ziet, nieuw theoretisch werk tengevolge gehad.

Door DE HAAS, DE BOER en VAN DEN BERG werd verder gemeten de weerstand van goud<sup>15)</sup>, lood<sup>15)</sup>, cadmium<sup>29)</sup>, thallium<sup>29)</sup> en tin<sup>29)</sup>.

Het eerstgenoemde metaal vertoonde in het heliumgebied een minimum in strijd met het gedrag van andere metalen en met de theorie van NORDHEIM.

De „ideale” weerstand van lood bleek beneden  $20^\circ$  K te kunnen worden voorgesteld met behulp van de formule van GRÜNEISEN, die overgaat in de formule van BLOCH bij lage temperaturen<sup>15)</sup>. Historisch kan hierbij worden opgemerkt, dat NERNST<sup>4)</sup> reeds in 1911 een formule publiceerde, welke merkwaardig goed de experimenten weergaf<sup>\*</sup>).

De metalen cadmium en thallium gaven geen geheele macht van

\*) Zie ook Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden, No. 119b, 1911 van H. KAMERLINGH ONNES.



*T.* De kromme op logarithmische schaal was niet recht, maar flauw *S*-vormig.

De polykristallijnen draden van tin hadden een „idealen” weerstand, welke ongeveer evenredig was met  $T^4$ .

In dit proefschrift worden besproken: de metingen van den weerstand van verschillende gouddraden in verband met het minimum in de weerstand-temperatuurkromme <sup>30)</sup> (gemeten werd ook het oploopen van den weerstand tot bij heel lage temperaturen beneden  $1^\circ$  K, waarbij deze temperaturen verkregen werden door demagnetisatie van paramagnetische zouten <sup>31)</sup>) en verder de metingen van looddraden, koperdraden, zilverdraden, tin-eenkristallen, wolfram-eenkristallen en kaliumdraden in glas.

Hierbij kunnen dan de volgende theoretische kwesties worden bestudeerd:

- a. het al of niet bestaan van een constanten restweerstand en de geldigheid van den regel van MATTHIESSEN bij lage temperaturen (theorie van NORDHEIM);
- b. de  $T^5$ -wet voor den „idealen” weerstand;
- c. de formule van GRÜNEISEN voor het geheele temperatuurgebied.

De onderzoekingen werden door mij verricht onder leiding van Prof. DE HAAS in het Kamerlingh Onnes Laboratorium.

Voor de hulp bij de metingen betuig ik mijn hartelijken dank aan den Heer C. E. MULDER, nat. phil. drs., aan Mej. J. KOOLHAAS, nat. phil. cand<sup>a</sup> en aan den Heer E. E. F. ZWEERS, nat. phil. drs.

## LITERATUUR.

- 1) A. H. WILSON, *The Theory of Metals*, Cambridge, 1936.
- 2) E. GRÜNEISEN, (a) *Verh. dtsh. Phys. Ges.* **15**, 186, 1913; (b) *Verh. dtsh. phys. Ges.* **20**, 36, 1918; *Phys. Z.* **19**, 382, 1918.
- 3) H. KAMERLINGH ONNES, *Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden.* No. 119b, 1911.
- 4) W. NERNST, *S. B. Akad. Wiss. Berlin*, 1911, p. 306.
- 5) P. DEBYE, *Ann. Phys. (4)* **39**, 789, 1912.
- 6) L. BRILLOUIN, *Atomes et Electrons. Rapp. et discussions du Conseil Solvay 1921, Paris 1923*, p. 192.
- 7) A. EINSTEIN en L. HOPF, *Ann. Phys.* **33**, 1115, 1910.
- 8) E. GRÜNEISEN, *Handb. d. Physik* **13**, 22, 1928.
- 9) W. V. HOUSTON, *Z. Phys.* **48**, 449, 1928; *Phys. Rev.* **34**, 279, 1928.
- 10) J. FRENKEL en N. MIROLUBOW, *Z. Phys.* **49**, 885, 1928.
- 11) F. BLOCH, *Z. Phys.* **52**, 555, 1929 (a); **59**, 208, 1930 (b).
- 12) G. BORELIUS, *Z. Phys.* **54**, 806, 1929.
- 13) A. MATTHIESSEN, *Ann. Physik. Chem. (Poggendorffsche Folge)* **110**, 190, 1860.  
A. MATTHIESSEN en G. VOGT, *Ann. Physik. Chem. (Poggendorffsche Folge)* **122**, 19, 1864.
- 14) E. GRÜNEISEN en E. GOENS, *Z. Phys.* **44**, 615, 1927.
- 15) W. J. DE HAAS, J. DE BOER en G. J. VAN DEN BERG, *Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden* No. 233b; *Physica, 's-Grav.* **1**, 1115, 1933—34.
- 16) L. NORDHEIM, *Ann. Physik. (5)* **9**, 641, 1931.
- 17) BETHE, *Handbuch der Physik.* 24—2 (2de druk), Berlin 1933.
- 18) E. GRÜNEISEN, *Leipziger Vorträge* 1930.
- 19) N. F. MOTT en H. JONES, *The Theory of the Properties of Metals and Alloys*, Clarendon Press, 1936.
- 20) W. MEISSNER, *Handb. der Exp. Physik* **11** (2), 1935, p. 50.
- 21) H. FRÖHLICH, *Elektronentheorie der Metalle* 1936.
- 22) J. C. MC. LENNAN, L. E. HOWLETT en J. O. WILHELM, *Trans. roy. Soc. Canada* **23**, III, 287, 1929.
- 23) W. J. DE HAAS en J. VOOGD, *Rapport No. 10 Congrès Internat. d'Electricité, Paris 1932; Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden, Suppl. 73b*, 1933.
- 24) E. GRÜNEISEN, *Ann. Physik.* **16**, 530, 1933.
- 25) M. BORN en E. BRODY, *Z. Phys.* **6**, 132, 1921.
- 26) J. DE BOER, *Diss., Leiden*, 1935.
- 27) W. J. DE HAAS en J. DE BOER, *Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden.* No. 231c; *Physica, 's-Grav.* **1**, 609, 1933—34.

- 28) W. G. BABER, Proc. roy. Soc., London, A. **158**, 383, 1937.
  - 29) W. J. DE HAAS, J. DE BOER en G. J. VAN DEN BERG, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden, No. 236d; Physica, 's-Grav. **2**, 453, 1935.
  - 30) W. J. DE HAAS en G. J. VAN DEN BERG, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden, No. 241d en 249b; Physica, 's-Grav. **3**, 440, 1936 en **4**, 683, 1937.
  - 31) W. J. DE HAAS, H. B. G. CASIMIR en G. J. VAN DEN BERG, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden, No. 251c; Physica, 's-Grav. **5**, 225, 1938.
-

## HOOFDSTUK II.

### Experimenteele methoden.

#### § 1. *Inleiding.*

Het temperatuurgebied, waarin voor dit proefschrift metingen werden verricht, kan men in de volgende deelen scheiden:

1. het gebied van de vloeibare zuurstof: 90—54° K.
2. het gebied van de vloeibare en vaste stikstof: 77—46° K.
3. het gebied te bereiken met het desorptie-apparaat: 46—29° K.
4. het gebied van de vloeibare waterstof: 20.4—14.2° K.
5. het gebied van de vaste waterstof: 14.2—9.2° K.
6. het gebied te bereiken met het desorptie-apparaat: 9.2—4.0° K.
7. het gebied van het vloeibare helium: 4.2—1.1° K.
8. het gebied te bereiken met het demagnetisatie-apparaat:  
1.1—0.03° K.

#### § 2. *De vloeistofcryostaten.*

Voor de in de vorige paragraaf genoemde metingen in de gebieden 1, 4 en 7 werd gebruik gemaakt van de gewone vloeistofcryostaten, bestaande uit twee of drie Dewarglazen. In het geval 1 en 4 werd de temperatuur bepaald met behulp van een platina-thermometer, *Pt 58'*, welke via een standaardthermometer tegen den heliumgasthermometer was gecalibreerd. Voor gebied 7 werd echter de temperatuur bepaald uit de dampspanning van het helium. De gegevens hiervoor werden ontleend aan metingen van KEESOM en zijn medewerkers <sup>1)</sup>.

#### § 3. *Het desorptie-apparaat.*

In 1926 gaf SIMON <sup>2)</sup> aan, dat het mogelijk was door middel van desorptie van gassen, tevoren aan kool geadsorbeerd, lage temperaturen te verkrijgen. Zijn doel was deze methode te gebruiken voor het vloeibaar maken van gassen. Eenigen tijd later ging SIMON echter voor dit doel tot de z.g. expansiemethode over <sup>3)</sup>.

DE HAAS en DE BOER <sup>4)</sup> gebruikten de methode echter voor een ander doel en wel om de temperaturen tusschen die van de vloeibare

en vaste waterstof en van vloeibaar helium te overbruggen. Het apparaat, dat zij construeerden, wordt in fig. 1 weergegeven.

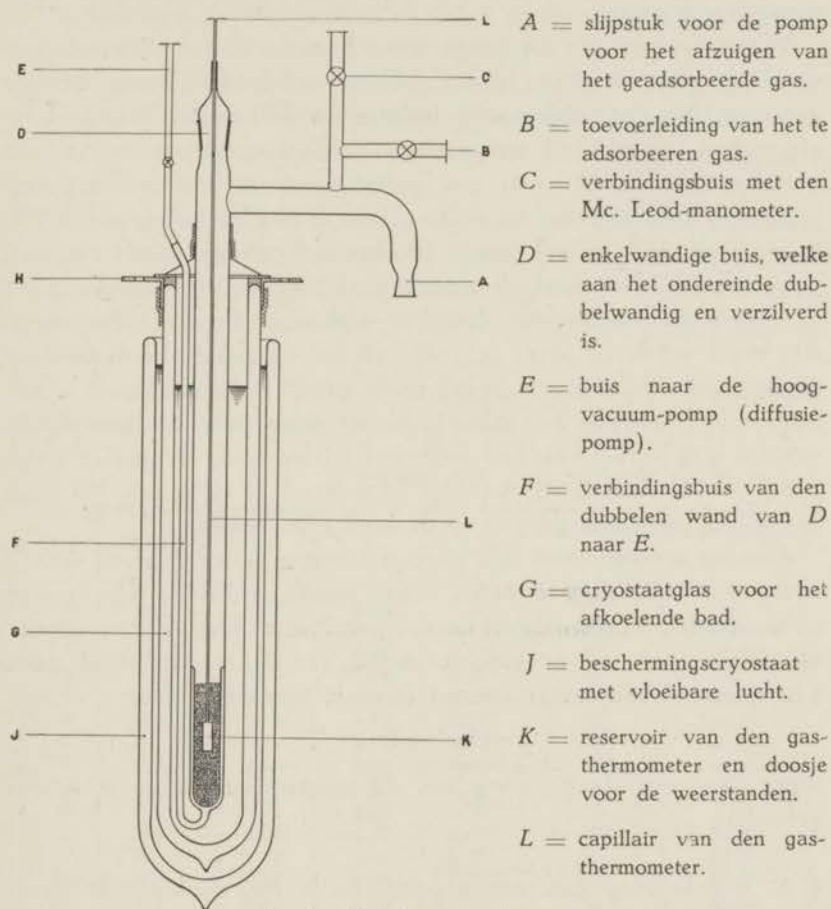


Fig. 1. Het desorptie-apparaat.

Als adsorptiemiddel dient kool (A. K. T.) \*). Deze kool wordt gekoeld door een vast of vloeibaar gas in glas G. De keuze van dit gas hangt af van het temperatuurgebied, dat men overbruggen wil. In den dubbelen wand van D wordt voor het warmtecontact een gas toegelaten, dat men gemakkelijk weer kan wegpompen. Men

\*) I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft, Leverkusen.

laat door de kool gas adsorberen (de keuze van het te adsorberen gas hangt af van het te bereiken temperatuurgebied), waarbij de temperatuur stijgt.

Wanneer tenslotte de temperatuur van de kool constant is geworden, wordt tusschen den dubbelen wand van  $D$  een vacuum gepompt. Na deze thermische isolatie wordt het gas van de kool afgepompt, waarbij de temperatuur daalt. De temperatuur wordt gemeten met behulp van een gasthermometer met roodkoperen reservoir. Dit reservoir en de te meten draad bevinden zich beide in de kool; het geheel wordt omgeven door een zakje van fijn geweven stof. Dit maakt het mogelijk het geheel uit den cryostaat te lichten om den te meten draad en de kool te kunnen verwisselen. Als regel wordt na ieder gebruik van het toestel de kool opnieuw geactiveerd, waarna deze in het zakje wordt gedaan. Hierna wordt zoo spoedig mogelijk het zakje in het apparaat gebracht; vervolgens worden met behulp van een dubbele Pfeiffer-pomp de gassen weggepompt. De druk is na twee uur ongeveer  $5 \times 10^{-5}$  mm. Na deze handeling laat men een gas op de kool adsorberen.

Aan het reservoir van den gasthermometer is een koperen doosje bevestigd, waarin de te meten draad wordt geplaatst. Eén van de stroomdraden wordt aan dit doosje gesoldeerd. De gasthermometer wordt gecalibreerd in vloeistofbaden (er is in dit geval geen adsorptiekool aanwezig) en een formule van den vorm:

$$p = a + bT + cT^2$$

dient dan voor de bepaling van de temperatuur in de tusschengebieden.

#### § 4. *Beschrijving van een experiment in het desorptie-apparaat tusschen de temperaturen van vloeibare waterstof en vloeibaar helium.*

In het desorptie-apparaat kunnen we de temperatuurgebieden 5 en 6 tegelijk bereiken. Dit gebeurt als volgt:

In glas  $G$  wordt vloeibare waterstof gebracht en de dampdruk gereduceerd tot 10 cm kwikdruk. We laten door de kool heliumgas adsorberen. Wanneer de temperatuur constant is geworden, wordt de weerstand van den draad gemeten. We hebben dan een temperatuur, welke ook bereikt kan worden in den gewonen vloeistof-

cryostaat met waterstof en kunnen dus de onderlinge aansluiting van de verschillende gebieden controleren.

De druk van de waterstof in *G* wordt zoodanig geregeld, dat we temperaturen bereiken van b.v. 13, 11 en 9.2° K.

Metingen op dergelijke manier verricht, zijn aangegeven door „HS”, terwijl die, welke in de vloeibare waterstof geschieden, door „H” en de metingen, welke gedurende het desorptieproces gedaan werden, door „S” zijn aangegeven.

Na de meting bij 9.2° K wordt tusschen den dubbelen wand van *D* een vacuum gepompt en daarna wordt het helium van de kool afgepompt met behulp van een dubbele Pfeiffer-pomp. Het heliumgas stroomt weer terug in den gashouder, van waar uit het via *B* op de kool was toegelaten.

De temperatuur daalt bij deze adsorptie dan tot op ongeveer 4° K (voor de juiste gegevens zie tabel 3).

TABEL 4.

No.	Metaal	T <sub>b</sub>	T <sub>e</sub>	T <sub>e</sub> /T <sub>b</sub>	Hoeveelheid He in liters	Gewicht kool in grammen
1	Au <sub>5</sub>	9.53	4.88	0.51 <sup>2</sup>	33	—
2	Au <sub>3</sub>	9.31	4.00	0.43 <sup>9</sup>	50	40.50
3	Ag <sub>2</sub>	9.26	4.09	0.44 <sup>2</sup>	50	37.50
4	Ag <sub>1</sub>	9.19	4.01	0.43 <sup>6</sup>	50	—
5	Au <sub>6a</sub>	9.32	4.05	0.43 <sup>3</sup>	50	43.30
6	Ag <sub>3</sub>	9.33	3.99	0.42 <sup>8</sup>	50	50.00
7	Pb <sub>4</sub>	9.19	3.92	0.42 <sup>7</sup>	50	46.20
8	Au <sub>11</sub>	9.10	3.89	0.42 <sup>7</sup>	50	40.38
9	Au <sub>10</sub>	9.15	3.91	0.42 <sup>7</sup>	50	—
10	W <sub>2</sub>	9.20	4.66	0.50 <sup>7</sup>	50	—
11	W <sub>v</sub>	9.19	4.17	0.45 <sup>4</sup>	50	54.13
12	K <sub>1</sub>	9.14	3.96	0.43 <sup>3</sup>	50	52.68
13	W <sub>v</sub>	9.17	4.03	0.43 <sup>9</sup>	50	43.25
14	W <sub>2</sub>	9.22	4.02	0.43 <sup>6</sup>	50	46.84
15	Pb	9.25	3.95	0.42 <sup>7</sup>	50	50.59
16	Pb	11.51	4.90	0.42 <sup>6</sup>	50	50.59
17	K <sub>3</sub>	9.26	4.08	0.44 <sup>1</sup>	50	44.66
18	Pb <sub>L</sub>	13.08	6.67	0.51 <sup>0</sup>	50	—
19	Sn <sub>4</sub>	9.27	4.24	0.45 <sup>7</sup>	50	42.96
20	Sn <sub>3</sub>	9.22	4.15	0.45 <sup>0</sup>	50	42.58

Daarna stijgt de temperatuur met een snelheid van ongeveer 0.01 graad per minuut. Bij deze snelheid is het wel mogelijk weerstanden te meten, maar beter is het de volgende methode toe te passen:

Na de eerste desorptie daalt de temperatuur eerst en stijgt daarna weer. Men krijgt dus een minimum. In dat minimum nu wordt de weerstand gemeten, d.w.z. men meet den weerstand te beginnen bij den dalenden tak en blijft meten totdat men op den stijgenden tak is gekomen. De temperatuur in dat minimum varieert met slechts enkele duizendste graden per minuut.

Daarna laat men weer wat gas door de kool adsorbeeren, terwijl de pomp even stil staat. Eerst stijgt de temperatuur, doch als we de pomp weer laten werken, treedt een daling in en gaat de temperatuur weer door een minimum, dat evenwel iets hooger ligt dan het vorige.

Door telkens wat gas toe te laten, kan men bijvoorbeeld telkens de temperatuur een graad verhoogen en in het minimum meten. Daar de laagste temperatuur beneden het kookpunt van helium ligt, hebben we ook aan de onderzijde van het gebied een punt ter controle van de aansluiting aan de metingen in vloeibaar helium.

#### § 5. *Enkele experimenten in het desorptie-apparaat met andere adsorbeerende stof.*

Hiervoor komt kwartspoeder wegens zijn groot adsorptievermogen het eerst in aanmerking. Het kwartzand werd tot ongeveer  $500^{\circ}$  C verhit en daarna in het zakje in het apparaat gebracht, waarvan de druk tot  $10^{-4}$  mm kwikdruk kon worden gebracht. Het zakje was van een dicht geweven stof gemaakt, om te voorkomen, dat het zand door de stof zou glippen en krasjes op het glas zou veroorzaken.

Bij een temperatuur van  $9.1^{\circ}$  K liet men heliumgas adsorbeeren. Toen het heliumgas afgepompt werd, daalde de temperatuur zeer snel. De druk van den gasthermometer, vlak voor het minimum, was 3.6 cm.

Indien we de druk-temperatuurkromme of de formule van den gasthermometer tot aan dien druk extrapolereen, dan zou daarbij een temperatuur van  $1.3^{\circ}$  K behooren. Een heliumdampdruk van 3.6 cm komt echter overeen met  $2^{\circ}$  K. De nulpuntsvulling van den thermometer was derhalve voor deze proef te hoog.

Na het bereiken van het minimum steeg de temperatuur zeer snel en in korten tijd was de badtemperatuur weer bereikt. Herhaling van het experiment gaf hetzelfde resultaat.

Een ander experiment werd uitgevoerd met een mengsel van



kwartzand en kool van ongeveer 31 gram kool tegen 65 gram kwartzand. Het zand vulde de ruimten tusschen de koolkorrels op. In fig. 2 is te zien, hoe de temperatuur in den loop van het experiment verandert tengevolge van verschillende handelingen met het apparaat verricht.

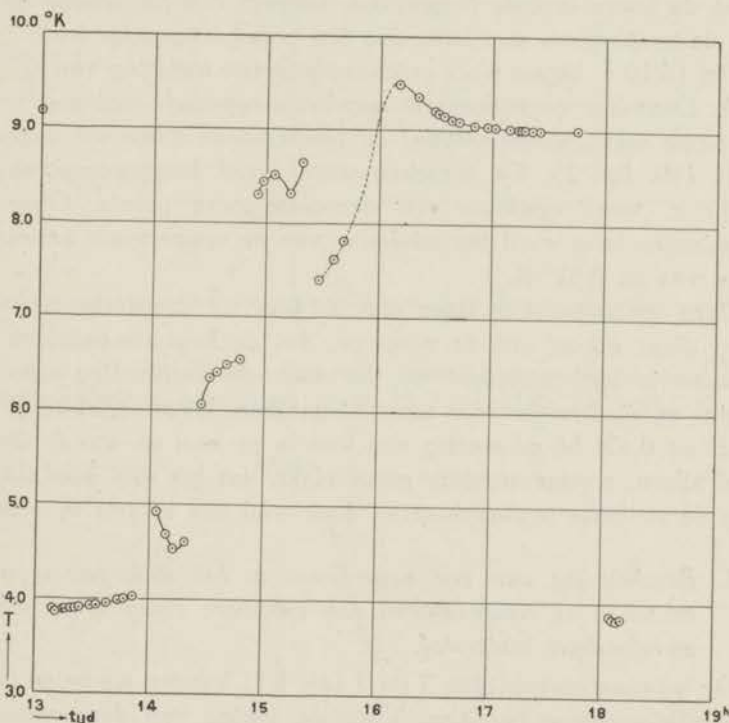


Fig. 2. De temperatuur van het mengsel kwartzand-kool als functie van den tijd.

Er werden met dit mengsel verschillende proeven gedaan. Bij een dezer proeven werd uitgegaan van een begintemperatuur van het mengsel kwartzand-kool van  $9.2^{\circ}$  K; de begindruk van het helium was 76 cm. Vervolgens werd gedesorbeerd tot 0.02 cm druk. Daarna werd om 13.55 u. een hoeveelheid helium toegelaten en steeg de temperatuur plotseling. Om 14.04 u. daalde de temperatuur weer, daar gedesorbeerd werd. In figuur 2 kan men dit volgen. Om 14.20 u. werd opnieuw helium toegelaten; daarna werd om 14.25 u. de kraan in buis *B* (een shunt op de pompleiding)

gedeeltelijk opengezet en de snelheid van de temperatuurstijging geregeld op 0.02 graad per minuut. Vervolgens werd om 14.50 u. een derde hoeveelheid helium toegelaten en juist op het moment, waarop de temperatuur weer ging dalen, werd er heliumgas in den tusschenwand gelaten. De temperatuur steeg weer, maar om 15.25 u. werd de kraan in buis *B* gesloten, hetgeen een plotselinge daling van de temperatuur met méér dan één graad tengevolge had.

Om 16.10 u. begon weer een adsorptie (na toelating van heliumgas). Daar het warmtecontact met het omgevende bad nog steeds aanwezig was, moest evenwel de temperatuur dalen tot ongeveer  $9^{\circ}$  K (zie fig. 2). De tusschenmantel werd leeggepompt en om 17.50 u. vond opnieuw een desorptieproces plaats. Ongeveer 19 minuten later werd het minimum van de temperatuur bereikt en deze was nu  $3.82^{\circ}$  K.

Deze temperatuur is lager dan bij kool tot dusver bereikt was. Men dient echter niet te vergeten, dat de begintemperatuur een grooten invloed uitoefent en dat men de verhouding tusschen begin- en eindtemperatuur moet vergelijken. Deze verhouding was  $0.42^0$  en  $0.42^4$  bij de meting met kwarts en kool en was  $0.42^8$  met kool alleen, zoodat uit deze proef blijkt, dat het niet noodzakelijk was de methode te compliceeren door kool met kwarts te mengen.

§ 6. *Beschrijving van een experiment in het desorptie-apparaat tusschen de temperaturen van vloeibare zuurstof of stikstof en vloeibare waterstof.*

De temperatuurgebieden 2 en 3 (zie § 1) kunnen we beide in het desorptie-apparaat bereiken. Voor de meting van den weerstand van een loodthermometer  $Pb_L$  (zie hoofdstuk 8) moest het gebied tusschen vloeibare zuurstof of stikstof en vloeibare waterstof worden overbrugd. Dit gelukte niet volkomen.

We trachtten het als volgt te bereiken:

In het vacuümglas *G* werd vloeibare zuurstof gebracht, terwijl wij door de kool waterstof lieten adsorbeeren. We maten enkele punten beneden  $60^{\circ}$  K in het vloeibare zuurstofgebied om den gasthermometer te kunnen calibreeren. Daar de nulpuntsvulling van den gasthermometer niet geschikt was voor de metingen tusschen  $60$  en  $90^{\circ}$  K, werd de temperatuur in dit gebied gemeten met den loodthermometer in de kool van het desorptie-apparaat.

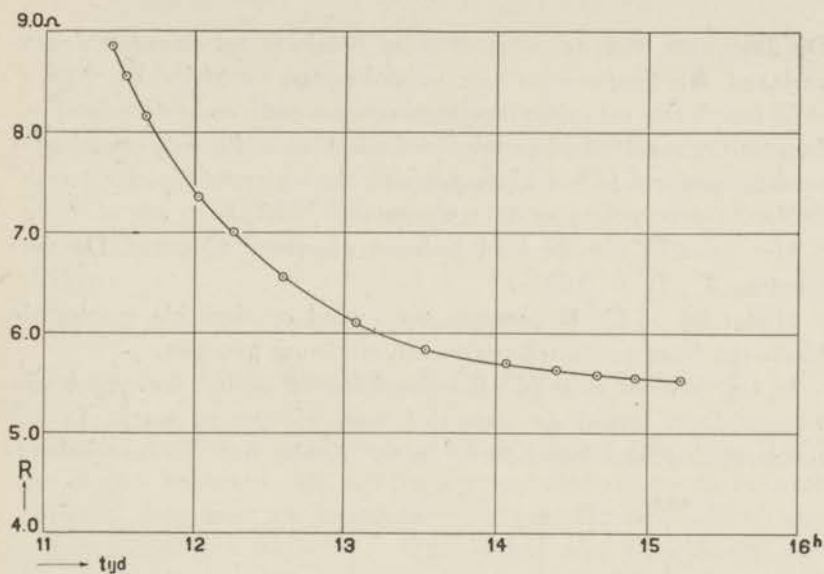


Fig. 3. Afkoelingskromme gedurende adsorptie van waterstof, doordat het zuurstofbad gereduceerd wordt. ( $9 \Omega = 79.5^\circ \text{K}$ ;  $5 \Omega = 49.3^\circ \text{K}$ ).

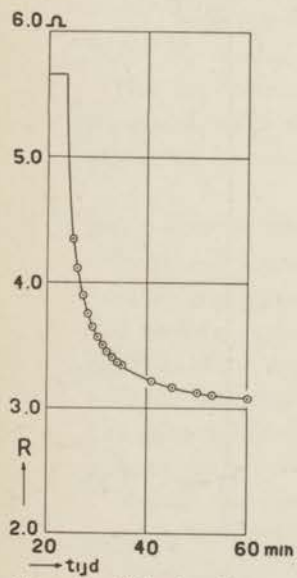


Fig. 4. Afkoelingskromme gedurende desorptie van waterstof  
( $6 \Omega = 56.6^\circ \text{K}$ ;  $3 \Omega = 35.0^\circ \text{K}$ )

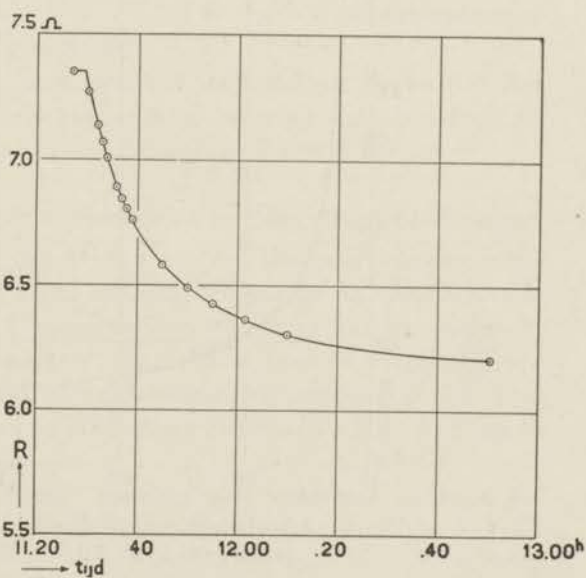


Fig. 5. Afkoelingskromme na het toevoegen van waterstofgas, dat weer afgepompt wordt.  
( $7.5 \Omega = 68.1^\circ \text{K}$ ;  $6 \Omega = 56.6^\circ \text{K}$ ).

De dampdruk van de zuurstof werd tenslotte tot ongeveer 1 mm verlaagd. Als temperatuur van de kool maten we  $54.15^{\circ}$  K.

In fig. 3 ziet men de afkoelingskromme gedurende de adsorptie, doordat het zuurstofbad gereduceerd wordt en in fig. 4 de afkoelingskromme gedurende het afpompen van de waterstof.

Na de desorptie was de temperatuur  $35.22^{\circ}$  K.

Het gewicht van de kool bedroeg ongeveer 40 gram. De verhouding  $T_c/T_b = 0.65^{\circ}$ .

Nadat bij  $35.22^{\circ}$  K gemeten was, werd op dezelfde manier als hierboven beschreven telkens in een minimum gemeten.

In fig. 5 vindt men de afkoelingskromme na het toevoegen van waterstofgas, terwijl de waterstof weer afgepompt wordt. In het temperatuurgebied tusschen 30 en  $60^{\circ}$  K was het zeer van belang,



Fig. 6. Afkoelingskromme bij desorptie van waterstofgas.  
( $4.5 \Omega = 45.6^{\circ}$  K;  $2.0 \Omega = 27.6^{\circ}$  K).

te meten in een minimum. Metingen verricht bij stijgende of dalende temperaturen bleken niet juist te zijn, daar door de warmtecapaci-

teiten van de verschillende onderdeelen van het apparaat geen temperatuurevenwicht aanwezig is.

Ten einde een lagere uitgangstemperatuur te verkrijgen, werd het glas G gevuld met vloeibare stikstof en werd hiervan de dampdruk verlaagd tot ongeveer 1 mm kwikdruk. De begintemperatuur werd in dit geval  $46.71^{\circ}\text{K}$  en de eindtemperatuur na desorptie  $29.96^{\circ}\text{K}$ .

Dus:

$$T_e/T_b = 0.641.$$

In fig. 6 is de afkoelingskromme bij desorptie geteekend.

Na dit experiment bleef er nog een onoverbrugd gebied van  $9.6^{\circ}\text{K}$  boven het kookpunt van waterstof over. Daarom werd de proef herhaald met neon als te adsorberen gas. De hoeveelheid neon bedroeg ongeveer 60 liter \*). Dit getal is niet nauwkeurig, daar door het springen van een vochtvanger eenig verlies van neon heeft plaats gegrepen.

Het gewicht van de kool bedroeg 38.94 gram.

De begintemperatuur was  $46.26^{\circ}\text{K}$  en de eindtemperatuur  $29.05^{\circ}\text{K}$ , zoodat  $T_e/T_b = 0.628$ .

Het experiment met neon verdient de voorkeur boven dat met waterstof, daar neon veel sneller adsorbeert dan waterstof en na afpompen bovendien een lagere temperatuur wordt bereikt.

### § 7. *Bespreking van de experimenten met het desorptie-apparaat.*

In de vorige paragrafen hebben wij eerst besproken de desorptieproeven met heliumgas als te adsorberen gas op de adsorbeerende stof kool (zie tabel 3). Daarna hebben wij een vergelijking gemaakt tusschen kool, kwarts en een mengsel van kool en kwarts bij een zelfde te adsorberen gas, namelijk helium. Het mengsel kool-kwarts had geen voordeelen boven kool alleen en kwarts alleen had een te geringe warmtecapaciteit.

Verder werden behandeld proeven met waterstof en neon als te adsorberen gassen op kool als adsorbeerende stof. De verhou-

---

\*) Het neon was gezuiverd door Prof. W. H. KEESOM en zijn medewerkers en ons welwillend ter beschikking gesteld.

ding tusschen de eind- en de begintemperatuur werd voor al deze gevallen opgegeven en dus kan men deze waarden voor de verschillende proeven vergelijken. De waarde van  $T_e/T_b$  ligt in de meeste gevallen van tabel 3 in de buurt van 0.43. In enkele gevallen vinden we belangrijke verschillen, zooals bij 10, 11, 18, 19 en 20. Voor deze uitzonderingen is de oorzaak echter aan te geven. De hooge meetstroom bij experiment 10 is de oorzaak van de hooge eindtemperatuur.

Bij experiment 11, 19 en 20 werd de hooge meetstroom uitgeschakeld gedurende het laatste deel van de adsorptie en het begin van de desorptie. De eindtemperatuur was toen lager.

Bij experiment 18 werd de kool gedeeltelijk geïnactiveerd door uit de pomp teruggeslagen olie.

Uit de vergelijking van de waarde van  $T_e/T_b$  voor het geval van helium, waterstof en neon, geadsorbeerd op kool, kan men besluiten, dat de waarde  $T_e/T_b$  kleiner wordt bij lagere temperaturen.

JUSTI<sup>5)</sup> heeft de opmerking gemaakt, dat het onmogelijk zou zijn om temperaturen beneden het kritische punt van waterstof te bereiken, wanneer men uitging van stikstoftemperaturen. Hij grondde deze opmerking op zijn experimenten, waarbij de waarde  $T_e/T_b$  niet kleiner werd bij lagere temperaturen.

Het is o.i. à priori evenwel volstrekt niet in te zien, wat het kritische punt te maken heeft met het desorptieproces.

We behoeven slechts naar onze experimenten met waterstof als te adsorbeeren gas te wijzen om de ongegrondheid van JUSTI's opmerking aan te toonen.

VAN ITTERBEEK<sup>6)</sup> spreekt de meening uit, dat de waarde van  $T_e/T_b$  afneemt, wanneer men een kool kan vinden met een groote adsorptiewarmte, welke voor drukken van 70 cm tot 1 mm slechts langzaam toeneemt.

De bedoeling is waarschijnlijk deze — behoort o.i. althans deze te zijn — dat, om een gunstige waarde van  $T_e/T_b$  te bereiken, het essentieel is, dat men een koolsoort neemt, waarvoor de adsorptiewarmte groot is en wel een zoodanige functie van den druk, dat deze waarde slechts langzaam afneemt naar hooge drukken (men bedenke, dat de adsorptiewarmte bij lage drukken steeds grooter moet zijn dan bij hooge).

VAN ITTERBEEK heeft opmerkelijk gemaakt op de eigenschappen van Desorex B kool. Deze kool zou inderdaad een belangrijke rol kunnen spelen om de gaping tusschen  $29.0$  en  $20.4^{\circ}$  K te overbruggen. Slaagt men erin deze gaping tot de helft te verkleinen, dan kan men het desorptie-apparaat, zooals hierboven beschreven, gebruiken voor metingen van den weerstand van metalen van  $90$  tot  $4^{\circ}$  K. Den te meten weerstand kan men dan rustig in het apparaat laten en men behoeft slechts de gassen in buis *D* en in glas *G* te verwisselen.

§ 8. *Het demagnetisatie-apparaat* <sup>7)</sup>.

De temperaturen beneden  $1^{\circ}$  K werden verkregen door middel van demagnetisatie van paramagnetische zouten. In dit gebied werd alleen de verandering van den weerstand van goud nagegaan.

Voor een beschrijving van het experiment en de montage zij daarom verwezen naar § 11 van hoofdstuk 3.

Van  $0.5$  tot  $1.0^{\circ}$  K kan men den weerstand van den draad behoorlijk meten, daar er dan in het gedemagnetiseerde zout nog temperatuurevenwicht is. Beneden  $0.4^{\circ}$  K is dit echter niet het geval.

§ 9. *Het meten van den electricchen weerstand.*

De weerstand werd als volgt bepaald: Door den onbekenden weerstand en door een normaal-weerstand van dezelfde orde van grootte, werd een bepaalde meetstroom gestuurd. Met behulp van een Diesselhorst-compensatiebank en een Zernike-galvanometer (*Zc*) werd het potentiaalverschil aan de uiteinden van beide weerstanden gemeten. De verhouding van deze potentiaalverschillen geeft dan den weerstand van den te meten draad.

§ 10. *De bepaling van  $R_0$ .*

Voor de bepaling van den weerstand bij  $0^{\circ}$  C werden de draden in een glazen buis met petroleumaether gebracht, welke afgesloten werd. Deze buis werd in fijngeschaafd ijs van gedestilleerd water geplaatst. Het smeltwater werd aan de onderzijde van den ijspot afgevoerd.

#### LITERATUUR.

- 1) W. H. KEESOM, SOPHUS WEBER en G. NØRGAARD, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 202b, 1929;  
W. H. KEESOM, SOPHUS WEBER en G. SCHMIDT, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 202c, 1929;  
W. H. KEESOM, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden Suppl. 71, 1932;  
W. H. KEESOM en K. CLUSIUS, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 219e, 1932.  
G. SCHMIDT, Diss. Leiden 1938.
- 2) F. SIMON, Phys. Z., **27**, 790, 1926; Z. Kälteind. **34**, 217, 1927; Z. Phys., **87**, 815, 1934.  
F. SIMON, Physica, 's-Grav. **4**, 879, 1937.
- 3) F. SIMON, Z. Kälteind. **39**, 89, 1932; Acte du VIIe Congrès Intern. du Froid I, 367, 1936;  
F. SIMON en J. E. AHLBERG, Z. Phys. **81**, 816, 1933;  
F. SIMON, A. H. COOKE en H. PEARSON, Proc. roy. Soc. **47**, 678, 1935.
- 4) Zie J. DE BOER, Diss. Leiden 1935.
- 5) E. JUSTI, Ann. Phys. **9**, 570, 1931; Z. Phys. **87**, 273, 1934; Z. Instrum.kde **51**, 283, 1931; **52**, 204, 1932; **53**, 294, 1933.
- 6) A. VAN ITTERBEEK en W. VEREYCKEN, Physica, 's-Grav. **3**, 666 en 954, 1936;  
A. VAN ITTERBEEK en W. VAN DINGENEN, Physica, 's-Grav. **4**, 389 en 617, 1937.
- 7) W. J. DE HAAS, H. B. G. CASIMIR en G. J. VAN DEN BERG, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 251c, 1938; Physica, 's-Grav. **5**, 225, 1938.



### HOOFDSTUK III.

#### De weerstand van goud als functie van de temperatuur.

##### § 1. *Overzicht van de metingen van den elektrischen weerstand van goud beneden 21° K.*

Reeds in 1901 werden door DEWAR<sup>1)</sup> metingen verricht van den weerstand van het zuiverste goud van ROBERTS-AUSTEN van de Engelsche Munt. Deze metingen strekten zich uit tot het kookpunt van waterstof. De waarde van  $R/R_0$  was daar 0.0329, hetgeen naar wij nu weten op onzuiver materiaal wijst.

In 1904 verscheen van denzelfden onderzoeker een publicatie over nog onzuiverder goud.

De metingen, drie jaar later door NICCOLAI<sup>2)</sup> verricht, van den weerstand van een getrokken draad van 0.5 mm middellijn, afkomstig van KAHLBAUM, geschieden slechts bij temperaturen tot het kookpunt van vloeibare lucht.

De eerste metingen in het Kamerlingh Onnes Laboratorium werden verricht door KAMERLINGH ONNES en CLAY<sup>3)</sup>. Het materiaal was goud van Dr. C. HOITSEMA van de Munt. De onzuiverheid bedroeg voor de weerstanden  $Au_0$ ,  $Au_{III}$ ,  $Au_{IV}$  en  $Au_V$  (van hetzelfde goud) \*) resp. 0.03, 0.015 en 0.005 %. Door HERAEUS werd het goud getrokken tot draden van 0.1 mm middellijn.  $Au_{III}$ ,  $Au_{IV}$  en  $Au_V$  werden „getemperd”. Bij kookpunt waterstof is de waarde voor  $R/R_0$ :

$$Au_0 : 0.04579$$

$$Au_{III} : 0.01627$$

$$Au_{IV} : 0.00899$$

$$Au_V : 0.00835$$

Het afnemende percentage van de verontreiniging doet zich als een

---

\*) Gelijk KAMERLINGH ONNES en CLAY reeds zelf opmerken, zijn door het trekken van den draad door trekijzers onzuiverheden in het goud gebracht.

verkleining van de waarde van  $R/R_0$  kennen. In Comm. No. 99c vindt men de waarde van  $R/R_0$  in het waterstofgebied. Om deze waarden nauwkeurig te vergelijken met waarden, welke gedurende den laatsten tijd zijn bepaald, moet men de temperaturen berekenen volgens de tegenwoordige schaal. (Zie tabel 5.)

TABEL 5.

$T$ °C	$10^4 R/R_0$		$T$ °K
	Au <sub>IV</sub>	Au <sub>V</sub>	
—252.93	87.43	81.03	20.16
—255.13	64.59	56.91	17.96
—258.81	42.65	36.01	14.28
—261.—		27.13	12.—
—262.—	32.57	25.26	11.—

Voor het absolute nulpunt gebruikte CLAY de waarde —273.09. In Suppl. 29 gaf KAMERLINGH ONNES <sup>4)</sup> de waarde 0.01020 voor de  $R/R_0$  van Au<sub>III</sub> bij kookpunt helium aan. De waarde van  $R/R_0$  voor deze Au<sub>III</sub> was constant in het heliumgebied.

In Comm. No. 107c van KAMERLINGH ONNES en CLAY vindt men ook een onderzoek vermeld naar de zuiverheid van twee draden van verschillende middellijn. De onzuiverheid van den draad van 0.1 mm middellijn bleek 0.072 % grooter te zijn dan die van den draad van 0.3 mm middellijn. De waarde voor  $R/R_0$  bleek bij het kookpunt van waterstof resp. 0.02988 en 0.01856 te zijn. Het verschil van 0.01132 in de waarde van  $R/R_0$  was bij 14.4° K even groot.

In 1912 werd door KAMERLINGH ONNES en BENGT BECKMANN <sup>5)</sup> een goudplaatje gemeten van 0.1 mm dikte, waarvan de verontreiniging minder dan 0.03 % was. De metingen strekten zich slechts uit tot het kookpunt van vloeibare waterstof, waar  $R/R_0 = 0.035$  was.

Door SCHIMANK <sup>6)</sup> werden in 1913 vier draden gemeten en wel twee van goud van HERAEUS, chemisch zuiver, (Au<sub>1</sub> en Au<sub>2</sub>) en twee van goud van de Gold- en Silberscheideanstalt, zuiverheid 99.99 % (Au<sub>3</sub> en Au<sub>4</sub>). Van elk paar werd er één „getemperd” door gloeien. De draden hadden bij kookpunt waterstof de volgende waarden van  $R/R_0$ :

- $Au_1$ : 0.0190 (getemperd)  
 $Au_2$ : 0.0293 (ongetemperd)  
 $Au_3$ : 0.0223 (getemperd)  
 $Au_4$ : 0.0343 (ongetemperd)

Het zuiverste goud werd echter gemeten door MEISSNER<sup>7)</sup> in 1915 tot de temperatuur van het kookpunt van vloeibare waterstof. Dit was goud, gezuiverd door MYLIUS. De onzuiverheden bedroegen minder dan  $10^{-3}$  %. De waarde van  $R/R_0$  was bij het kookpunt van waterstof 0.0069.

De metingen waren onnauwkeurig en het aantal temperaturen, waarbij gemeten werd, was te klein om behoorlijk de temperatuurafhankelijkheid te kunnen nagaan.

Hiervoor waren beter geschikt de metingen, verricht door CATH, KAMERLINGH ONNES en BURGERS<sup>8)</sup> in 1917, van den weerstand van zuiver muntgoud van Dr. HOITSEMA van de Munt. De draad werd getrokken door nieuwe diamanten tot 0.1 mm middellijn ( $Au-11-1915$ ) en „getemperd” door gloeien, waarna een domping in vloeibare lucht (dit werd eenige malen herhaald) plaats vond.

De gegevens van  $20^\circ$  K af vindt men in de tabel 6 en in figuur 7.

TABEL 6.

$T$ $^\circ\text{C}$	$T$ $^\circ\text{K}$	$10^4 R/R_0$
-252.57	20.52	84.5
-255.01	18.08	59.4
-258.35	14.74	37.9
-268.88	4.21	22.3
-269.57	3.52	22.3
-270.84	2.25	22.3
-271.61	1.48	22.3

Ongepubliceerde metingen van BURGERS en KAMERLINGH ONNES zijn hierbij gebruikt. Ze zijn ontleend aan Suppl. 58 (KAMERLINGH ONNES en TUYN).

Van hetzelfde goud werd, eveneens door nieuwe diamanten, een draad getrokken van 0.05 mm middellijn ( $Au-12-1915$ ). Bij  $20.52^\circ$  K (volgens de temperatuurschaal met  $0^\circ$  K =  $-273.09^\circ$  C) vertoonde  $Au-12-1915$  een hoogere  $R/R_0$  dan  $Au-11-1915$ , n.l.  $91.05$  tegen  $84.5 \times 10^{-4}$ .

HOLBORN<sup>9)</sup> mat in 1919 en 1920 een draad van 0.1 mm. middel-  
lijn (die „getemperd” werd bij 500° C) tot het kookpunt van water-

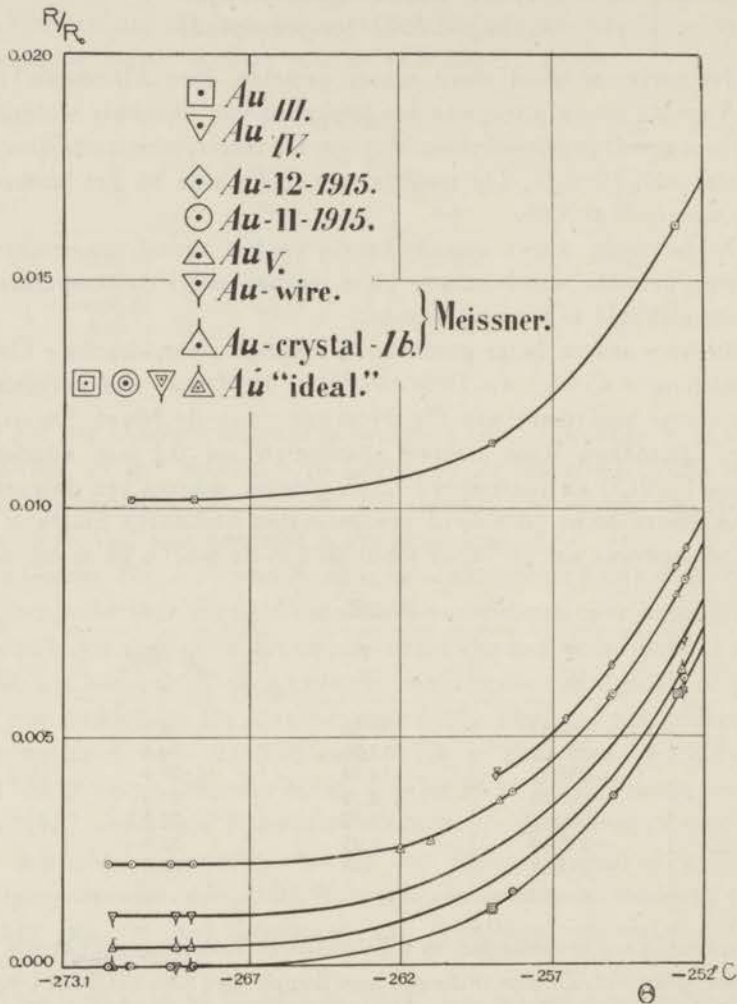


Fig. 7. De elektrische weerstand van goud van 0—20° K.

stof. De waarde van  $R/R_0$  was daar 0.0068. Dit is dus lager dan de waarde, die MEISSNER vond bij het meten van Mylius-goud in 1915.

In 1925 werd door MEISSNER<sup>10)</sup> een draad gemeten, die van het

zuivere Mylius-goud was getrokken en een middellijn had van 0.25 mm. „Ongetemperd” gemeten was de  $R/R_0$  bij kookpunt waterstof 0.019, daarentegen „getemperd” gemeten was  $R/R_0$  gelijk aan 0.00698. Het „temperen” bestond uit  $3\frac{1}{2}$  uur verhitten op  $350^\circ\text{C}$ . (Zie tabel 7.)

TABEL 7.

m.m.Hg	T °K	$10^2 R/R_0$	
		voor	na
766.8	4.21	1.073	
764.5	4.20		0.109
446.5	3.71		0.109
430.8	3.68	1.073	
82.0	2.63	1.073	
40.2	2.30	1.075	
7.3	1.61		0.109

Verder mat MEISSNER nog eenkristallen van het zuivere Mylius-goud gemaakt. (Zie tabel 8.)

TABEL 8.

T °K	$10^3 R/R_0$							
	1 a	1 b	1 a+b	2 a	2 b	2 a+b	3 a	3 a+b
20.41	6.83	6.42	6.77					
20.37			6.67	6.58	6.57	6.56	6.60	6.78
4.20	0.93	0.39	0.87	1.00		1.06	1.17	1.32
3.71	0.93	0.38	0.87	0.98	1.08	1.05	1.16	1.33
1.61	0.93	0.39	0.87	1.01	1.08	1.06	1.17	1.34

1 a + b wil zeggen, dat MEISSNER de twee ongelijke stukken a en b als één weerstand mat, nadat hij de deelen eerst afzonderlijk had gemeten. De waarde voor  $R/R_0$  van het geheele kristal is niet de gemiddelde waarde tusschen de  $R/R_0$  van 1 a en die van 1 b.

Bij het 2e kristal is dit binnen de meetprecisie wel het geval. Van de hand van KAMERLINGH ONNES en TUYN<sup>8)</sup> verscheen in 1926 een overzicht over de metingen van den electricischen weerstand bij lage temperaturen.

In 1926 publiceerde MEISSNER<sup>11)</sup> nog enkele metingen van den weerstand van goudraden. Deze metingen geschieden ook weer bij kookpunt waterstof en enkele heliumtemperaturen.

Ter vergelijking nam hij ook weer de meting van  $1 b$  uit tabel 8 in de nieuwe tabel op. (Zie tabel 9.)

TABEL 9.

$T$ °K	Ring 1 b		Ring 4		Staaf 5		Staaf 11		Spoel	
	$10^3 R/R_0$	$10^3 [R/R_0]$	$10^3 R/R_0$	$10^3 [R/R_0]$	$10^3 R/R_0$	$10^3 [R/R_0]$	$10^3 R/R_0$	$10^3 [R/R_0]$	$10^3 R/R_0$	$10^3 [R/R_0]$
20.45		6.07	6.96 <sup>4</sup>	5.83 <sup>0</sup>	6.89 <sup>0</sup>	5.85 <sup>0</sup>		5.79		6.03
20.41	6.42	6.03							7.07	5.99
20.40							6.01	5.72		
4.21							0.29 <sup>4</sup>	0.00 <sup>3</sup>		
4.20	0.39	0	1.14 <sup>0</sup>	0.00 <sup>0</sup>	1.05 <sup>3</sup>	0.00 <sup>3</sup>			1.09	0.
1.67			1.14 <sup>1</sup>	0.00 <sup>1</sup>	1.05 <sup>3</sup>	0.00 <sup>1</sup>			1.09	0.
1.61	0.39	0								
1.34							0.29 <sup>1</sup>	0.		

Uit de metingen bij 2 heliumtemperaturen maakte hij een restweerstand op en berekende met behulp van den regel van MATTHIESSEN den „idealen" weerstand bij de gemeten hogere temperaturen. De stroom, dien MEISSNER door de draden leidde om hun weerstand te kunnen bepalen, bedroeg maximaal 6 Amp. Dit komt neer op 30 Amp. per mm<sup>2</sup>, hetgeen een zeer hoge belasting is. MEISSNER besloot zijn artikel met de bewering, dat de verandering in het heliumgebied van  $R/R_0$  wat orde van grootte betreft, overeenstemt met hetgeen men krijgt als men met GRÜNEISEN  $R = A T C_p$  (waarin  $A$  een constante,  $T$  de temperatuur en  $C_p$  de warmtecapaciteit per gramatoommassa) stelt en voor  $C_p$  de  $T^3$ -wet van DEBYE als geldig aanneemt (zie algemeene inleiding van dit proefschrift).

Van GRÜNEISEN en GOENS<sup>12)</sup> verscheen in 1927 een publicatie over elektrische geleiding van metaalkristallen, doch hierin werd slechts melding gemaakt van metingen tot het kookpunt van waterstof. Er werden zuivere en onzuivere eenkristallen — in chemisch en fysisch opzicht — gemeten.

In tabel 10 ziet men de waarden van  $R/R_0$  bij de temperatuur 21.2° K, welke waarschijnlijk als kookpunt waterstof is bedoeld. In 1929 werd door MEISSNER en SCHEFFERS<sup>13)</sup> de weerstand van goud gemeten in magneetvelden bij lage temperaturen, d.w.z. bij het kookpunt van stikstof, waterstof en helium.

De gebruikte draden waren  $Au_{11}$ ,  $Au_5$  en  $Au_{11}$ , welke reeds eerder door GRÜNEISEN en GOENS en door MEISSNER waren gemeten.

TABEL 10.

	$10^4 R/R_0$
$Au_{12}$ ; eenkristal van Mylius.....	69.6
$Au_{14}$ ; " " " .....	78.5
$Au_{13}$ ; idem, gehamerd en $5\frac{1}{2}$ uur „getemperd” bij $380^\circ\text{C}$ .....	72.2
$Au_{11}$ ; gehamerd, „ongetemperd”, technisch zuiver van Gold- und Silberscheideanstalt (1898) .....	541.0
$Au_{11a}$ ; idem, maar 3 uur „getemperd” bij $390^\circ\text{C}$ .....	440.0
$Au_1$ ; gehamerd, „ongetemperd”, technisch onzuiver .....	4680.

In tabel 11 zijn de herhaalde metingen nog eens overgenomen. Zij gelden voor magneetveld nul.

TABEL 11.

$T$ $^\circ\text{K}$	$10^3 R/R_0$		
	$Au_{11}$	$Au_5$	$Au_{11}$
20.4	44.3	6.89	6.01
4.21	35.0	1.02	0.28 <sup>b</sup>
1.30	34.8	1.01	0.28 <sup>b</sup>

Bij de metingen in een magneetveld stond het magneetveld loodrecht op de lengterichting van den goudweerstand. Bij de metingen in vloeibaar helium trad bij  $Au_{11}$ , dus bij den minder zuiveren weerstand, in een magneetveld een weerstandsverkleining in plaats van vergrooting op beneden 200 Gauss. MEISSNER tracht dit te verklaren door het aannemen van de aanwezigheid van ijzer in den goudweerstand en verwijst daarvoor zoowel naar de metingen van GRUNMACH en WEIDERT<sup>14)</sup> als naar die van BENGT BECKMANN<sup>15)</sup>.

Een Röntgenspectroscopische analyse door NODDACK en BEUTHE wees uit, dat  $Au_{11}$  minder dan  $\frac{1}{4}$  0/00 ijzer bevatte. MEISSNER houdt een bij het trekken ontstaan ijzerlaagje aan het oppervlak voor de eventueele oorzaak.

In verband met latere experimenten van GIAUQUE c.s. werden deze metingen in een magneetveld uitvoeriger besproken.

De weerstand  $Au-12-1915$ , vroeger gemeten door CATH,

KAMERLINGH ONNES en BURGERS<sup>8)</sup>, werd in 1929 van 90 tot 14° K nogmaals gemeten door TUYN<sup>16)</sup>. De resultaten van 20 tot 14° K staan vermeld in tabel 12.

TABEL 12.

$T$ °K	$10^4 R/R_0$
20.51	91.2
18.06	65.6
16.53	53.9
14.22	41.5

In 1930 verscheen van MEISSNER en VOIGT<sup>17)</sup> een overzicht van de metingen van den electricischen weerstand van verschillende metalen.

Wat het goud betreft, worden in dit overzicht de metingen van MEISSNER (zie boven) van den weerstand van het beste eenkristal en van een gouddraad besproken.

Ook de Leipziger Vortrag van GRÜNEISEN<sup>18)</sup> vond in dien tijd plaats, zooals reeds in de inleiding werd besproken.

Zooals eveneens in de algemeene inleiding aangegeven, was goud een van de eerste metalen, die in het Kamerlingh Onnes Laboratorium door DE HAAS, DE BOER en VAN DEN BERG in het geheele gebied tusschen 1 en 20° K werd gemeten.

Toen bleek echter, dat het goud, hetwelk gemeten werd en dat afkomstig was van HERAEUS, een minimum bezat in de weerstand-temperatuurkromme bij heliumtemperaturen, zoodat over een eigenlijken restweerstand niet meer gesproken kon worden.

Het was van belang een nader onderzoek naar de beteekenis van dit minimum in te stellen. (Zie volgende paragrafen.)

Door JUSTI en SCHEFFERS<sup>19)</sup> werd in 1936 de electricische weerstand van goud in een transversaal magneetveld gemeten bij lage temperaturen.

Ten slotte zij nog vermeld, dat in 1937 GIAUQUE, STOUT en CLARK<sup>20)</sup> in een „Letter to the editor” van Phys. Review mededeelden, dat zij den weerstand van goud, verontreinigd met 0.1 % zilver, hadden gemeten bij lage temperaturen en daarbij evenals vroeger DE HAAS, DE BOER en VAN DEN BERG<sup>21)</sup> een minimum in de weerstand-temperatuurkromme hadden gevonden bij ongeveer



8° K. Dit was evenzeer in overeenstemming met de metingen van DE HAAS en VAN DEN BERG<sup>22</sup>) van den weerstand van onzuiver goud.

Bij 2° K was de waarde van  $R/R_0$  ongeveer 3 % hooger dan die bij het minimum. Bij een meting van den weerstand in een magneetveld vonden zij, dat bij 1.3° K en 8000 Gauss de weerstand met ruim 1 % afnam in plaats van toenam.

Dit is in overeenstemming met de metingen van MEISSNER van den weerstand van  $Au_{11}$ .

De waarde van  $R/R_0$  in het minimum bedroeg 0.0957.

## § 2. *Het materiaal.*

Bij nauwkeurig bestudeeren van de metingen van andere onderzoekers, als MEISSNER, bleken deze metingen, ofschoon zij minder nauwkeurig waren, ook in de richting van een minimum te wijzen (zie tabel 8 van het overzicht).

De invloed van de zuiverheid van het metaal op het minimum werd door Prof. DE HAAS en mij het eerst nagegaan. Daarvoor werden verschillende soorten goud gebruikt, welke op verschillende manieren werden behandeld.

Het zuiverste goud, waarover wij de beschikking hadden, was van W. C. HERAEUS. Volgens de chemische analyse zou de onzuiverheid minder dan  $10^{-4}$  % bedragen (enkele sporen *Cu* en *Ag*). Door de firma HERAEUS werd van dit goud een draad van 0.15 mm middellijn getrokken.

De tweede soort goud, welke we gebruikten, was van ADAM HILGER Ltd. (Lab. No. 9874). Het spectroscopisch onderzoek gaf het volgende resultaat: het totale bedrag aan onzuiverheden was minder dan  $10^{-3}$  %, mogelijk was een spoor van zilver aanwezig. Dit was in overeenstemming met het chemisch onderzoek, dat minstens 99.999 % garandeerde.

De derde soort goud was van de Munt in Utrecht. Het was z.g. „getuigengoud" (1000/1000) en bevatte o.a. ijzer van de trekplaten en silicium van den smeltkroes.

Het Heraeus-goud kregen wij in draden van 0.15 mm middellijn, doch zoowel het Hilger- als het Muntgoud ontvingen wij in staafjes.

Het Hilger-goudstaafje had een middellijn van 3 mm. De middel-

lijn van de openingen in de treksteen van agaat, waarover wij beschikten, was hoogstens 2 mm.

Door afwisselend schuren met carborundum en daarna flink afetsen met koningswater werd de middellijn van het Hilger-staafje teruggebracht tot 2 mm.

De treksteen werden gereinigd met behulp van koningswater. Daar dit niet voldoende is, werden ze ook nog mechanisch gereinigd door er het Munt-goud door te trekken. De Munt-gouddraad werd na elk trekken met salpeterzuur afgeëtsd. Na afloop van de mechanische reiniging werden de treksteen nogmaals met koningswater gereinigd en met gedestilleerd water nagespoeld. Hierna werd het Hilger-goud er doorheen getrokken.

Op dezelfde manier werden de steenen met een opening van 0.15 tot 0.05 mm middellijn nogmaals gereinigd en werd de Heraeus-gouddraad van 0.15 mm er doorheen getrokken tot 0.09 en 0.05 mm middellijn.

Van deze draden werden nu de volgende weerstanden gemaakt:

Heraeus-goud:  $Au_1, Au_2, Au_{7a}, Au_8, Au_9, Au_{10},$

$Au_B, Au_M, Au_O, Au_{11},$

Hilger-goud :  $Au_5, Au_{6a},$

Munt-goud :  $Au_3.$

(Zie ook § 8.)

### § 3. De behandeling van het materiaal en de montage van de draden.

De draden werden op twee manieren „getemperd”. Onder „temperen” zullen we verstaan het houden van den draad op een bepaalde temperatuur gedurende een bepaalden tijd in vacuum en een niet te plotselinge afkoeling tot kamertemperatuur na afloop. Bij het luchtledig pompen werd zorg gedragen dat er geen kwikdampen bij den draad konden komen.

Methode I: De draad werd, op kwarts gemonteerd, in een kwartsbuis gebracht, waarin een vacuum werd gepompt en waaromheen een oven stond om de gewenschte temperatuur te verkrijgen.

Methode II: De gemonteerde draad werd aan dikke koperdraden in een glazen buis, waarin een vacuum gepompt werd, opgehangen

en er werd een elektrische stroom via deze koperdraden en de potentiaal- en stroomdraden doorheen geleid.

Volgens methode I werden  $Au_1$ ,  $Au_2$  en  $Au_3$  behandeld. De overige weerstanden werden volgens de methode II getemperd.

De draden werden gespiraliseerd en dan vrij opgehangen aan de potentiaal- en stroomdraden. Als montuur voor de ophanging diende een soort van raampje (zie figuur 8) van kwarts (bij methode I) of van glas (bij methode II).

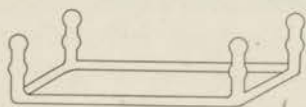


Fig. 8.

De potentiaal- en stroomdraden werden op twee manieren gelascht. Bij de eerste methode werden de potentiaal- en stroomdraden afzonderlijk bevestigd en bij de tweede methode niet.

De eerste methode is beter dan de tweede. Er werd onderzocht of er een verschil viel waar te nemen tusschen de methoden, doch daar dit uiterst gering was, werd de tweede methode, welke voor de montage gemakkelijker bleek te zijn, vaak toegepast.

Het bevestigen van de potentiaal- en stroomdraden, die alle van goud waren, geschiedde met behulp van een laschmachine, welke twee dikke koperen elektroden bezat, waartusschen de draadjes geklemd werden, terwijl door de elektroden via de dunne gouddraadjes een flinke stroom ging. De draadjes werden verwarmd en smolten in elkaar. Daar nu de kans bestond, dat er koper van de elektroden in het goud werd gebracht en een legering aan de uiteinden zou ontstaan, waarvan men niet kon weten hoever deze in het metaal zou diffundeeren en welke invloeden hiervan zouden uitgaan in verband met het minimum, werd er ook een weerstand gelascht met koperen elektroden, waarin gouden kopjes gedraaid waren. Het minimum bleef ook hierbij bestaan en het gedrag van den weerstand was analoog aan dat van de andere.

Het vacuum bij het temperen werd verkregen door een moleculairpomp (Holweck), waarbij als voorpomp een „Pfeiffer” oliepompe diende, of door een oliecondensatiepomp (Metropolitan-Vickers) met een koelbuis, gekoeld in vloeibare lucht, als voorpomp.

De kwik-diffusiepompen werden vermeden met het oog op verontreiniging van het goud.

Als temper-temperatuur werd gekozen 480 tot 500° C, een

waarde, welke ontleend is aan onderzoeken van CREDNER<sup>23</sup>).

De tempertijden waren verschillend en liepen van 0 tot 115 uur. Gedurende den langen tempertijd werd het vacuum verkregen met behulp van een koolbuis, welke bij een temperatuur van 100° C gedurende 6 uur was afgepompt tot lager dan 10<sup>-5</sup> mm kwikdruk en daarna gedurende den tempertijd in vloeibare lucht werd gekoeld. De verbinding met de hoogvacuumpomp was afgesmolten.

#### § 4. *Invloed van den tempertijd.*

De weerstand ( $Au_8$ ), welke 115 uur getemperd was, bleek bij de meting een grooteren restweerstand te bezitten dan een weerstand, welke b.v. 2 uur getemperd was. Dit zou erop wijzen, dat de weerstandsverandering niet die functie van den tempertijd was, welke CREDNER<sup>23</sup>) aangaf. Hierop wijzen ook de metingen, welke gedaan werden van den weerstand van  $Au_9$  (HERAEUS). Deze gouddraad van 0.15 mm middellijn werd op een glazen raampje gemonteerd en aan de potentiaal- en stroomdraden werden platina-draden gelascht. Het geheel werd in een buisje gebracht met vele smeltplaatsen, terwijl de platinadraden door het glas werden gevoerd.

De buis werd leeggepompt tot 10<sup>-5</sup> mm kwikdruk, terwijl het glas tot 200° C werd verhit. Daarna werd de draad getemperd door er een stroom van 450 mA gedurende 3½ uur door te zenden. Na afloop werd de buis bij de buitenste smeltplaats dichtgesmolten en de weerstand in een bad met vloeibare waterstof gemeten met verschillende meetstroomen. Vervolgens werd de buis weer opengesneden en aan de pomp aangeblazen, waarop het temperen in vacuum werd herhaald met dezelfde stroomsterkte en gedurende denzelfden tijd. Hierna werd waterstofgas toegelaten tot een druk van 60 cm en de buis werd weer afgesmolten, waarna een weerstandsmeting in vloeibare waterstof volgde. De weerstand-temperatuurkromme bleek geheel verschoven te zijn naar grooteren weerstand.

Deze verschuiving kon aan twee oorzaken geweten worden:

- 1<sup>o</sup>. aan de gasvulling;
- 2<sup>o</sup>. aan den tweemaal langeren tempertijd.

Een meting met stikstof- in plaats van waterstofvulling had als

resultaat, dat de kromme weer een stukje naar grooteren weerstand opschoof.

Ter contrôle van den gasinvloed werd nu weer een meting in vacuum verricht en deze gaf weer een verschuiving te zien naar grooteren weerstand.

Tusschen de metingen, die in vacuum geschieden, was dus het verschil gelegen in den tempertijd, want de temperstroom was steeds dezelfde. Het langere temperen ging dus gepaard met een vergrooting van den weerstand. De gasinvloed werd nog op andere en betere wijze gecontroleerd (zie volgende §) en bleek niet een dusdanige vergrooting tengevolge te hebben.

Ofschoon het onderzoek niet volledig is, lijkt het toch, dat een langere tempertijd niet zonder invloed blijft op den weerstand, maar een vergrooting tengevolge heeft. In tabel 13 zijn de weerstanden berekend voor meetstroomsterkte nul, zoodat ze rechtstreeks kunnen worden vergeleken.

TABEL 13. Au<sub>9</sub> (Heraeus).

$T$ °K	$10^4 R/R_0$ in vacuum	$T$ °K	$10^4 R/R_0$ in H <sub>2</sub>	$T$ °K	$10^4 R/R_0$ in N <sub>2</sub>	$T$ °K	$10^4 R/R_0$ in vacuum
20.40	91.13	20.44	93.15	20.40	93.42	20.38	93.77
19.07	75.45	19.11	77.76	19.06	78.17	19.06	78.67
18.13	66.91	18.09	67.68	18.17	69.10	18.06	68.74
17.20	59.05	17.19	60.02	17.19	60.76	17.14	60.88
15.96	50.25	15.98	51.37	15.79	51.99	16.00	52.63
		15.24	46.77	15.12	47.05		
14.08	40.36	14.14	41.22	14.17	42.25	14.25	42.74

Uit het bovenstaande zien we, dat het van belang is te weten, hoe lang de verschillende draden zijn getemperd. In tabel 14 is een volledig overzicht gegeven.

De waarden van  $R/R_0$  zijn voor de weerstanden van Heraeusgoud te vergelijken bij het kookpunt van waterstof (zie tabel 15).

Onderlinge vergelijking van de draden is niet geheel gerechtvaardigd, daar de omstandigheden van de draden wel ongeveer, maar niet volkomen dezelfde zijn geweest.

Wel mogen we vergelijken den draad Au<sub>10</sub> vóór en na het temperen en den draad Au<sub>9</sub> na elk temperen. We zien uit tabel 15, dat een korte tempertijd een lagere waarde voor  $R/R_0$  geeft dan

TABEL 14.

Naam	$R_0$ $\Omega$	Temper- tijd uur	Temper- temperatuur $^{\circ}\text{C}$	Methode	Draad- dikte mm
Au <sub>1</sub>	1.93593	5	480	in oven	0.15
Au <sub>2</sub>	0.26426	5	480	" "	0.15
Au <sub>3</sub>	0.43293	1.5	480	" "	0.10
Au <sub>5</sub>	0.40313	0.5	~ 500	gloeien	0.10
Au <sub>6a</sub>	0.50136	3.0	500	"	0.10
Au <sub>7a</sub>	0.35383	2.5	500	"	0.15
Au <sub>8</sub>	0.13309	115	500	"	0.15
Au <sub>9</sub>	0.27403	3.5	500	"	0.15
Au <sub>10</sub>	0.20408	0	—	—	0.15
Au <sub>10</sub>	0.20065	1.5	500	gloeien	0.15
Au <sub>11</sub>	0.19764	2.0	500	"	0.15
Au <sub>B</sub>	0.16681	2.0	500	"	0.15
Au <sub>M</sub>	0.37584	2.0	500	"	0.09
Au <sub>O</sub>	0.85994	2.0	500	"	0.05

TABEL 15.

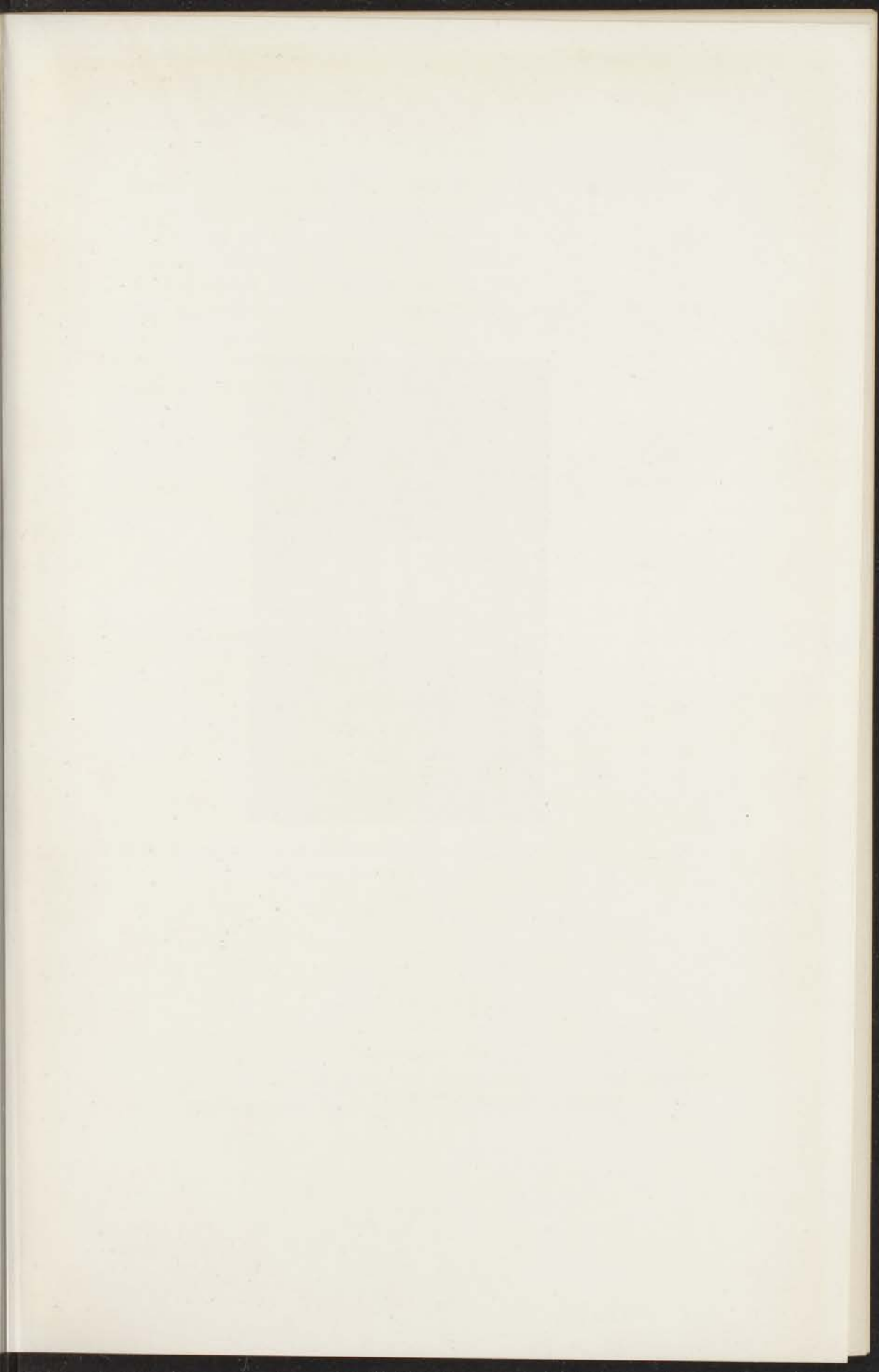
Naam	$10^4 R_{20.4^{\circ}\text{K}}/R_{0^{\circ}\text{C}}$	Tempertijd uur	Opmerkingen
Au <sub>10</sub>	232.40	0.0	
Au <sub>7</sub> *)	91.40	1.0	
Au <sub>10</sub>	92.15	1.5	
Au <sub>11</sub>	90.50	2.0	andere montage
Au <sub>7a</sub>	94.80	2.5	
Au <sub>9</sub>	91.13	3.5	in vacuum, na 1 × temperen
Au <sub>1</sub>	90.00	5.0	methode I (oven)
Au <sub>9</sub>	92.50	7.0	in H <sub>2</sub> , na 2 × temperen
Au <sub>9</sub>	93.42	10.5	in N <sub>2</sub> , na 3 × temperen
Au <sub>9</sub>	94.00	14.0	in vacuum, na 4 × temperen
Au <sub>8</sub>	108.10	115.0	

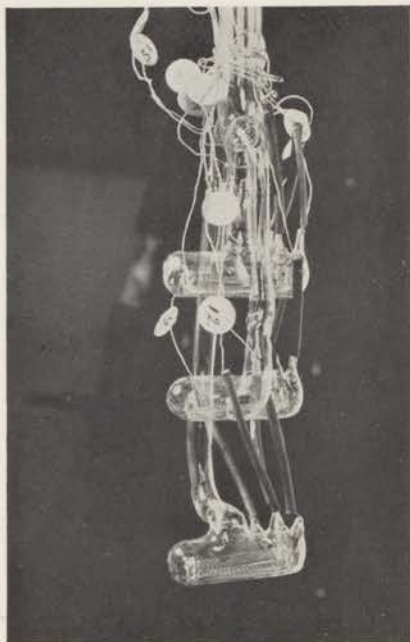
een lange tempertijd. Een tempertijd van 2 tot 2.5 uur is wel de meest geschikte bij het temperen volgens methode II.

### § 5. Invloed van het omringende gas.

Om op een betere manier dan bij Au<sub>9</sub> (zie vorige §) na te gaan of er een invloed van het omringende gas viel waar te nemen, werden eenige weerstanden van Heraeus-goud gemonteerd in een glazen

\*) Omdat Au<sub>7</sub> bij de behandeling was gevallen, werd deze opnieuw gemonteerd, daarna 2.5 uur getemperd en Au<sub>7a</sub> genoemd.





Glazen apparatuur, waarin drie goudweerstand van verschillenden diameter werden getemperd en gemeten.



apparaat, dat in den cryostaat werd ingebouwd en van buiten af met gas gevuld of leeggepompt kon worden (zie foto).

Met het oog op andere onderzoekingen werden drie verschillende draaddikten gebruikt, n.l. 0.15, 0.09 en 0.05 mm.

Bij den dikken draad trad een storing op, zoodat alleen bij de draden van 0.09 mm ( $Au_M$ ) en van 0.05 mm ( $Au_O$ ) de invloed van het gas volledig kon worden nagegaan.

De draden werden in hetzelfde vacuum ( $10^{-6}$  mm) en bij dezelfde temperatuur getemperd door er gedurende 2 uur een electrischen stroom door te sturen.

Hierna volgde een meting in vloeibare waterstof ( $A$ ), terwijl het apparaat op vacuum werd gehouden. Er werden voor elken draad drie verschillende meetstroomsterkten gebruikt. (Tabel 16 en 17.)

$Au_M$ : 14.1, 20.0 en 24.4 mA

$Au_O$ : 10.0, 14.1 en 17.3 mA.

TABEL 16.

$Au_M$ in vacuum, 27 Jan. 1937. (A)			
$T$ °K	$10^4 R/R_0$		
	m.s. 14.1 mA	20.0 mA	24.5 mA
20.39	99.97	103.87	107.91
18.72	80.38	83.83	87.09
17.17	66.57	69.31	72.05
15.68	55.82	58.33	60.58
14.33	48.59	50.47	52.31

TABEL 17.

$Au_O$ in vacuum, 27 Jan. 1937. (A)			
$T$ °K	$10^4 R/R_0$		
	m.s. 10.0 mA	14.1 mA	17.3 mA
20.39	102.37	105.94	109.90
18.72	83.10	86.38	89.35
17.17	69.04	71.62	74.50
15.68	58.32	60.42	62.85
14.34	50.99	52.70	54.64

Uit deze waarden zijn de weerstanden berekend voor meetstroomsterkte nul. Na deze meting in vloeibare waterstof werd het apparaat gevuld met heliumgas (66 cm druk bij kamertemperatuur).

Na een meting in vloeibaar helium en een in vloeibare zuurstof vond weer een meting in vloeibare waterstof plaats, juist een week na de eerste (B).

TABEL 18.

Au <sub>M</sub> en Au <sub>O</sub> in heliumgas, 3 Febr. 1937. (B)					
	T °K	10 <sup>4</sup> R/R <sub>0</sub>		T °K	10 <sup>4</sup> R/R <sub>0</sub>
Au <sub>M</sub>	20.43	95.97	Au <sub>O</sub>	20.43	99.20
	19.07	80.95		19.07	84.00
	17.85	70.93		17.86	73.84
	17.18	64.05		17.17	66.94
	16.08	55.97		16.01	58.77
	14.34	46.43		14.32	49.13
	14.22	46.32			

Deze waarden van tabel 18 zijn opgegeven voor meetstroomsterkte nul.

Ter contrôle geschiedde een week later nog een meting in vloeibare waterstof (C) onder dezelfde omstandigheden als bij B (zie tabel 18 en 19).

TABEL 19.

Au <sub>M</sub> en Au <sub>O</sub> in heliumgas, 10 Febr. 1937. (C)					
	T °K	10 <sup>4</sup> R/R <sub>0</sub>		T °K	10 <sup>4</sup> R/R <sub>0</sub>
Au <sub>M</sub>	20.43	95.90	Au <sub>O</sub>	20.43	99.20
	19.09	80.89		19.09	84.06
	18.11	71.28		18.11	74.36
	17.12	63.55		17.12	66.47
	15.95	55.27		15.95	58.28
	14.26	46.14		14.25	49.09

In de figuren 9 en 10 is te zien, dat de kromme voor meetstroomsterkte nul, die gevonden werd uit de drie met verschillende meetstroomsterkten in vacuum gemeten krommen, vrijwel niet afwijkt van de twee in heliumgas gemeten krommen. De kleine afwijkingen geven niet het recht eenige conclusie te trekken.

We kunnen uit deze metingen niet tot een merkbaaren invloed van het heliumgas op deze goudweerstandens besluiten.

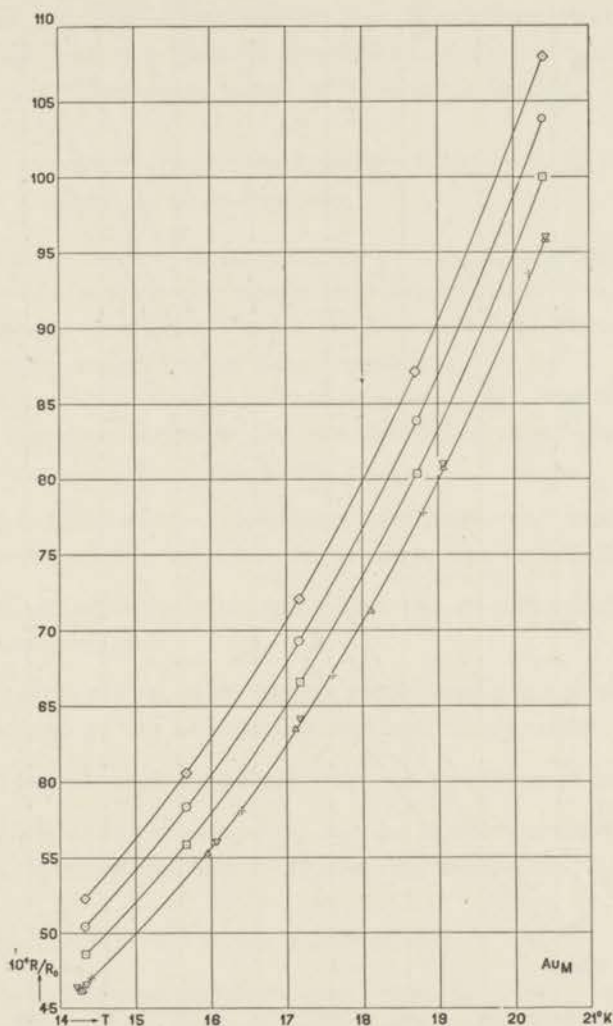
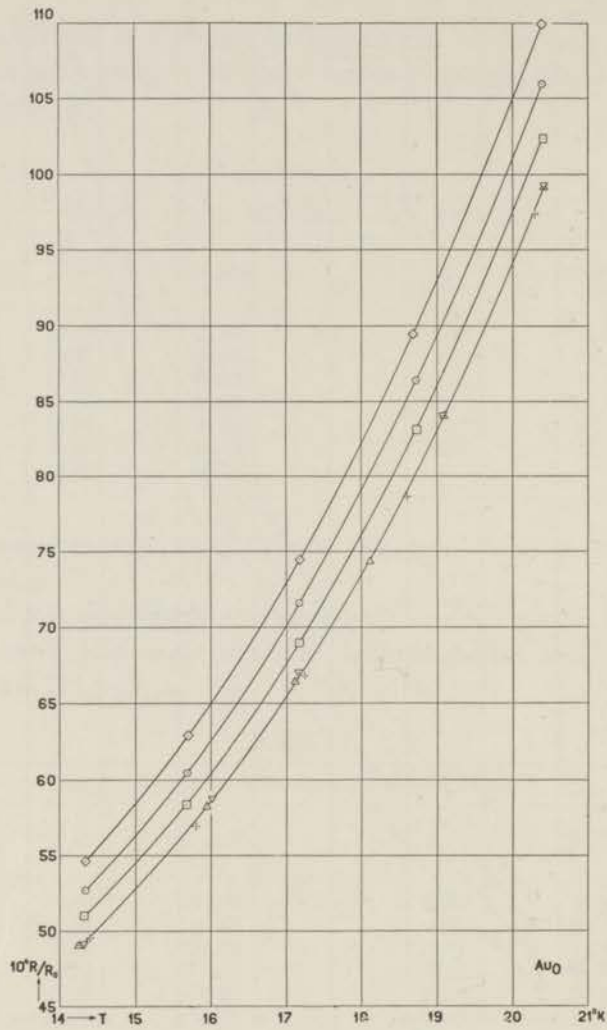


Fig. 9. Electrische weerstand van  $Au_M$ .

- ◇ gemeten in vacuüm, meetstroom 24.4 mA
- " " " " " 20.0 "
- " " " " " 14.1 "
- ▽ " " " " " heliumgas één week later dan de meting in vacuüm
- △ " " " " " twee weken later
- ⊕ " " " " " vacuüm, geëxtrapoleerd naar meetstroom nul.

Fig. 10. Electriche weerstand van  $AuO$ .

- ◇ gemeten in vacuum, meetstroom 17.3 mA
- " " " " " 14.1 "
- " " " " " 10.0 "
- ▽ " " " " heliumgas één week later dan de meting in vacuum.
- △ " " " " twee weken later
- ⊕ " " " " vacuum, geëxtrapoleerd naar meetstroom nul.

Het zal wel van belang zijn om van verschillende gassen den invloed nog eens na te gaan bij verschillende drukken en gedurende verschillende tijden, maar vooral bij verwarmde draden.

§ 6. *De weerstand-temperatuurkrommen tusschen 1 en 21° K en het minimum in deze krommen.*

Nadat de invloeden van temperen en gasomgeving nagegaan zijn, zullen we de weerstand-temperatuurkrommen nader beschouwen. Zooals reeds vermeld werd in het begin van dit hoofdstuk, werd er een minimum aangetoond in deze krommen.

Een dergelijk minimum is in het geheel niet te verwachten volgens de electronentheorie. Om te onderzoeken waar het minimum aan te wijten was, werd nagegaan:

- 1<sup>o</sup>. of het minimum op dezelfde plaats bleef voor goudsoorten, die verschillen in chemische en physische zuiverheid;
- 2<sup>o</sup>. of het minimum afhankelijk was van de aanwezigheid van omringend gas;
- 3<sup>o</sup>. of het minimum ontstond door een legering aan de uiteinden, tengevolge van het lasschen met koperen electroden;
- 4<sup>o</sup>. of het minimum afhankelijk was van de dikte van den draad;
- 5<sup>o</sup>. of het minimum samenhang met dat in den warmteweerstand en ontstond door opstoken met den meetstroom.

1<sup>o</sup>. *Invloed van verschillende goudsoorten.*

De weerstand-temperatuurkromme van  $Au_3$ , een draad van Muntgoud, bleek een minimum te hebben bij 6.95° K. Dit is dus in het gebied, hetwelk we overbruggen konden met behulp van het desorptie-apparaat.

De gegevens vindt men in tabel 20 en fig. 11.

Aan dezen weerstand werd later tevens de invloed van de meetstroomsterkte onderzocht. Daarvoor werd gebruik gemaakt van twee zeer verschillende meetstroomsterkten, n.l. 10 en 40 mA. Het resultaat vindt men in tabel 21.

Men krijgt den indruk, dat bij de meting met 40 mA meetstroom de waarden van  $R/R_0$  iets kleiner zijn. Dit zou misschien aan een geringe verwarming geweten kunnen worden; deze zou een verkleining van den weerstand tengevolge hebben, omdat de temperatuur van het minimum voor  $Au_3$  bij  $6.95^\circ$  K ligt.

TABEL 20.  $Au_3$  (Munt).

	$T$ $^\circ$ K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
H	20.47	295.98	220.07	77.62
"	18.44	271.45		52.54
"	17.14	258.47		39.26
"	16.10	249.00		29.58
"	14.17	237.32		17.64
S	10.88	224.98		5.02
HS	9.34	222.48		2.46
S	9.21	222.35		2.33
"	8.89	221.93		1.90
"	8.39	221.59		1.55
"	7.93	221.32		1.28
"	6.50	221.19		
"	5.90	221.30		
"	5.37	221.50		
"	4.92	221.74		
HeenS	4.30	222.28		
S	4.00	222.47		
He	3.69	222.80		
"	3.58	222.98		
"	3.09	223.63		
"	2.09	225.67		
"	1.72	226.76		
"	1.48	227.74		

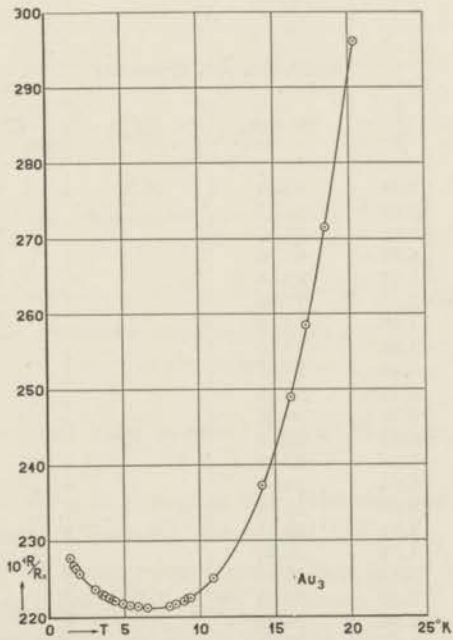
TABEL 21.  $Au_3$  (Munt).

$T$ $^\circ$ K	$10^4 R/R_0$	
	10 mA	40 mA
4.20	222.5	222.5
3.57	223.1	223.0
3.30	223.4	223.4
2.41	225.0	225.0
1.29	228.8	228.7

De weerstanden  $Au_5$  en  $Au_{6a}$ , beide weerstanden van Hilger-goud, hebben hun minimum in de weerstand-temperatuurkromme bij iets lagere temperatuur. (Zie tabel 22 en 23 en fig. 12.)

TABEL 22.  $Au_3$  (Hilger).

	$T$ °K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
H	20.46	170.73	100.50	70.94
"	19.13	154.79		54.84
"	19.08	154.48		54.53
"	18.10	144.39		44.34
"	17.16	135.99		35.85
"	16.96	134.50		34.35
"	15.95	126.90		26.67
"	14.33	117.20		16.87
"	14.12	116.09		15.75
HS	9.56	102.94		2.46
S	6.25	100.95		0.45
"	5.97	100.95		
"	5.67	100.97		
"	5.15	101.08		
"	4.98	101.14		
He	4.30	101.35		
"	2.97	102.35		
"	2.03	103.58		
"	1.26	105.37		

Fig. 11. De elektrische weerstand van  $Au_3$  als functie van de temperatuur.

TABEL 23. Au<sub>6a</sub> (Hilger).

	T °K	10 <sup>4</sup> R/R <sub>0</sub>	10 <sup>4</sup> z	10 <sup>4</sup> [R/R <sub>0</sub> ]
H	20.46	158.11	88.72	70.04
"	19.08	142.00		53.77
"	18.13	132.30		43.99
"	16.96	122.12		33.70
"	15.96	114.63		26.13
HS	15.17	110.55		22.03
H	14.33	105.10		16.55
HS	13.88	103.97		15.37
"	10.92	93.67		4.99
"	9.39	91.05		2.37
"	9.35	90.98		2.28
S	8.03	89.97		1.26
"	7.30	89.62		0.91
"	7.20	89.58		0.87
"	6.60	89.46		
"	5.60	89.46		
"	4.66	89.70		
He	4.30	89.59		
S	4.05	89.92		
He	2.97	90.57		
"	2.03	91.80		
"	1.26	93.58		

TABEL 24. Au<sub>1</sub> (Heraeus).

	T °K	10 <sup>4</sup> R/R <sub>0</sub>	10 <sup>4</sup> z	10 <sup>4</sup> [R/R <sub>0</sub> ]
H	20.44	90.48	26.30	64.35
"	18.08	65.73		39.53
"	17.03	57.30		31.08
"	16.05	50.76		24.52
"	15.17	45.64		19.39
S	12.10	33.86		7.58
"	11.95	33.48		7.20
"	11.84	33.20		6.92
"	10.00	29.67		3.38
"	9.95	29.59		3.30
HS	9.38	28.90		2.61
S	8.83	28.26		1.97
"	7.28	27.14		0.84
"	6.54	26.85		0.55
"	6.08	26.74		0.44
"	4.81	26.51		
He	4.23	26.44 <sup>b</sup>		
"	3.77	26.44		
"	3.12	26.46		
"	2.39	26.52		
"	1.63	26.66		



De weerstanden  $Au_1$  en  $Au_2$  hebben het minimum in het heliumgebied (beneden  $4.2^\circ \text{K}$ ). Bij deze twee weerstanden werd het minimum het eerst opgemerkt.

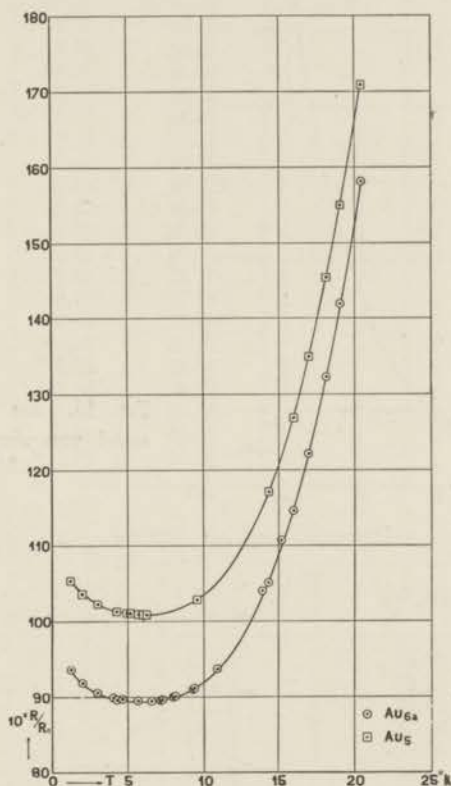


Fig. 12. De elektrische weerstand van  $Au_5$  en  $Au_{6a}$  als functie van de temperatuur.

De gegevens vindt men in tabel 24 en 25 en in de figuren 13 en 14.

De weerstand  $Au_{7a}$  is eveneens van Heraeus-goud. Alleen werd deze op een andere manier getemperd dan  $Au_1$  en  $Au_2$ . Het minimum is ook bij dezen weerstand aanwezig en ligt vlak bij dat van  $Au_1$  en  $Au_2$ . (Zie tabel 26.)

Nadat op deze manier de plaats van het minimum was nagegaan voor verschillende goudsoorten, werd de invloed van een heel langen

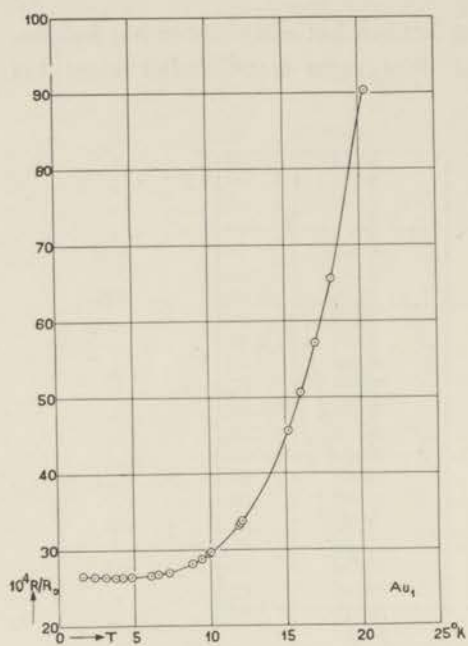


Fig. 13. De elektrische weerstand van  $Au_1$  tusschen 1 en  $21^\circ K$ .

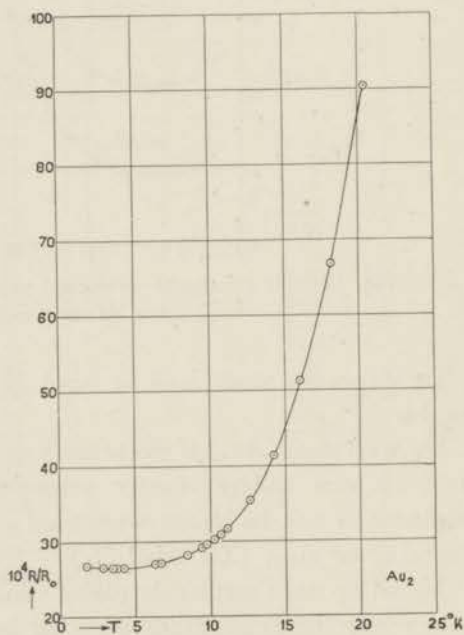


Fig. 14. De elektrische weerstand van  $Au_2$  tusschen 1 en  $21^\circ K$ .

TABEL 25. Au<sub>2</sub> (Heraeus).

	$T$ °K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
H	20.45	90.48	26.48	64.16
"	18.15	66.42		40.05
"	16.02	50.67		24.25
"	14.25	41.40		14.95
S	12.66	35.42		8.96
"	11.15	31.83		5.35
"	11.11	31.73		5.25
"	10.68	30.96		4.49
"	10.24	30.22		3.75
"	10.12	30.05		3.58
HS	9.76	29.62		3.15
S	9.41	29.14		2.67
"	8.48	28.20		1.72
"	6.70	27.15		0.67
"	6.28	27.02		0.54
He	4.24	26.58		
"	4.22	26.57		
"	3.76	26.57		
"	3.49	26.58		
"	2.86	26.61		
"	1.75	26.85		

TABEL 26. Au<sub>7a</sub> (Heraeus).

	$T$ °K	$10^4 R/R_0$
H	20.46	95.53
"	19.09	79.76
"	18.12	70.43
"	16.96	60.68
"	15.96	53.64
"	14.33	44.74
He	4.30	29.01
"	3.86	28.91
"	2.98	28.97
"	2.03	29.08
"	1.26	29.31

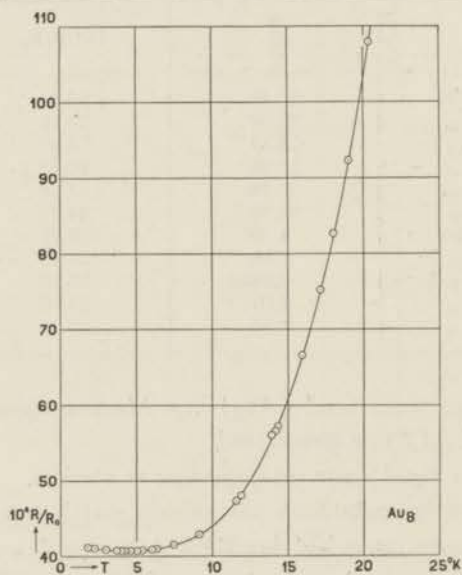
tempertijd bij een weerstand ( $Au_8$ ) van Heraeus-goud onderzocht. Deze  $Au_8$  werd 115 uur getemperd.

In tabel 27 en fig. 15 zijn de gegevens te vinden.

Om te zien of het minimum samenhang met het temperen, werd een draad gemeten, zonder dat deze getemperd was. Zooals te verwachten was, waren de waarden van  $R/R_0$  groot. Toch was ook

TABEL 27.  $Au_8$  (Heraeus).

	$T$ °K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
H	20.39	107.96	40.55	67.68
"	19.00	92.28		51.94
"	18.01	82.60		42.22
"	17.13	75.17		34.76
"	15.95	66.54		26.09
HS	14.33	57.17		16.69
H	14.19	56.54		16.05
HS	13.94	55.95		15.46
S	11.91	48.00		7.48
"	11.64	47.39		6.87
HS	9.15	42.85		2.31
S	7.49	41.47		0.92
"	6.36	40.96		0.41
"	6.08	40.91		0.36
"	5.40	40.78		0.23
"	5.07	40.75		0.20
"	4.62	40.73		
He	4.24	40.72		
S	4.02	40.74		
He	3.70	40.77		
"	3.02	40.83		
"	2.29	41.00		
"	1.80	41.16		
"	1.60	41.24		

Fig. 15. De elektrische weerstand van  $Au_8$  als functie van de temperatuur.

hier weer het minimum aanwezig, maar alleen op een andere plaats dan men uit bepaalde overwegingen zou verwachten (zie § 7).

In tabel 28 en fig. 16 vindt men de gegevens. De waarden van  $R/R_0$  zijn veel grooter dan bij getemperde draden.

TABEL 28.

Au <sub>10</sub> (Heraeus), ongetemperd.				
	$T$ °K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
H	20.39	232.41	159.75	73.84
"	19.06	215.60		56.76
"	18.08	204.92		45.90
"	17.13	196.10		36.94
"	16.01	187.25		27.95
HS	15.17	181.54		22.14
H	14.19	176.16		16.68
HS	13.18	171.53		11.97
"	11.18	165.11		5.45
"	9.18	161.87		2.15
S	8.67	161.39		1.67
"	7.57	160.71		0.98
"	6.78	160.42		0.68
"	5.93	160.25		
"	5.40	160.20		
"	4.85	160.16		
He	4.25	160.13		
S	4.22	160.13		
"	4.05	160.13		
He	3.70	160.13		
"	3.00	160.17		
"	2.02	160.30		
"	1.26	160.48		

## 20. Invloed van het omringende gas.

Daar alle, onder 10. genoemde, draden gemeten werden in een gasomgeving, was de mogelijkheid niet uitgesloten, dat het minimum te wijten zou zijn aan geadsorbeerde of geabsorbeerde gassen. Het was dus van belang een draad te meten, welke na het temperen in vacuüm *niet* aan de eventuele werking van de lucht en van het vloeibare gas, waarin gemeten werd, blootgesteld was geweest.

De draad Au<sub>9</sub> werd in vacuüm gemeten in vloeibare waterstof (zie § 4 van dit hoofdstuk) en was dus niet met gassen in aanraking geweest. Deze draad werd nu eveneens in vacuüm in een vloeibaar heliumbad gemeten. Voor een meting in vacuüm dient men met

verschillende stroomsterkten den weerstand te meten om te kunnen extrapoleren naar meetstroomsterkte nul, daar de draad tengevolge

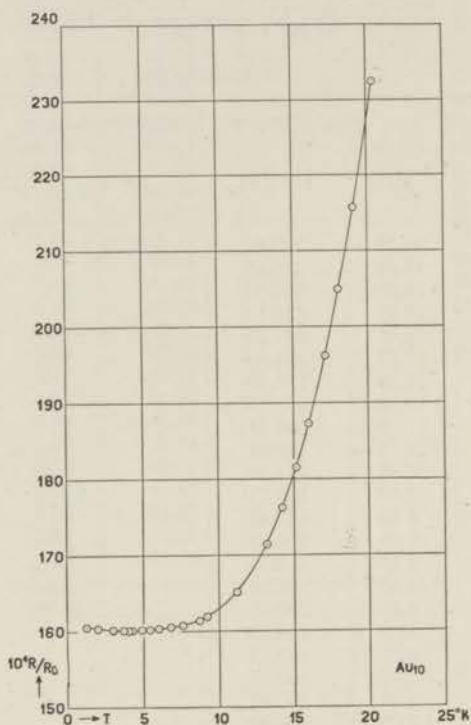


Fig. 16. De elektrische weerstand van  $Au_{10}$  (ongetemperd).

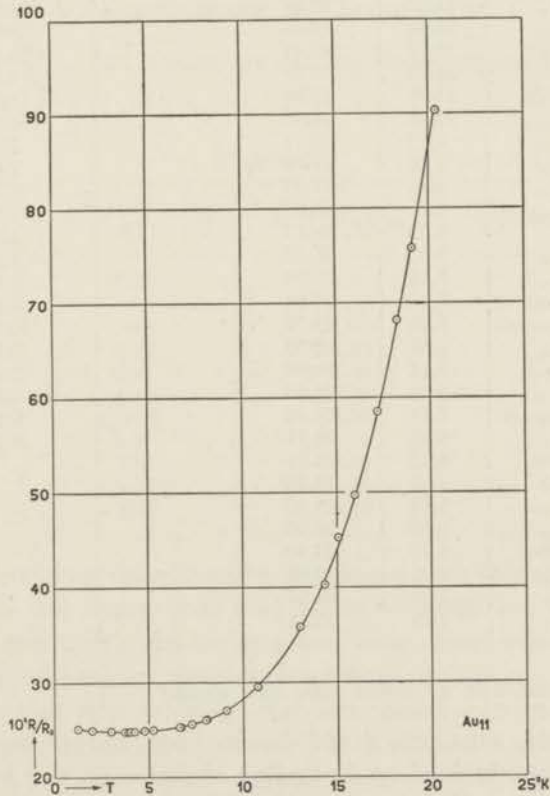
van den meetstroom warm wordt en dus een weerstand heeft, welke afhankelijk is van den meetstroom.

Voor de verschillende stroomsterkten bleef het minimum aanwezig en verschoof voor grootere stroomsterkte naar lagere temperaturen. In tabel 29 zijn de gegevens te vinden over dit experiment. In de laatste kolom is de weerstand voor meetstroomsterkte nul aangegeven.

Men kan dus besluiten, dat het minimum ook bij afwezigheid van omringend gas aanwezig is en dus niet te wijten is aan de omringende gassen.

TABEL 29.

Au <sub>0</sub> (Heraeus) in vacuum.				
	10 <sup>4</sup> R/R <sub>0</sub>	Meetstroom	Nauwkeurigheid	10 <sup>4</sup> R/R <sub>0</sub> voor meetstroom = 0
4.25	27.16	35 mA	0.9 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	27.14
	27.15	20 "	1.4 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	
	27.1	10 "	3.0 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	
3.70	27.14	35 "		27.08
	27.10	20 "		
	27.1	10 "		
3.00	27.13	35 "		27.13
	27.13	20 "		
	27.1	10 "		
2.02	27.18	35 "		27.24
	27.22	20 "		
	27.3	10 "		
1.25	27.28	35 "		27.36
1.26	27.33	20 "		
1.26	27.4	10 "		

Fig. 17. De elektrische weerstand van Au<sub>11</sub>.

30. *Invloed van koperen electroden.*

Het onderzoek naar den invloed op het minimum van het lasschen met de koperen electroden werd gedaan bij  $Au_{11}$ , waarbij tevens de potentiaal- en stroomdraden afzonderlijk werden bevestigd.

De draden werden aan elkaar gelascht tusschen gouden knopjes, welke in de koperen electroden waren vastgemaakt. Ook bij dezen weerstand bleef het minimum in de weerstand-temperatuurkromme, zooals te zien is in tabel 30 en fig. 17.

TABEL 30.  $Au_{11}$  (Heraeus).

	$T$ °K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
H	20.41	90.39	24.81	65.74
"	19.10	75.83		51.15
"	18.24	68.19		43.49
"	17.22	58.48		33.75
"	15.99	49.71		24.96
HS	15.12	45.23		20.47
H	14.35	40.27		15.50
HS	13.07	35.80		11.02
"	10.77	29.55		4.75
"	9.15	27.11		2.31
"	9.12	27.09		2.29
"	9.10	27.05		2.25
"	8.06	26.09		1.28
"	8.03	26.07		1.26
"	8.02	26.06		1.25
"	7.28	25.63		0.82
"	7.26	25.61		0.80
"	6.64	25.37		0.56
"	6.62	25.35		0.54
"	5.11	24.99		0.18
"	4.76	24.95		0.14
"	4.71	24.94		0.13
"	4.25	24.91		0.10
He	4.22	24.91		
S	4.05	24.90 <sup>1</sup>		
"	3.98	24.90 <sup>3</sup>		
"	3.89	24.90		
He	3.70	24.90		
"	3.01	24.91		
"	2.01	24.97		
"	1.23	25.11		

40. *Invloed van de dikte van den draad.*

De dikte van den draad heeft, voor zoover nagegaan kon worden, geen invloed op de ligging of den vorm van het minimum.



Later (zie § 8) zal de belangrijke kwestie besproken worden van den invloed van de draaddikte op de grootte van den restweerstand.

5<sup>o</sup>. *Invloed van den meetstroom.*

De invloed van de warmteontwikkeling door den meetstroom is reeds vermeld onder punt 1<sup>o</sup>.

§ 7. *Het verband tusschen de temperatuur en  $R/R_0$  van het minimum.*

Uit de metingen van de vorige paragraaf kunnen we het volgende besluiten.

Voor onzuiverder goud verplaatst het minimum zich naar hogere temperaturen, of beter gezegd: de temperatuur van het minimum is een functie van de waarde van  $R/R_0$  in het minimum.

Zetten we n.l. de temperatuur van het minimum ( $T_{\min}$ ) uit als functie van  $\frac{R_{\min}}{R_0}$ , dan vinden we een continue kromme (zie fig. 18 en tabel 31).

TABEL 31.

Naam	$T_{\min}$ °K	$10^4 (R/R_0)_{\min}$	Opmerkingen
Au <sub>3</sub>	6.95	221.1	
Au <sub>10</sub>	3.95	160.13	Ongetemperd
Au <sub>10</sub>	3.80	27.94	Getemperd
Au <sub>5</sub>	6.15	100.9	
Au <sub>6a</sub>	5.95	89.40	
Au <sub>8</sub>	4.40	40.70	
Au <sub>O</sub>	3.9-4.0	34.40	Onzeker
Au <sub>M</sub>	3.9	31.34	
Au	3.80	28.86	"
Au <sub>7a</sub>	3.70	26.44	
Au <sub>11</sub>	3.60	24.90	

Extrapoleren we deze kromme, dan kunnen we voorspellen waar het minimum zal liggen voor heel kleine waarden van  $R/R_0$ . Het is dan niet onmogelijk, dat het minimum voor ideaal zuiver goud bij 0° K zou liggen, hetgeen in overeenstemming zou zijn met de theorie.

Het is echter ook mogelijk, dat het ideaal zuivere goud een minimum heeft bij een temperatuur van b.v. enkele tienden graad Kelvin.

Uit de extrapolatie kan men ook besluiten, dat MEISSNER bij zijn heel zuiver goud met een waarde van  $2.9 \times 10^{-4}$  voor  $R/R_0$  geen minimum zal vinden, omdat de temperatuur van het minimum samenvalt met de laagste temperatuur waarbij hij meten kan.

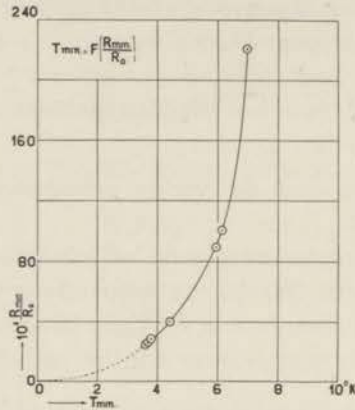


Fig. 18.  $T_{\min}$  als functie van  $(R/R_0)_{\min}$ .

Het zou daarom interessant zijn dergelijk zuiver goud nauwkeurig te meten om deze voorspelling te kunnen toetsen.

Bij het meten van den ongetemperden gouddraad bleek, dat het minimum niet op de plaats kwam, die voorspeld kon worden met behulp van de kromme in fig. 18.

Men zou de volgende opmerking kunnen maken. Onderstellen we, dat de draad bestaat uit een aantal in serie geschakelde stukken goud van verschillende zuiverheid, zoowel fysisch als chemisch, dan is de gemeten weerstand een gemiddelde van de weerstanden van elk stuk. Daar echter het verband tusschen  $T_{\min}$  en  $\frac{R_{\min}}{R_0}$  niet lineair is, behoeft de plaats van het minimum geen gemiddelde te zijn van de plaatsen, behorende bij de verschillende stukken. Ter demonstratie werden enkele krommen geteekend, waarbij twee verschillende soorten goud in verschillende verhoudingen in serie werden geschakeld.

Nemen we aan, dat een ongetemperde draad voor de helft zou bestaan uit Munt-goud en voor de andere helft uit Heraeus-goud, dan vinden we een temperatuur voor het minimum van ongeveer

6° K bij een  $R/R_0$  van  $123.24 \times 10^{-4}$ , terwijl de  $T_{\min}$  van de samenstellende deelen resp. 6.95° en 3.60° K was (zie fig. 19). We nemen voor de samenstellende deelen goud van de zuiverheid van getemperd Munt- en Heraeus-goud.

Bij de verhouding 1 Munt-goud tegen 2 Heraeus-goud komt het minimum, zooals te zien is in fig. 20, bij 5,25° K en  $R/R_0 = 90.54 \times 10^{-4}$  te liggen, terwijl bij de verhouding 1 Munt-goud tegen 9 Heraeus-goud het minimum bij 4.75° K en  $R/R_0 = 44.64 \times 10^{-4}$  komt te liggen (zie fig. 21).

Het was nu wel interessant om na te gaan of de weerstand  $Au_{10}$  na temperen wel aan de kromme van fig. 18 zou voldoen. De resultaten van de meting van den getemperden  $Au_{10}$  vindt men in tabel 32 en figuur 22, waaruit blijkt, dat de temperatuur van het minimum 3.80° K is en de waarde van  $R/R_0$   $27.94 \times 10^{-4}$  bedraagt.

$Au_{10}$  voldoet dus weer aan de kromme van fig. 18.

TABEL 32.  $Au_{10}$  (Heraeus), getemperd.

	$T$ °K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
H	20.41	92.34	27.78	64.74
"	19.08	77.21		49.57
"	18.06	67.63		39.96
"	17.10	60.17		32.48
"	15.91	51.95		24.24
HS	15.13	47.49		19.76
H	14.18	42.70		14.96
HS	13.14	38.70		10.95
"	11.36	33.54		5.78
"	9.31	30.20		2.43
S	7.92	28.95		1.17
"	7.01	28.49		0.71
"	6.31	28.22		0.44
"	5.73	28.10		0.32
"	5.27	28.04		0.26
"	4.51	27.96		
He	4.24	27.95		
S	4.10	27.94		
He	3.71	27.94		
"	3.51	27.94		
"	3.00	27.99		
"	2.47	28.01		
"	2.01	28.06		
"	1.56	28.15		
"	1.24	28.22		
"	1.23	28.24		

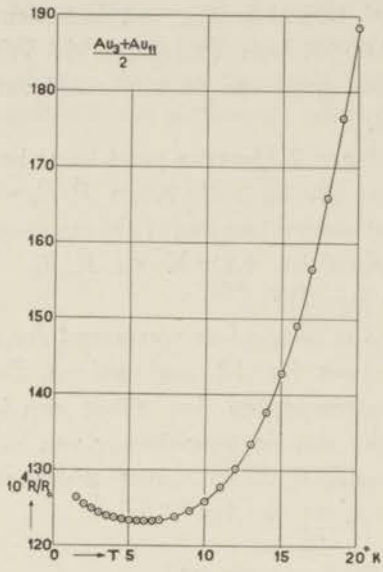


Fig. 19.

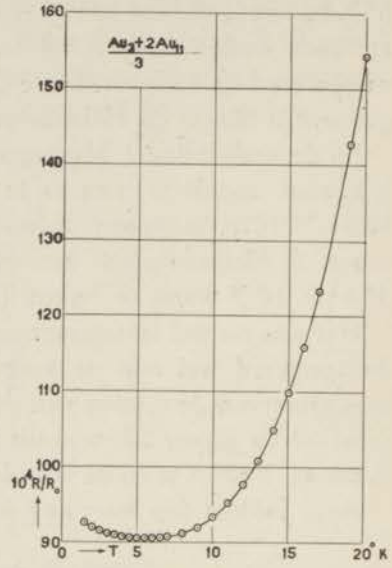


Fig. 20.

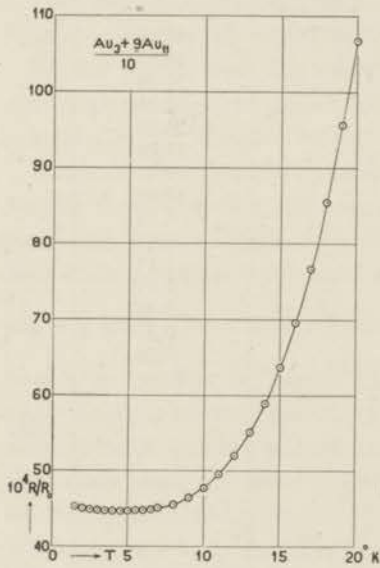
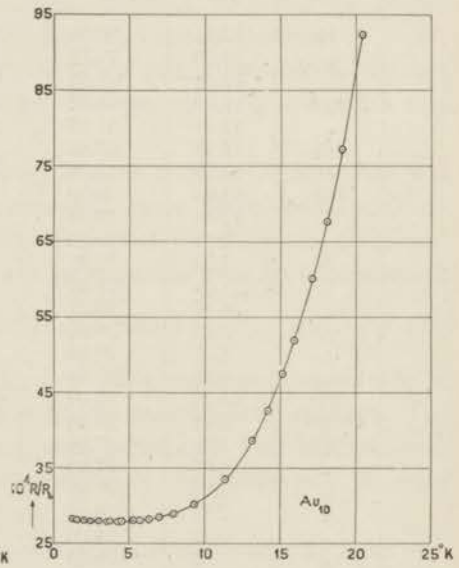


Fig. 21.

Fig. 22. De elektrische weerstand van  $Au_{10}$  als functie van de temperatuur

We zien dus, dat voor de getemperde gouddraden een verband bestaat tusschen de temperatuur van het minimum en de daarbij behorende waarde van  $R/R_0$  zooals aangegeven in fig. 18 van pag. 58.

Welke de beteekenis is van het feit, dat de getemperde draden steeds weer op de kromme komen te liggen, is echter niet duidelijk.

### § 8. Onderzoek naar den invloed van de draaddoorsnede.

De directe aanleiding tot de in deze paragraaph beschreven metingen was de volgende: door DE HAAS en BIERMASZ<sup>24</sup>) was gevonden, dat de warmteweerstand van isolatoren een minimum vertoont. Bij temperaturen beneden die van het minimum bleek de specifieke warmteweerstand een functie van de dikte van het staafje te zijn. Het lag nu voor de hand na te gaan, of ook in het geval van goud een dergelijke samenhang tusschen het minimum en de draaddikte kon worden aangetoond. Metingen van den weerstand van een tweetal draden van een tiende- ( $Au_M$ ) en een twintigste ( $Au_O$ ) millimeter diameter toonden geen invloed aan op het minimum, doch wel op den restweerstand. Hiervoor verwijzen wij naar tabel 35 en tabel 36, waarin het verschil tusschen de weerstanden van  $Au_M$  en  $Au_O$  in het heliumgebied zijn aangegeven, en naar tabel 33 en 34,

TABEL 33.

$T$ °K	$10^4 R/R_0$	
	$Au_M$	$Au_O$
90	2723.	2728.
85	2513.	2517.
78.55	2306.	2311.
75.01	2096.	2100.
69.97	1874.	1878.
66.30	1671.	1677.

waarin de waarden van de weerstanden voor  $Au_M$  en  $Au_O$  zijn opgegeven bij zuurstof- en heliumtemperaturen. Voor de waterstoftemperaturen verwijzen wij naar tabel 18 op blz. 42. In tabel 35 en 36 zien we verschillende waarden aangegeven. Deze zijn n.l. ontleend aan metingen, welke geschieden met een week tusschentijd. Voor de eerste meting was er géén heliumgas in de omgeving van den draad (dit werd bij lage temperaturen eerst toegelaten) en de tweede meting geschiedde nadat de draad gedurende een week in

heliumgas was geweest. Uit de beide metingen blijkt evenwel, dat de opgaande takken beneden het minimum evenwijdig lopen met een nauwkeurigheid van ruim 1 %, zoodat we geen invloed op het minimum kunnen vaststellen. Zooals de tabel 34 aantoont, is er wel een invloed op den restweerstand.

TABEL 34.

$T$ °K	$10^4 R/R_0$		$T$ °K	$10^4 R/R_0$	
	$Au_M$	$Au_O$		$Au_M$	$Au_O$
4.21	31.35	34.02	4.20	31.44	34.41
3.70	31.34	34.01	3.98	31.43	34.40
3.00	31.38	34.03	3.51	31.44	34.41
2.02	31.49	34.13	2.50	31.50	34.52
1.51	31.59	34.23	2.00	31.58	34.57
1.22	31.63	34.28	1.89	31.59	34.59
			1.22	31.77	34.74

TABEL 35.

$T$ °K	$10^4 \Delta R/R_0$
4.21	2.67
3.70	2.67
3.00	2.65
2.02	2.64
1.51	2.64
1.22	2.65

TABEL 36.

$T$ °K	$10^4 \Delta R/R_0$
4.20	2.97
3.98	2.97
3.51	2.97
2.50	3.02
2.00	2.99
1.89	3.00
1.22	2.97

We moeten in verband hiermede de aandacht vestigen op vroegere metingen van CATH, KAMERLINGH ONNES en BURGERS <sup>8)</sup> van den weerstand van de gouddraden *Au-11-1915* en *Au-12-1915*. Deze draden van 0.1 en 0.05 mm middellijn waren door nieuwe diamanten getrokken en hadden een waarde van  $R/R_0$  bij kookpunt waterstof van resp.  $82.5$  en  $81.1 \times 10^{-4}$ . Ook metingen van andere onderzoekers wijzen op den invloed van den diameter, zooals uit het volgende lijstje blijkt:

P. G. CATH, H. KAMERLINGH ONNES en J. H. BURGERS, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 152c, 1917; Versl. Kon. Ak. v. Wetensch. Amsterdam 26, 688, 1918; Proc. kon. Akad. Amsterdam 20, 1163, 1918. Platina (Heraeus)

$$R_{20.4}/R_0 = 0.01219 \text{ voor diameter } 0.05 \text{ mm}$$

$$" = 0.01000 \text{ " " } 0.10 \text{ "}$$

H. KAMERLINGH ONNES en W. TUYN, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 160a, 1922; Versl. Kon. Akad. v. Wetensch. Amsterdam 31, 467, 1922; Proc. kon. Akad. Amsterdam 25, 443, 1922; Arch. néerl. Sci. et nat. (III A) 6, 284, 1923.

Thallium (Kahlbaum)

$$R_{4,2}/R_0 = 0.00168 \text{ voor diameter } 0.2 \text{ mm}$$

$$" = 0.00084 \text{ " " } 0.5 \text{ "}$$

H. KAMERLINGH ONNES en W. TUYN, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden Suppl. No. 58, 1926.

Tin („Kahlbaum“)

$$R_{4,2}/R_0 = 0.00079 \text{ voor diameter } 0.15 \text{ mm}$$

$$" = 0.00075 \text{ " " } 0.40 \text{ "}$$

K. STEINER en E. FÜNFER, Actes VIIe Congrès Int. du Froid 1936.

Zilver (Hönigschmid)

$$R_{4,2}/R_0 = 0.00319 \text{ voor diameter } 0.1 \text{ mm}$$

$$" = 0.00249 \text{ " " } 0.4 \text{ "}$$

Merkwaardig is de opmerking van KAMERLINGH ONNES in Communication 119b van het jaar 1911:

„One may ask if it is not possible to put the difference between the two wires, obtained from HERAEUS, inversely proportional to the thickness.”

De draden  $Au_M$  en  $Au_O$  waren door ons zeer zorgvuldig behandeld en volkomen gelijk getemperd, zoodat we vrij zeker konden zijn, dat het verschil in restweerstand niet aan een verschil in chemische en physische zuiverheid toe te schrijven was.

Volgens NORDHEIM kan men den specifiëken weerstand van een draad schrijven als een som van den specifiëken weerstand voor een oneindig dikken draad en een term, die evenredig is met de gemiddelde vrije weglengte  $\bar{l}$  van het electron en met een reflectiecoëfficiënt  $\alpha$  tegen den wand van den draad en welke omgekeerd evenredig is met den diameter  $d$ . Of:

$$\varrho_d = \varrho_\infty \left( 1 + \alpha \frac{\bar{l}}{d} \right).$$

Daar we mogen aannemen, dat het aantal vrije electronen per atoom temperatuurafhankelijk is, kunnen we schrijven:

$$\varrho_\infty \bar{l} = \varrho_\infty^0 \bar{l}^0.$$

Hierin is  $\varrho_{\infty}^0$  = de specifieke weerstand voor een oneindig dikken draad bij  $0^{\circ}$  C;

$\bar{l}^0$  = de gemiddelde vrije weglengte bij  $0^{\circ}$  C.

We kunnen dan schrijven:

$$\varrho_d = \varrho_{\infty} + a \varrho_{\infty}^0 \frac{\bar{l}^0}{d}.$$

We mogen aannemen, dat  $\varrho_d^0 = \varrho_{\infty}^0$ , als we draden kiezen, waarvoor  $d \geq 1$  micron. De formule wordt dan:

$$\frac{\varrho_d}{\varrho_d^0} = \frac{\varrho_{\infty}}{\varrho_{\infty}^0} + a \frac{\bar{l}^0}{d}$$

of:

$$(R/R_0)_d = (R/R_0)_{\infty} + a \frac{\bar{l}^0}{d}.$$

Uit de formule zien we, dat het verschil in waarde van  $R/R_0$  voor twee verschillend dikke draden omgekeerd evenredig zou moeten zijn met den diameter. Een dergelijke samenhang tusschen weerstand en draaddikte was reeds in 1934 door EUCKEN en zijn leerlingen<sup>25)</sup> in onderzoek genomen. Door hen werd de weerstand van uiterst dunne bismuth-draadjes gemeten. Deze draadjes werden echter in glas getrokken. Men is dan niet zeker van dezelfde chemische en fysische zuiverheid.

In 1937 heeft RIEDEL<sup>26)</sup> den elektrischen weerstand gemeten van lood- en cadmiumdraden van verschillende draaddikten. De looddraden werden verkregen door uitschieten van gesmolten lood in glas. Hier kan men dus evenmin zeker zijn van dezelfde chemische en fysische zuiverheid, vooral voor zoover het het oppervlak van den draad betreft.

De waargenomen weerstanden, zooals die door RIEDEL bepaald zijn, zijn dan ook buitengewoon slecht. Uit de grafiek, welke RIEDEL geeft, waarin de waarden van  $R/R_0$  als ordinaat bij kookpunt waterstof zijn uitgezet als functie van het omgekeerde van den diameter als abscis, ligt het geheele vlak op niet te overtreffen wijze bezaaid met punten; RIEDEL kiest de punten met de kleinste  $R/R_0$ , daar de punten met de kleinste  $R/R_0$  inderdaad de waarschijnlijkste zijn, als de juiste en trekt door die punten een rechte



lijn. De spreiding van de punten maant tot groote voorzichtigheid en een conclusie te trekken uit de laagste punten is op zijn minst genomen gewaagd te noemen. De spreiding van de punten voor cadmium is geringer.

Bij de hoogere temperaturen werd door REUTER <sup>27)</sup> de weerstand gemeten van verschillend dikke platinadraden met 0.1 % verontreiniging. Hij vindt een bevestiging van de formule van NORDHEIM, hetgeen verbazingwekkend is als men zijn meetmethode nader bekijkt.

Keeren we terug tot de voorloopige metingen van de twee gouddraden en berekenen we hieruit de vrije weglengte bij 0° C, dan vinden we de waarde 391 Å. Hierbij werd voor  $\alpha$  de theoretische waarde  $\frac{8}{3\pi}$  genomen. Gebruik makende van de formule van SOMMERFELD voor den soortelijken weerstand:

$$\rho = \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{1/2} \frac{h}{e^2} \frac{1}{N_e^{1/2} \bar{l}}$$

waarbij

$$h = 6.55 \times 10^{-34} \text{ Watt sec.}^2$$

$$e = 1.59 \times 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

$$N_e = \text{het aantal vrije electronen per cm}^3,$$

kunnen we met behulp van de bepaalde vrije weglengte het aantal vrije electronen per atoom bepalen. De formule kunnen we namelijk als volgt schrijven:

$$\rho y^{1/2} \bar{l}^0 = 1.781 \times 10^{-12} \left(\frac{M}{\delta}\right)^{1/2}$$

waarbij

$$y = \text{het aantal vrije electronen per atoom}$$

$$\bar{l}^0 = \text{de gemiddelde vrije weglengte in cm bij } 0^\circ \text{ C}$$

$$\delta = \text{de dichtheid van het metaal}$$

$$M = \text{het atoomgewicht van het metaal.}$$

Voor het aantal vrije electronen vinden we dan 0.96 per atoom voor goud.

Ofschoon dit resultaat verrassend mooi is, kunnen we uit de meting van twee draden geen conclusie trekken, welke genoegzaam zeker is. Daarom hebben we het onderzoek op grootere schaal opgezet. We maten den weerstand van 18 gouddraden van 10 behoorlijk verschillende diameters tusschen 500 en 25 micron. Deze draden werden getrokken door treksteen van agaat, saffier en diamant. Alvorens echter het te meten goud van HERAEUS („Analysenrein“ van 1 mm diameter) erdoor te trekken, werden de openingen gereinigd met koningswater. Hierna werd er zuiver goud van de Munt in Utrecht doorgetrokken. Alle draden werden met behulp van filtreerpapier aangepakt om verontreiniging door de handen te voorkomen. Met behulp van koningswater werd één uiteinde dunner geëetst en dat door de steenen gestoken. Wanneer op deze wijze een begin gemaakt was, kon de draad verder door de opening worden getrokken.

Toen alle openingen dus zoowel chemisch als mechanisch waren gereinigd, werden ze eerst weer in koningswater gebracht en met gedestilleerd water doorgespoeld. Na het drogen van de steenen werd het goud van HERAEUS erdoor getrokken, waarbij zeer veel acht geslagen werd op het schoonhouden van den draad. Er werden draden vervaardigd van de volgende diameters: 501 (1), 253 (2<sup>a</sup>) 251 (2<sup>b</sup>), 174 (3<sup>a</sup>), 172 (3<sup>b</sup>), 160 (4<sup>a</sup> en 4<sup>b</sup>), 108 (5), 64<sup>5</sup> (6<sup>a</sup>), 61 (6<sup>b</sup>), 51 (7<sup>a</sup> en 7<sup>b</sup>), 40<sup>2</sup> (8<sup>a</sup> en 8<sup>b</sup>), 30<sup>8</sup> (9<sup>a</sup> en <sup>b</sup>) en 25<sup>5</sup> (10<sup>a</sup> en 10<sup>b</sup>) micron. Aan draad N<sup>o</sup>. 1 van 501 micron werden aan beide uiteinden 2 dunnere draden gelascht, die op een glazen raampje werden vastgemaakt, zoodat de draad vrij hing. Dicht bij het midden werden 2 dunne potentiaaldraden aangelascht. De draad werd niet gespiraliseerd. Dit geschiedde wel met de andere draden behalve met 10<sup>a</sup> en 10<sup>b</sup> van 25<sup>5</sup> micron. Bij de draden 2<sup>a</sup> (253  $\mu$ ) en 2<sup>b</sup> (251  $\mu$ ) werden de potentiaaldraden dicht bij het midden geplaatst. Bij de andere draden werden de potentiaaldraden dicht bij de uiteinden gelascht en dienden tevens als ophangdraad. Dit werd gedaan met het oog op een homogeen temperen.

Het temperen van de draden, welke volledig gemonteerd waren, geschiedde door er in vacuum een electrischen stroom door te sturen. De temper-temperatuur was ongeveer 500° C. Van de draden werd de waarde bij 0° C,  $R_0$ , bepaald voor en na de meting in vloeibaar waterstof en in vloeibaar helium. In figuur 23 vindt men de waarde

van  $R/R_0$  voor de verschillende draden weergegeven als functie van het omgekeerde van den diameter voor de temperatuur  $4.2^\circ \text{K}$ . (Zie tabel 37.) In deze figuur valt het eerst op, dat de punten

TABEL 37.  $T = 4.21^\circ \text{K}$ 

No.	$R_0$ $\Omega$	Diameter (d) in m.m.	$\frac{1}{d}$ mm <sup>-1</sup>	$10^4 R/R_0$
1	0.002567	0.501	2.00	63.9
2a	0.03270	0.253	3.95	64.17
2b	0.06168	0.251	3.98	64.01
3a	0.14147	0.174	5.75	70.94
3b	0.08588	0.172	5.81	65.38
4a	0.16923	0.160	6.25	71.38
4b	0.12403	0.160	6.25	65.63
5	0.19167	0.108	9.26	66.36
6a	0.43089	0.064	15.50	72.15
6b	0.42908	0.061	16.39	72.21
7a	0.46982	0.051	19.60	75.69
7b	0.59112	0.051	19.60	76.96
8a	1.06244	0.040 <sup>a</sup>	24.87	84.35
8b	1.11533	0.040 <sup>a</sup>	24.87	86.29
9a	1.07006	0.030 <sup>b</sup>	32.46	91.68
9b	0.90262	0.030 <sup>b</sup>	32.46	95.16
10a	0.55673	0.025 <sup>c</sup>	39.21	97.16
10b	0.79639	0.025 <sup>c</sup>	39.21	76.96

1 t/m 10<sup>a</sup> niet een rechte vormen, doch een kromme, die naar kleineren diameter  $\left(\text{grootte } \frac{1}{d}\right)$  oploopt. De kromming is vrij sterk en de ligging van de 15 punten zoodanig, dat er *geen twijfel* bestaat hoe de kromme getrokken moet worden. Dit zou dus niet overeenkomen met de formule van NORDHEIM. En de aanname ligt voor de hand, dat deze onder te eenvoudige veronderstellingen is afgeleid.

Beschouwen we de eerste 6 punten, dan kunnen we daardoor wel een rechte trekken. De helling van deze rechte lijn geeft dan het product  $a \times \bar{l}^0$ . We kunnen dan  $\bar{l}^0$  uitrekenen als we voor  $a$  de theoretische waarde  $\frac{8}{3\pi}$  invoeren. De waarde van de vrije weglengte bij  $0^\circ \text{C}$  bedraagt dan ongeveer 400 Å. Hiermee kan men

dan het aantal vrije electronen per atoom berekenen. Dit bedraagt dan 0.94.

Het verlengde van de rechte door de punten 1 t/m 5 komt merkwaardigerwijs dicht in de buurt van punt  $10^b$  te liggen. Evenwel zou men de oorzaak moeten vinden voor de systematische afwijking van de punten  $6^a$  en  $6^b$ ,  $7^a$  en  $7^b$ ,  $8^a$  en  $8^b$ ,  $9^a$  en  $9^b$  en  $10^a$ , en dan nagaan of deze oorzaak niet aanwezig was bij  $10^b$ .

Ofschoon de spreiding van de punten zeer veel minder is dan bij RIEDEL, durven we toch nog geen definitieve conclusie hieruit te

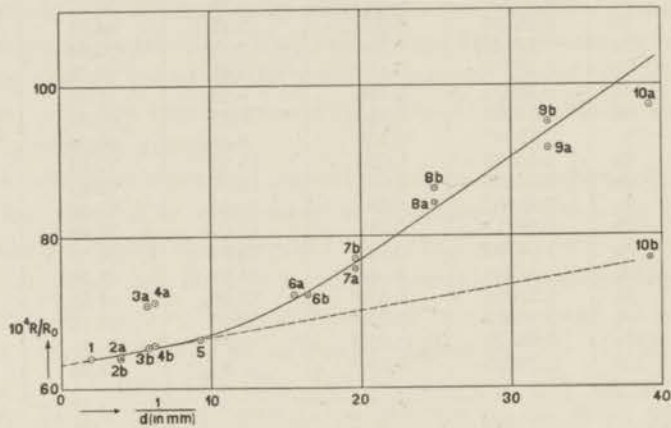


Fig. 23. De waarde van  $R/R_0$  als functie van het omgekeerde van den diameter.

trekken. Wel is zeker, dat er een vormeffect en wel in dien zin, dat dit *niet* veroorzaakt wordt door chemische verontreiniging van het oppervlak, aanwezig is. Het onderzoek naar den invloed van de doorsnede kan men waarschijnlijk beter doen aan een metaal, dat weinig gevoelig is voor het temperen en dat gemakkelijk in zeer zuiveren vorm is te krijgen. De metalen echter, die niet zeer gevoelig voor het temperen zijn, hebben meestal de eigenschap om snel te oxydeeren, zoodat dit dan weer een moeilijkheid oplevert. Het voordeel van het metaal goud was juist, dat het niet oxydeert en om het onderzoek naar den invloed van de doorsnede tot een meer beslissend resultaat te voeren, lijkt het mij van belang een uitgebreid onderzoek naar het temperen in te stellen, opdat men volledig zeker kan zijn van volkomen gelijke temperomstandigheden.

§ 9. *De regel van MATTHIESSEN en de bepaling van den restweerstand.*

Zooals bekend is, heeft MATTHIESSEN opgemerkt, dat het product van den specifieke weerstand en den bijbehorenden temperatuurcoëfficiënt bij bepaalde temperatuur bij benadering constant is, d.w.z. onafhankelijk van de verontreiniging.

Tegenwoordig formuleert men den regel van MATTHIESSEN aldus:

$$[R/R_0] = \frac{R/R_0 - z}{1 - z} \quad (\text{zie Hoofdstuk 1})$$

d.w.z. dat men den „idealen” weerstand kan uitrekenen, indien men den gemeten weerstand  $R/R_0$  en den restweerstand ( $z$ ) kent.

Dezen restweerstand vindt men dan door extrapolatie naar  $0^\circ \text{K}$  van het in den regel vrij vlakke deel van de gemeten weerstand-temperatuurkromme.

Daar bij goud een minimum in deze kromme voorkomt bij de lage temperaturen, is het eigenlijk onmogelijk om een restweerstand te definiëren.

We hebben echter een restweerstand ( $z$ ) bepaald, door eenvoudig de kromme vanaf temperaturen boven die van het minimum te extrapoleren naar  $0^\circ \text{K}$ . Deze wijze van doen is ongewoon. Toch was het treffend, dat de aldus bepaalde restweerstand leidde tot een z.g. „idealen” weerstand, waarvan de logaritme als functie van de logaritme van de temperatuur uitgezet bij eerste benadering een rechte lijn gaf voor de verschillende weerstanden (zie fig. 24).

De helling van de lijn duidt op een macht 4.2 van de temperatuur.

Dus:

$$[R/R_0] = A T^{4.2}.$$

Deze formule komt dus het dichtst bij de formule (1) van GRÜNEISEN, volgens welke

$$[R/R_0] = A T^4.$$

Deze wijze van corrigeren met behulp van den regel van MATTHIESSEN maakt het waarschijnlijk, dat we de verschillende goudsoorten tot een normaal goudsoort kunnen terugbrengen. Beschouwen we de rechte lijn (op logaritmische schaal) nauwkeurig,

dan vallen kleine systematische afwijkingen in het oog. Wij willen derhalve den regel van MATTHIESSEN aan een nader onderzoek onderwerpen, waarbij zal blijken dat deze voor grotere nauwkeurigheid niet meer opgaat.

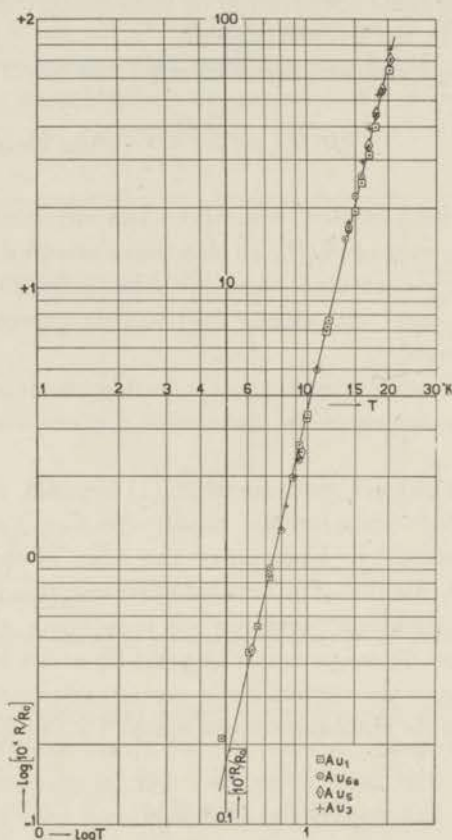


Fig. 24. De z.g. „ideale” weerstand van goud als functie van de temperatuur.

De uitkomst van dit nader onderzoek is, dat de regel van MATTHIESSEN met des te meer recht mag worden toegepast, als men draden meet van ongelijke maat, maar van *de zelfde* soort goud.

De groote afwijkingen komen voor den dag bij draden van verschillende soort goud. We geven de volgende voorbeelden:

$Au_{10}$  werd gemeten vóór en na het temperen. De weerstand bij

0° C was vóór het temperen:  $0.20408 \Omega$ , terwijl deze na het temperen  $0.20065 \Omega$  bedroeg.

Het verschil in  $R/R_0$  vóór en na het temperen is:  $170 \times 10^{-4}$ , waarbij voor  $R_0$  genomen is  $0.20065 \Omega$ . Bij 20° K is dit verschil in  $R/R_0$   $140.0 \times 10^{-4}$ , hetgeen  $30 \times 10^{-4}$  lager is dan bij 0° C.

In fig. 25 ziet men het verloop van dit verschil als functie van de

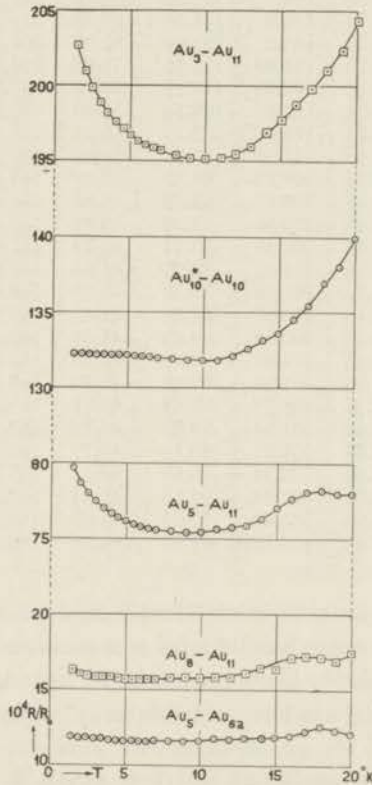


Fig. 25. De verschillen tusschen de waarden van  $R/R_0$  van verschillende draden als functie van de temperatuur.

temperatuur. ( $Au_{10}^*$  is de ongetemperde draad). Van 20° K af tot bij 10° K neemt het verschil af, daarna loopt het heel weinig op om practisch constant te zijn beneden 7° K. Beneden 12° K is de grootste spreiding 3 0/00 van het totale verschil (zie tabel 39). De waarden bij 12 en 20° K verschillen echter 6 %.

In tabel 38 ziet men de waarden van  $R/R_0$  voor verschillende draden bij de temperaturen van  $1.5^\circ$  af tot  $20^\circ$  K.

TABEL 38.

$T$ $^\circ\text{K}$	$10^4 R/R_0$							
	$Au_1$	$Au_3$	$Au_5$	$Au_{6a}$	$Au_8$	$Au_{10}^*$	$Au_{10}$	$Au_{11}$
20.0	86.48	290.68	164.3	152.20	103.78	227.7	87.70	86.34
19.0	75.61	277.78	153.4	141.10	92.28	214.7	76.55	75.40
18.0	64.74	266.50	143.6	131.00	82.60	204.1	67.14	65.42
17.0	57.18	256.52	134.80	122.56	73.95	194.8	59.30	56.70
16.0	50.38	248.46	127.30	115.37	66.78	187.04	52.45	49.68
15.0	44.76	241.74	120.95	109.14	60.30	180.37	46.74	43.94
14.0	40.40	236.20	115.56	103.78	55.73	175.10	41.90	39.26
13.0	36.78	231.48	111.36	99.58	51.60	170.76	38.14	35.52
12.0	33.66	227.94	108.25	96.30	48.30	167.27	35.14	32.48
11.0	31.48	225.28	105.67	93.88	45.90	164.60	32.78	30.06
10.0	29.76	223.42	103.66	92.08	43.95	162.88	31.06	28.24
9.0	28.47	222.07	102.30	90.74	42.73	161.69	29.83	26.92
8.0	27.59	221.36	101.52	89.98	41.84	160.93	29.00	26.05
7.0	27.02	221.24	101.08	89.50	41.23	160.49	28.49	25.51
6.5	26.85	221.19	100.97	89.44	41.02	160.35	28.28	25.32
6.0	26.72	221.28	100.95	89.40	40.89	160.26	28.16	25.20
5.5	26.62	221.45	101.00	89.42	40.78	160.21	28.07	25.08
5.0	26.54	221.70	101.09	89.48	40.75	160.17	28.00	24.98
4.5	26.47	222.11	101.25	89.62	40.71	160.14	27.96	24.93
4.0	26.44	222.47	101.54	89.88	40.73	160.13	27.94	24.90 <sup>s</sup>
3.5	26.45	223.05	101.91	90.19	40.77	160.14	27.94	24.90
3.0	26.46	223.81	102.34	90.57	40.83	160.17	27.99	24.91
2.5	26.51	224.83	102.94	91.15	40.94	160.22	28.01	24.94
2.0	26.59	225.94	103.62	91.85	41.09	160.30	28.06	24.97
1.5	26.70	227.66	104.75	92.92	41.33	160.41	28.18	25.06

Een voorbeeld van het verschil tusschen draden van verschillende soort goud vinden we in het verschil tusschen  $Au_3$  (Munt-goud) en  $Au_{11}$  (Heraeus-goud). Dit verschil blijkt beneden  $12^\circ$  K lang niet zoo constant te zijn als het verschil  $Au_{10}^* - Au_{10}$ .

Tusschen  $20^\circ$  K en  $12^\circ$  K neemt de waarde van  $Au_3 - Au_{11}$  af van  $204.34 \times 10^{-4}$  tot  $195.46 \times 10^{-4}$ , zooals in tabel 39 te vinden is. (Zie fig. 25.)

Ook het verschil tusschen de draden  $Au_5$  (Hilger-goud) en  $Au_{11}$  (Heraeus-goud) is een voorbeeld van het verschil tusschen draden van verschillende goudsoort. (Zie tabel 39.)

De verschillen  $Au_8 - Au_{11}$  (beide van Heraeus-goud) en  $Au_5 - Au_{6a}$  (beide van Hilger-goud) toonen tusschen 10 en  $20^\circ$  K veel grootere variatie, dan beneden  $10^\circ$  K, waar deze variatie resp.  $3\frac{1}{2}$  en 2 % van de waarde bij  $10^\circ$  K bedraagt.



We zien, dat de regel van MATTHIESSEN zeker niet opgaat bij de temperaturen van 10 tot 20° K.

TABEL 39.

T °K	$10^4 R/R_0$					Au <sub>8</sub> -Au <sub>11</sub>	Au <sub>8</sub> -Au <sub>11</sub>
	Au <sub>3</sub> -Au <sub>11</sub>	Au <sub>5</sub> -Au <sub>11</sub>	Au <sub>8</sub> -Au <sub>11</sub>	Au <sub>5</sub> -Au <sub>6a</sub>	Au <sub>10</sub> *-Au <sub>10</sub>	Au <sub>5</sub> -Au <sub>11</sub>	Au <sub>5</sub> -Au <sub>6a</sub>
20.0	204.34	78.0	17.44	12.10	140.0	2.61 <sup>9</sup>	1.44 <sup>1</sup>
19.0	202.38	78.0	16.88	12.30	138.1	2.59 <sup>4</sup>	1.37 <sup>2</sup>
18.0	201.08	78.2	17.18	12.60	137.0	2.57 <sup>1</sup>	1.36 <sup>3</sup>
17.0	199.82	78.1	17.25	12.24	135.5	2.55 <sup>9</sup>	1.40 <sup>9</sup>
16.0	198.78	77.62	17.10	11.93	134.59	2.56 <sup>1</sup>	1.43 <sup>3</sup>
15.0	197.80	77.01	16.36	11.81	133.63	2.56 <sup>8</sup>	1.38 <sup>5</sup>
14.0	196.94	76.30	16.47	11.78	133.20	2.58 <sup>1</sup>	1.39 <sup>8</sup>
13.0	195.96	75.84	16.08	11.78	132.62	2.58 <sup>4</sup>	1.36 <sup>5</sup>
12.0	195.46	75.77	15.82	11.70	132.13	2.58 <sup>1</sup>	1.35 <sup>2</sup>
11.0	195.22	75.61	15.84	11.79	131.82	2.58 <sup>2</sup>	1.34 <sup>4</sup>
10.0	195.18	75.42	15.71	11.58	131.82	2.58 <sup>8</sup>	1.35 <sup>7</sup>
9.0	195.15	75.38	15.81	11.56	131.86	2.58 <sup>9</sup>	1.36 <sup>8</sup>
8.0	195.31	75.47	15.79	11.54	131.93	2.58 <sup>8</sup>	1.36 <sup>8</sup>
7.0	195.73	75.57	15.72	11.58	132.00	2.59 <sup>0</sup>	1.35 <sup>7</sup>
6.5	195.87	75.65	15.70	11.53	132.07	2.58 <sup>9</sup>	1.36 <sup>1</sup>
6.0	196.08	75.75	15.69	11.55	132.10	2.58 <sup>9</sup>	1.35 <sup>8</sup>
5.5	196.37	75.92	15.70	11.58	132.14	2.58 <sup>0</sup>	1.35 <sup>6</sup>
5.0	196.72	76.11	15.77	11.61	132.17	2.58 <sup>5</sup>	1.36 <sup>7</sup>
4.5	197.18	76.32	15.78	11.63	132.18	2.58 <sup>4</sup>	1.35 <sup>7</sup>
4.0	197.57	76.64	15.83	11.66	132.19	2.57 <sup>8</sup>	1.35 <sup>8</sup>
3.5	198.15	77.01	15.87	11.72	132.20	2.57 <sup>3</sup>	1.35 <sup>4</sup>
3.0	198.90	77.43	15.92	11.77	132.18	2.56 <sup>9</sup>	1.35 <sup>3</sup>
2.5	199.89	78.00	16.00	11.79	132.21	2.56 <sup>3</sup>	1.35 <sup>7</sup>
2.0	200.97	78.65	16.12	11.77	132.24	2.55 <sup>5</sup>	1.36 <sup>9</sup>
1.5	202.60	79.69	16.27	11.83	132.23	2.54 <sup>4</sup>	1.37 <sup>6</sup>

Volgens den regel van MATTHIESSEN moet bij een bepaalde temperatuur de weerstand van verschillend zuivere goudraden een lineaire functie zijn van de resp. restweerstand. We zullen dit nagaan voor de grove extrapolatie, welke wij toepasten om een z.g. „idealen” weerstand te kunnen bepalen.

De  $R/R_0$  bij 20° K als functie van den restweerstand uitgezet, zal een rechte lijn moeten geven voor de verschillende goudweerstand. Indien de regel van MATTHIESSEN geldt, moet die lijn een helling van 45° hebben.

In fig. 26 zijn de rechten getrokken voor 20, 18, 16, 10 en 8° K. De rechte voor 20° K heeft een helling, welke 4 % grooter is dan die, welke te verwachten is volgens den regel van MATTHIESSEN. Bij 10° K is de helling juist 45°, evenals bij 8° K. Bekijken we de punten bij 4° K (dus in het gebied van het minimum), dan vinden

we ook een rechte lijn. De extrapolatie van deze lijn geeft echter een negatieve waarde voor den „idealen” weerstand.

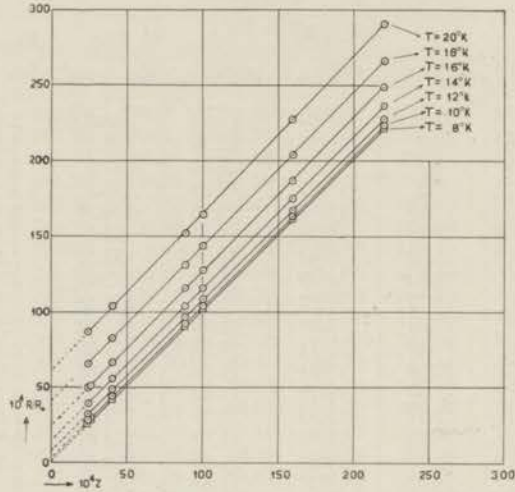


Fig. 26. De waarden van  $R/R_0$  voor de verschillende draden als functie van den bijbehorenden restweerstand  $z$ .

Voor de temperaturen van  $8^\circ\text{K}$  af zijn de rechten te gebruiken om den „idealen” weerstand, den weerstand voor de waarde  $z = 0$ , te bepalen. (Zie tabel 40.) \*)

TABEL 40.

$T$ $^\circ\text{K}$	$10^4 [R/R_0]$
20.0	61.3
18.0	41.0
16.0	24.5
14.0	14.8
12.0	8.2
10.0	3.9
8.0	1.5

Deze waarden zijn hooger dan die, welke GRÜNEISEN<sup>18)</sup> bepaalt

\*) Ik dank den Heer P. VAN DER LEEDEN, nat. phil. drs., voor de opmerkingen, die mij tot het uitvoeren van deze berekening brachten.

uit metingen van KAMERLINGH ONNES en CLAY en van MEISSNER. De waarden worden het best weergegeven door de formule  $[R/R_0] = A T^{4.0}$  voor dit gebied van 8—20° K.

§ 10. *De mogelijkheid om de weerstandskromme van goud voor te stellen met behulp van twee functies van de temperatuur.*

Ten einde een formule te vinden, welke het verloop van den weerstand als functie van de temperatuur zou kunnen weergeven in het geval van goud, werden de krommen nader bekeken.

Zooals reeds aangegeven in hoofdstuk I, zou men den weerstand van een verontreinigd metaal moeten opvatten als te bestaan uit een temperatuuraafhankelijk- en een temperatuurafhankelijk deel, welk laatste den „idealen” weerstand als functie van de temperatuur zou voorstellen.

Deze opvatting laat geen plaats voor een minimum in de weerstandskromme. Laten we daarom eens onderstellen, dat de weerstand zou bestaan uit een temperatuurafhankelijk deel van den vorm van den „idealen” weerstand en een deel, dat ook temperatuurafhankelijk is, voornamelijk bij lage temperaturen, maar dat toeneemt bij afnemende temperatuur. Dit laatste deel zou, met een constante vermenigvuldigd, worden opgeteld bij het eerste. Deze constante zou dan wèl een functie van de verontreiniging zijn.

Dus:

$$R/R_0 = f(T) + A g(T).$$

We zullen dit eens toepassen op de draden  $Au_3$ ,  $Au_5$  en  $Au_{11}$ .

$$(R/R_0)_{Au_3} = f(T) + A g(T) \quad . . . . . (1)$$

$$(R/R_0)_{Au_5} = f(T) + B g(T) \quad . . . . . (2)$$

$$(R/R_0)_{Au_{11}} = f(T) + C g(T) \quad . . . . . (3)$$

(1) — (3) levert:

$$(R/R_0)_3 - (R/R_0)_{11} = (A - C) g(T) \quad . . . . . (4)$$

(2) — (3) levert:

$$(R/R_0)_5 - (R/R_0)_{11} = (B - C) g(T) \quad . . . . . (5)$$

Uit (4) en (5) vinden we:

$$\frac{(R/R_0)_3 - (R/R_0)_{11}}{(R/R_0)_5 - (R/R_0)_{11}} = \frac{A - C}{B - C} = V_1.$$

Deze breuk zou temperatuuronafhankelijk moeten zijn. We kunnen aan tabel 40 de gegevens voor  $V_1$  ontleenen. In deze tabel is in de zevende kolom de waarde voor  $V_1$  opgenomen.

In de achtste kolom is de waarde voor nog een dergelijke verhouding opgenomen, n.l.

$$V_2 = \frac{(R/R_0)_8 - (R/R_0)_{11}}{(R/R_0)_5 - (R/R_0)_{6a}}.$$

Hier hebben we te doen met de verhouding van de verschillen tusschen Heraeus- en tusschen Hilger-gouddraden.

In fig. 27 zijn de waarden van  $V_1$  en  $V_2$  als functie van de

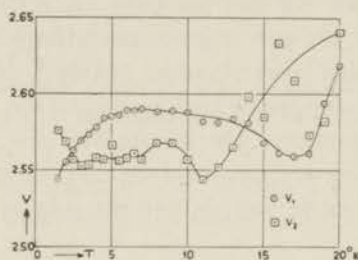


Fig. 27.

temperatuur uitgezet. Gezien de metingen, mogen we hier geen betere overeenstemming dan tot 1 % verwachten. De afwijkingen van een constante waarde voor het geheele temperatuurgebied zijn echter ongeveer 3 %.

Met de nauwkeurigheid van een paar procent zou het mogelijk zijn het verloop van de weerstandskrommen met behulp van bovenvermelde formule weer te geven.

#### § 11. De weerstand van goud, gemeten bij temperaturen beneden $1^\circ K$ .

In verband met het feit, dat een minimum in de weerstand-temperatuurkromme een onverwacht verschijnsel is, was het zeer

belangrijk te weten, hoe de kromme zou lopen dicht bij het absolute nulpunt. Daarom hebben we den weerstand van een gouddraad ( $Au_3$ ) gemeten beneden  $1^\circ K$ . We kozen dezen  $Au_3$ , omdat hiervan het minimum lag bij  $7^\circ K$  en omdat de  $R/R_0$  niet klein was, zoodat we geen grooten meetstroom behoeften te gebruiken om den weerstand behoorlijk te kunnen meten.

De temperaturen werden bereikt door demagnetisatie van ijzerammonium-aluin,  $(NH_4)_2SO_4Fe_2(SO_4)_3$ . Het demagnetisatietoestel, geconstrueerd door DE HAAS en WIERSMA<sup>28</sup>), werd gebruikt. Hierbij werden de temperaturen gemeten volgens de ballistische methode.

Wij wilden trachten den weerstand onder dezelfde voorwaarden te meten als bij hogere temperaturen, d.w.z. volkomen vrij hangend in een montuurtje, dat ter bescherming in een glazen kokertje zit. Echter hadden we te zorgen voor warmtecontact tusschen den draad en het zout. De eerste pogingen mislukten gedeeltelijk. Tenslotte werd aan de twee voorwaarden op de volgende manier voldaan. De gouddraad werd, volledig gemonteerd, in een glazen buisje gebracht, dat voorzien was van doorsmeltplaatsen. Tevoren was een phosphorbronsdraad om het glazen kokertje van den gouddraad gelegd en een van de stroomdraden aan een van die van het goud vastgesoldeerd. De potentiaal- en stroomdraden van beide weerstanden werden via platinadraden door het glas gevoerd. Het buisje werd met 70 cm heliumgas bij kamertemperatuur gevuld. Dit buisje werd in het zout geplaatst, dat in een glazen reservoir was gevat, hetwelk bij vloeibare luchttemperatuur gevuld werd met heliumgas van 25 cm kwikdruk en daarna afgesmolten. De toevoerdraden werden weer met platina door den reservoirwand geleid.

Het reservoir stond op een dunwandig glazen voetje onder in de buis, welke luchtledig gepompt kon worden om het warmtecontact met het vloeistofbad te verbreken.

De verbindingsdraden tusschen de platinadraden door het zoutreservoir en die door de vacuumbuis waren van onzuiver handelslood. Dit lood heeft een grooten warmte weerstand (geringen warmtetoevoer) en tevens een kleinen electrischen weerstand (geringe warmteontwikkeling door den meetstroom), daar het supergeleidend is beneden  $7.2^\circ K$ .

Aan een potentiaal draad van het goud werd in het zout een

constantaan weerstand bevestigd van ongeveer  $30 \Omega$ . Deze kon worden gebruikt om te stoken.

De metingen verliepen nu als volgt:

Na het uitzwaaien van den cryostaat uit den magneet, werd ongeveer iedere minuut de magnetische temperatuur gemeten, terwijl op de compensatiebank afwisselend de weerstand van goud en van phosphorbrons werd gemeten. Bij de meting bleek de temperatuur beneden  $0.4^\circ \text{K}$  heel langzaam op te loopen en daarom werd van tijd tot tijd een stroom van  $1 \text{ mA}$  door den constantaandraad gestuurd.

In het gebied boven  $0.4^\circ \text{K}$  liep de temperatuur iets harder op en de snelheid bedroeg toen ongeveer  $0.01^\circ/\text{min}$ .

In fig. 28 is uitgezet de weerstand van den phosphorbrons als

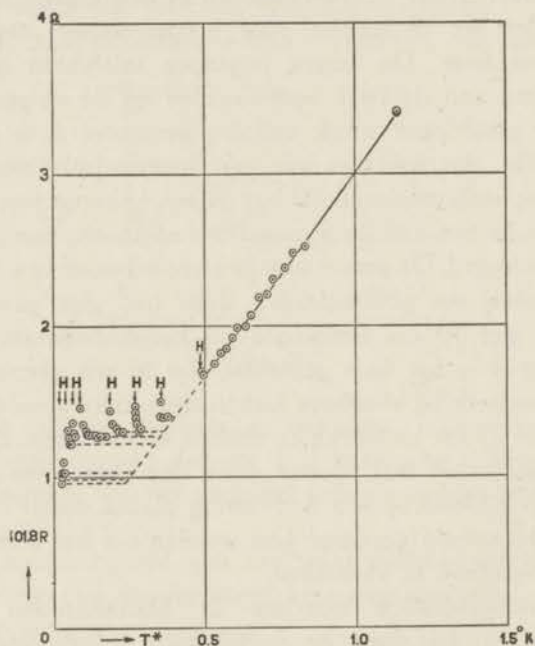


Fig. 28. De weerstand van phosphorbrons.

functie van de magnetische temperatuur. We zien hieruit, dat er van  $0.5$  tot  $1.14^\circ \text{K}$  zeker temperatuurevenwicht was. Dit was te verwachten, aangezien de dampdruk van het helium daar nog hoog

genoeg is voor evenwicht. Beneden  $0.4^\circ \text{K}$  is de vorm van de kromme erg onregelmatig en is er blijkbaar geen temperatuur-evenwicht.

De temperatuur van den phosphorbrons blijft practisch constant, terwijl de magnetische temperatuur van  $0.1$  tot  $0.4^\circ \text{K}$  oploopt.

Na elke stookperiode, die in fig. 28 is aangegeven met  $H$ , is de waarde van den phosphorbrons eerst hoger en daalt daarna weer langzaam tot de oude waarde.

Gezien de metingen door ALLEN en SHIRE van den weerstand van phosphorbrons <sup>29)</sup>, leek het gerechtvaardigd de rechte lijn van  $0.5$  tot  $0.2^\circ \text{K}$  te extrapoleren. De ware temperaturen kan men dan van de grafiek aflezen met een redelijke nauwkeurigheid.

In fig. 29 zijn de gegevens over den gouddraad te vinden. (Zie tabel 41.) Tusschen  $0.4$  en  $0.9^\circ \text{K}$  werden in totaal 57 punten

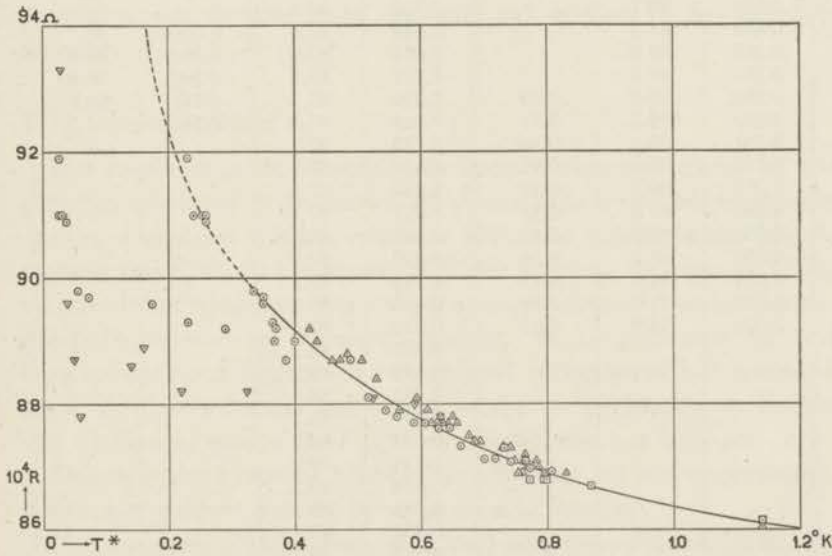


Fig. 29. De weerstand van  $\text{Au}_3$  beneden  $1.2^\circ \text{K}$ .

gemeten. De waarden, aangegeven door de cirkeltjes, werden op denzelfden dag verkregen als die in fig. 28. Voor die punten kan de ware temperatuur dus bepaald worden. De gecorrigeerde waarden zijn door gestippelde cirkels aangegeven.

Daar er uit het stoken met den constantaandraad bleek, dat er wel via metaal warmtecontact was, werd de montage iets gewijzigd.

TABEL 41. Au<sub>3</sub> (Munt).

$T$ °K	$10^4 R$	$T_{\text{corr.}}$	$T$ °K	$10^4 R$	$T$ °K	$10^4 R$
1.14	86.1		1.14	86.1	1.14	86.1
0.850	86.3		0.830	86.9	0.77	87.0
0.807	86.9		0.801	86.9	0.63	87.8
0.772	87.0		0.795	86.9	0.59	88.0
0.742	87.1		0.786	87.0	0.52 <sup>5</sup>	88.1
0.717	87.1		0.781	87.1	0.32 <sup>5</sup>	88.2
0.700	87.1		0.775	87.0	0.22	88.1
0.663	87.3		0.769	87.0	0.15	88.9
0.645	87.6		0.764	87.2	0.15	88.8
0.627	87.6		0.764	87.1	0.14	88.6
0.606	87.7		0.759	86.9	0.06	87.8
0.589	87.7		0.754	86.9	0.05	88.7
0.562	87.8		0.748	87.1	0.04	89.6
0.544	87.9		0.742	87.3	0.03	93.3
0.516	88.1		0.732	87.3		
0.488	88.7		0.693	87.4	0.869	86.7
0.388	89.5		0.684	87.4	0.799	86.8
0.384	88.0		0.676	87.5	0.796	86.8
0.368	89.0	0.40	0.656	87.7	0.771	86.8
0.290	89.2	0.37	0.649	87.8	0.744	87.2
0.231	89.3	0.36 <sup>5</sup>	0.642	87.7		
0.174	89.6	0.35	0.633	87.7		
0.073	89.7	0.35	0.630	87.8		
0.056	89.8	0.33 <sup>5</sup>	0.625	87.7		
0.038	90.9	0.26	0.617	87.7		
0.030	91.0	0.26	0.610	87.9		
0.027	91.0	0.25 <sup>5</sup>	0.593	88.1		
0.027	91.0	0.24	0.566	87.9		
0.026	91.9	0.23	0.530	88.4		
			0.507	88.7		
			0.495	89.1		
			0.483	88.8		
			0.471	88.7		
			0.460	88.7		
			0.435	89.0		
			0.424	89.2		
			0.410	89.1		
			0.394	89.1		
			0.352	89.1		
			0.350	89.3		

De phosphorbrons werd nu weggelaten en aan de vier draden van den goudweerstand werden rood koperen cylinders gesoldeerd, welke gevuld waren met aangestampt zout en 80 atm. heliumgas bij kamertemperatuur. Dit geheel werd in het zout in het zoutreservoir



gezet. De bedoeling was in de koperen cylinders een goed warmte-contact te maken tusschen het zout en den wand via het helium, dat er in geperst was. De cylinders zouden dan goed koud worden en via de stroom- en potentiaaldraden zou de weerstand gekoeld worden. Dit gelukte echter niet. Wel werd een hoogere waarde voor  $R$  gevonden dan bij de eerste methode. De driehoekjes geven in de figuur de resultaten van die meting aan. De temperatuur liep hierbij harder op dan bij de eerste experimenten.

### *Conclusie.*

Het toenemen van den weerstand van goud bij gewone helium-temperaturen duurt voort bij de heel lage temperaturen.

Aannemende, dat de extrapolatie van den phosphorbrons juist is, kan men zelfs beweren, dat de weerstand bij afnemende temperatuur beneden  $0.2^\circ$  K heel hard zal toenemen. Men is geneigd aan te nemen, dat de weerstand oneindig zal worden bij het absolute nulpunt.

### § 12. *Samenvatting.*

Het minimum in de weerstand-temperatuurkromme treedt bij alle gemeten goudraden op, zoowel bij getemperde als bij ongetemperde draden. De plaats van het minimum blijkt een functie te zijn van de waarde van  $R/R_0$  in het minimum. Voor grootere waarde van  $R/R_0$  verschuift het minimum naar hoogere temperaturen. Voor heel zuiver goud, in fysisch en chemisch opzicht, zal het minimum bij heel lage temperatuur liggen. Of voor ideaal zuiver goud het minimum bij  $0^\circ$  K of iets hoger zal liggen, is niet te beslissen met behulp van de figuur, waarin de  $T_{\min}$  als  $f(R/R_0 \text{ min.})$  is uitgezet.

Ongetemperde draden hebben het minimum bij een temperatuur, welke niet voldoet aan de bovengenoemde kromme.

Het minimum blijft aanwezig na heel lang temperen en bij meting in vacuum. Zeer lange tempertijden blijken een toename van den weerstand tengevolge te hebben. De meetstroom kan niet verantwoordelijk gesteld worden voor het minimum, evenmin als de methode van lasschen van de potentiaal- en stroomdraden. In het temperatuurgebied van vloeibare waterstof kon geen invloed van heliumgas op den weerstand worden geconstateerd.

Er kan met zekerheid worden besloten tot de aanwezigheid van een vormeffect. Achttien draden van een diameter tusschen 500 en 25 micron werden gemeten. Uit 17 draden zou men moeten besluiten, dat de theorie van NORDHEIM, volgens welke het toenemen van de  $R/R_0$  omgekeerd evenredig is met den diameter, *niet* voldoende is voor de beschrijving van den invloed van den diameter, daar er een sterke kromming optreedt in de kromme, welke de waarden van  $R/R_0$  als functie van het omgekeerde van den diameter voorstelt. Een van de draden van 25.5 micron heeft echter een veel lagere waarde van  $R/R_0$  en deze waarde klopt merkwaardigerwijs aardig met een rechte door de punten van de dikste draden, welke rechte tot een vrije weglengte van de electronen van ongeveer 400 Å leidt. Met deze vrije weglengte kan men met behulp van de theorie van SOMMERFELD een aantal vrije electronen van 0.94 per atoom berekenen.

Metingen van den weerstand van goud bij zeer lage temperaturen (0.2—1.1° K) wekken den indruk, dat de weerstand bij nog lagere temperaturen steeds sneller zal toenemen.

---

## LITERATUUR.

- 1) J. DEWAR, Proc. roy. Soc., Londen **68**, 360, 1901;  
Proc. roy. Soc., Londen **73**, 244, 1904.
- 2) G. NICCOLAI, Lincei Rend **16** (1), 906, 1907;  
Phys. Z. **9**, 367, 1908.
- 3) H. KAMERLINGH ONNES en J. CLAY, Commun. Kamerlingh Onnes Lab.,  
Leiden No. 99c, 1907; Versl. Kon. Ak. v. Wet., Amsterdam **16**, 169,  
1908; Proc. kon. Akad., Amsterdam **10**, 207, 1908;  
Zie J. CLAY, Diss. Leiden 1908.
- 4) H. KAMERLINGH ONNES, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden Suppl.  
No. 29, 1911.
- 5) H. KAMERLINGH ONNES en BENGT BECKMAN, Commun. Kamerlingh Onnes  
Lab., Leiden No. 129a, 1912; Versl. Kon. Ak. v. Wet., Amsterdam **21**,  
881, 1913; Proc. kon. Akad., Amsterdam **15**, 981, 1913.
- 6) H. SCHIMANK, Ann. Phys. (4) **45**, 706, 1914;  
Diss. Berlijn 1913.
- 7) W. MEISSNER, Ann. Phys. (4) **47**, 1001, 1915.
- 8) Zie: H. KAMERLINGH ONNES en W. TUYN, Commun. Kamerlingh Onnes  
Lab., Leiden Suppl. No. **58**, 1926;  
P. G. CATH, H. KAMERLINGH ONNES en J. M. BURGERS, Commun. Leiden  
No. 152c, 1917; Versl. Kon. Ak. v. Wet., Amsterdam **26**, 688, 1918;  
Proc. kon. Akad., Amsterdam **20**, 1163, 1918;  
P. G. CATH, Diss. Leiden 1917.
- 9) L. HOLBORN, Ann. Phys. (4) **59**, 145, 1919;  
Z. Instrum.kde. **40**, 144, 1920.
- 10) W. MEISSNER, Phys. Z. **26**, 689, 1925.
- 11) W. MEISSNER, Z. Phys. **38**, 647, 1926;  
Phys. Z. **27**, 725, 1926.
- 12) E. GRÜNEISEN en E. GOENS, Z. Phys. **44**, 615, 1927.
- 13) W. MEISSNER en H. SCHEFFERS, Phys. Z. **30**, 827, 1929.
- 14) L. GRUNMACH en F. WEIDERT, Ann. Phys. **22**, 141, 1907.
- 15) BENGT BECKMAN, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden Suppl. No. 40b.  
1915.
- 16) W. TUYN, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 196b, 1929.
- 17) W. MEISSNER en G. VOIGT, Ann. Phys. (5) **7**, 761 en 892, 1930.
- 18) E. GRÜNEISEN, Leipziger Vorträge, 1930, p. 46.
- 19) E. JUSTI en H. SCHEFFERS, Phys. Z. **37**, 383 en 475, 1936.
- 20) W. F. GIAUQUE, J. W. STOUT en C. W. CLARK, Phys. Rev. **51**, 1108, 1937.
- 21) W. J. DE HAAS, J. DE BOER en G. J. VAN DEN BERG, Commun. Kamerlingh  
Onnes Lab., Leiden No. 233b; Physica, 's-Grav. **1**, 1115, 1933—34.

- 22) W. J. DE HAAS en G. J. VAN DEN BERG, Commun. Kamerlingh Onnes Lab.,  
Leiden No. 241*d* en 249*b*; Physica, 's-Grav. 3, 440, 1936 en 4, 683, 1937.
  - 23) F. CREDNER, Z. phys. Chem. (4) 82, 457, 1913.
  - 24) W. J. DE HAAS en TH. BIERMASZ, Commun. Kamerlingh Onnes Lab.,  
Leiden No. 251*a* en *b*; Physica, 's-Grav. 5, 47 en 320, 1938.
  - 25) A. EUCKEN en F. FÖRSTER, Gött. Nachrichten N. F. 1, 43 en 129, 1934.
  - 26) L. RIEDEL, Ann. Phys. (5) 28, 603, 1937.
  - 27) H. REUTER, Ann. Phys. (5) 30, 494, 1937.
  - 28) W. J. DE HAAS en E. C. WIERSMA, Commun. Kamerlingh Onnes Lab.,  
Leiden No. 236*a* en *b*; Physica, 's-Grav. 2, 81 en 335, 1935.  
Zie ook: Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden Suppl. No. 81, 1936.
  - 29) J. F. ALLEN en E. S. SHIRE, Nature 139, 878, 1937.
-

## HOOFDSTUK IV.

### De weerstand van zilver als functie van de temperatuur.

#### § 1. *Inleiding.*

Zilver behoort evenals goud tot de eerste kolom van het periodiek systeem en is een heel goede geleider.

Het was van belang de temperatuurafhankelijkheid van den electrischen weerstand voor dit éénwaardige metaal na te gaan.

In het rapport N<sup>o</sup>. 10 voor het Congrès International d'Electricité (zie hoofdstuk I, pag. 8) geven DE HAAS en VOOGD <sup>1)</sup> als laagsten bekenden restweerstand  $28.6 \times 10^{-4}$  op.

Voor de temperatuurafhankelijkheid worden de metingen van KAMERLINGH ONNES en CLAY <sup>2)</sup>, van MEISSNER <sup>3)</sup> en van DE HAAS, VOOGD en DE BOER <sup>4)</sup> nagegaan. Ze vinden, dat de formule  $[R/R_0] = A T^B$  geldig is met exponent  $B = 4.2$ .

Toen wij de zilverdraden (zie § 2) maten, bleek de restweerstand voor enkele draden <sup>5)</sup> kleiner te zijn dan  $28.6 \times 10^{-4}$ .

Kort hierna verscheen van STEINER en FÜNFER <sup>6)</sup> een mededeeling over een zilvereenkristal met een restweerstand van  $3 \times 10^{-4}$ . De doorsnede van dit kristal bedroeg 2—3 mm<sup>2</sup> en de meetnauwkeurigheid 30 tot 40 %. Het materiaal was dus wel veel zuiverder, maar de meetnauwkeurigheid veel geringer. De meetstroom was maximaal 2.5 Ampère. Van dit eenkristal maakten STEINER en FÜNFER door walsen en trekken twee draden van 0.4 en 0.1 mm middellijn. De draden werden gedurende twee uur in hoogvacuum getemperd bij 550° C. De weerstand-temperatuurkrommen werden bepaald tot 14° K en snijden elkaar twee keer. Toch beweren STEINER en FÜNFER, dat de regel van MATTHIESSEN eenigermate geldt.

De restweerstand van de getrokken draden zijn hooger dan die van het eenkristal.

#### § 2. *Het materiaal en de montage.*

Het zilver, dat door ons gebruikt werd, was van ADAM HILGER

Ltd. (Lab. No. 5939). Dit werd geleverd in staafjes van 7 mm middellijn.

Om er dunne draden van te trekken, werd een deel van een dezer staafjes versmolten in kwarts tot een staafje van 2 mm middellijn. Nadat het kwarts verwijderd was, werd het staafje door treksteenen van agaat getrokken tot een draad van 0.06 mm middellijn. Alle voorzorgen werden genomen, opdat geen verontreiniging zou plaats hebben. De draad werd gedurende de behandeling met schoon filtreerpapier aangepakt.

Ter vergelijking werd een deel van het draad met de handen behandeld.

Toen de beide draden magnetisch op ijzer werden onderzocht, bleek de tweede draad vele malen meer ijzer te bevatten dan de eerste, terwijl hierin slechts een heel geringe hoeveelheid werd geconstateerd.

Van het zuivere materiaal werden eenige weerstandsdraden gemaakt, welke op dezelfde manier gemonteerd werden als de goudweerstand. De tempertijden waren verschillend. (Zie tabel 42.)

TABEL 42.

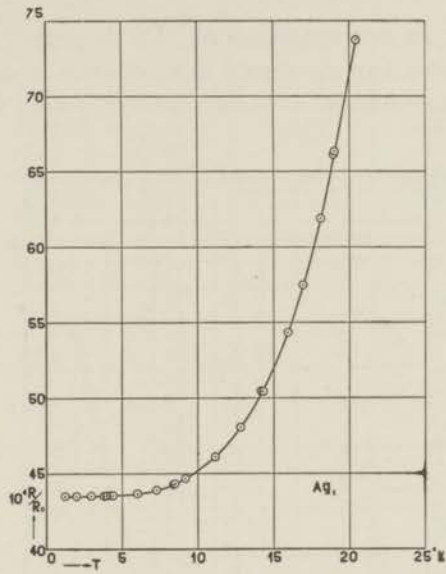
Naam	Tempertijd in uren	Temper-temperatuur in °C.	$R_0$ in $\Omega$	Diameter in mm
Ag <sub>1</sub>	2	500	0.88173	0.06
Ag <sub>2</sub>	2 en 2	500	1.13645	0.06
Ag <sub>3</sub>	3	500	0.18412	0.06
Ag <sub>4</sub>	2	500	0.91894	0.06
Ag <sub>5</sub>	1½	500	1.04374	0.06

Ag<sub>3</sub> was een rechte draad, terwijl Ag<sub>1</sub>, Ag<sub>2</sub>, Ag<sub>4</sub> en Ag<sub>5</sub> gespiraliseerd waren.

### § 3. De metingen en de resultaten.

In de weerstand-temperatuurkromme van Ag<sub>1</sub> en Ag<sub>2</sub> komt geen minimum voor, in die van Ag<sub>3</sub>, Ag<sub>4</sub> en Ag<sub>5</sub> zeker wel. In fig. 30 en fig. 31 zijn de krommen van Ag<sub>1</sub> en Ag<sub>3</sub> geteekend. De gegevens vindt men in de tabellen 43, 44, 45 en 46.

Het is onbegrijpelijk, waarom de eene draad wel en de andere niet een minimum heeft. Aan Ag<sub>4</sub> en Ag<sub>5</sub> zien we, dat de vorm van het minimum kan verschillen. De metingen van Ag<sub>3</sub>, Ag<sub>4</sub> en Ag<sub>5</sub>

Fig. 30. De elektrische weerstand van  $Ag^1$ .TABEL 43.  $Ag^1$ .

	$T$ °K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
H	20.44	73.72	43.51	30.34
"	19.06	66.32		22.91
"	18.98	66.16		22.75
"	18.12	61.92		18.49
"	16.96	57.50		14.05
"	15.96	54.38		10.92
"	14.36	50.48		7.00
HS	14.21	50.50		7.02
"	12.86	48.13		4.64
"	12.84	48.10		4.61
"	11.18	46.11		2.61
"	9.21	44.73		1.23
S	9.19	44.68		1.18
"	8.49	44.35		0.84
"	8.40	44.32		0.81
"	7.31	43.92		0.41
"	6.09	43.71		0.20
"	6.02	43.70		0.19
"	4.41	43.56		0.05
He	4.29	43.56		
S	4.01	43.55		
He	3.86	43.52		
"	2.97	43.52		
"	2.02	43.51		
"	1.26	43.51		

zijn met elkaar in overeenstemming. De kromme van  $Ag_3$  is de meest betrouwbare van de eerste drie, daar  $Ag_3$  gemonteerd, getemperd en gemeten werd over het geheele gebied binnen den tijd van één week.

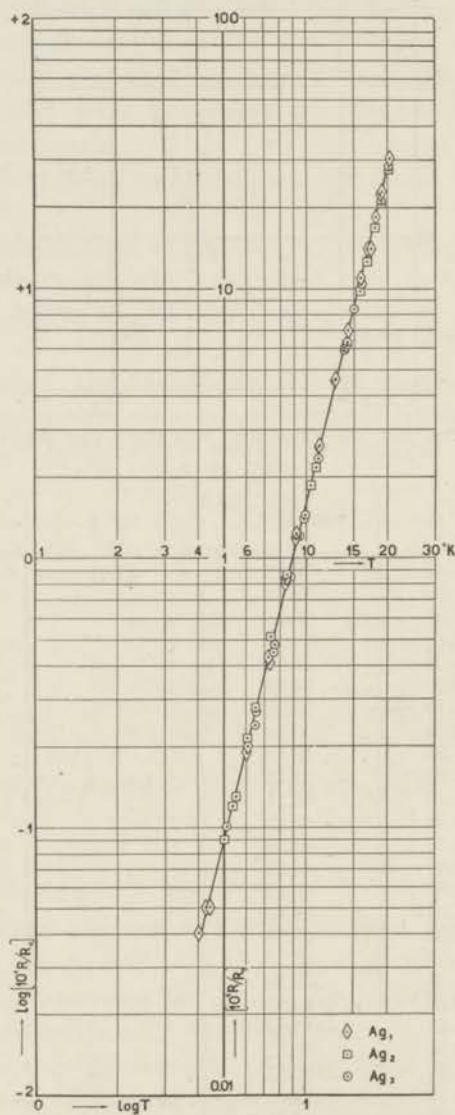
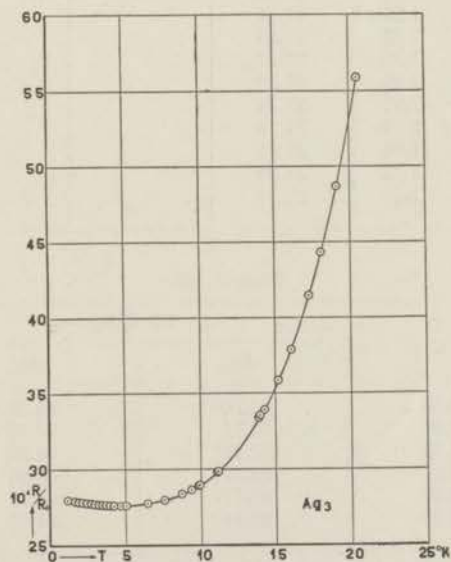


Fig. 32. De „ideale” weerstand van zilver.



TABEL 44.  $Ag_2$ .

	$T$ °K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
H	20.46	54.31	26.59	27.79
"	19.10	47.32		20.79
"	18.12	43.31		16.76
"	16.95	39.26		12.70
"	15.94	36.41		9.85
"	14.31	32.84		6.27
S	10.80	28.76		2.18
"	10.38	28.46		1.88
"	9.82	28.13		1.54
"	9.76	28.08		1.49
HS	9.26	27.82		1.23
S	8.48	27.46		0.87
"	8.41	27.43		0.84
"	7.40	27.11		0.52
"	7.37	27.08		0.49
"	6.50	26.89		0.30
"	6.48	26.87		0.28
"	6.07	26.81		0.22
"	6.01	26.80		0.21
"	5.50	26.72		0.13
"	5.33	26.71		0.12
"	4.99	26.68		0.09
"	4.50	26.64		0.05
"	4.44	26.63		
"	4.18	26.62		
"	4.14	26.61		
"	4.10	26.62		

Fig. 31. De elektrische weerstand van  $Ag_3$ .

TABEL 45. Ag<sub>3</sub>.

	$T$ °K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
H	20.51	55.82	27.47	28.43
"	19.12	48.68		21.27
"	18.06	44.30		16.88
"	17.25	41.45		14.02
"	16.09	37.86		10.42
HS	15.19	35.87		8.42
H	14.28	33.84		6.39
HS	13.97	33.51		6.06
"	13.90	33.39		5.94
"	13.86	33.28		5.83
"	11.15	29.81		2.35
"	11.12	29.18		2.32
"	9.94	28.91		1.44
"	9.88	28.89		1.42
"	9.44	28.68		1.21
"	9.40	28.64		1.17
S	8.76	28.32		0.85
"	7.64	27.95		0.48
"	7.61	27.93		0.46
"	6.53	27.74		0.27
"	6.49	27.71		0.24
"	5.09	27.59		0.10
"	4.71	27.57		
He	4.29	27.57		
S	4.00	27.57		
He	3.73	27.59		
"	3.61	27.62		
"	3.50	27.63		
"	3.38	27.65		
"	3.30	27.67		
"	2.99	27.69		
"	2.51	27.74		
"	2.19	27.78		
"	1.96	27.81		
"	1.72	27.85		
"	1.23	27.91		

TABEL 46.

$T$ °K	$10^4 R/R_0$	
	Ag <sub>4</sub>	Ag <sub>5</sub>
4.24	82.74 <sup>5</sup>	64.31
3.98	82.73	64.30
3.71	82.72 <sup>5</sup>	64.32
3.02	82.71	64.36
2.05	82.72	64.48
1.30	82.74	64.63

De oorzaak van het al of niet optreden van een minimum is misschien te vinden in het al of niet aanwezig zijn van een bepaalde zeer geringe verontreiniging. Waarom dan echter die bepaalde verontreiniging een minimum zou doen ontstaan, is moeilijk te zeggen.

De „ideale” weerstand werd berekend op dezelfde manier als voor goud. De drie verschillende over het geheele gebied gemeten draden  $Ag_1$ ,  $Ag_2$  en  $Ag_3$  geven een rechte lijn op logaritmische schaal voor den „idealen” weerstand als functie van de temperatuur, zoodat de „ideale” weerstand kan worden voorgesteld door de formule:  $[R/R_0] = A T^B$ , waarin  $B$  de waarde 4.1 heeft. (Zie fig. 32.) Deze exponent komt aardig overeen met dien, welke door DE HAAS en VOOGD bepaald werd. (Zie § 1.)

---

#### LITERATUUR.

- 1) W. J. DE HAAS en J. VOOGD, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden Suppl. No. 73b, 1933; Rapport No. 10 Congrès Internat. d'Electricité, Paris 1932.
  - 2) H. KAMERLINGH ONNES en J. CLAY, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 99c.
  - 3) Zie W. MEISSNER en W. VOIGT, Ann. Phys. (5) 7, 761, 1930.
  - 4) Ongepubliceerde metingen. Zie daarvoor 1).
  - 5) W. J. DE HAAS en G. J. VAN DEN BERG, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 241d; Physica, 's-Grav. 3, 440, 1936.
  - 6) K. STEINER en E. FÜNFER, Actes du VIIe Congrès internat. du Froid I, 391, 1936.
-

## HOOFDSTUK V.

### De weerstand van koper als functie van de temperatuur.

#### § 1. *Inleiding.*

Koper behoort tot de metalen met een kubisch, vlak gecentreerd rooster en behoort evenals goud en zilver tot de eerste kolom van het periodiek systeem.

Het reinigen van koper levert vrij veel moeilijkheden op. Men kan namelijk niet gemakkelijk vinden, welke bewerking de juiste is. De resultaten zijn onreproduceerbaar en door het metaal geadsorbeerde of misschien geabsorbeerde gassen worden in den regel daarvoor aansprakelijk gesteld.

GRÜNEISEN en GOENS <sup>1)</sup> bepaalden den weerstand van verschillende koperdraden en vonden een verschil in restweerstand bij 90 en 20° K. De waarde, welke men aan den restweerstand zou moeten toekennen bij 90° K was grooter dan die bij 20° K.

DE HAAS, DE BOER en VAN DEN BERG <sup>2)</sup> maten den weerstand van verschillende koperdraden bij temperaturen van vloeibare waterstof. Hierbij bleek dat de verschillen tusschen de weerstand-temperatuurkrommen niet constant waren. Dit klopte met metingen van TUYN <sup>3)</sup>.

De regel van MATTHIessen <sup>4)</sup> geldt hier dus niet.

Er werden nog enkele metingen op dit gebied verricht van den weerstand van technisch koperdraad.

#### § 2. *Het materiaal en de montage.*

Voor andere onderzoekingen was het van belang den weerstand te meten van technisch koperdraad van 0.07 mm dikte. Twee van de draden n.l.  $Cu_A$  en  $Cu_B$  waren geïsoleerd door celluloid en een derde,  $Cu_O$  door zijde.

De draden werden op een glazen buisje gewikkeld zonder getemperd te zijn. Na de eerste metingen werd van den met zijde omwoelden draad de isolatie verwijderd en de draad gemonteerd

op een zelfde raampje van glas, als beschreven in hoofdstuk 3. blz. 37, en daar geteekend in fig. 8. Daarna werd de draad getemperd in hoog vacuum bij  $500^{\circ}\text{C}$ .

§ 3. *De metingen en de resultaten.*

De draden  $\text{Cu}_A$ ,  $\text{Cu}_B$  en  $\text{Cu}_O^*$  werden gemeten bij temperaturen van vloeibare waterstof. De draden waren ongetemperd. In tabel 47 vindt men de resultaten. Hierin zijn tevens de resultaten opgenomen van de meting van den getemperden  $\text{Cu}_O$ .

TABEL 47.

$T$ $^{\circ}\text{K}$	$10^4 R/R_0$ $\text{Cu}_A$	$T$ $^{\circ}\text{K}$	$10^4 R/R_0$ $\text{Cu}_B$	$T$ $^{\circ}\text{K}$	$10^4 R/R_0$ $\text{Cu}_O^*$	$T$ $^{\circ}\text{K}$	$10^4 R/R_0$ $\text{Cu}_O$	$T$ $^{\circ}\text{K}$	$10^4 R/R_0$ $\text{Cu}_O$
20.39	202.6	20.39	157.4	20.39	127.0	20.40	78.29	4.21	70.53
19.00	200.1	19.00	155.1	19.00	124.7	19.07	76.22	3.70	70.53
18.02	198.7	18.00	153.7	18.02	123.4	18.12	75.00	3.03	70.53
17.14	197.7	17.16	152.7	17.14	122.4	17.20	74.05	2.29	70.53
15.95	196.5	15.91	151.7	15.96	121.4	15.96	73.04	1.83	70.53
13.87	195.3	13.88	150.5	13.91	120.2	14.10	71.97	1.60	70.54

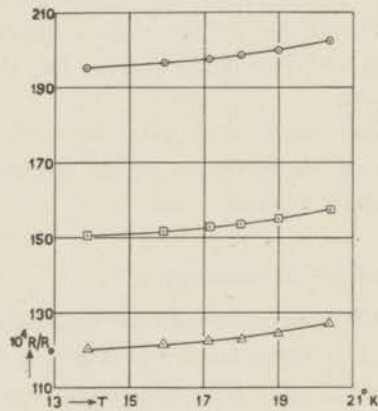


Fig. 33. De weerstand van koper als functie van de temperatuur.

- $\odot = \text{Cu}_A$   
 $\square = \text{Cu}_B$   
 $\triangle = \text{Cu}_O$

Uit fig. 33 ziet men, dat de regel van MATTHIESSEN wel geldt, want het verschil tusschen de waarden voor  $R/R_0$  varieert slechts zeer weinig.

Ter demonstratie is tabel 48 opgenomen, waarin voor de temperaturen van 14 tot 20° K de verschillen in  $R/R_0$  tusschen den getemperden  $Cu_O$  en de andere draden zijn vermeld.

TABEL 48.

T °K	$10^4 \Delta R/R_0$		
	$Cu_O^*-Cu_O$	$Cu_B-Cu_O$	$Cu_A-Cu_O$
14	48.3	78.7	123.5
15	48.3	78.8	123.6
16	48.3	78.8	123.5
17	48.3	78.7	123.6
18	48.5	78.9	123.9
19	48.5	78.9	123.9
20	48.5	79.0	124.1

De verschillen loopen wel iets op, doch de geheele afwijking is slechts  $\frac{1}{2}$  %, hetgeen zeer mooi genoemd mag worden.

Deze resultaten zijn dus niet in overeenstemming met de in de inleiding van dit hoofdstuk genoemde metingen.

Voor den draad  $Cu_O$  (getemperd) werd ook de weerstand in vloeibaar helium bepaald. (Zie tabel 47.) Uit de metingen moet men concluderen, dat er geen minimum in de weerstand-temperatuurkromme van koper is.

#### LITERATUUR.

- 1) Zie hiervoor: E. GRÜNEISEN, Ann. Phys. (5) **16**, 538, 1933.  
E. GRÜNEISEN en E. GOENS, Z. Phys. **44**, 615, 1927.
  - 2) W. J. DE HAAS, J. DE BOER en G. J. VAN DEN BERG, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 233*b*; Physica, 's-Grav. **1**, 1115, 1933—34.
  - 3) W. TUYN, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 196*b*, 1929.
  - 4) A. MATTHIESSEN en G. VOGT, Ann. Physik. Chem. (Poggendorffsche Folge) **122**, 19, 1864.
-



## HOOFDSTUK VI.

### De weerstand van kalium als functie van de temperatuur.

#### § 1. *Inleiding.*

Kalium behoort tot de alkalimetalen van de eerste kolom van het periodiek systeem. De alkalimetalen kan men naar klimmende smelttemperatuur rangschikken:

*Cs* (27° C), *Rb* (39° C), *K* (63° C), *Na* (97.5° C) en *Li* (186° C).

Kalium ligt dan juist in het midden. Ook wat het oxydeeren betreft, ligt kalium midden tusschen de uitersten: *Li*, dat in de lucht eenigen tijd houdbaar is en *Cs*, dat dadelijk ontvlamt in de lucht. Lithium zou vanwege de juist genoemde eigenschap beter geschikt zijn voor de weerstandsmetingen dan kalium, doch lithium heeft bij het smeltpunt de eigenschap om glas- en kwartsbuizen onder hevig gloeien te vernielen, met kool onder vuurverschijnselen een carbid en met platina een broze grauwe legering te vormen.

Een methode van bereiden van kalium werd reeds in 1905 door HACKSPILL<sup>1)</sup> en later door DE BOER, BROOS en EMMENS<sup>2)</sup> aangegeven.

Men dient den weerstand van kalium te meten in een glas-capillair of in een omgeving van een onwerkzaam gas.

De eerste en tot nog toe de beste metingen van den weerstand van kalium in het waterstof- en heliumgebied werden verricht door WOLTJER en KAMERLINGH ONNES<sup>3)</sup>. In het tusschengebied vonden nog geen metingen plaats. In dit hoofdstuk worden weerstandsmetingen van kalium tusschen 1 en 21° K behandeld.

#### § 2. *Het materiaal en de montage.*

Er werden twee soorten kalium gebruikt, n.l.: chemisch zuiver kalium van RIEDEL-HAËN en zeer zuiver kalium, geleverd door ROGER R. BRUNSCHWIG. Van het eerstgenoemde kalium werd  $K_1$

gemaakt en van het tweede  $K_2$  \*). Het chemisch zuivere kalium werd onder petroleumaether afgeschild en daarna in een destillatie-apparaat gebracht, dat dadelijk leeggepompt werd. Dit leegpompen geschiedde via een U-vormig buisje met ingesmolten platinadraden. Het kalium werd overgedestilleerd tot vlak boven het U-buisje. Door verwarmde paraffine daar omheen te plaatsen, werd het kalium tot smelten gebracht (smeltpunt  $63^\circ \text{C}$ ) en door den dampdruk van het kalium in het destillatie-apparaat ( $300^\circ \text{C}$ ) in het U-buisje gedreven.

Het zeer zuivere kalium van  $K_2$  werd dadelijk tot smelten gebracht boven het U-buisje en met behulp van een geringen heliumgasdruk in dit buisje geperst. Er vond dus geen destillatie plaats.

Daar WOLTJER en KAMERLINGH ONNES<sup>3)</sup> last ondervonden van snel verloopende weerstanden bij  $0^\circ \text{C}$ , hebben we naar een methode gezocht om dit tegen te gaan. Het verlopen van de  $R_0$  is waarschijnlijk voornamelijk te wijten aan chemische reacties tusschen het kalium en het glas. Uit het werk van HACKSPILL kon men besluiten, dat het een eerste vereischte is, dat de glazen capillair vóór het vullen op  $200^\circ \text{C}$  droog wordt leeggepompt, daar dan de werking tusschen glas en kalium veel geringer is. We hebben dan ook de U-buisjes goed droog gepompt bij  $200^\circ \text{C}$ . Verder werd de weerstand voortdurend bij vloeibare lucht-temperatuur bewaard. De reactiesnelheid is dan heel klein. Dit bleek ook uit het feit, dat de  $R_0$  van  $K_1$  in een maand niet meer verliep dan de meetnauwkeurigheid. Bij  $K_2$  trad bij  $R_0$  een geringe verkleining op.

### § 3. De metingen en de resultaten.

De weerstand  $K_1$  had een restweerstand, welke veel grooter was dan die, welke de weerstanden van WOLTJER en KAMERLINGH ONNES<sup>3)</sup> hadden. Daarentegen had  $K_2$  een restweerstand, welke ongeveer drie maal kleiner was. De beide weerstanden werden gemeten van 1 tot  $21^\circ \text{K}$ .

De weerstand  $K_2$  had na een week tijd een waarde voor  $R/R_0$ , welke kleiner was dan de eerst bepaalde. Daarom werd de  $R/R_0$

\*) Den Heer E. E. F. ZWEERS, nat. phil. drs, dank ik voor het prepareren van  $K_2$ .

verschillende malen bepaald. Het verloop van  $R_0$  was véél minder dan dat van de  $R$  bij de lage temperaturen. In de tabellen 49, 50 en 51 vindt men de resultaten vermeld. In het heliumgebied neemt de weerstand nog behoorlijk af. Van een minimum in de weerstand-temperatuurkromme is geen sprake. (Zie fig. 34 en 35.)

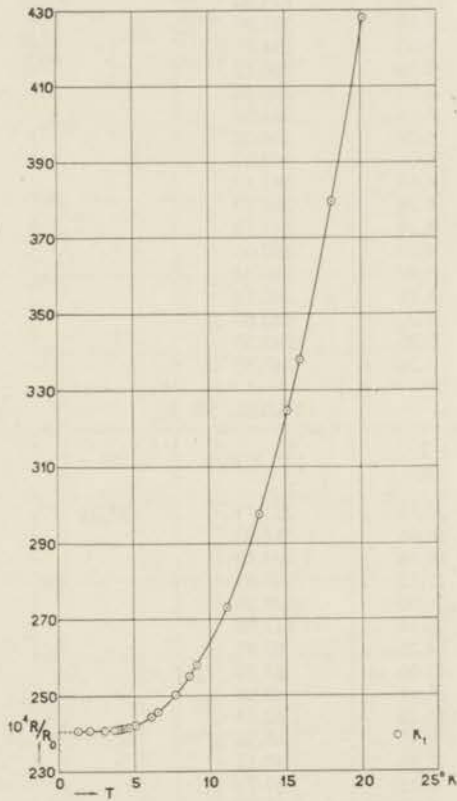


Fig. 34. De elektrische weerstand van  $K_1$  als functie van de temperatuur.

Met behulp van den regel van MATTHIESSEN (zie hoofdstuk I) kan men een „idealen” weerstand berekenen, zooals in de tabellen gebeurde. Dezen regel dient men echter te controleeren. Gaan we het verloop van het verschil in  $R/R_0$  tusschen  $K_1$  en  $K_2$  na, dan

TABEL 49. K<sub>1</sub>.

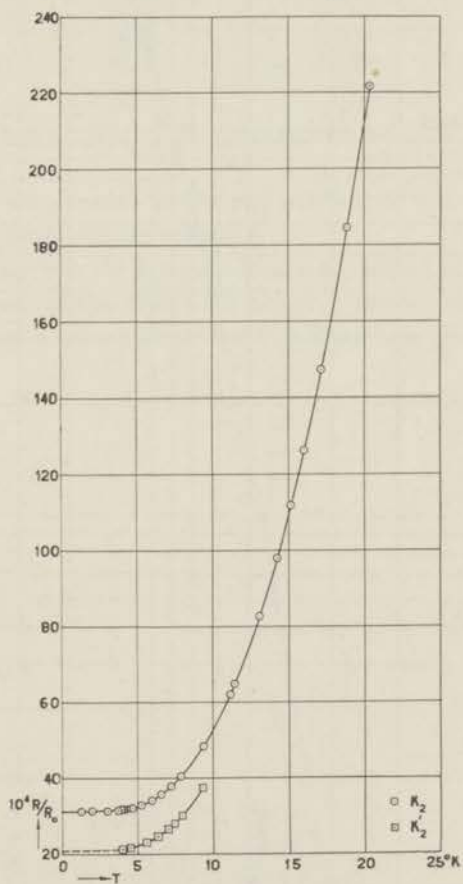
	$T$ °K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
HS	20.15	428.00	240.50	192.12
"	18.08	379.67		142.60
"	15.95	338.09		100.00
"	15.15	324.78		86.36
"	13.25	297.65		58.56
"	11.10	273.20		33.51
"	9.15	257.93		17.86
S	8.65	254.87		14.73
"	7.76	250.12		9.86
"	6.57	245.48		5.11
"	6.11	244.34		3.94
"	6.08	244.20		3.79
"	5.08	242.03		1.57
"	4.63	241.42		0.95
"	4.28	241.19		0.71
He	4.24	241.14		0.66
S	4.09	240.96		0.47
"	3.97	240.84		0.35
He	3.71	240.74		0.25
"	3.02	240.60		0.10
"	2.05	240.50		
"	1.26	240.50		

TABEL 50. K<sub>2</sub>.

	$T$ °K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
HS	20.33	221.77	31.24	191.10
"	18.86	184.90		154.12
"	18.84	184.49		153.71
"	17.12	147.49		116.60
"	16.00	126.38		95.42
"	15.14	111.86		80.46
"	14.23	97.97		66.93
"	13.06	82.79		51.70
"	11.41	64.96		33.82
"	11.15	62.13		30.97
"	9.35	48.56		17.37
S	7.88	40.42		9.21
"	7.21	37.77		6.55
"	6.59	35.80		4.57
"	5.96	33.71		2.48
"	5.25	32.90		1.66
"	4.66	32.13		0.89
He	4.24	31.81		0.57
S	4.22	31.80		0.56
"	4.18	31.73		0.49
"	4.13	31.71		0.47
He	3.98	31.64		0.40
"	3.71	31.51		0.27
"	3.02	31.32		0.08
"	2.05	31.24		
"	1.29	31.24		

TABEL 51.  $K'_2$ .

	$T$ °K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
HS	9.30	37.48	20.77	16.74
S	7.96	30.18		9.43
"	7.45	28.06		7.30
"	7.03	26.57		5.81
"	6.35	24.60		3.83
"	5.60	23.02		2.25
"	4.52	21.58		0.81
"	4.00	21.19		0.42

Fig. 35. De elektrische weerstand van  $K_2$  als functie van de temperatuur.

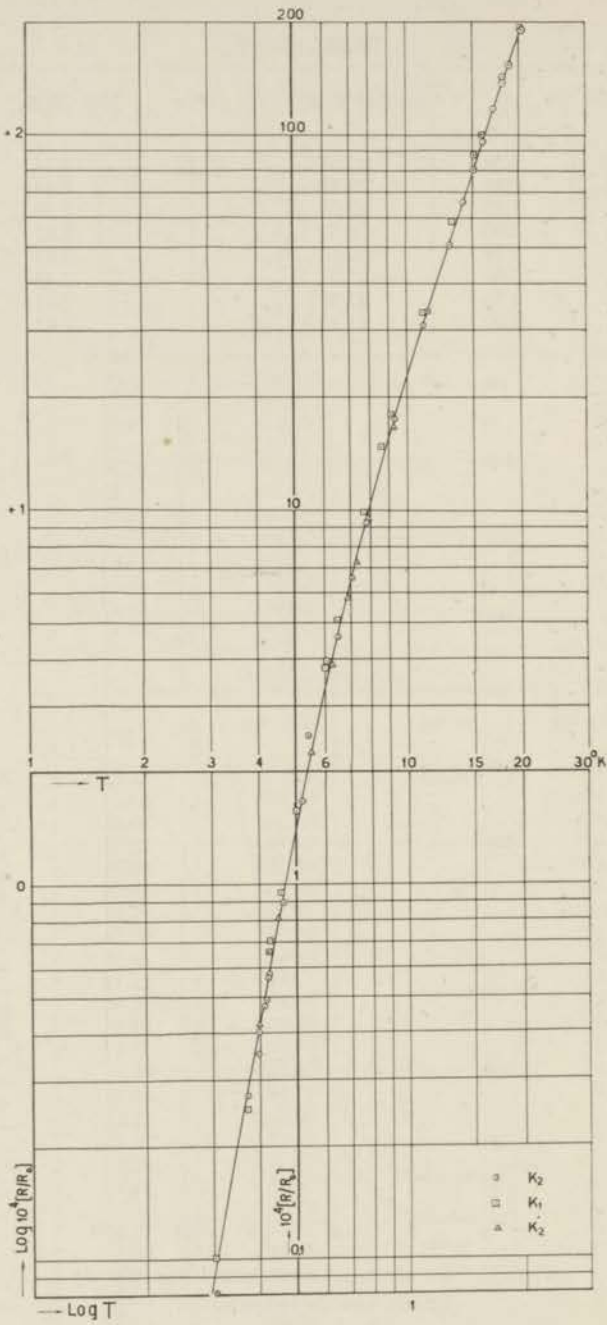


Fig. 36. De „ideale” weerstand van kalium.

vinden we, dat dit verschil toeneemt bij hogere temperaturen.  
(Zie tabel 52.)

TABEL 52.

$T$ °K	$10^4 \Delta R/R_0$
2.05	209.26
3.02	209.28
4.24	209.33
6.59	209.73
9.35	210.37
11.15	211.55
15.15	212.77
18.08	212.59

Bij 9° K is het verschil  $\frac{1}{2}$  % groter dan bij 2° K, daarna neemt het sneller toe.

In fig. 36 is de „ideale” weerstand als functie van de temperatuur uitgezet op logaritmische schaal.

Uit de helling van de kromme kan men besluiten, dat van 3 tot 7° K een  $T^5$ -wet geldt, welke bij hogere temperatuur overgaat in een wet met een lagere macht van  $T$ . Tusschen 14 en 20° K geldt een  $T^3$ -wet.

#### LITERATUUR.

- 1) L. HACKSPILL, C. R. **141**, 106, 1905.
- 2) J. H. DE BOER, J. BROOS en H. EMMENS, Z. anorg. Chem. **191**, 113, 1930.  
Zie ook: J. H. DE BOER, P. CLAUSING en G. ZECHER, Philips Separata  
No. 309, Z. anorg. Chem. **160**, 128, 1927.
- 3) H. R. WOLTJER en H. KAMERLINGH ONNES, Commun. Kamerlingh Onnes  
Lab., Leiden No. 173a, 1924; Rapp. et Comm. IVème Congrès Internat.  
du Froid, Londen 1924, p. 211.



## HOOFDSTUK VII.

### De weerstand van wolfram als functie van de temperatuur.

#### § 1. *Inleiding.*

Wolfram behoort ook tot de metalen met een kubisch rooster en wel evenals kalium tot die met een ruimtelijk gecentreerd rooster. Het behoort echter niet tot de reeks van goede geleiders van de eerste kolom van het periodiek systeem.

De karakteristieke temperatuur  $\theta$  is hoog en bedraagt ongeveer  $330^\circ$ . Dit is dus even hoog als die voor koper. Wolfram is moeilijk te lasschen en niet te soldeeren, zoodat voor het bevestigen van de potentiaal- en stroomdraden een andere methode moest worden toegepast. De weerstand van eenkristallen werd gemeten. De eenkristallen waren verschillend georiënteerd n.l. met de lengterichting evenwijdig aan de ribbe van den roosterkubus ( $W_v$ ) en met de lengterichting evenwijdig aan de lichaamsdiagonaal van den roosterkubus ( $W_s$ ). Bij de eerstgenoemde oriëntatie behoorde een kleinere weerstand.

#### § 2. *Het materiaal en de montage.*

De wolfram-eenkristallen werden ons ter beschikking gesteld door Dr. J. A. M. VAN LIEMPT, van het Phys. Chem. Laboratorium der N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken te Eindhoven. Deze eenkristallen werden vervaardigd volgens de methode van VAN ARKEL en DE BOER<sup>1)</sup>. Er werden op twee manieren potentiaal- en stroomdraden aan deze kristallen bevestigd, n.l. 1<sup>o</sup>. door electrolyse werden vier ringvormige koperlaagjes aangebracht, waarop de potentiaal- en stroomdraden werden vastgesoldeerd; 2<sup>o</sup>. in vier kegelvormige bakjes rond het staafje werd kwik geschonken, waarin de potentiaal- en stroomdraden werden gestoken<sup>2)</sup>. Deze draden werden door openingen in het omringende glazen buisje naar buiten gevoerd en daar aan dit glazen buisje vastgezet.

De weerstandsmetingen van 1 tot  $21^\circ$  K werden voor beide manieren van monteeren volledig uitgevoerd. Bij de eerste methode

dient men groote zorg aan het ontvetten van het staafje en aan de regeling van den stroom bij de electrolyse te besteden. Want, ofschoon de draden mechanisch volledig vast leken te zitten, bleek uit de metingen, dat de contacten niet deugden.

De metingen reproduceerden n.l. in het geheel niet, zooals in fig. 37a en 37b te zien is.

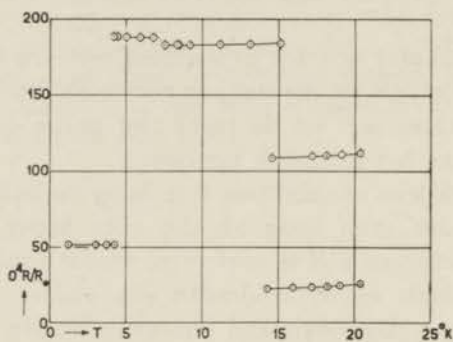


Fig. 37a. De weerstand van  $W_v$  met slechte contacten.

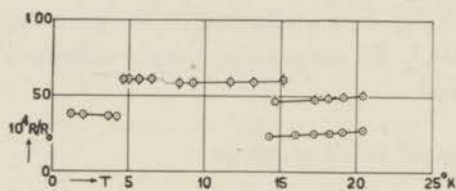


Fig. 37b. De weerstand van  $W_z$  met slechte contacten.

Bij deze figuren valt ook de plotselinge sprong bij ongeveer  $7^\circ \text{K}$  op te merken, die optrad gedurende eenzelfde meetdag.

Bij de herhaling van de electrolyse werd een kleinere stroomsterkte gekozen en het niet te verkoperen deel van het kristal met celluloid inplaats van met paraffine bedekt. Nu trad er geen onreproduceerbaarheid op en was er slechts een gering verschil tusschen de methode 1 en 2 te bespeuren.

### § 3. De metingen en de resultaten.

Daar de staafjes vrij dik waren, was de weerstand bij  $0^\circ \text{C}$  reeds klein en aangezien het metaal zuiver was, werd de te meten weer-

stand bij lage temperaturen zeer klein, van de grootte  $4 \times 10^{-6} \Omega$ . Er moest dus worden gemeten met een behoorlijk grooten stroom om de nauwkeurigheid niet al te gering te laten zijn.

Andere omstandigheden stellen aan dien meetstroom echter een bovenste grens. De grootste meetstroom, die gebruikt werd, was 500 mA. Deze had in het desorptieapparaat een snelle opwarming tengevolge, welke de nauwkeurigheid van de meting weer verkleinde.

De nauwkeurigheid mag ten hoogste 1 % worden geacht. Een nauwkeurige bepaling van den restweerstand en een daaruit voortvloeiende nauwkeurige bepaling van den „idealen” weerstand, is dus niet mogelijk.

In de figuren 38 en 39 is de weerstand van het wolfram, resp. gemeten volgens montagemethode 1 en 2, als functie van de temperatuur uitgezet.

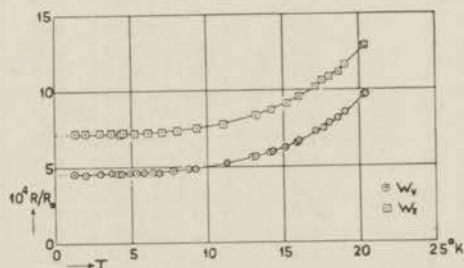


Fig. 38. De weerstand van  $W_v$  en  $W_z$  met kopercontacten.

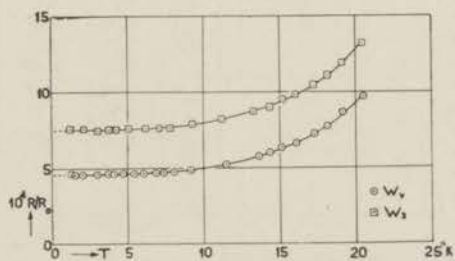


Fig. 39. De weerstand van  $W_v$  en  $W_z$  met kwikcontacten.

Voor de beide verschillende oriëntaties vinden we verschillende waarden voor  $R/R_0$ . Het verschil in  $R/R_0$  neemt met de temperatuur toe. De regel van MATTHIESEN geldt niet in ongewijzigden vorm.

Om te kunnen nagaan of de regel in gewijzigden vorm zou gelden, moet men van meer wolframdraden den weerstand meten.

Daar de  $\theta$  hoog is, valt het geheele bereikte temperatuurgebied binnen dat, waarvoor  $T < \frac{\theta}{13}$  is. Een evenredigheid met een enkele macht van de temperatuur zal dus in het geheele gebied moeten bestaan.

In tabel 53, 54 en 55, 56 vindt men de waarden van den „idealen”

TABEL 53. Wv.

	$T$ °K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
H	20.41	9.7 <sup>1</sup>	4.6	5.1
„	20.39	9.7 <sup>0</sup>		5.1
HS	20.28	9.7 <sup>4</sup>		5.1
H	19.07	8.5 <sup>2</sup>		3.9
„	18.59	8.1 <sup>6</sup>		3.6
„	18.06	7.8 <sup>3</sup>		3.2
„	17.64	7.4 <sup>9</sup>		2.9
„	17.11	7.3 <sup>2</sup>		2.7
„	16.04	6.6 <sup>5</sup>		2.0 <sup>5</sup>
„	15.91	6.5 <sup>4</sup>		1.9
HS	15.14	6.2 <sup>0</sup>		1.6
H	14.32	5.9 <sup>4</sup>		1.3
„	14.18	5.9 <sup>6</sup>		1.4
HS	13.18	5.6 <sup>8</sup>		1.1
„	13.10	5.6 <sup>1</sup>		1.0
„	11.27	5.2 <sup>3</sup>		0.6
„	9.24	4.8 <sup>8</sup>		0.2 <sup>8</sup>
S	8.78	4.9 <sup>3</sup>		0.3 <sup>3</sup>
„	7.76	4.7 <sup>4</sup>		0.1 <sup>4</sup>
„	7.68	4.7 <sup>5</sup>		0.1 <sup>5</sup>
„	7.65	4.7 <sup>4</sup>		
„	6.86	4.6 <sup>5</sup>		
„	6.42	4.6 <sup>0</sup>		
„	5.81	4.6 <sup>4</sup>		
„	5.35	4.6 <sup>1</sup>		
„	4.90	4.6 <sup>4</sup>		
„	4.40	4.5 <sup>8</sup>		
He	4.25	4.5 <sup>5</sup>		
„	3.71	4.6 <sup>2</sup>		
„	3.00	4.5 <sup>7</sup>		
„	2.01	4.4 <sup>5</sup>		
„	1.29	4.5 <sup>4</sup>		

TABEL 54. Wv.

	$T$ °K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
H	20.49	9.6 <sup>8</sup>	4.6	5.1
„	19.11	8.6 <sup>5</sup>		4.0 <sup>5</sup>
„	18.12	7.7 <sup>4</sup>		3.1
„	17.25	7.2 <sup>8</sup>		2.7
„	16.09	6.6 <sup>6</sup>		2.1
HS	15.10	6.3 <sup>7</sup>		1.8
H	14.33	6.0 <sup>1</sup>		1.4
HS	13.62	5.7 <sup>8</sup>		1.2
„	11.46	5.2 <sup>7</sup>		0.7
„	9.17	4.9 <sup>2</sup>		0.3 <sup>2</sup>
S	8.00	4.7 <sup>6</sup>		0.1 <sup>6</sup>
„	7.32	4.7 <sup>2</sup>		0.1 <sup>2</sup>
„	6.86	4.7 <sup>1</sup>		
„	6.06	4.6 <sup>6</sup>		
„	6.04	4.6 <sup>4</sup>		
„	5.42	4.6 <sup>1</sup>		
„	4.70	4.6 <sup>4</sup>		
He	4.24	4.6 <sup>3</sup>		
S	4.17	4.6 <sup>4</sup>		
„	4.06	4.6 <sup>2</sup>		
He	3.71	4.6 <sup>3</sup>		
„	3.02	4.6 <sup>2</sup>		
„	2.04	4.5 <sup>9</sup>		
„	1.55	4.5 <sup>7</sup>		
„	1.26	4.6 <sup>2</sup>		

weerstand als functie van de temperatuur. Op logarithmische schaal zijn deze waarden uitgezet in figuur 40.

Uit deze figuur moet men concluderen, dat de „ideale” weerstand

van 8 tot 20° K evenredig is met  $T^{3.6}$ . De rechten voor  $W_o$  (lengterichting evenwijdig ribbe) en  $W_z$  (lengterichting evenwijdig lichaamsdiagonaal) vallen niet samen, doch loopen praktisch even-

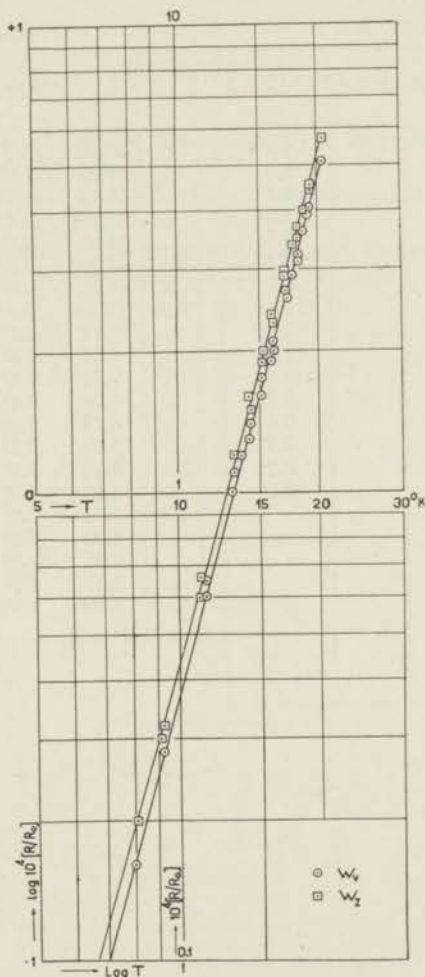


Fig. 40. De „ideale” weerstand van wolfram als functie van de temperatuur.

wijdig (de hellingen, welke de macht van  $T$  aangeven, zijn  $3.6^2$  en  $3.5^8$ ). We vinden dus in het geheel geen  $T^5$ -wet voor wolfram. Evenmin is te voldoen aan de betrekking  $[R/R_0] = A T^2 + B T^5$

Bepalen we n.l.  $A$  en  $B$  uit een tweetal gegevens en trachten we dan enkele andere waarden te berekenen, dan vinden we 10 tot 15 % afwijking tusschen deze berekende en experimenteele waarden.

TABEL 55. Wz.

	$T$ °K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
H	20.41	12.9 <sup>6</sup>	7.2	5.8
"	20.39	12.8 <sup>8</sup>		5.7
"	19.07	11.6 <sup>7</sup>		4.5
"	18.59	11.1 <sup>9</sup>		4.0
"	18.06	10.9 <sup>2</sup>		3.7
"	17.64	10.6 <sup>4</sup>		3.4
"	17.11	10.2 <sup>1</sup>		3.0
"	16.04	9.5 <sup>9</sup>		2.4
"	15.91	9.5 <sup>5</sup>		2.3 <sup>5</sup>
HS	15.21	9.1 <sup>1</sup>		1.9
H	14.18	8.7 <sup>7</sup>		1.6
HS	13.19	8.3 <sup>9</sup>		1.2
"	11.09	7.8 <sup>4</sup>		0.6
"	9.34	7.5 <sup>3</sup>		0.3 <sup>3</sup>
S	8.05	7.4 <sup>2</sup>		0.2 <sup>2</sup>
"	7.06	7.3 <sup>4</sup>		0.1 <sup>4</sup>
"	6.07	7.2 <sup>7</sup>		
"	5.20	7.1 <sup>8</sup>		
"	4.49	7.2 <sup>3</sup>		
He	4.25	7.1 <sup>2</sup>		
"	3.71	7.2 <sup>5</sup>		
"	3.00	7.2 <sup>4</sup>		
"	2.01	7.1 <sup>6</sup>		
"	1.30	7.2 <sup>2</sup>		

TABEL 56. Wz.

	$T$ °K	$10^4 R/R_0$	$10^4 z$	$10^4 [R/R_0]$
H	20.48	13.2 <sup>2</sup>	7.5	5.7
"	19.12	11.9 <sup>2</sup>		4.4
"	18.12	11.0 <sup>5</sup>		3.5 <sup>5</sup>
"	17.26	10.4 <sup>4</sup>		2.9
"	16.07	9.8 <sup>2</sup>		2.3
HS	15.20	9.5 <sup>4</sup>		2.0
H	14.32	8.9 <sup>8</sup>		1.5
HS	13.28	8.7 <sup>5</sup>		1.2
"	11.17	8.1 <sup>9</sup>		0.7
"	9.24	7.8 <sup>5</sup>		0.3 <sup>5</sup>
S	7.81	7.6 <sup>3</sup>		0.1 <sup>3</sup>
"	7.09	7.6 <sup>7</sup>		0.1 <sup>7</sup>
"	6.13	7.6 <sup>2</sup>		
"	5.06	7.5 <sup>3</sup>		
He	4.24	7.5 <sup>4</sup>		
S	4.23	7.5 <sup>8</sup>		
He	3.71	7.5 <sup>4</sup>		
"	3.02	7.4 <sup>6</sup>		
"	2.05	7.5 <sup>9</sup>		
"	1.31	7.5 <sup>2</sup>		
"	1.20	7.5 <sup>4</sup>		

#### LITERATUUR.

- 1) A. E. VAN ARKEL en J. H. DE BOER, *Z. anorg. u. alg. Chem.* **148**, 345, 1925.  
A. E. VAN ARKEL, *Physica* **3**, 76, 1923.  
J. H. DE BOER en J. D. FAST, *Z. anorg. u. alg. Chem.* **153**, 1, 1926; **187**, 177, 1930; **187**, 193, 1930.
  - 2) Zie W. J. DE HAAS en TH BIERMASZ, *Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 249a*; *Physica, 's-Grav.* **4**, 752, 1937.
-

## HOOFDSTUK VIII.

### De weerstand van lood als functie van de temperatuur.

#### § 1. *Inleiding.*

Lood was een van de metalen, waarvan het eerst de supergeleiding werd ontdekt. Het sprongpunt ligt hoog, n.l. bij  $7.2^\circ$  K. De weerstand-temperatuurkromme kan men dus slechts meten tot die temperatuur. Dit maakt de extrapolatie ter bepaling van den restweerstand onzeker.

Uit metingen van DE HAAS, SIZOO en KAMERLINGH ONNES bleek, dat in geval van kwik de kromme, welke beneden het sprongpunt verkregen kan worden door metingen in een de supergeleiding verstorend magneetveld, een vloeiende voortzetting is van de kromme boven het sprongpunt.

MEISSNER vond hetzelfde voor het geval, dat men te maken heeft met de extrapolatie van lood. Hij mat bij  $4.2$  en  $1.3^\circ$  K den weerstand van lood in verschillende magneetvelden en extrapoleerde de weerstand-magneetveldkromme naar veldwaarde nul. Daar MEISSNER het gebied tusschen  $4$  en  $14^\circ$  K niet kon bereiken, was het van belang de kromme van  $7.2^\circ$  K af te bepalen.

Wij maten den weerstand van lood in een drietal velden, zoowel boven als beneden het sprongpunt. In het heliumgebied werden eenige metingen verricht in verschillende velden en bij verschillende temperaturen.

De extrapolatie naar veld nul is in zekeren zin willekeurig. Voor niet-supergeleidende metalen vindt men meestal voor den weerstand een kwadratische afhankelijkheid van het magneetveld in lage velden. Theoretisch is deze ook te verwachten. Daarom probeerden we de extrapolatie met behulp van de formule:

$$R_{HT} = R_{0T} (1 + \beta H^2). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

(Zie verdere opmerkingen in § 4 van dit hoofdstuk.)

De nauwkeurigheid, waarmede de waarde  $R_{0T}$  bepaald kon worden, was niet groot, n.l. één tot vier procent. De weerstand werd



in een veld van 600 Gauss gemeten tusschen 4 en 20.4° K. Voor het temperatuurgebied 1—4° K werd de waarde voor een veld van 600 Gauss berekend met behulp van de bovengenoemde formule (1). (In de tabellen 58 en 59 zijn de berekende getallen tusschen haakjes geplaatst.)

Behalve de extrapolatie beneden het sprongpunt werd ook de temperatuurafhankelijkheid van den „idealen” weerstand van lood nagegaan tusschen de temperaturen 7.2 en 90° K.

### § 2. Het materiaal en de montage.

Het gebruikte lood was afkomstig van de firma KAHLBAUM. Van dit lood werden draden gespoten en hiervan werden spiraaltjes gemaakt, welke aan de potentiaal- en stroomdraden vrij werden opgehangen.

Het temperen van looddraden heeft weinig zin, zooals uit de meting van de drie loodweerstand:  $Pb_4$  (3 uur getemperd bij 200° C),  $Pb_5$  (1½ uur getemperd bij 200° C) en  $Pb_3$  (ongetemperd) blijkt. De ongetemperde draad is niet slechter dan  $Pb_5$ . (Zie fig. 41.)

Als weerstand  $Pb_L$  diende een bijzonder geconstrueerde loodthermometer, welke gebruikt werd bij de meting van de warmtegeleiding van metalen.

### § 3. De metingen en de resultaten.

$Pb_3$ ,  $Pb_4$  en  $Pb_5$  werden gemeten bij de temperaturen van vloeibare waterstof. In tabel 57 staan de waarden van  $R/R_0$  vermeld. Uit de figuur is te zien, dat de regel van MATTHIESSEN ook hier niet opgaat.

TABEL 57.

T °K	10 <sup>4</sup> R/R <sub>0</sub>		
	Pb <sub>3</sub>	Pb <sub>4</sub>	Pb <sub>5</sub>
20.47	302.1 <sup>6</sup>	300.2 <sup>6</sup>	307.3 <sup>9</sup>
19.07	253.8 <sup>1</sup>	252.1 <sup>0</sup>	258.7 <sup>3</sup>
18.03	219.8 <sup>5</sup>	218.7 <sup>1</sup>	225.0 <sup>4</sup>
17.19	193.2 <sup>1</sup>	192.1 <sup>7</sup>	198.3 <sup>3</sup>
15.91	155.6 <sup>7</sup>	154.9 <sup>6</sup>	160.6 <sup>2</sup>
14.20	110.6 <sup>3</sup>	110.5 <sup>7</sup>	115.3 <sup>9</sup>

$Pb_4$  werd gemeten van 4 tot 20° K in velden van 0 Gauss, 600 Gauss en 660 Gauss. Beneden 4° K werd de weerstand gemeten

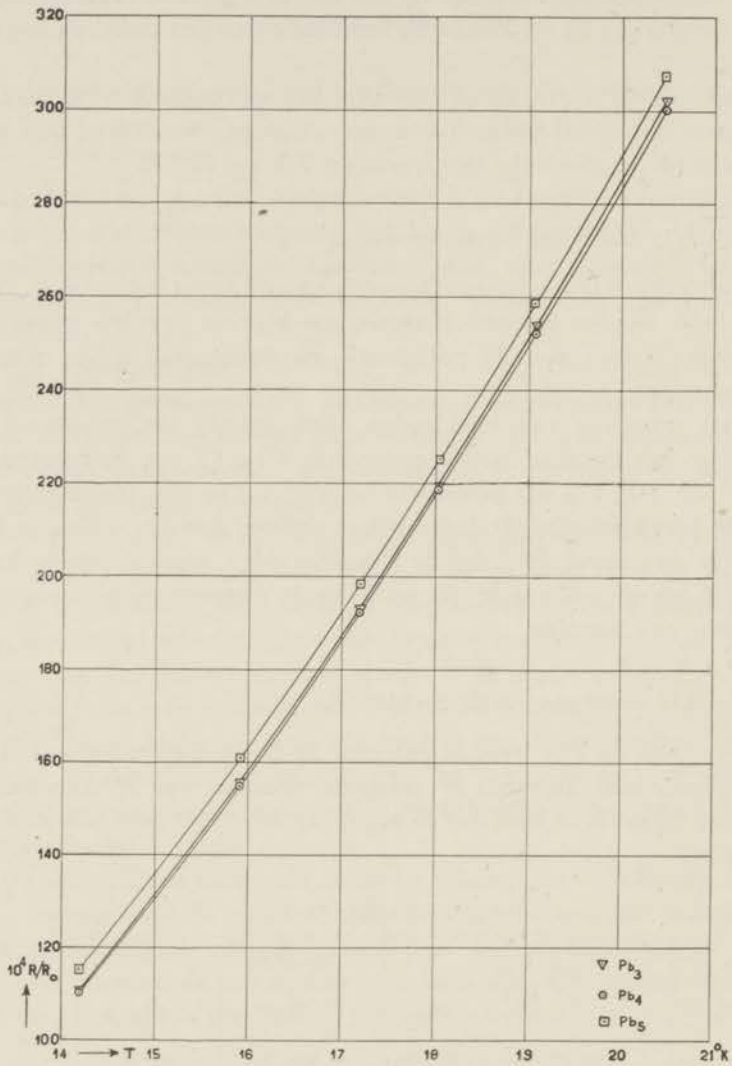


Fig. 41. De weerstand van lood tussen 14 en 21° K.

in hogere velden en werd naar een veld van 0 en van 600 Gauss geëxtrapoleerd.

De gegevens vindt men in tabel 58—61 en fig. 42 en 43.

TABEL 58.  
Pb<sub>4</sub> voor H = 0

	T °K	10 <sup>4</sup> R/R <sub>0</sub>	10 <sup>4</sup> z	10 <sup>4</sup> [R/R <sub>0</sub> ]
HS	20.32	301.0 <sup>2</sup>	1.26	299.79
"	17.22	196.7 <sup>8</sup>		195.52
"	14.21	112.2 <sup>3</sup>		110.99
"	12.81	80.24		78.99
"	10.51	39.59		38.34
"	9.38	25.30		24.04
"	9.23	23.82		22.56
S	7.81	12.20		10.94
"	7.23	8.49		7.23
"	7.22	8.33		7.07
He	4.24	(1.88)		0.62
"	3.22	(1.50)		0.24
"	2.30	(1.31)		0.05

TABEL 59.  
Pb<sub>4</sub> voor H = 600 G

	T °K	10 <sup>4</sup> R/R <sub>0</sub>
HS	20.32	301.1 <sup>0</sup>
"	17.22	196.8 <sup>1</sup>
"	14.21	112.3 <sup>5</sup>
"	12.80	80.05
"	10.51	39.51
"	9.30	24.63
S	7.79	12.12
"	7.25	8.89
"	6.94	7.45
"	5.63	3.52
He	4.24	(2.10)
"	3.22	(1.75)
"	2.30	(1.59)

TABEL 60.  
Pb<sub>4</sub> voor H = 630 G

	T °K	10 <sup>4</sup> R/R <sub>0</sub>
HS	20.32	301.1 <sup>0</sup>
"	17.26	197.6 <sup>8</sup>
"	14.21	112.3 <sup>0</sup>
"	12.80	80.04
"	9.27	24.26
S	7.26	8.93
"	5.64	3.54

TABEL 61.  
Pb<sub>4</sub> voor H = 660 G

	T °K	10 <sup>4</sup> R/R <sub>0</sub>
HS	20.32	301.0 <sup>7</sup>
"	17.23	197.3 <sup>1</sup>
"	14.21	112.2 <sup>8</sup>
"	12.81	80.18
"	10.51	39.45
"	9.24	24.08
S	7.80	12.12
"	7.26	8.96
"	6.95	7.58
"	5.65	3.56

Boven 7.2° K is nog geen verschil in de waarden van 0 en van 600 Gauss te vinden. Beneden 7.2° K treedt een klein verschil op, dat toeneemt naar lagere temperaturen.

We hebben getracht de punten beneden 8° K voor te stellen door de volgende formules:

$$R/R_0 = a + bT^5 \quad ; a = 1.29$$

$$R/R_0 = a + bT^4 \quad ; a = 1.26$$

$$R/R_0 = a + bT^2 + cT^5 \quad ; a = 1.25$$

$$R/R_0 = a + bT^4 + cT^5 \quad ; a = 1.27$$

Geen van deze formules gaven de kromme behoorlijk weer. Als restweerstand hebben we 1.26 aangenomen.

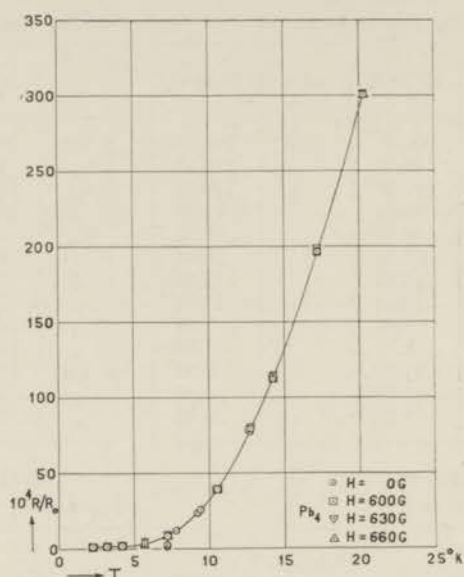


Fig. 42. De weerstand van  $Pb_4$  van 2—21° K in verschillende magneetvelden.

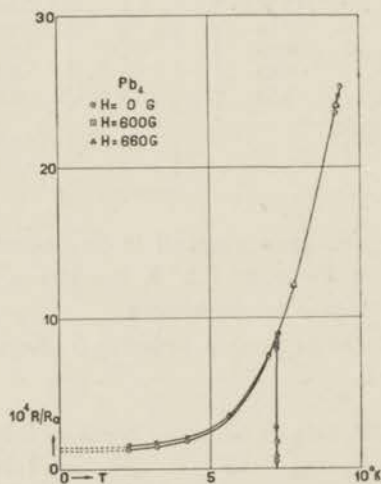


Fig. 43. De weerstand van  $Pb_4$  van 2—10° K in verschillende magneetvelden.

In tabel 58 vindt men de waarden van den „idealen” weerstand, waarvan in figuur 44 de logaritmische als functie van de log. van de temperatuur is uitgezet.

De waarden van den „idealen” weerstand zijn hooger dan die van  $Pb_1$  en  $Pb_2$ , gemeten door DE HAAS, DE BOER en VAN DEN BERG<sup>3</sup>). Het verschil is te wijten aan het verschil in de geëxtrapolerde waarden voor den restweerstand.

#### § 4. *Critiek op de extrapolatie.*

Men kan zich afvragen, of het gerechtvaardigd is voor de supergeleidende metalen beneden het sprongpunt een kwadratische veldafhankelijkheid voor den electrischen weerstand aan te nemen. Bij niet-supergeleidende metalen wordt weliswaar deze afhankelijkheid gevonden, maar als we de weerstandsmetingen bekijken, welke MEISSNER verrichtte bij eenzelfde temperatuur en in verschillende magneetvelden, dan vinden we voor den weerstand geen kwadratische afhankelijkheid van het magneetveld. Deze metingen bij 4.2 en 1.3° K blijken te kunnen worden voorgesteld door de formule:

$$R_{HT} = R_{0T} (1 + \beta H^{4/3}) \dots \dots \dots (2)$$

De afwijkingen van deze formule zijn maximaal 3%. De kwadratische formule (1) zou grootere afwijkingen geven. Het feit, dat hier de metingen beter kunnen worden voorgesteld met de macht  $4/3$  in plaats van met de macht 2, is nog geen voldoende bewijs, dat er werkelijk een macht  $4/3$  zou gelden beneden het sprongpunt. Men zou metingen moeten verrichten ook boven het sprongpunt om na te gaan of daar die  $4/3$ -macht van  $H$  ook geldt. Dan had men meer aanwijzingen in die richting.

De metingen boven het sprongpunt, welke wij verrichtten bij 660, 600 en 0 Gauss, zijn voor dit doel niet geschikt, daar geen verschil gevonden werd tusschen de metingen in verschillende velden. Berekenen we de waarde  $R_{0T}$  met de formule (2), dan vinden we volkomen andere waarden dan in geval van het gebruik van formule (1), waarbij de formule (2) beter de metingen weergeeft (één tot twee procent). (Zie tabel 62.)

Hieruit zien we, dat het eigenlijk weinig zin heeft dergelijke extrapolaties uit te voeren om op die manier een juistere bepaling

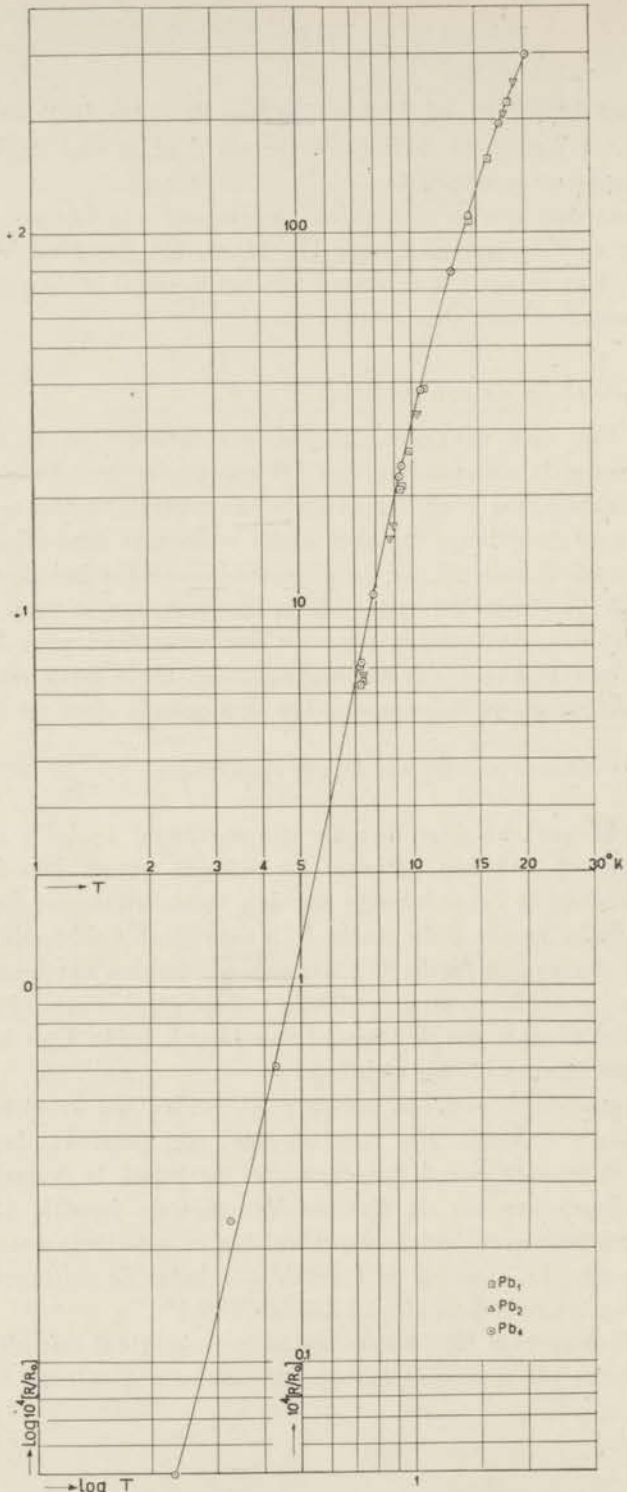


Fig. 44. De „ideale” weerstand van lood.

van den restweerstand te verkrijgen. Het is de vraag, of een eenduidige definitie van den „idealen” weerstand mogelijk is beneden het sprongpunt. Wel kunnen we uit de metingen in een veld

TABEL 62.

$T$ °K	$10^4 R/R_0$ volgens (1)	$10^4 R/R_0$ volgens (2)	$\Delta$ in % van (1)
4.24	1.88	1.47	22
3.22	1.50	0.95	37
2.30	1.31	0.54	59

van 600 Gauss bij temperaturen boven en beneden het sprongpunt besluiten, dat er in de weerstand-temperatuurkromme, bepaald in een magneetveld, geen bijzonderheden optreden bij het sprongpunt.

§ 5. *Het toetsen van de formule (3) van GRÜNEISEN van 7.2 tot 90° K.*

Voor  $Pb_1$  en  $Pb_2$  werd de formule (3) van GRÜNEISEN (zie Hoofdstuk 1, pag. 5) toegepast<sup>3)</sup>. Er werd een overeenstemming gevonden tusschen de experimenteele en de berekende waarden, wanneer men de  $\theta$ -waarden uit de soortelijke warmtemetingen gebruikte (zie ook dissertatie J. DE BOER).

We hebben  $Pb_L$  gemeten van 7.2° tot 90° K en de formule van GRÜNEISEN daaraan getoetst. GRÜNEISEN<sup>4)</sup> gebruikt bij de contrôle voor  $\theta$  de waarde 86 en vindt dan geen mooie overeenstemming. Door de berekende waarden te vermenigvuldigen met den factor  $(1 + a_1 T + a_2 T^2)$ , welken hij bepaalt door overeenstemming te verlangen bij hogere temperaturen, kan hij een betere overeenstemming tot stand brengen. Dat dit gelukt, behoeft geen verwondering te verwekken, daar hij dan de  $\theta$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  en nog gedeeltelijk de  $z$  in handen heeft om tot het doel te geraken. Deze samengestelde formule heeft geen verdere beteekenis dan een behoorlijke interpolatieformule. Wij willen hierbij herinneren aan de formule, welke NERNST in 1911<sup>5)</sup> opstelde en welke de experimenten van lood behoorlijk weergaf. (Zie ook: H. KAMERLINGH ONNES in Comm. 119b, 1911.)

Ter vergelijking hebben we de ongecorrigeerde formule van GRÜNEISEN toegepast met een  $\theta$ -waarde 86. De overeenstemming

wordt bij hogere temperatuur slecht. Wij berekenden ter demonstratie de waarden van  $\theta$ , welke men zou moeten kiezen om behoorlijke overeenstemming te krijgen tusschen de berekende en experimenteele waarden en we vonden een waarde, die liep van 85 bij 7° K tot 127 bij 90° K. (Zie tabel 63 en figuur 45.) Bij de berekening met de  $\theta$ -waarde 86 snijden de experimenteele en berekende krommen elkaar bij ongeveer 12° K.

Tot 20° K treden geen al te groote verschillen op tusschen de

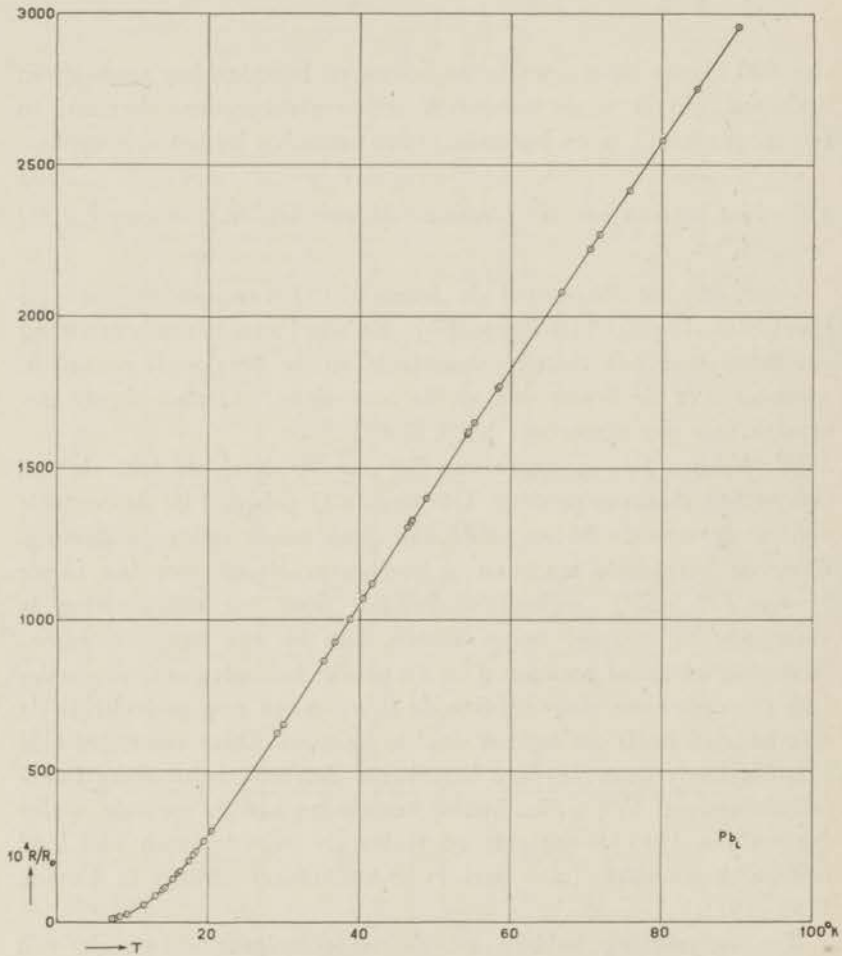


Fig. 45. De weerstand van  $Pb_L$  van 0—90° K.



$\theta$ -waarden, die men voor den electricischen weerstand zou moeten kiezen en de  $\theta$ -waarden, welke uit de metingen van de soortelijke warmte volgen. Dit bevestigen de resultaten bij  $Pb_1$  en  $Pb_2$ . De

TABEL 63.  $Pb_L$ .

$T$ °K	$R/R_0$	$R/R_0 - z$	$[R/R_0]$ exp.	$[R/R_0]$ berekend	$\frac{86}{T}$	$\frac{\sigma}{\sigma_{20}}$	$\theta_r$	$\theta_{s.w.}$	
90.11	0.29570	0.29520	0.29535	0.31373	0.95 <sup>4</sup>	0.9510	127.5		91.0
84.63 <sup>1</sup>	0.27500	0.27450	0.27464	0.29425	1.01 <sup>7</sup>	0.9497			
80.14	0.25826	0.25776	0.25789	0.27538	1.07 <sup>3</sup>	0.9386	121.8	90.1	87.0
75.65 <sup>7</sup>	0.24163	0.24113	0.24125	0.25801	1.13 <sup>6</sup>	0.9315			
71.73 <sup>9</sup>	0.22693	0.22643	0.22654	0.24273	1.19 <sup>8</sup>	0.9242			
70.49	0.22227	0.22177	0.22188	0.23784	1.22 <sup>0</sup>	0.9216	117.6	89.0	87.2
66.67 <sup>1</sup>	0.20804	0.20754	0.20764	0.22285	1.29 <sup>0</sup>	0.9130			
62.02	0.19240	0.19190	0.19200	0.20442	1.38 <sup>7</sup>	0.9003			
58.32 <sup>9</sup>	0.17672	0.17622	0.17631	0.18967	1.47 <sup>5</sup>	0.8882			
58.26	0.17641	0.17591	0.17600	0.18943	1.47 <sup>6</sup>	0.8881	110.8	88.5	87.2
55.13	0.16488	0.16438	0.16446	0.17681	1.56 <sup>1</sup>	0.8760			
48.82	0.14001	0.13951	0.13958	0.15296	1.76 <sup>2</sup>	0.8558			
46.94	0.13268	0.13218	0.13225	0.14341	1.83 <sup>3</sup>	0.8345			
46.71	0.13235	0.13185	0.13192	0.14252	1.84 <sup>0</sup>	0.8334			
46.26	0.13062	0.13012	0.13018	0.14062	1.85 <sup>8</sup>	0.8303			
40.40	0.10700	0.10650	0.10655	0.11621	2.12 <sup>8</sup>	0.7857	101.0	89.5	86.0
38.68	0.10027	0.09977	0.09982	0.10891	2.22 <sup>4</sup>	0.7691			
36.75	0.09261	0.09211	0.09216	0.10073	2.34 <sup>1</sup>	0.7487			
35.22	0.08652 <sup>9</sup>	0.08603 <sup>0</sup>	0.08607 <sup>3</sup>	0.09419	2.44 <sup>4</sup>	0.7305			
30.02	0.06580 <sup>3</sup>	0.06530 <sup>7</sup>	0.06533 <sup>9</sup>	0.07239	2.86 <sup>4</sup>	0.6587	96.4	92.6	87.1
29.96	0.06530	0.06480	0.06483 <sup>2</sup>	0.07169	2.87 <sup>2</sup>	0.6536			
29.05	0.06206 <sup>6</sup>	0.061570	0.061601	0.06784	2.96	0.6379			
20.32	0.030288	0.029792	0.029807	0.03167	4.23	0.4257	89.3	88.2	
18.02	0.022339	0.021843	0.021854	0.02312	4.77	0.3505			
15.98	0.016064	0.015568	0.015576	0.01629	5.38	0.2785	87.7	87.4	
14.22	0.011407	0.010911	0.010917	0.01117	6.05	0.2145			
13.03	0.008688	0.008192	0.008196	0.008229	6.60	0.1725	86.2	87.1	
11.47	0.005625	0.005129	0.005132	0.005067	7.50	0.12067	85.7	86.8	
9.23	0.002614	0.002118	0.002119	0.002049	9.32	0.06065			
9.17	0.002555	0.002059	0.002060	0.001962	9.38	0.05844	84.8	86.4	
8.38	0.001865	0.001369	0.001370	0.001300 <sup>2</sup>	10.26 <sup>2</sup>	0.04238			
7.63	0.001363	0.000867	0.000867	0.000835 <sup>1</sup>	11.27 <sup>1</sup>	0.02989			
7.57	0.001326	0.000830	0.000830	0.000802 <sup>5</sup>	11.36 <sup>6</sup>	0.02896			
7.54	0.001315	0.000819	0.000819	0.000790 <sup>1</sup>	11.40 <sup>5</sup>	0.02862			
7.52	0.001302	0.000806	0.000806	0.000778 <sup>9</sup>	11.43 <sup>6</sup>	0.02829	85.2	85.9	
7.44	0.001259	0.000763	0.000763	0.000739 <sup>8</sup>	11.55 <sup>9</sup>	0.02716			
7.37	0.001223	0.000727	0.000727	0.000706 <sup>9</sup>	11.66 <sup>9</sup>	0.02620			
7.35	0.001208	0.000712	0.000712	0.000697 <sup>8</sup>	11.70 <sup>0</sup>	0.02593			
7.31	0.001192	0.000696	0.000696	0.000679 <sup>8</sup>	11.76 <sup>4</sup>	0.02540			
7.27	0.001172	0.000676	0.000676	0.000661 <sup>9</sup>	11.82 <sup>9</sup>	0.02487	85.5	85.8	
0	0.000496								

De waarden voor  $\theta$  werden voor de temperaturen tusschen 7 en 20°K ontleend aan de metingen van KEESOM en VAN DEN ENDE<sup>6</sup>), voor de temperaturen tusschen 20 en 90°K aan de metingen van KEESOM en KAMERLINGH ONNES<sup>7</sup>) (zie eerste kolom onder  $\theta$  s.w.) en van EUCKEN en SCHWERS<sup>8</sup>).

restweerstand voor  $Pb_L$  werd op de volgende manier bepaald: de laagste punten boven het sprongpunt bleken vrij goed te kunnen worden voorgesteld door:

$$R/R_0 = a + bT^5.$$

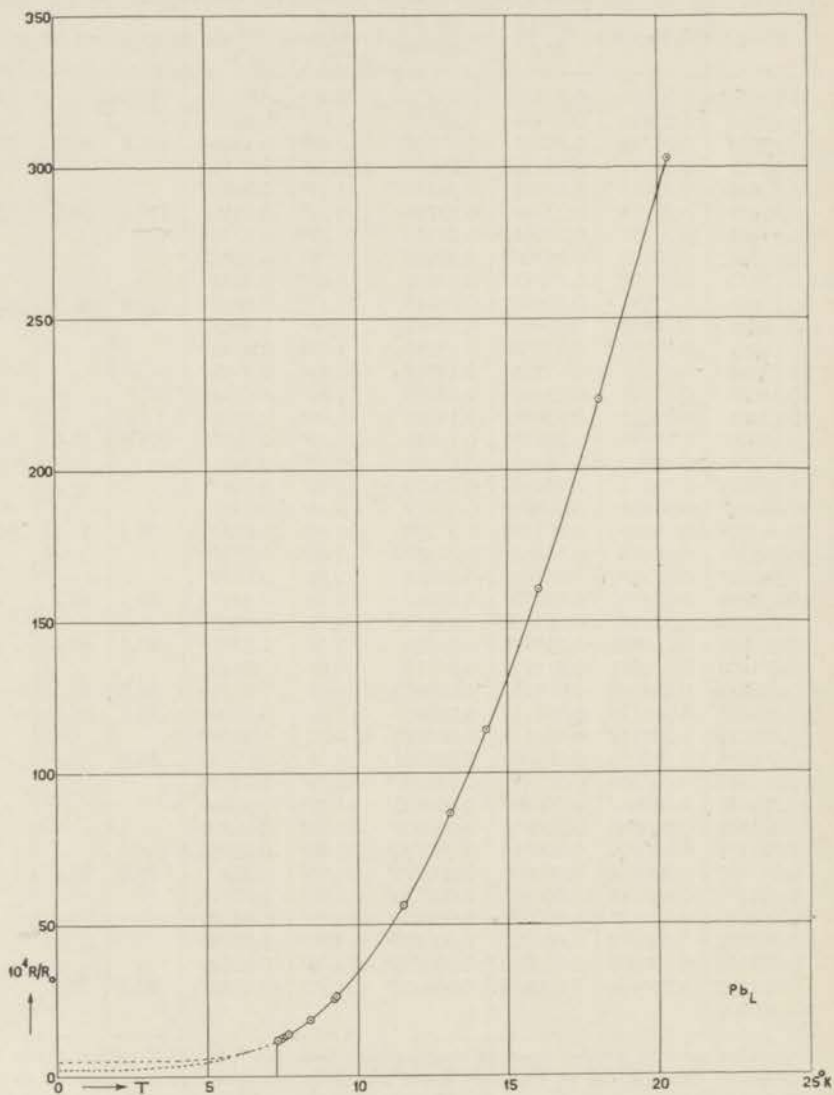


Fig. 46. De weerstand van  $Pb_L$  van 0—20° K.

Door uit deze formule voor de experimenteele gegevens de  $a$  te bepalen, had men de extrapolatie naar  $T=0^\circ\text{K}$  bepaald. Voor  $a$  werd de waarde  $4.96 \times 10^{-4}$  gevonden.

In figuur 46 is aangegeven de extrapolatie volgens deze  $T^5$ -wet en de extrapolatie, welke men geneigd is in een grafiek uit te voeren en welke ongeveer overeenkomt met een  $T^4$ -wet. Deze beide extrapolaties geven restweerstand, welke haast een factor 2 verschillen.

## LITERATUUR.

- 1) W. J. DE HAAS, G. J. SIZOO en H. KAMERLINGH ONNES, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 180d; Proc. kon. Akad., Amsterdam **29**, 250, 1925.
- 2) W. MEISSNER, Ann. Phys. (5) **13**, 641, 1932.
- 3) W. J. DE HAAS, J. DE BOER en G. J. VAN DEN BERG, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 233b; Physica, 's-Grav. **1**, 1115, 1933—34.
- 4) E. GRÜNEISEN, Ann. Phys. (5) **16**, 530, 1933.
- 5) W. NERNST, S.-B. Akad. Wiss. Berlin, 1911, p. 306.
- 6) W. H. KEESOM en J. N. VAN DEN ENDE, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 213c; Proc. kon. Akad., Amsterdam **34**, 210, 1931.
- 7) W. H. KEESOM en H. KAMERLINGH ONNES, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 143; Proc. kon. Akad., Amsterdam **17**, 894, 1914.
- 8) A. EUCKEN en F. SCHWERS, Verh. dtsch., phys. Ges. **15**, 582, 1913.

## HOOFDSTUK IX.

### De weerstand van tin als functie van de temperatuur.

#### § 1. *Inleiding.*

Het metaal tin heeft een tetragonaal rooster en behoort dus tot de metalen met anisotroop rooster, in tegenstelling met goud, zilver, koper, lood, wolfram en kalium, welke behooren tot de metalen met isotroop rooster en welke in de vorige hoofdstukken werden behandeld.

Door DE HAAS, DE BOER en VAN DEN BERG<sup>1)</sup> werden destijds polykristallijne draden gemeten. Uit deze metingen moest men besluiten, dat de „ideale” weerstand evenredig was met de vierde macht van de temperatuur. Voor dit metaal met anisotroop rooster was het van belang den „idealen” weerstand van eenkristallen als functie van de temperatuur na te gaan.

#### § 2. *Het materiaal en de montage.*

Er werden twee eenkristallen gemaakt van tin van de firma „Kahlbaum”. Dit geschiedde op de volgende manier: Capillairen van glas, welke aan één uiteinde waren dichtgesmolten, werden op een tinnen cylinder in een buis geplaatst met de open uiteinden naar beneden en daarna werd de buis geëvacueerd. Het tin werd verwarmd en wanneer de capillairen ver genoeg in het gesmolten metaal waren weggezakt, werden ze vol geperst, doordat er gasdruk ( $N_2$ ) op het metaal werd gezet. Deze volgeperste capillairen lieten we met de metaal massa samen zeer langzaam afkoelen. Daarna werden ze losgesneden en werd het glas door etsen met fluorwaterstof verwijderd.

Optisch kon dan dadelijk geconstateerd worden, of we met een eenkristal te doen hadden. Een nauwkeuriger methode om dit na te gaan, werd beschreven door DE HAAS en VAN ALPHEN<sup>2)</sup>.

De eenkristallen werden op ivoren raampjes gemonteerd en dunne koperdraden door middel van een vonkje aangelascht.

## § 3. De metingen en de resultaten.

De beide eenkristallen werden gemeten van 4 tot 21° K. Het sprongpunt ligt wel 0.3° lager dan 4° K, doch met het desorptie-apparaat konden we hierbij niet lager dan 4° K komen en bij het overbrengen naar den heliumcryostaat waren beide draden onbruikbaar geraakt.

De gegevens zijn in tabel 64 en 65 opgenomen.

TABEL 64. Sn<sub>3</sub>.

	T °K	10 <sup>4</sup> R/R <sub>0</sub>	10 <sup>4</sup> z	10 <sup>4</sup> [R/R <sub>0</sub> ]
H	20.27	100.76	4.31	96.49
"	19.23	86.78		82.51
"	18.36	75.43		71.15
"	17.44	64.89		60.61
"	16.47	54.23		49.94
"	15.31	43.34		39.05
HS	15.18	42.92		38.63
H	14.22	34.99		30.71
HS	13.20	27.66		23.36
"	11.29	17.16		12.86
"	9.24	9.88		5.97
S	8.24	7.76		3.45
"	7.31	6.35		2.04
"	6.07	5.10		0.79
"	5.28	4.71		0.40
"	4.56	4.51		0.20
"	4.49	4.45		0.14
"	4.32	4.43		0.12
"	4.19	4.42 <sup>5</sup>		0.11 <sup>5</sup>

TABEL 65. Sn<sub>4</sub>.

	T °K	10 <sup>4</sup> R/R <sub>0</sub>	10 <sup>4</sup> z	10 <sup>4</sup> [R/R <sub>0</sub> ]
H	20.27	100.25	3.95	96.34
"	19.23	85.95		82.03
"	18.36	75.30		71.38
"	17.44	64.27		60.34
"	16.47	53.44		49.51
"	15.31	42.62		38.69
HS	15.15	41.74		37.80
H	14.22	34.29		30.35
HS	13.16	26.90		22.96
"	11.42	17.15		13.21
"	9.28	9.61		5.67
"	9.20	9.17		5.22
S	8.37	7.49		3.54
"	8.29	7.39		3.44
"	7.84	6.65		2.70
"	7.73	6.45		2.50
"	7.27	5.74		1.79
"	7.17	5.71		1.76
"	6.84	5.32		1.37
"	6.74	5.26		1.31
"	6.15	4.74		0.79
"	5.97	4.63		0.68
"	5.52	4.44		0.49
"	4.80	4.15		0.20
"	4.27	4.90		0.14

In fig. 47 is, behalve Sn<sub>3</sub> en Sn<sub>4</sub>, ook de polykristallijne draad Sn<sub>1</sub> opgenomen.

Het verschil in R/R<sub>0</sub> tusschen Sn<sub>3</sub> en Sn<sub>4</sub> is klein en varieert over het gemeten temperatuurgebied. Het verschil tusschen Sn<sub>1</sub> en Sn<sub>3</sub> is veel grooter en neemt toe van 4 naar 20° K.

De restweerstand werd door extrapolatie van de weerstand-temperatuurkromme bepaald. De z.g. „ideale” weerstand blijkt

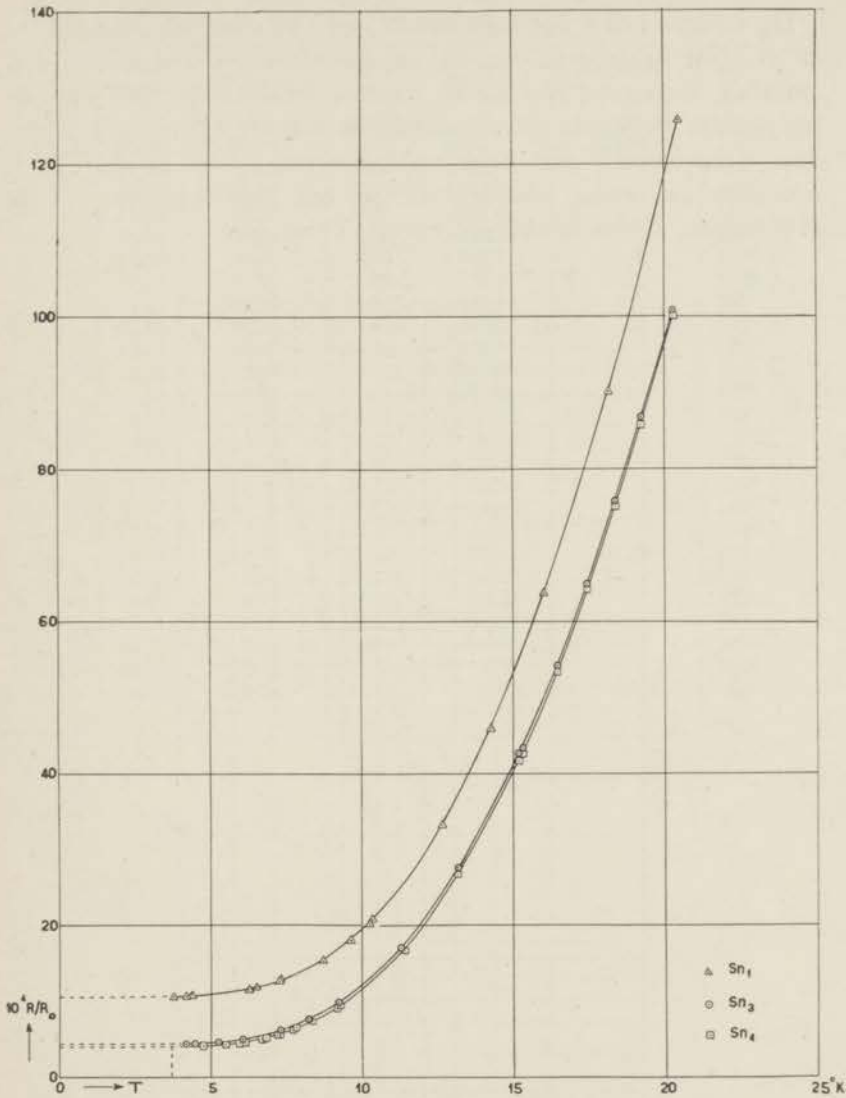


Fig. 47. De weerstand van  $Sn_1$ ,  $Sn_3$  en  $Sn_4$ .

(zie fig. 48) evenredig te zijn met de vijfde macht van de temperatuur in het gebied beneden  $10^\circ$  K. De karakteristieke temperatuur, volgends uit de metingen van de soortelijke warmte van tin, geldt niet voor een bepaalde kristaloriëntatie.

De waarde van  $\theta$  ligt tusschen 125 en 165 voor het gebied 2 tot  $20^\circ\text{K}$ . Het heeft geen zin, de experimenteele waarden van den „idealen” weerstand met die uit formule 3 van GRÜNEISEN voor de bijpassende  $\theta$ -waarde uit de soortelijke warmte <sup>3)</sup>, te vergelijken, daar deze formule *niet* geldt voor een anisotroop rooster. Toch rekenden we eenige waarden uit, om een idee te geven van de afwijkingen, welke hierbij optreden. (Tabel 66.)

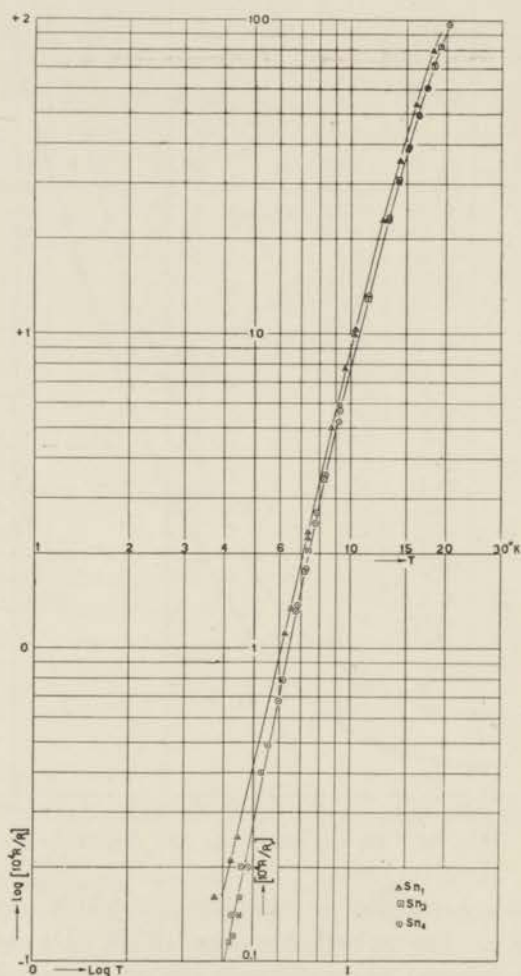


Fig. 48. De „ideale” weerstand van tin als functie van de temperatuur.



TABEL 66.

$T$ °K	$10^4 [R/R_0]$	$\frac{\theta}{T}$	$10^4 \frac{\sigma}{\sigma_\infty}$	$10^4 [R/R_0]$ ber.	$\theta$ s.w.
20.27	96.34	6.97	1490.	110.05	141 <sup>2</sup>
19.23	82.03	7.26	1327.		139 <sup>6</sup>
18.36	71.38	7.53	1192.7		138 <sup>2</sup>
17.44	60.34	7.84	1055.4		136 <sup>8</sup>
16.47	49.51	8.22	907.8		135 <sup>3</sup>
15.31	38.69	8.72	749.7		133 <sup>6</sup>
15.15	37.80	8.80	727.2	40.30	133 <sup>3</sup>
14.22	30.35	9.30	602.1		132 <sup>0</sup>
13.16	22.96	9.91	480.9		130 <sup>3</sup>
11.42	13.21	11.16	310.3		127 <sup>5</sup>
9.28	5.67	13.52	147.9		125 <sup>5</sup>
9.20	5.22	13.63	143.5	4.83	125 <sup>3</sup>
8.37	3.54	14.92	100.20		125
8.29	3.44	15.12	95.03		125 <sup>3</sup>
7.84	2.70	16.08	74.38		126
7.73	2.50	16.35	69.59		126 <sup>5</sup>
7.27	1.79	17.82	49.44		129 <sup>5</sup>
7.17	1.76	18.42	43.53		130 <sup>5</sup>
6.84	1.37	19.43	35.10	0.88	133
6.74	1.31	20.18	30.23		134
6.15	0.79	22.68	19.38		139 <sup>5</sup>
5.97	0.68	23.62	16.25		141
5.52	0.49	26.64	10.00		147
4.80	0.20	32.30	4.59		155 <sup>5</sup>
4.27	0.14	37.70	2.42	0.038	161 <sup>5</sup>

#### LITERATUUR.

- 1) W. J. DE HAAS, J. DE BOER en G. J. VAN DEN BERG, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 236d; Physica, 's-Grav. 2, 453, 1935.
  - 2) W. J. DE HAAS en P. M. VAN ALPHEN, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 204d; Proc. kon. Akad., Amsterdam 33, 128, 1930.
  - 3) J. N. VAN DEN ENDE, diss. Leiden 1932, pag. 76.
-

## SUMMARY.

This thesis deals with measurements on the electrical resistance of gold (Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 233*b*, 241*d*, 249*b* and 251*c*; *Physica 's-Grav.* 1, 1115, 1933—34; 3, 440, 1936; 4, 683, 1937; 5, 225, 1938), silver (Commun. No. 241*d*; *Physica 's-Grav.* 3, 440, 1936), copper, potassium, tungsten (single crystals), lead and tin (single crystals).

In order to determine in what manner the "ideal" resistance depends on the temperature, gold wires were measured between 1 and 21° K. There was a minimum in the resistance-temperature curve and so it was impossible to calculate with certainty an "ideal" resistance by means of MATTHIESSEN's rule. It was important to investigate what caused the minimum. Many gold wires of different purity were measured. The minimum shifts to higher temperatures when the value of  $R/R_0$  increases. The temperature of the minimum as a function of the  $R/R_0$  of the minimum forms a smooth curve. Extrapolation of this curve seems to indicate that  $(R/R_0)_{\min} = 0$  at 0° K. When the wire has not been annealed the minimum is still there, but the temperature and the value of  $R/R_0$  of the minimum no longer fits the curve.

The minimum does probably not depend on the adsorption of gases and it is also not to be imputed to impurities introduced by the welding of the wires. The extrapolation of the curve from temperatures above the minimum-temperature to 0° K seems to have some significance for the calculation of the "ideal" resistance, as the „ideal" resistance curves of many different kinds of wire coincide, so that there is some reason to believe that this "ideal" resistance is the resistance of perfectly pure gold. The single power of  $T$  (temperature) is 4.2.

The values of  $R/R_0$  for the different kinds of wires as a function of their residual resistances, calculated as mentioned above, lie on a straight line for each temperature above that of the minimum. By extrapolating these lines to  $z=0$ , an "ideal" resistance is again obtained which, however, is not completely identical with the one

first calculated. This "ideal" resistance depends on  $T^{4.0}$ . Therefore the "ideal" resistance of perfectly pure gold cannot be determined with a high degree of accuracy, but on the other hand it is fairly certain that the power of  $T$  is  $4.0 \pm 0.2$ .

In the temperature range 14—20° K no influence of helium gas on the resistance can be shown.

Measurements on gold wires of the same purity but with a different diameter show that the value of the resistance of a wire with a small diameter is higher than the value of one with a large diameter. 18 wires with a diameter between 500 and 25.5 microns were measured.

The curve obtained by plotting the value of  $R/R_0$  as a function of  $\frac{1}{d}$  ( $d$  = diameter), shows a strong curvature. According to NORDHEIM such a curve should be a straight line. So from an experimental point of view one is tempted to believe that the formula of NORDHEIM is not sufficient to describe the influence of the diameter on the resistance.

However, one of the wires of 25.5 micron has a lower value of  $R/R_0$  and this value happens to fit the straight line through the points of the wires with a diameter  $> 0.10$  mm, which gives a value of 400 Å for the mean free path of electrons in the metal. With the aid of the theory of SOMMERFELD one can calculate from this value for the mean free path a number of 0.94 free electrons per atom. The effect of the cross section cannot be the cause of the minimum.

In order to know how the resistance-temperature curve approaches the absolute zero, measurements below 1° K were executed. The results obtained show definitely that the increase of the resistance of gold observed at ordinary liquid helium-temperatures is continued at very low temperatures. The increase of the resistance with decreasing temperature will become extremely rapid at temperatures below 0.2° K. Though the results obtained are not sufficient for making any definitive statement concerning the behaviour of the gold wire near the absolute zero, one is tempted to assume tentatively that the resistance will become infinite.

There was also found a minimum (with two exceptions) in the resistance-temperature curves of silver. The "ideal" resistance, calculated as in the case of gold, is a linear function of  $T^{4.1}$ .

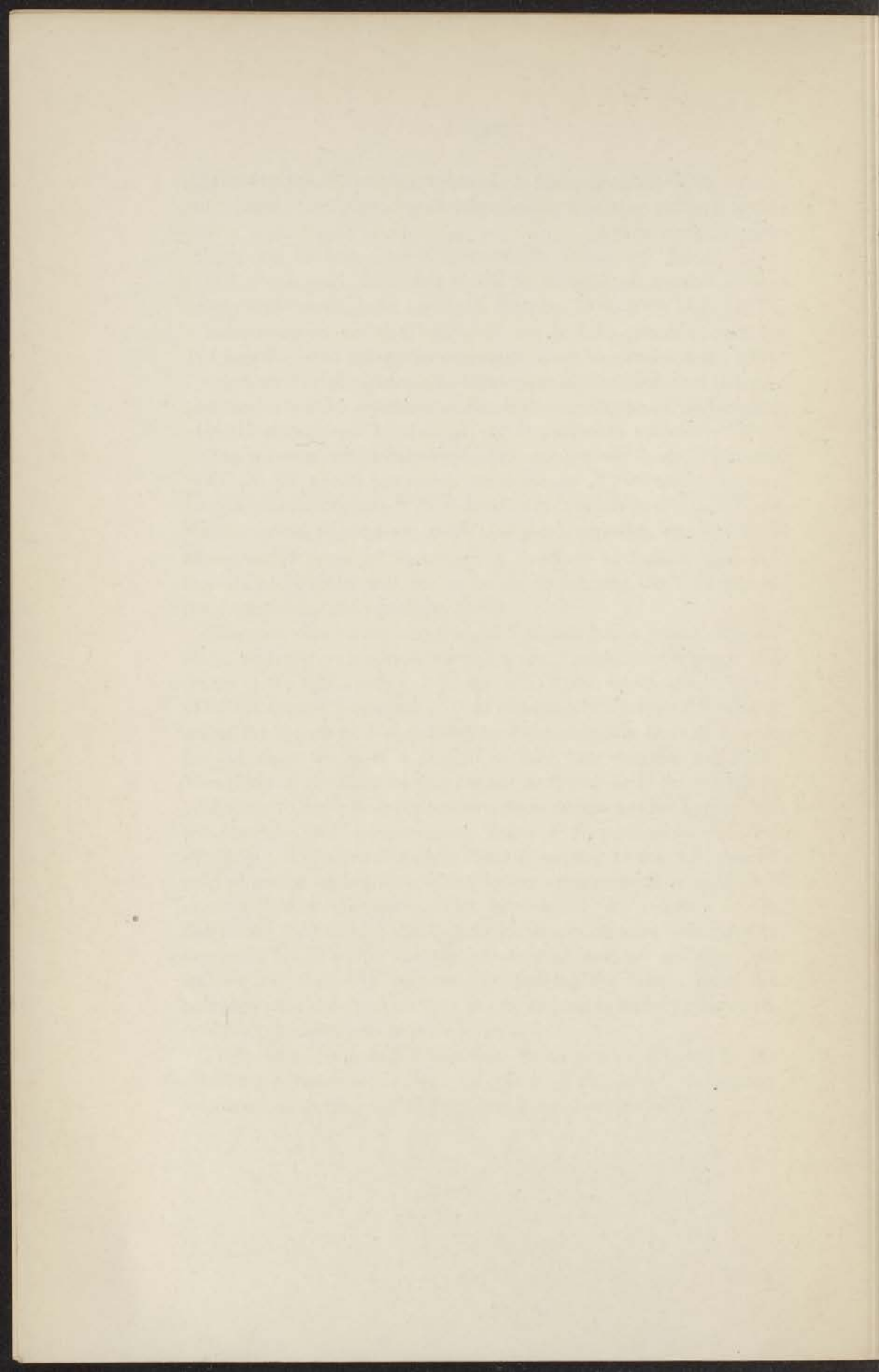
For other purposes technical copper wires were measured. MATTHIESSEN's rule was found valid for these wires contrary to other measurements.

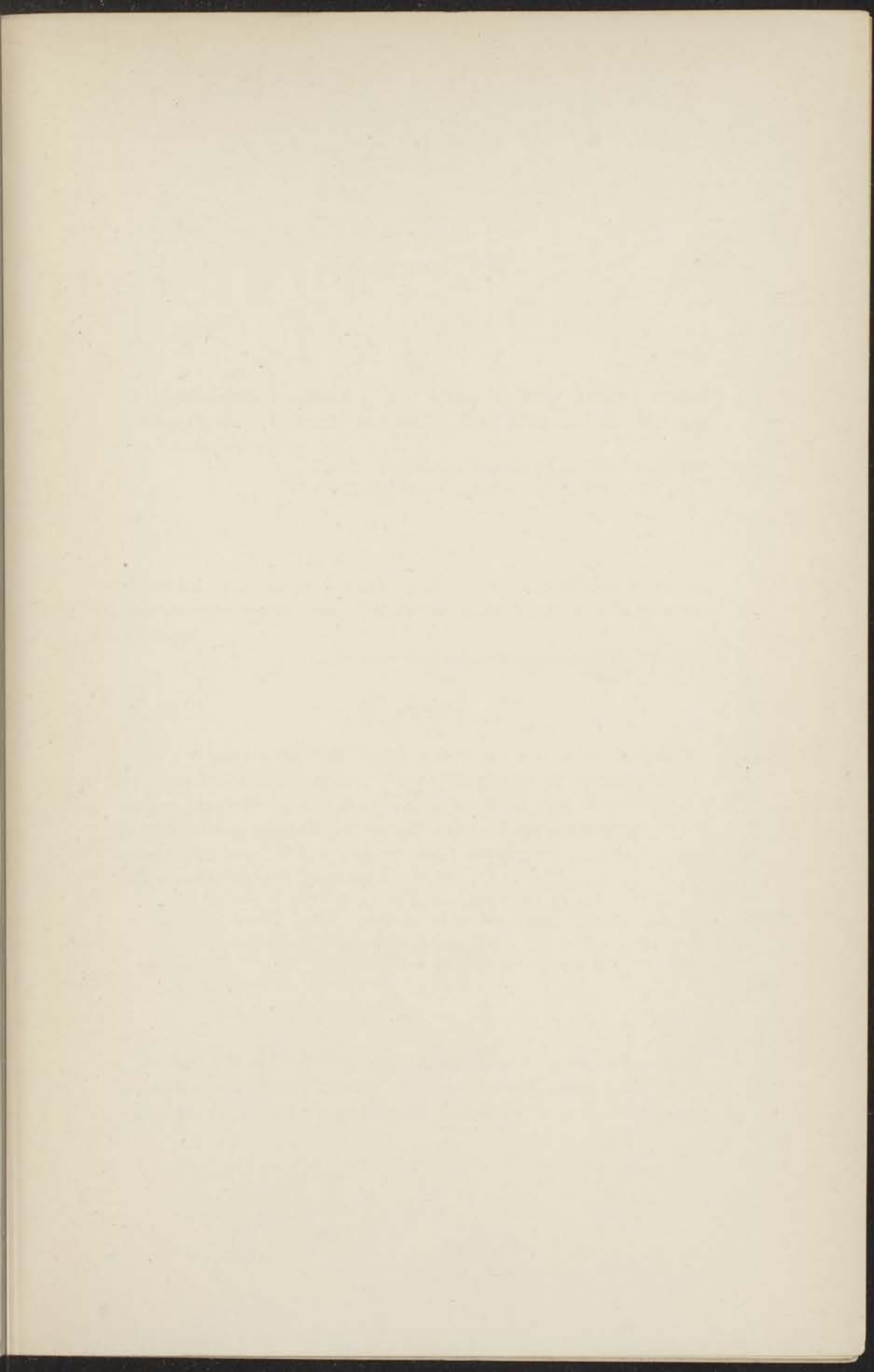
The "ideal" resistance of potassium wires and of tin single crystals follows the formula of BLOCH below  $10^{\circ}$  K.

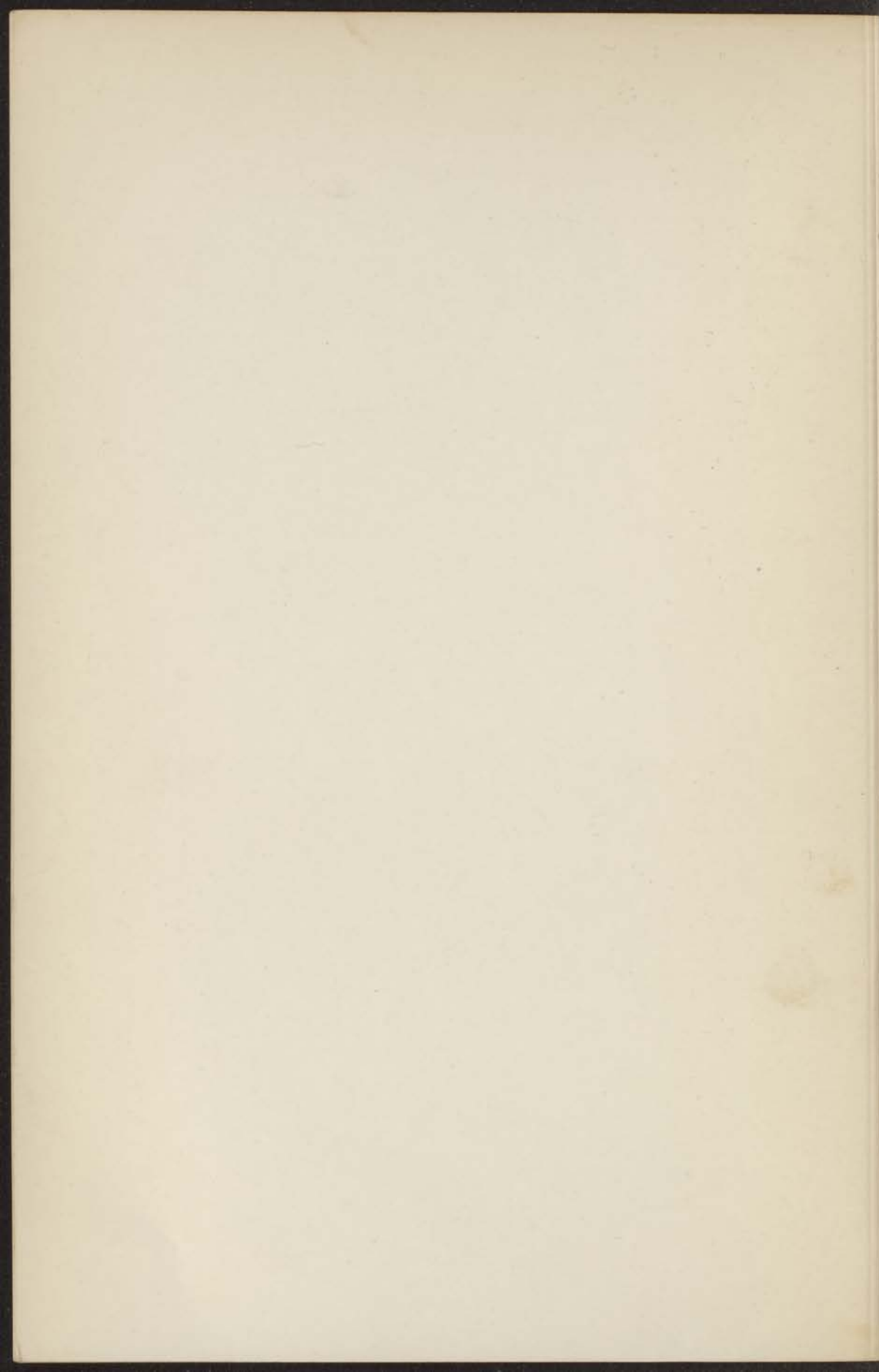
The single crystals of tungsten have an "ideal" resistance which is a linear function of  $T^{3.6}$ .

The extrapolation of the resistance-temperature curve of lead by means of measurements in magnetic fields, which disturb the superconductivity, is not very reliable. A comparison of the calculated "ideal" resistance according to the formula of GRÜNEISEN (1930) with the "ideal" resistance, calculated from the measurements between  $7$  and  $90^{\circ}$  K, shows large deviations above  $20^{\circ}$  K. The characteristic temperature, calculated from the measurements above  $20^{\circ}$  K, is very different from that from the specific heat.

---









## STELLINGEN

---

### I.

Het menschelijk gehoor is niet steeds in staat vast te stellen of twee tonen van verschillend timbre even hoog zijn dan wel een octaaf verschillen.

Zie: C. V. RAMAN, Handb. Phys. VIII, 354, 1927.  
E. MEYER, Hand. Phys. VIII, 489, 1927.

### II.

Doordat HUFFER geen rekening houdt met een derden zwakke component in het systeem AG Perseï, komt hij tot enkele onjuiste conclusies.

C. M. HUFFER, Publ. Washburn Obs. XV, 17, 1931.

### III.

Het verdient aanbeveling den weerstand van loodeenkristallen van verschillende zuiverheid in een longitudinaal magneetveld te bepalen teneinde na te gaan, of de opmerking van MEISSNER, dat de door hem gemeten lagere magnetische drempelwaarden te wijten zouden zijn aan het feit, dat zijn lood zuiverder was dan dat van vorige onderzoekers, gegrond is.

W. MEISSNER, Ann. Phys. (5) 13, 644, 1932.

W. TUYN en H. KAMERLINGH ONNES, Commun.  
Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 174a, 1926.

W. J. DE HAAS en J. VOOGD, Comm. No. 191d, 1928.

### IV.

De methode ter bepaling van susceptibiliteiten, welke berust op het meten van de zelfinductie van een de stof omringende spoel, resp. van de wederkerige inductie van twee de stof omringende

spoelen, kan gemakkelijk uitgebreid worden tot het bepalen van magnetisaties in hooge uitwendige velden.

W. F. GIAUQUE en D. F. MACDOUGALL, *J. Am. Chem. Soc.* **57**, 1175, 1935; **60**, 376, 1938.

C. J. GORTER, *Diss. Leiden* 1932; *Arch. Musée Teyler (III)* **7**, 183, 1932.

## V.

Het bestaan van een verschil tusschen de resultaten van McLENNAN en zijn medewerkers eenerzijds en KEESOM en zijn medewerkers anderzijds betreffende de weerstand-temperatuurkromme van magnesium doet het gewenscht schijnen een nader onderzoek naar het optreden van een minimum in deze kromme in te stellen.

W. H. KEESOM, *Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden Suppl. No. 80*, 1936.

J. C. McLENNAN, L. E. HOWLETT en J. O. WILHELM, *Trans. roy. Soc. Canada (III)*, **23**, 287, 1929.

## VI.

De vermindering van de meetnauwkeurigheid bij de metingen van den invloed van het magneetveld op den weerstand van goud door MEISSNER en SCHEFFERS had grootendeels kunnen worden voorkomen door gebruik te maken van een looden in plaats van een koperen spoel.

W. MEISSNER en H. SCHEFFERS, *Phys. Z.* **30**, 827, 1929.

## VII.

De resultaten van de metingen van den weerstand van „ongetemperd” en „getemperd” platina door STEINER en FÜNFER zijn misleidend.

K. STEINER en E. FÜNFER, *Actes du VIIe Congrès Int. du Froid I*, 388, 1936.

## VIII.

Het verdient aanbeveling bij een cryostaat voor het meten van weerstanden bij lage temperaturen het heliumglas van boven enkelwandig te maken en te zorgen, dat de lasch van het dubbelwandige deel onder den vloeistofspiegel van de omringende waterstof blijft.

## IX.

De zinsnede, voorkomende in het boek „Theoretische Physik” van JOOS:

„Das hohe Wärmeleitvermögen der Metalle, dass das Wärmeleitvermögen fester Isolatoren um viele Zehnerpotenzen übertrifft, usw.”

is alleen juist voor hooge temperaturen.

JOOS, p. 382.

W. J. DE HAAS en TH. BIERMASZ, Commun. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 236e en 249a.

H. BREMMER en W. J. DE HAAS, Commun. No. 243a.

TH. BIERMASZ, Diss. Leiden 1938.

H. BREMMER, Diss. Leiden 1934.

## X.

Het is opmerkelijk, dat, terwijl de metingen van den weerstand van goud-zilverlegeringen met 10 tot 90 mol. procenten zilver door GIAUQUE en STOUT geen minimum geven, die van een tweetal legeringen door CLAY het wel doen.

W. F. GIAUQUE en J. W. STOUT, J. Am. Chem. Soc. 60, 388, 1938.

J. CLAY, Diss. Leiden 1908; Comm. Kamerlingh Onnes Lab., Leiden No. 107d, 1908.

## XI.

De temperatuurafhankelijkheid van den weerstand van platina wordt door REUTER in zijn publicatie over den invloed van de draaddikte op den weerstand op tegenstrijdige manier aangegeven.

H. REUTER, Ann. Phys. (5) 30, 494, 1937.

## XII.

Het ware toe te juichen, indien de wiskunde zich bij de keuze tusschen een „rechts” en „links” assenstelsel zou aansluiten bij het in de natuurkunde algemeen geldende gebruik.

### XIII.

Het verdient aanbeveling calorische gegevens, voor zoover ze niet van technischen aard zijn, uit te drukken in Joules in plaats van in Calorieën.

### XIV.

Het bepalen van de snelheid van een pomp, door deze tegen een meetbaar lek te laten opwerken, is te verkiezen boven de methode, waarbij de tijd gemeten wordt, welke noodig is voor het bereiken van een bepaalden druk in een afgesloten ruimte.

### XV.

Indien men het prisma van NICOL op de Middelbare Scholen behandelt, dient men meer de aandacht te vestigen op het feit, dat de brekingsindex van canadabalsem ligt tusschen dien voor den gewonen en den buitengewonen straal in kalkspaat.

