

Messungen mit Hilfe von flüssigem Helium XI
Widerstand der reinen Metalle in tiefen Temperaturen
Von W. Meissner und B. Voigt

(Mit 13 Figuren)

(Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt)

(Schluß)

4. Gruppe

Von den Elementen dieser Gruppe wurden alle bis auf Hafnium untersucht.

a) *Kohlenstoff* (Montierungsart 3)

Kohlenstoff wurde bis jetzt von uns in Gestalt eines Glühlampenkohlefadens und eines Stückes Graphit geprüft. Während der Widerstand des ersteren dauernd ansteigt, hat das untersuchte Graphitstück einen solchen Widerstandsverlauf, daß r nach einem Maximum im Temperaturgebiet zwischen 20° und 90° abs. bei $4,2^{\circ}$ abs. wieder nahezu gleich 1 wird, um dann nochmals im Temperaturgebiet des flüssigen Heliums beträchtlich zu steigen. Dieser Widerstandsverlauf entspricht aber bekanntlich nicht dem Verhalten des reinen Graphits, wie aus Arbeiten von D. E. Roberts¹⁾, Kamerlingh Onnes und K. Hof²⁾, Pirani und Fehse³⁾ und Ryschkewitsch⁴⁾ hervorgeht. Messungen an Graphiteinkristallen sind von uns begonnen, konnten aber wegen Schwierigkeiten, die auftraten, noch nicht beendet werden.

1) D. E. Roberts, Ann. d. Phys. (4) 40. S. 453. 1913.

2) H. Kamerlingh u. K. Hof, Comm. Leiden Nr. 142b, 1914.

3) M. Pirani u. W. Fehse, Ztschr. f. Elektrochem. 29. S. 168. 1923.

4) E. Ryschkewitsch, Ztschr. f. Elektrochem. 29. S. 474. 1923.

Tabelle 21. Kohlenstoff

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	6 — Kohle 1	6 trig. Graphit 1
Herkunft, Verunreinigung		aus Glühlampe ?	Kahlbaum (Ceylon) ?
Behandlung		gebrannt	aus einem Stück herausgeschnitten
Länge Dicke		52 mm 0,2 mm ϕ	34 mm 3,5 \times 4 mm
Abstand der Stromdrähte		51,5 mm	28 mm
Abstand der Spannungsdrähte		43,7 mm	22 mm
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{beob.}}$
—	273,16	1	1
—	88,19	—	1,39 ₄
—	78,30	—	1,41 ₃
—	78,23	1,145	—
—	20,45	—	1,39 ₀
—	20,44	1,163	—
776,3	4,22	—	1,07 ₇
774,4	4,22	1,182	—
1,9	1,32	1,193	—
1,4	1,27	—	1,40 ₂
R_0 in Ω bei 273,16		46,7	0,19 ₆

Tabelle 22. Silicium

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	14 K.	Si 1
Herkunft, Verunreinigung		de Haën geschm.	0,5% Fe u. Al Spuren Ca
Behandlung		abgeätzt	
Länge Dicke		25 mm 7 \times 7 mm	
Abstand der Stromdrähte		18 mm	
Abstand der Spannungsdrähte		4,7 mm	
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$
—	273,16	1	
—	88,30	9,55 ₄	
—	77,61	12,2 ₇	
—	20,44	65,4	
768,5	4,21	190	
1,05	1,22	21	
R_0 in Ω bei 237,16		1,26	

b) *Silicium* (Montierungsart 8). (Tab. 22)

Untersucht wurde ein Stück geschmolzenes Silicium Si 1 und ein einzelner Kristall Si 2, für den die Meßergebnisse in Tab. 22 nicht mit aufgenommen sind. Der Widerstand von Si 1 steigt bis $4,2^{\circ}$ abs. beträchtlich an, fällt dann aber im Temperaturgebiet von $4,2^{\circ}$ bis $1,2^{\circ}$ abs.¹⁾ wieder stark ab. Der Siliciumkristall Si 2 dagegen, der in flüssigem Helium einen doppelt so großen Widerstand wie bei 0° C. hatte, zeigte diesen Abfall zwischen 4° und 1° abs. nicht. Einen metallischen, überall positiven Temperaturkoeffizienten, wie ihn H. J. Seemann²⁾ bis herab zur Temperatur der flüssigen Luft feststellte, fanden wir an Siliciumkristallen der Firma de Haën bis jetzt nicht. Doch werden diese Messungen an Einkristallen noch fortgesetzt.

c) *Titan* (Montierungsart 3)

Von Titan haben wir zwei Proben untersucht, erstens geschmolzenes Titan von der Firma Kahlbaum und zweitens Titan, das Herr Dr. de Boer³⁾, Eindhoven, aus der Gasphase abschied und uns freundlicher Weise zur Verfügung stellte. Ti 1 wurde bis herab zu $1,24^{\circ}$ abs. untersucht; es hat bei dieser Temperatur noch einen Widerstand von etwa $0,9 R_0$. Ti 2 jedoch hat bei $1,26^{\circ}$ abs. einen Widerstand von nur noch $0,2 R_0$ und wird, wie früher⁴⁾ bereits mitgeteilt, aller Wahrscheinlichkeit nach bei etwa $1,1^{\circ}$ abs. supraleitend. Bei $1,13^{\circ}$, der tiefsten erreichten Temperatur, ist R nur noch $0,001 R_0$. An einem andern Ti-Stäbchen wurde kürzlich von dem einen von uns bei einer etwas höheren Temperatur völlige Supraleitfähigkeit festgestellt.

Über die charakteristische Temperatur scheinen bisher keine Angaben vorzuliegen. Aus unseren Messungen ergibt

1) W. Meissner, Die Naturwissenschaften 17. S. 390. 1929.

2) H. J. Seemann, Phys. Ztschr. 28. S. 765. 1927; 29. S. 94. 1928.

3) A. E. v. Arkel und J. H. de Boer, Ztschr. f. anorg. u. allg. Chem. 148. S. 345. 1925; P. Clausing und G. Moubis, Physica 7. S. 245—250. 1927. Nr. 7.

4) W. Meissner, Ztschr. f. Phys. 60. S. 181. 1930.

Tabelle 23. Titan

Atom-Nr. Kristall- system	Metall	22 hex.	Ti 1	Ti 2		$\theta = 342$, berechnet nach Formel (2a)
Herkunft, Verunreinigung	Kahlb.	etwa 1% Fe; 0,1% V; Oxyde, Karbid (?)	geschm.	de Boer aus Gas- Eindh. phase	0,2% Zn; 0,03% Pb; auf Fe nicht untersucht	
Behandlung	abgeätzt			—		
Länge	13 mm			33,5 mm		
Dicke	2,5 × 3 mm			2 mm ϕ auf dünner Wolfram-Seele		
Abst. d. Stromdr. „ d. Spanngsdr.	9,5 mm 4,5 mm			29 mm 23 mm		
He-Dpfd. mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
—	273,16	1	—	1	1	1
—	88,19	—	—	0,3505	0,178 ₇	0,182 ₅
—	86,02	1,010 ₁	—	—	—	—
—	77,87	1,010 ₀	—	—	—	—
—	77,61	—	—	0,3180	0,137 ₈	0,137 ₀
—	20,46	—	—	0,2180	0,011 ₁	0,001 ₁
—	20,41	1,011 ₇	—	—	—	—
771,6	4,21	—	—	0,215	0,007 ₃	0,000 ₀
760,4	4,20	0,906	—	—	—	—
1,7	1,30	—	—	0,211	0,002 ₃	0,000 ₀
1,3	1,26	—	—	0,203	—	—
1,2	1,24	0,902	—	—	—	—
0,7	1,17	—	—	0,154	—	—
0,5	1,13	—	—	0,0014	—	—
—	0,00	—	—	(0,209 ₂) ¹⁾	—	—
R_0 in Ω b. 273,16		$1,694 \cdot 10^{-2}$		$3,973 \cdot 10^{-3}$ ²⁾		—

sich der Wert $\theta = 342$. Nach C. Blom berechnet man im Mittel $\theta = 478$.

Als spezifischer elektrischer Widerstand des Titans 2 ergibt sich ohne Berücksichtigung der dünnen Wolframseele etwa der Wert $\rho_0 = 54 \cdot 10^{-9} \Omega \text{ cm}$ bei 0° C .

1) Extrapoliert aus dem Verlauf zwischen $4,2^\circ$ und $1,3^\circ$ abs.

2) In der Sonderveröffentlichung [W. Meissner, Ztschr. f. Phys. 60. S. 181. 1930] ist $R_0 = 4,47 \cdot 10^{-3}$ angegeben, weil der Widerstand vor d. Messg. in fl. He neu montiert worden war.

d) Zirkonium (Montierungsart 4)

Auch von Zirkonium standen uns zwei verschiedene Proben zur Verfügung, eine von Herrn Dr. v. Arkel¹⁾, Eindhoven, aus der Gasphase abgeschiedene und ein Draht von der Fa. Osram. Beide Sorten zeigen metallische Leitfähigkeit. Der Restwiderstand von Zr 2 (Osram) beträgt etwa $0,11 R_0$, derjenige des Einkristalles Zr 1 nur $0,04 R_0$. Der Widerstand

Tabelle 24. Zirkonium

Atom-Nr. Kristall- system	Metall	40 hex.	Zr 1	$\theta = 288,$ berechnet nach Formel (2a)	Zr 2		$\theta = 274,$ berechnet nach Formel (2a)
Herkunft, Verunreinigung			0,3 % Hf, v. Arkel 0,01 % Zn Philips Fe nicht unters.		Osram	?	
Behandlung			—		i. Vak. 2½ st. 500° C		
Länge Dicke			etwa 75 mm 5 mm ϕ auf Seele von W. etwa 1 mm ϕ		etwa 60 mm 0,490 mm auf Pintschfaden, 0,050 mm ϕ		
Abst. d. Stromdr. „ d. Spanngsdr.			61 mm 52 mm		58,0 mm 51,5 mm		
He-Dpfd. mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
—	273,16	1	1	1	1	1	1
—	88,19	0,2380	0,2067	0,2107	—	(0,2145)	0,2183
—	86,14	—	(0,1991)	0,2016	0,2924	0,2059	0,2091
—	83,57	0,2214	0,1895	0,1900	—	(0,1956)	0,1980
—	78,42	—	(0,1703)	0,1677	0,2648	0,1750	0,1750
—	77,61	0,1971	0,1642	0,1642	—	(0,1718)	0,1715
—	77,59	0,1970	0,1641	0,1641	—	(0,1717)	0,1715
—	20,46	0,0443 ₆	0,0051 ₆	0,0022 ₃	—	—	0,0025 ₁
—	20,45	—	—	0,0022 ₃	0,1124	0,0039	0,0025 ₄
776,3	4,22	0,0421	0,0028	0,0000 ₀	—	—	—
767,5	4,21	—	—	—	0,109 ₀	0,0001	0,0000 ₀
2,3	1,36	0,0403	0,0009	0,0000 ₀	—	—	—
1,1	1,23	—	—	—	0,108 ₀	0,0000	0,0000 ₀
0,5	1,13	0,0388	—	—	—	—	—
—	0,00	(0,0391) ²⁾	—	—	(0,108 ₀)	—	—
R_0 in Ω b. 273,16		1,111 · 10 ⁻³		—	1,241 · 10 ⁻¹		—

1) A. E. van Arkel und J. H. de Boer, Ztschr. f. anorg. u. allg. Chem. 148. S. 345. 1925; P. Clausing u. G. Moubis, Physica 7. S. 245 bis 250. 1927. Nr. 7.

2) Extrapoliert aus dem Verlauf zwischen $4,22^\circ$ und $1,36^\circ$ abs.

von Zr 1 sinkt zwischen $1,36^{\circ}$ und $1,13^{\circ}$ schneller als zwischen $4,22^{\circ}$ und $1,36^{\circ}$ abs., was vielleicht als Anfang der Übergangskurve zur Supraleitfähigkeit aufzufassen ist.

Zirkon ist auch in Leiden von de Haas und Voogd¹⁾ untersucht worden, wobei sich im Temperaturgebiet des flüssigen Heliums bis herunter zu $1,3^{\circ}$ abs. keine Widerstandsabnahme ergab.

Auch bei Zirkon liegen Angaben über die charakteristische Temperatur bisher nicht vor. Aus unseren Beobachtungen ergibt sich im Mittel $\theta = 281$.

Für den spezifischen elektrischen Widerstand ergibt sich unter Berücksichtigung der bei beiden Zirkonsorten vorhandenen Wolframseelen bei Zr 1 der Wert $\rho_0 = 6 \cdot 10^{-5} \Omega \text{ cm}$, bei Zr 2 etwa der Wert $\rho_0 = 4,9 \cdot 10^{-5} \Omega \text{ cm}$ bei 0° C . Aus Messungen von P. W. Bridgman²⁾ folgt der Wert $\rho_0 = 4,4 \cdot 10^{-5} \Omega \text{ cm}$. Clausing u. Moubis (a. a. O.) fanden $\rho_0 = 4,1 \cdot 10^{-5} \Omega \text{ cm}$.

e) Cer (Montierungsart 3 und 6)

Das untersuchte geschmolzene Cer weist nur einen geringen Widerstandsabfall mit sinkender Temperatur auf. Eine Berechnung von θ ist nicht möglich.

Tabelle 25. Cer

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	58 hex. dichtestgepackt	Ce 1
Herkunft, Verunreinigung		de Haas geschmolzen	?
Behandlung		im Glasrohr mit He-Gas eingeschlossen	
Länge	Dicke	—	3 mm
Abstand d. Stromdrähte		6 mm	
Abstand d. Spannungsdrähte		3 mm	
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	
—	273,16	1	
—	86,90	0,842	
—	77,77	0,816	
—	20,41	0,749	
769,6	4,21	0,686	
3,3	1,43	0,697	
R_0 in Ω bei 273,16		$1,878 \cdot 10^{-4}$	

1) W. J. de Haas u. J. Voogd, Comm. Leiden Nr. 194c, S. 27. 1928.

2) P. W. Bridgman, Proc. of the Amer. Acad. 63. S. 347. 1928.

f) Thorium (Montierungsart 3)

Es wurde nur ein aus der Gasphase¹⁾ abgeschiedener Einkristall untersucht, der uns von Hrn. Dr. J. H. de Boer, Eindhoven, zur Verfügung gestellt worden war. Über die Supraleitfähigkeit von Thorium wurde schon früher von dem einen²⁾ von uns berichtet. Der Sprungpunkt des untersuchten Thoriummetalles liegt bei etwa $1,4^\circ$ abs., der Abfall erstreckt sich über das verhältnismäßig breite Temperaturintervall von etwa $0,2^\circ$.

Thorium scheint von anderer Seite noch nicht untersucht zu sein. Aus unseren Messungen ergibt sich als charakteristische Temperatur $\theta = 168$.

Tabelle 26. Thorium

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	90 K. fz.	Th 1	$\theta = 168$, berechnet nach Formel (2a)
Herkunft, Verunreinigung		de Boer Eindhoven	Einkrist. $< 0,1\%$ Fe	
Behandlung		—		
Länge Dicke		12,5 mm 3 mm ϕ auf dünner Wolfram-Seele		
Abstand der Stromdrähte Abstand der Spannungsdrähte		9 mm 3 mm		
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
—	273,16	1	1	1
—	86,15	0,278 ₅	0,266 ₅	0,267 ₈
—	77,93	0,245 ₁	0,232 ₈	0,232 ₈
—	20,44	0,030 ₈	0,014 ₇	0,010 ₀
769,6	4,21	$1,71 \cdot 10^{-2}$	0,0007	0,000 ₀
5,2	1,53	$1,57 \cdot 10^{-2}$	—	—
4,2	1,49	$1,36 \cdot 10^{-2}$	—	—
4,1 ₅	1,48 ₅	$1,21 \cdot 10^{-2}$	—	—
2,4	1,36 ₅	$0,23 \cdot 10^{-2}$	—	—
2,0	1,33 ₅	$0,00 \cdot 10^{-2}$	—	—
1,0	1,22 ₅	$< 7 \cdot 10^{-3}$	—	—
—	0,00	$(1,64 \cdot 10^{-2})^3$	—	—
R_0 in Ω bei 273,16		$5,627 \cdot 10^{-5}$		—

1) A. E. van Arkel u. J. H. de Boer, Ztschr. f. anorg. u. allg. Chem. 148. S. 345. 1925.

2) W. Meissner, Ztschr. f. Phys. 61. S. 191. 1930.

3) Extrapoliert aus dem Verlauf zwischen $4,2^\circ$ und $1,5^\circ$ abs.

Als Wert für den spezifischen elektrischen Widerstand bei 0°C . ergibt sich etwa $\varrho_0 = 13 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}$.

g) Germanium (Montierungsart 1)

Das untersuchte Germanium, das uns Herr Dr. d'Ans zur Verfügung stellte, hat ein Widerstandsmaximum im Temperaturgebiet der flüssigen Luft. Der Widerstand fällt dann wieder ab, um in Heliumtemperaturen einen konstanten, aber größeren Widerstand als bei 0°C anzunehmen.

Tabelle 27. Germanium

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	32 K. Diamantgitter		Ge 1
Herkunft, Verunreinigung		d'Ans Auer	geschmolzen	0,05 % Sn 0,01 % Pb
Behandlung		—		
Länge Dicke		Regulus	etwa 12,0 mm etwa 6 × 11,5 mm	
Abstand der Stromdrähte		10,5 mm		
Abstand der Spannungsdrähte		6,0 mm		
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	
—	273,16	1	—	
—	85,68	1,33 ₂	—	
—	78,00	1,35 ₀	—	
—	20,45	1,30 ₁	—	
763,2	4,20	1,28 ₀	—	
1,6	1,31	1,28 ₀	—	
1,0	1,22	1,28 ₀	—	
R_0 in Ω bei 273,16		$9,59 \cdot 10^{-3}$		

C. C. Bidwell¹⁾ untersuchte an reinem Germanium ebenfalls den Widerstandsverlauf und fand zwischen 273° und 80° abs. bei 157° ein Widerstandsminimum von etwa der Größe $0,8 R_0$. Das Germanium Bidwells scheint etwas reiner als unser Germanium zu sein. Bidwell fand nämlich als spezifischen Widerstand $0,089 \Omega \text{ cm}$, wir für unsere Probe etwa $0,054 \Omega \text{ cm}$. Ganz reines Germanium mit Diamantgitter wird vielleicht ebenso wie Diamant völlig nichtleitend sein.

1) C. C. Bidwell, Phys. Rev. [2] 19. S. 447. 1922.

Es sind Versuche in die Wege geleitet, eine andere Modifikation des Germaniums, die dem Graphit bzw. weißem Zinn entsprechen würde, zu gewinnen, was nach Angaben in der Literatur vielleicht gelingen kann.

h) Zinn (Montierungsart 2)

Tab. 28 gibt die früheren Messungen des einen¹⁾ von uns wieder. Der Sprungpunkt liegt bei etwa 445 mm Hg, d. h. 3,71° abs., während er nach den Leidener²⁾ Messungen bei

Tabelle 28. Zinn

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	50 tetrag.	Sn 1	
Herkunft, Verunreinigung		?	?	$\theta = 210$, berechnet nach Formel (2)
Behandlung		—		
Länge Dicke		57,2 mm 0,7 mm ϕ		
Abstand der Stromdrähte Abstand der Spannungsdrähte		57,2 mm 51,5 mm		
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
..	273,16	1	1	1
..	88,23	0,2457	0,2451	0,2476
..	84,87	0,2321	0,2315	0,2330
..	81,75	0,2191	0,2185	0,2197
..	79,97	0,2126	0,2120	0,2120
..	20,41	0,01196	0,01122	0,00509
..	20,37	0,01139	0,01065	0,00505
762,4	4,20	$7,89 \cdot 10^{-4}$	$0,39 \cdot 10^{-4}$	$0,091 \cdot 10^{-4}$
464,4	3,74	$7,57 \cdot 10^{-4}$	$0,07 \cdot 10^{-4}$	$0,05_s \cdot 10^{-4}$
458,6	3,73	$7,19 \cdot 10^{-4}$	—	—
429,0	3,67	$0,01 \cdot 10^{-4}$	—	—
418,0	3,65	$0,00 \cdot 10^{-4}$	—	—
400	3,61	$< 2 \cdot 10^{-8}$	—	—
7,3	1,61	$< 2 \cdot 10^{-8}$	—	—
—	0,00	$(7,50 \cdot 10^{-4})^3$	—	—
R_0 in Ω bei 273,16		0,97		—

1) W. Meissner, Phys. Ztschr. 26. S. 689. 1925.

2) W. Tuyn, Diss. Leiden, S. 5. 1924; W. Tuyn u. H. Kamerlingh Onnes, Arch. Néerland (III. A) 10. S. 5. 1926; Comm. Leiden, Nr. 181. 1926; W. Tuyn, Comm. Leiden Nr. 196b, 1929.

3) Extrapoliert aus dem Verlauf zwischen 4,2° und 3,7° abs.

etwa 470 mm Hg, d. h. $3,75^\circ$ abs., beobachtet wurde. Die Breite des Temperaturintervalles, in dem der Widerstand plötzlich abfällt, erstreckt sich bei den Leidener Messungen über etwa $0,04^\circ$, bei den hiesigen Messungen über etwa $0,07^\circ$. Beide Unterschiede sind vielleicht auf verschiedene Strombelastung zu schieben.

Aus unseren Messungen folgt als charakteristische Temperatur $\Theta = 210$, während Simon aus der spezifischen Wärme $\Theta = 145$ findet. Nach C. Blom erhält man im Mittel $\Theta = 163$.

i) Blei (Montierungsart 1)

In Tab. 29 sind die früheren Messungen an sehr reinem ¹⁾ Blei des einen ²⁾ von uns, sowie Messungen von Meissner und Franz ³⁾ aufgeführt. Das untersuchte Material zeigt den gleichen

Tabelle 29. Blei

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	82 K. fz.	Pb 1	Pb 2		$\theta = 92, a_1 = +25 \cdot 10^{-5},$ $a_2 = +27 \cdot 10^{-6}$, berechnet nach Formel (5)
Herkunft, Verunreinigung		Kahlb. Mylius	etwa 0,002%	Schuchardt		
Behandlung		—		—		
Länge Dicke		Spule 0,3 mm		50 mm 0,3 mm		
Abstand d. Stromdrähte „ d. Spannungsdr.		—		—		
He-Dampfdruck mg He	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
—	273,16	1	1	1	1	1
—	84,87	0,2756	0,2756	—	—	0,2771
—	20,41	0,02963	0,02963	—	—	0,03011
—	20,32	—	—	0,02917	0,02917	0,02978
—	14,02	—	—	0,0104	0,0104	0,0105
—	7,26	—	—	0,00075	0,00075	0,00094
—	7,20	—	—	—	$< 1 \cdot 10^{-9}$	—
768,2	4,21	$< 1 \cdot 10^{-8}$	—	—	—	—
—	0.00	(0,0000 ₀)	—	(0,0000 ₀)	—	—
R_0 in Ω bei 273,16		2,28		—		—

1) F. Mylius, Ztschr. f. anorg. Chem. 74. S. 407. 1912.

2) W. Meissner, Phys. Ztschr. 26. S. 689. 1925.

3) W. Meissner u. H. Franz, Ztschr. f. Phys. 65. S. 30. 1930.

Widerstandsabfall, wie das in Leiden¹⁾ untersuchte. Der Sprungpunkt von Blei wurde nicht bestimmt. Er liegt nach den Leidener Messungen bei $7,26^\circ$ abs.

Für Blei wurde schon früher von E. Grüneisen²⁾ die charakteristische Temperatur nach Formel (5) berechnet. Er fand unter Benutzung der Konstanten $a_1 = 2,5 \cdot 10^{-4}$ und $a_2 = 2,7 \cdot 10^{-7}$ den Wert $\theta = 92$, der in Tab. 29 übernommen ist. Simon leitet aus der spezifischen Wärme den Wert $\theta = 88$ ab. Nach C. Blom findet man als Mittelwert $\theta = 96$.

5. Gruppe

Von der fünften Gruppe wurden Vanadium, Tantal, Arsen, Antimon und Wismut untersucht.

a) Vanadium (Montierungsart 3 bzw. 4)

Der Widerstand des untersuchten Vanadiums nimmt von 273° bis herunter zu 20° abs. um nur etwa 5% ab, fällt dann aber sehr stark und beträgt bei $1,25^\circ$ abs. nur noch $0,429 R_0$. Dieser starke Widerstandsabfall läßt vermuten, daß Vanadium bei noch weiterer Senkung der Temperatur supraleitend werden wird.

Vanadium scheint von anderer Seite noch nicht untersucht worden zu sein. Ein θ -Wert konnte nicht berechnet werden.

Für den spezifischen elektrischen Widerstand bei 0°C berechnet sich etwa der Wert $\varrho_0 = 17 \cdot 10^{-5} \Omega \text{ cm}$.

b) Tantal (Montierungsart 3 und 4)

Tab. 31 enthält die Meßresultate für vier verschiedene Tantalproben. Über die Supraleitfähigkeit von Tantal wurde bereits früher von dem einen³⁾ von uns ausführlich berichtet.

1) H. Kamerlingh Onnes en W. Tuyn, Comm. Leiden Nr. 160b, 1922; W. Tuyn et H. Kamerlingh Onnes, Comm. Leiden Nr. 181. 1926.

2) E. Grüneisen, Handbuch-Artikel „Metallische Leitfähigkeit“, S. 20.

3) W. Meissner, Phys. Ztschr. 29. S. 897. 1928; Ztschr. f. Phys. 61. S. 191. 1930.

Tabelle 30. Vanadium

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	23 K. rz.	V 1
Herkunft, Verunreinigung		de Haën geschm.	0,01 % Mn < 0,2 % Fe
Behandlung		—	
Länge Dicke		19,5 mm 2 × 2 mm	
Abstand der Stromdrähte Abstand der Spannungsdrähte		16 mm 10 mm	
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	
—	273,16	1	
—	83,57	0,9683	
—	77,59	0,9674	
—	20,45	0,9540	
771	4,21	0,555	
2,4 ₅	1,37	0,511	
1,2 ₅	1,25	0,429	
R_0 in Ω bei 273,16		$4,129 \cdot 10^{-8}$	

Inzwischen ist von Mc. Lennan¹⁾ und seinen Mitarbeitern die Supraleitfähigkeit von Tantal bestätigt worden.

Als charakteristische Temperatur finden wir bei Ta 1 und Ta 2 im Mittel $\theta = 228$. Bei Ta 4 sind die auf ideal reines Material reduzierten r -Werte erheblich größer als bei Ta 1 und Ta 2. Infolgedessen hat die aus den reduzierten Werten berechnete charakteristische Temperatur bei Ta 4 den beträchtlich kleineren Wert $\theta = 143$. Da der Restwiderstand bei Ta 1 und besonders bei Ta 2 kleiner ist als bei Ta 4, wird man den für Ta 1 und Ta 2 berechneten θ -Wert als den richtigen ansehen müssen. Vielleicht ist Ta 4 noch nicht genügend gesintert und hat daher einen anormalen Verlauf der Widerstandskurve.

F. Simon berechnet nach der Lindemannschen Schmelzpunktsformel den Wert $\theta = 260$.

1) J. C. Mc Lennan, L. E. Howlett, J. O. Wilhelm, Transact. of the Roy. Soc. of Canada Serie III. Bd. 23. Sect. III. S. 287, 1929.

Tabelle 31a. Tantal

Atom-Nr. Kristallsyst.	Metall	73 K. rz.	Ta 1		Ta 2		Ta 4		Mittel aus Ta 1 und Ta 2	$\theta = 228$, ber. nach For- mel (2)
Herkunft, Verunreinigung	aus Glühlampe	?	aus Glühlampe	?	aus Glühlampe	?	S. u. H. ev. etwas Fe_2O_3	geglüht bei 2800°C		
Behandlung	längere Zeit als Lampe benutzt		längere Zeit als Lampe benutzt		längere Zeit als Lampe benutzt		58 mm 1,5 mm ϕ	50,7 mm 45,5 mm		
Länge	Dicke	58,5 mm	0,045 mm ϕ		58,5 mm	0,05 mm ϕ				
Abst. d. Stromdrähte " d. Spannungsdr.		58,5 mm 51,4 mm			58,5 mm 53 mm					
He-Dpfr. mm Hg	Grad abs.	r beob.	r red.	r beob.	r red.	r beob.	r red.	r beob.	r red.	r ber.
---	273,16	1	1	1	1	1	1	1	1	1
---	88,30	--	(0,2419)	0,2511	0,2436	--	--	--	0,2428	0,2433
---	85,62	--	(0,2306)	--	(0,2316)	--	--	0,2788	0,2311	0,2315
---	85,19	--	(0,2288)	--	(0,2297)	--	--	--	0,2293	0,2297
---	78,23	0,2278	0,1996	--	(0,1985)	--	--	--	0,1991	0,1991
---	78,00	--	(0,1986)	--	(0,1975)	0,2817	0,2441	--	0,1981	0,1980
---	77,79	--	(0,1978)	--	(0,1965)	--	--	--	0,1972	0,1972
---	77,73	0,2257	0,1975	--	(0,1962)	--	--	--	0,1969	0,1969
---	77,61	--	(0,1970)	0,2037	0,1957	--	--	--	0,1964	0,1964
---	20,45	--	(0,0049)	--	(0,0041)	0,0594	0,0101	--	0,0045	0,0043
---	20,44	0,0399	0,0049	--	0,0041	--	--	--	0,0045	0,0043
---	20,42	0,0399	0,0049	0,0140	(0,0041)	--	--	--	0,0045	0,0043
---	20,41	--	(0,0049)	--	(0,0041)	--	--	--	0,0045	0,0042

Tabelle 31b. Tantal

He-Dpfd. mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$ bei Stromdichte 12 A/mm ² 1,2 A/mm ²	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$ bei Stromdichte 10 A/mm ² 1,2 A/mm ²	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$ bei Strom- dichte 1,4 A/mm ²	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
982,1	4,49	35,3 · 10 ⁻³	0,0001	9,91 · 10 ⁻³	0,00000	—	—	0,0000 ₆	0,0000 ₁
971,5	4,47 ₅	35,2 · 10 ⁻³	0,0000	9,94 · 10 ⁻³	0,00003	—	—	0,0000 ₁₅	0,0000 ₁
966,9	4,47	—	(0,0000)	9,92 · 10 ⁻³	0,00001	—	—	0,0000 ₀₅	0,0000 ₁
951	4,45	—	—	—	—	49,8 · 10 ⁻³	0,0000	—	—
934,7	4,43	—	—	9,39 · 10 ⁻³	—	—	—	—	—
921,6	4,41	—	—	8,95 · 10 ⁻³	—	—	—	—	—
916,2	4,40	34,0 · 10 ⁻³	0,0000	—	—	—	—	(0,0000)	0,0000 ₁
911,6	4,40	—	—	8,51 · 10 ⁻³	—	—	—	—	—
897	4,38	—	—	—	—	49,8 · 10 ⁻³	0,0000	—	—
859,8	4,33	7,38 · 10 ⁻³	—	3,04 · 10 ⁻³	—	—	—	—	—
850,0	4,32	—	—	—	—	—	—	—	—
838	4,30 ₆	—	—	—	—	0,15 · 10 ⁻³	—	—	—
829,9	4,29	< 1 · 10 ⁻⁷	—	0,76 · 10 ⁻³	—	0,00 · 10 ⁻³	—	—	—
761,6	4,20	< 1 · 10 ⁻⁷	—	4 · 10 ⁻⁶	—	< 1 · 10 ⁻⁷	—	—	—
—	0,00	(0,0352)	—	(0,00991)	—	(0,0498)	—	—	—
R_0 in Ω bei 273,16	3,62	—	—	4,11	—	3,59 · 10 ⁻³	—	—	—

c) Arsen
(Montierungsart 1)
(Tab. 32)

Das unter-
suchte Arsen hat
im Temperatur-
gebiet des flüs-
sigen Heliums
nocheinmerk-
lichen Wider-
standsabfall, der
sogar bei den
tiefsten erreich-
ten Temperatu-
ren etwas grö-
ßer zu werden
scheint, so daß
die Untersu-
chung in noch
tieferen Tempe-
raturen inter-
essant wäre.

Als charak-
teristische Tem-
peratur finden
wir $\theta = 291$.
F. Simon be-
rechnet nach der
Lindemann-
schen Schmelz-
punktsformel
den Wert $\theta = 210$.

d) Antimon
(Montierungsart 1)
(Tab. 33)

Unter den
drei untersuchen-
ten Antimon-
proben ist Sb 3
diejenige, die die

Tabelle 32. Arsen

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	33 rhomboedr.	As 1	$\theta = 291$, berechnet nach Formel (2)
Herkunft, Verunreinigung		de Haën dopp. subl.	0,01 % Zn	
Behandlung		—		
Länge Dicke		11 mm 0,5 x 4,5 mm		
Abstand der Stromdrähte Abstand der Spannungsdrähte		10 mm 6,7 mm		
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
—	273,16	1	1	1
—	88,16	0,2184	0,2024	0,2092
—	78,30	0,1825	0,1657	0,1657
—	20,45	0,0321 ₉	0,0123 ₃	0,0021 ₂
760	4,2	0,0228	0,0028	0,0000
2,3	1,36	0,0213	0,0012	0,0000
0,5	1,13	0,0211	0,0010	0,0000
—	0,00	(0,0201)	—	—
R_0 in Ω bei 273,16		$7,734 \cdot 10^{-4}$		—

Fa. Schering-Kahlbaum als besonders reines Material auf Veranlassung der Reichsanstalt für Schmelzpunktsbestimmungen herstellte. Sie ist auch, nach dem Restwiderstande beurteilt, die reinste unter den drei Antimonsorten.

Der Widerstand von Sb 3, der bis zu $1,16^\circ$ abs. herunter untersucht worden ist, fällt im Temperaturgebiet des flüssigen Heliums zwischen $4,20$ und $1,30^\circ$ abs. um $1,4\%$, im Temperaturgebiet zwischen $1,30$ und $1,16^\circ$ abs. aber plötzlich um $6,2\%$, so daß auch hier vielleicht eine Andeutung der Sprungkurve zur Supraleitfähigkeit vorliegt.

Wegen seines größeren Restwiderstandes wurde Sb 2 bei der Bestimmung der charakteristischen Temperatur nicht benutzt. Aus den Messungen von Sb 1 und Sb 3 ergibt sich als charakteristische Temperatur $\theta = 241$. F. Simon fand aus der spezifischen Wärme $\theta = 140$. Nach C. Blom ist im Mittel $\theta = 186$.

TABELLE 55. ANTIMON

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	51 rhomboedr. ¹⁾	Sb 1	Sb 2	Sb 3	$\theta = 241^\circ$, berechnet nach Formel(2)
Herkunft, Verunreinigung		Kahlb.	—	de Haën (99,93% Sb)	Kahlb. <0,05% Fe; <0,03% As; 1929 <0,01% Pb u. Zn	Mittel aus Sb 1 u. Sb 3
Länge	Dicke	23,1 mm	2,3 × 2,7 mm	58 mm	2 × 2 mm	60 mm
Abstand d. Stromdrähte " d. Spannungsdr.		21,7 mm 18,0 mm		56,5 mm 52 mm	57 mm 52 mm	
He-Dampfdruck mg He	Grad. abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
—	273,16	1	1	1	1	1
—	88,37	—	(0,2284 ₉)	—	0,2294	0,2358 ₉
—	86,92	0,2415 ₄	0,2231 ₃	—	(0,2238)	0,2294 ₆
—	84,52	—	(0,2143 ₉)	—	(0,2146)	0,2188 ₇
—	77,78	0,2088 ₄	0,1896 ₆	0,2887 ₉	(0,1887)	0,1891 ₇
—	77,75	—	(0,1895 ₉)	—	0,2041	0,1891 ₇
—	77,66	—	(0,1891 ₉)	—	0,1886	0,1890 ₆
—	20,42	0,0372 ₄	0,0138 ₇	0,2638 ₈	(0,1883)	0,1886 ₆
—	20,38	—	—	—	0,0130	0,0036 ₀
774	4,22	0,0243	0,0006 ₁	0,0796 ₆	(0,0043)	—
760,4	4,20	—	(0,0006 ₁)	—	0,00043	0,0000 ₁
759,5	4,19 ₆	—	(0,0006 ₁)	—	0,01953	0,0000 ₁
213,1	3,16	—	(0,0004 ₉)	0,0640 ₉	(0,00043)	0,0000 ₁
1,8	1,31	0,0239	0,0002 ₆	0,0637 ₈	(0,00033)	0,0000 ₀
1,7	1,30	—	(0,0002 ₆)	—	(0,00013)	0,0000 ₀
1,4	1,27	—	(0,0001 ₉)	—	0,00013	0,0000 ₀
0,65	1,16	—	—	0,0636 ₆	0,01924	0,0001 ₇
				—	(0,00013)	0,0000 ₀
				0,01805	—	—
				(0,01911) ²⁾	—	—
R_0 in Ω bei	273,16	3,417 · 10 ⁻³	—	7,801 · 10 ⁻³	—	—
				5,473 · 10 ⁻³	—	—

1) P. Ewald u. C. Hermann, Ztschr. Krist. 65. 2) Extrapoliert aus dem Verlauf zwischen 4,2° und 1,3° abs.

Tabelle 34. Wismut

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	83 rhomboedr.		Bi 1		Bi 4		Bi 5		Mittel aus Bi 1, Bi 4 und Bi 5	$\theta = 62^\circ$, berechnet nach Formel (2)
Herkunft, Verunreinigung		Hartmann & Braun 1919 (Mylius)		Kahlb. (Mylius)		0,00 %		Hartmann & Braun 1929 0,00 % 6 ^b 200° C im Vak.			
Behandlung		—		—		—		—			
Länge Dicke		53 mm 0,2 mm		59 mm 1,5 × 1,6 mm		52 mm		58 mm 1 mm Φ			
Abst. d. Strom- u. Spannungsdr.		53 mm 44 mm		57 mm		52 mm		58 mm 53 mm			
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
—	273,16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
—	88,90	—	(0,3394 ₄)	0,4323	0,3316	—	(0,3306)	—	0,3339	0,3163	
—	86,92	0,3582 ₃	0,3320 ₆	—	(0,3254)	—	(0,3253)	—	0,3276	0,3088	
—	85,19	—	(0,3256 ₁)	—	(0,3200)	—	0,3206	—	0,3221	0,3024	
—	77,82	—	(0,2981 ₁)	0,4028	0,2968	—	(0,3007)	—	0,2986	0,2748	
—	77,79	—	(0,2980 ₉)	—	(0,2967)	—	0,3006	—	0,2985	0,2747	
—	77,78	0,3255 ₃	0,2980 ₉	—	(0,2967)	—	(0,3006)	—	0,2984	0,2747	
—	20,46	—	(0,04383)	0,1937	0,0506	—	(0,0570)	—	0,0505	0,0488	
—	20,41	—	(0,04361)	—	(0,0504)	—	0,0567	—	0,0502	0,0486	
—	20,40	0,08105	0,04357	—	(0,0503)	—	(0,0367)	—	0,0302	0,0486	
772,6	4,21	0,04024	0,00109	—	(0,0021)	—	(0,0019)	—	0,0017	0,0004	
770	4,21	—	(0,00109)	—	(0,0021)	—	0,0019	—	0,0017	0,0004	
760,4	4,20	—	(0,00109)	—	0,0021	—	(0,0019)	—	0,0017	0,0004	
320,8	3,44	—	(0,00079)	—	(0,0017)	—	0,0015	—	0,0013	0,0002	
2,7	1,39	0,03919	0,00000	—	(0,0007)	—	(0,0007)	—	—	0,0000	
1,3	1,26	—	—	—	(0,0006)	—	0,0006	—	(0,0006)	0,0000	
1,2	1,24	—	—	0,1512	0,0006	—	(0,0006)	—	(0,0006)	0,0000	
0,7	1,17	0,03920	—	—	(0,0006)	—	(0,0006)	—	(0,0006)	0,0000	
—	0,00	(0,03919)	—	(0,1507)	—	(0,1247)	—	—	—	—	
R_0 in Ω bei	273,16	2,041		3,240 · 10 ⁻²		7,490 · 10 ⁻²		—		—	

e) Wismut (Montierungsart 1)

Als reinstes Wismut erwies sich eine Wismutprobe aus einem Materialvorrat von Holborn¹⁾, den er sich von der Fa. Hartmann und Braun im Jahre 1919 beschafft hatte und der von Mylius²⁾ gereinigt wurde.

Für Bi 1 finden wir $\theta = 70,4$, für die weniger reinen Sorten Bi 4 und Bi 5 im Mittel $\theta = 53,9$. Natürlich können diese Unterschiede zum Teil auf Bevorzugung gewisser Kristallrichtungen bei den verschiedenen Proben beruhen.

F. Simon berechnet nach der Lindemannschen Schmelzpunktsformel $\theta = 80$. Nach C. Blom ergibt sich im Mittel der noch größere Wert $\theta = 120$.

6. Gruppe

Von der sechsten Gruppe wurden Chrom, Molybdän, Wolfram, Uran, Selen und Tellur untersucht.

Tabelle 35. Chrom

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	24 K. rz.	Cr 1	Cr nach Messungen von Mc. Lennan, Niven und Wilhelm			$\theta = 495$, berechnet nach Formel (2a)
Herkunft, Verunreinigung		de Haën geschm. 0,5% Fe					
Behandlung		—					
Länge Dicke		21 mm 2,5 × 2,5 mm					
Abstand der Stromdrähte Abstand der Spannungsdrähte		19,5 mm 13,1 mm					
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$		
—	273,16	1	1	1	1		
—	86,14	0,8561	—	—	—		
—	80,00	—	0,134	0,085 ₉	0,085 ₉		
—	78,42	0,8507	—	—	—		
—	20,6	—	0,053 ₃	0,000 ₇	0,000 ₆		
—	20,45	0,832	—	—	—		
760,4	4,20	0,83 ₄	0,052 ₃	0,000 ₀	0,000 ₀		
—	2,25	—	0,052 ₆	0,000 ₀	0,000 ₀		
2,9	1,41	0,83 ₁	—	—	—		
—	0,00	—	(0,052 ₀)	—	—		
R_0 in Ω bei	273,16	$5,490 \cdot 10^{-4}$	$5,15 \cdot 10^{-3}$	—	—		

1) L. Holborn, Ann. d. Phys. 59. S. 145. 1919.

2) F. Mylius u. E. Groschuff, Ztschr. f. anorg. Chem. 96. S. 237. 1916.

a) Chrom (Montierungsart 3)

In Tab. 35 sind die gemessenen r -Werte wiedergegeben. Das untersuchte Metall hat einen so großen Restwiderstand, daß eine Reduktion auf ideal reines Material und die Berechnung der charakteristischen Temperatur unmöglich ist.

In Tab. 35 sind außerdem die Meßresultate von Mc Lennan¹⁾ und seinen Mitarbeitern an reinerem Chrom mit aufgenommen. Es ergibt sich als charakteristische Temperatur der Wert $\theta = 495$. F. Simon berechnet aus der Lindemannschen Schmelzpunktsformel den Wert $\theta = 445$. Nach C. Blom erhält man $\theta = 411$.

Tabelle 36. Molybdän

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	42 K. rz.	Mo 1	Mo 2	Mo 3
Herkunft, Verunreinigung		Mo 1 Holb.		Osram	Osram
Behandlung		2,5 ^b 500° C		—	2,5 ^b 500° C (i. Vakuum)
Länge Dicke		60 mm 0,1 mm ϕ		59 mm 0,5 mm ϕ	60 mm 0,7 mm ϕ
Abstand der Stromdrähte		58,7 mm		57,3 mm	58,0 mm
Abstand der Spannungsdrähte		52,0 mm		51,5 mm	51,5 mm
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{beob.}}$
—	273,16	1	1	1	—
—	86,92	—	0,1701	—	—
—	86,80	—	—	—	0,2030
—	77,83	—	—	—	0,1719
—	77,78	—	0,1370	—	—
—	77,73	0,2245	—	—	—
—	20,42	0,1307	—	—	—
—	20,41	—	0,0448 _i	—	0,0826 _s
774	4,22	0,1318	—	—	—
767,5	4,21	—	—	—	0,0847
765,0	4,20	—	0,0455	—	—
4,6	1,51	—	0,0462	—	—
1,4	1,28	0,1335	—	—	—
1,3	1,26	—	—	—	0,0863
—	0,00	—	—	—	—
R_0 in Ω bei	273,16	0,366	$1,371 \cdot 10^{-2}$	$7,276 \cdot 10^{-3}$	—

1) J. C. Mc Lennan, C. D. Niven u. J. O. Wilhelm, Phil. Mag. VI. S. 672. 1928.

b) Molybdän (Montierungsart 3 bzw. 4)

Alle drei Molybdän-Proben zeigen nach einer Abnahme des Widerstandes zwischen 273° und 20° abs. im Temperaturgebiet des flüssigen Heliums eine Widerstandszunahme. Aus diesem Grunde ist eine Reduktion der Widerstandswerte auf ideal reines Metall und eine Ableitung der charakteristischen Temperatur unmöglich.

F. Simon berechnet nach der Lindemannschen Schmelzpunktsformel den Wert $\theta = 360$ und leitet aus der spezifischen Wärme den Wert¹⁾ $\theta = 379$ ab. Nach C. Blom ergibt sich der Mittelwert $\theta = 363$.

c) Wolfram (Montierungsart 3 bzw. 4)

Von den beiden geprüften Wolframproben ist die eine der von Grüneisen und Goens²⁾ auf elektrisches und ther-

Tabelle 37. Wolfram

Atom-Nr. Kristall- system	Metall	74 K. rz.	W 1	W 2			
Herkunft, Verunreinigung		Osramlampe ?		van Arkel (Philips) Gr. u. Goe., Einkrist. ?		Mittel aus W 1 und W 2	$\theta = 385$, berechnet nach Formel (2)
Behandlung		geglüht		—			
Länge Dicke		60 mm 0,03 mm ϕ		etwa 65 mm etwa 4 x 4 mm			
Abst. d. Stromdr. „ d. Spanngdr.		58,2 mm 51,9 mm		59 mm 52 mm			
He-Dpdr. mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
—	273,16	1	1	1	1	1	1
—	87,40	—	(0,1583)	0,1565	0,1560 ₁	0,1572	0,1574
—	78,23	0,1478	0,1209	—	(0,1177 ₇)	0,1193	0,1192
—	77,60	—	(0,1183)	0,1156	0,1151 ₄	0,1167	0,1167
—	20,44	0,0317	0,0010	0,00108	0,00056 ₈	0,0007 ₈	0,0009 ₈
774	4,22	0,0307	0,0000	—	(0,00002 ₂)	0,0000 ₁	0,0000 ₀
770	4,21	—	(0,0000)	0,00054	0,00002 ₈	0,0000 ₁	0,0000 ₀
1,7	1,31	0,0307	0,0000	0,00053	0,00001 ₄	0,0000 ₀	0,0000 ₀
—	0,00	(0,0307)	—	(5,16 · 10 ⁻⁴)	—	—	—
R_0 in Ω bei 273,16		2,60		2,450 · 10 ⁻⁴		—	—

1) F. Simon, Phys.-chem. Tabellen von Landolt-Börnstein.

2) E. Grüneisen u. E. Goens, Ztschr. f. Physik 44. S. 615. 1927.

misches Leitvermögen hin untersuchte Einkristall von van Arkel, Eindhoven. Der Einkristall zeigt einen Restwiderstand von $0,00052 R_0$. Supraleitfähigkeit wurde nicht beobachtet.

Aus den reduzierten r -Werten finden wir für die charakteristische Temperatur $\theta = 385$, während F. Simon $\theta = 306$ und in den Tabellen von Landolt-Börnstein den Wert $\theta = 310$, beide aus der spezifischen Wärme abgeleitet, angibt.

d) Uran (Montierungsart 3)

Das von uns untersuchte Uranmetall ist noch recht unrein und hat dementsprechend einen hohen Restwiderstand, so daß man aus den beobachteten Werten die charakteristische Temperatur nicht berechnen kann.

Mc Lennan, Howlett und Wilhelm¹⁾ stand eine etwas reinere Uranprobe zur Verfügung, die sie bis $2,3^\circ$ abs. herunter untersuchten. Aber auch der Restwiderstand dieser Probe war noch $0,3 \cdot R_0$, so daß man auch aus den Messungen in Toronto kein θ berechnen kann.

Tabelle 38. Uran

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	92 K. kz. ²⁾	U 1
Herkunft, Verunreinigung		de Haën	1,24% N; 0,2% Si; 0,03% Al; 0,34% Fe; 0,1% Pb
Länge			32 mm
Dicke			$4 \times 3,5$ mm
Abstand der Stromdrähte			28 mm
Abstand der Spannungsdrähte			22 mm
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	
—	273,16	1	
—	86,80	0,7001	
—	77,83	0,6844	
—	20,41	0,5867	
760,4	4,20	0,5445	
2,9	1,41	0,5400	
R_0 in Ω bei	273,16	$6,811 \cdot 10^{-3}$	

1) a. a. O.

2) Mc. Lennan u. Mc. Kay, Trans. Roy. Soc. 24. 1930.

Als Wert für den spezifischen elektrischen Widerstand bei 0° C erhält man etwa $4 \cdot 10^{-4} \Omega \text{ cm}$.

e) Selen (Montierungsart 7)

Das von der Fa. de Haën in Stangenform gelieferte Selen wurde pulverisiert, in ein enges, mit vier eingeschmolzenen Platindrähten versehenes Glasrohr eingefüllt, sodann nach den Angaben von Chr. Ries¹⁾ im Vakuum 12 Stunden auf 210° C erhitzt und langsam abgekühlt, worauf das Glasröhrchen abgeschmolzen wurde.

Tabelle 39. Selen

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	34 graukristall. Modifik. II, hex.	Se 1
Herkunft, Verunreinigung		de Haën	0,2% As
Behandlung		12 ^b	210° C
Länge Dicke		etwa 8 mm 4 mm	
Abstand der Stromdrähte Abstand der Spannungsdrähte		5 mm 2 mm	
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	
—	273,16	1	
—	87,16	~ 1,2	
—	77,61	~ 1,2	
—	20,34	~ 1,2	
657	4,04	~ 36	
1,3	1,26	~ 74	
R_0 in Ω bei	273,16	$\sim 2,85 \cdot 10^7$	

Der Widerstand der so vorbehandelten Selenprobe blieb bis herunter zur Temperatur der flüssigen Luft und des flüssigen Wasserstoffs nahezu konstant, stieg dann aber beträchtlich im Gebiet des flüssigen Heliums.

f) Tellur (Montierungsart 3 bzw. 5)

Die beiden untersuchten Tellurproben zeigen ein Minimum des Widerstandes, das bei Te 2, der reineren der beiden Sorten,

1) Chr. Ries, „Die elektrischen Eigenschaften und die Bedeutung des Selens für die Elektrotechnik“, Berlin-Nikolassee 1908.

ausgeprägter ist als bei Te 1. Auch ist die Widerstandszunahme im Bereich zwischen $4,2^\circ$ und $1,1^\circ$ abs. bei Te 2 wesentlich stärker als bei Te 1. Die Leidener Forscher¹⁾ fanden gleichfalls bei der von ihnen untersuchten Tellurprobe, deren Reinheitsgrad vermutlich zwischen dem von Te 1 und Te 2 liegt, ein Widerstandsminimum, das bei etwa 48° abs. lag.

Tabelle 40. Tellur

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	52 trig.	Te 1	Te 2
Herkunft, Verunreinigung		Kahlb.	?	Marckwaldt 0,3% Ag 0,01% As
Länge Dicke		49,7 mm 3,0 mm ϕ		6 mm 1 \times 2 mm
Abstand der Stromdrähte Abstand der Spannungsdr.		44,5 mm 36,0 mm		3 mm 3 mm
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$		$r_{\text{beob.}}$
—	273,16	1		1
—	88,37	—		0,411,
—	88,30	0,845 ₀		—
—	77,75	—		0,386 ₉
—	77,61	0,829 ₄		—
—	20,46	0,854 ₇		—
—	20,42	—		0,3812
759,5	4,19 ₈	0,914		—
757,7	4,19 ₆	—		0,5299
213,1	3,15	0,922		—
1,4	1,27	0,940		—
0,6	1,15	—		0,5468
0,5	1,13	—		0,5470
R_0 in Ω bei	273,16	5,15		2,94

Wahrscheinlich wird ja genügend reines Tellur (bzw. ein Einkristall) im Gegensatz zu den bisher untersuchten Proben eine normale Temperatur-Widerstandskurve besitzen, ähnlich wie dies bei Titan, Zirkon usw. schon festgestellt ist.

1) H. Kamerlingh Onnes u. Bengt Beckman, Comm. Leiden Nr. 132d. 1912. Bengt Beckman, Comm. Leiden Suppl. Nr. 40. 915.

7. Gruppe

Von der siebenten Gruppe wurden Mangan und Rhenium untersucht.

a) Mangan (Montierungsart 1)

Beide untersuchten Mangansorten sind so unrein, daß eine Bestimmung der charakteristischen Temperatur unmöglich ist.

Tabelle 41. Mangan

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	25 K.	Mn 1	Mn 2
Herkunft, Verunreinigung		Kahlbaum 6% Fe; 0,05% Co; „nach 0,2% Ni; 0,05% Cr; Goldschmidt“ 0,05% V		Simon geschm.
Länge Dicke		11 mm 1,0 × 1,8 mm		20 mm 3 × 3 mm
Abstand der Stromdrähte Abstand d. Spannungsdr.		10 mm 6 mm		17,5 mm 9,5 mm
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$		$r_{\text{beob.}}$
—	273,16	1		1
—	88,90	0,9776		0,9695
—	77,32	0,9807		0,9729
—	20,46	1,0020		1,0082
763,2	4,20	—		0,990
760,4	4,20	0,976 ₅		—
2,9	1,41	0,958 ₁		—
1,0	1,22	—		0,986
R_0 in Ω bei 273,16		5,161 · 10 ⁻³		6,486 · 10 ⁻³

Für Mn 1 beträgt der spezifische elektrische Widerstand bei 0° C etwa $1,5 \cdot 10^{-4} \Omega \text{ cm}$, für Mn 2 etwa $6 \cdot 10^{-4} \Omega \text{ cm}$.

b) Rhenium (Montierungsart 3). (Tab. 42)

Der Widerstand der gesinterten Rheniumprobe fällt bis zur Temperatur des flüssigem Wasserstoffs ab und bleibt von dort an bei weiterer Temperatursenkung nahezu konstant.

Aus den auf ideal reines Metall reduzierten r -Werten findet man als charakteristische Temperatur $\theta = 310$.

Tabelle 42. Rhenium

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	75 hex. Re 1 dichtest gepackt ¹⁾	$\theta = 310$ berechnet nach Formel (2a)	
Herkunft, Verunreinigung		Noddack (gesintert)		
Länge Dicke		11,9 mm $0,95 \times 0,83$ mm		
Abstand der Stromdrähte Abstand der Spannungsdrähte		10,5 mm 4,9 mm		
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
—	273,16	1	1	1
—	88,23	0,2849	0,197 ₉	0,198 ₃
—	78,29	0,2474	0,155 ₈	0,155 ₃
—	20,45	0,110	0,001 ₇	0,001 ₃
776,3	4,22	0,110	0,001 ₇	0,000 ₀
2,3	1,36	0,109	0,000 ₀	0,000 ₀
—	0,00	(0,108 ₀)	—	—
R_0 in Ω bei 273,16		0,1364		—

Der spezifische elektrische Widerstand bei 0°C beträgt $18,9 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}$.

8. Gruppe

Von der achten Gruppe wurden die Metalle Eisen, Ruthenium, Kobalt, Rhodium, Iridium, Nickel, Palladium und Platin untersucht.

a) Eisen (Montierungsart 1). (Tab. 43)

Es wurden 11 Eisenproben geprüft. Fe 1, Fe 2 und Fe 2* sind von dem einen²⁾ von uns bereits früher untersuchte Eisensorten, die auch Holborn³⁾ schon bis zur Temperatur der flüssigen Luft herunter prüfte. Fe 3, das von Grüneisen und Goens⁴⁾ auf elektrische und thermische Leitfähigkeit hin

1) V. W. Goldschmidt, Die Naturwissenschaften 17. S. 134. 1929.

2) W. Meissner, Phys. Ztschr. 27. S. 725. 1926; Phys. Ztschr. 29. S. 897. 1928.

3) L. Holborn, Ann. d. Phys. (4) 49. S. 145. 1919.

4) E. Grüneisen u. E. Goens, Ztschr. f. Phys. 44. S. 615. 1927.

untersuchte Elektrolyteisen, ist, nach dem Restwiderstande von nur $0,006 R_0$ zu urteilen, die reinste Eisenprobe.

Durch Reduktion der beobachteten Widerstandswerte auf ideal reines Metall erhält man bei den 11 Proben keine befriedigende Übereinstimmung. Sie ist sogar nicht einmal bei sonst gleichem, jedoch verschieden vorbehandelten Material vorhanden.

Aus den reduzierten r -Werten berechnet sich im Mittel als charakteristische Temperatur der Wert $\theta = 519$.

E. Grüneisen¹⁾ findet nach Formel (5) unter Berücksichtigung des ganzen Temperaturintervalles zwischen 20° und 873° abs. mit den Konstanten $\alpha_1 = +0,0008$ und $\alpha_2 = +0,0000015$ den Wert $\theta = 470$. F. Simon ermittelt aus den spezifischen Wärmen den Wert $\theta = 390-395$. Nach C. Blom findet man als Mittelwert $\theta = 416$.

b) *Ruthenium* (Montierungsart 1). (Tab. 44)

Der Widerstand des untersuchten Rutheniums, eines von der Fa. W. C. Heraeus durch Sinterung des gepreßten Metallpulvers hergestellten Stabes, hat zwischen $4,21^\circ$ und $1,11^\circ$ abs. einen konstanten Wert. Das steht im Gegensatz zu den Angaben von Mc Lennan, Allen und Wilhelm²⁾, nach denen Ruthenium bei $2,04^\circ$ abs. supraleitend wird. Der Restwiderstand unseres Rutheniums ist aber nur $0,08 R_0$, der des in Toronto geprüften Materials vor dem Sprungpunkt $0,75 R_0$, so daß vielleicht die Supraleitfähigkeit der letzteren auf Beimengungen zu schieben ist. Andernfalls wäre daran zu denken, daß ungenügende Sinterung bei unserem reineren Ruthenium die Supraleitfähigkeit verhindert.

Als charakteristische Temperatur finden wir aus unseren Messungen den Wert $\theta = 426$.

F. Simon berechnet nach der Lindemannschen Schmelzpunktsformel $\theta = 350$.

1) E. Grüneisen, Handbuch, Artikel „Metallische Leitfähigkeit“.

2) J. C. Mc Lennan, Nature February 1, 1930; J. Mc Lennan, J. F. Allen u. J. O. Wilhelm, Trans. Roy. Soc. Canada, Serie III. Bd. 23. Sect. III. S. 283. 1929.

Tabelle 43a. Eisen

Atom-Nr. Kristallsystem	26 K. 12.	Fe 1	Fe 2	Fe 2*	Fe 3	Fe 4	
Herkunft, Verunreinigung	(Holborn) Heraeus	= Fe 2 0,001% Mn; Holb. 0,004% Cu; Kahlb. 0,0049 Ni u. Nitrat E. C, Si, O ₂	Fe 2 Halb. (wie Fe 2) Kahlb.	Fe I Gr. u. Goe. Griesheim	Heraeus Elektrol.		
Behandlung	getempert	getempert	getempert	getempert	getempert	gereckt gr. Krist.	
Länge Dicke	etwa 55 mm 0,2 mm Φ	59,7 mm 0,2 mm Φ	60,0 mm 0,2 mm Φ	33,0 mm 1,0 mm Φ	58,2 mm 1,0 mm Φ	58,2 mm 1,0 mm Φ	
Abst. d. Stromdrähte " d. Spannungsdrr.	etwa 55 mm 50 mm	59,7 mm 56,6 mm	60,0 mm 56,3 mm	33,0 mm 30,0 mm	58,2 mm 53,4 mm	58,2 mm 53,4 mm	
He-Dampf- druck mm Hg	Grad abs.	$r_{beob.}$	$r_{red.}$	$r_{beob.}$	$r_{red.}$	$r_{beob.}$	$r_{red.}$
—	273,16	1	1	1	1	1	1
—	90,46	(0,1055)	(0,1022)	(0,1007)	(0,0889)	(0,0500)	(0,0500)
—	87,42	0,1169	(0,0974)	(0,0938)	(0,0884)	(0,0845)	(0,0845)
—	85,19	—	(0,0908)	(0,0887)	(0,0801)	(0,0805)	(0,0805)
—	83,90	—	(0,0864)	0,0952	(0,0779)	(0,0782)	(0,0782)
—	81,73	—	(0,0805)	—	(0,0742)	(0,0745)	(0,0745)
—	78,85	0,0919	(0,0719)	—	(0,0694)	(0,0694)	(0,0694)
—	78,24	—	(0,0701)	(0,0745)	(0,0683)	(0,0676)	(0,0676)
—	78,20	—	(0,0700)	(0,0729)	(0,0683)	(0,0676)	(0,0676)
—	77,79	—	(0,0687)	(0,0719)	(0,0676)	(0,0676)	(0,0676)
—	77,74	—	(0,0686)	(0,0718)	(0,0676)	(0,0676)	(0,0676)
—	20,40	0,02282	0,00150	(0,0715)	0,0014	0,0089	0,0007
753	4,21	0,02160	0,00005	0,0010	0,0002	0,0084	0,0000
443	3,71	—	0,0141	0,0102	0,0000	0,0000	0,0000
17,4	1,98	—	0,0141	—	(0,0000)	0,0000	0,0000
2,6	1,38	0,02156	0,00001	(0,0001)	0,0004	0,0081	0,0000
1,6	1,20	(0,00001)	(0,0000)	0,0103	(0,0000)	—	(0,0000)
—	0,00	(0,02155)	—	(0,0102)	(0,0061)	(0,0081)	—
R_s in Ω bei 273,16	0,149	0,169	0,156	3,48·10 ⁻³	6,07·10 ⁻³	—	—

c) Kobalt (Montierungsart 1). (Tab. 45)

Die beiden Kobaltsorten Co 2 und Co 3 sind nicht so rein, wie das früher von Holborn¹⁾ untersuchte Material (Co II

1) L. Holborn, Ztsch. f. Phys. 8. S. 58. 1922.

Tabelle 43b. Eisen

Vgl. Tabelle 43a	Fe 5		Fe 6		Fe 7		Fe 8		Fe 9		Fe 10		$\theta = 519$ be- rechnet nach Formel (2)
	Kreussler		Kreussler		S. u. H. 5 × elektr.	S. u. H. 5 × elektr.	S. u. H. 5 × elektr.	S. u. H. 5 × elektr.	S. u. H. 5 × elektr.	S. u. H. 5 × elektr.	S. u. H. 5 × elektr.	Mittel aus Fe 1 bis Fe 10	
	—	—	—	—	—	—	3 × 300°	3 × 300°	3 × 300°	3 × 300°	3 × 300°	15 × Rotg. geklitz	
	58,5 mm 0,1 mm Φ	58,4 mm 0,1 mm Φ	58,7 mm 0,3 mm Φ	58,7 mm 0,3 mm Φ	58,7 mm 0,3 mm Φ	58,7 mm 0,3 mm Φ	58,7 mm 0,3 mm Φ	58,7 mm 0,3 mm Φ	57,8 mm 0,3 mm Φ	57,8 mm 0,3 mm Φ	57,5 mm 0,3 mm Φ	57,5 mm 0,3 mm Φ	
	53,6 mm 54,2 mm	58,4 mm 54,4 mm	58,7 mm 54,0 mm	58,7 mm 54,0 mm	58,7 mm 54,4 mm	58,7 mm 54,4 mm	58,7 mm 54,4 mm	58,7 mm 54,4 mm	57,8 mm 56,1 mm	57,8 mm 56,1 mm	57,5 mm 51,7 mm	57,5 mm 51,7 mm	
Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
273,16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
90,46	(0,0941 ₄)	(0,0896 ₆)	(0,0844 ₄)	(0,0800 ₆)	0,1734	0,1166	0,1124	0,1031	(0,1131)	(0,1115)	(0,1115)	0,1023 ₆	0,1138
87,42	(0,0883 ₄)	(0,0845 ₆)	—	(0,0808 ₆)	—	(0,1072)	(0,1031)	(0,1031)	(0,1038)	(0,1025 ₆)	0,0943 ₆	0,0949 ₆	0,1024
84,19	(0,0841 ₄)	(0,0808 ₆)	—	(0,0768 ₆)	—	(0,1008)	(0,0968)	(0,0968)	(0,0970)	0,0950 ₆	0,0895 ₆	0,0895 ₆	0,0946
81,90	(0,0816 ₄)	(0,0786 ₆)	—	(0,0744 ₆)	—	(0,0964)	(0,0928)	(0,0928)	(0,0930)	(0,0921 ₆)	0,0863 ₆	0,0863 ₆	0,0903
80,73	(0,0776 ₄)	(0,0749 ₆)	—	(0,0701 ₆)	0,1482	0,0897	0,1240	0,0857	0,1220	—	0,0856 ₆	0,0811 ₆	0,0832
78,85	(0,0720 ₄)	(0,0691 ₆)	—	(0,0651 ₆)	—	(0,0808)	(0,0768)	(0,0768)	(0,0775)	—	0,0771 ₆	0,0740 ₆	0,0746
78,24	(0,0708 ₄)	(0,0681 ₆)	—	(0,0641 ₆)	—	(0,0788)	(0,0749)	(0,0749)	(0,0757)	—	0,0753 ₆	0,0726 ₆	0,0729
78,20	(0,0707 ₄)	(0,0680 ₆)	—	(0,0640 ₆)	—	(0,0786)	(0,0748)	(0,0748)	(0,0755)	—	0,0751 ₆	0,0725 ₆	0,0727
77,79	(0,0699 ₄)	(0,0672 ₆)	—	(0,0632 ₆)	—	(0,0775)	(0,0736)	(0,0736)	(0,0743)	0,1167 ₆	0,0739 ₆	0,0715	0,0715
77,74	(0,0698 ₄)	(0,0671 ₆)	—	(0,0631 ₆)	—	(0,0774)	(0,0735)	(0,0735)	(0,0742)	—	0,0738 ₆	0,0714	0,0714
20,40	0,0875	0,0698	0,0822	0,0653	0,0670	0,0029	0,0436	0,0018	0,0414	0,0472	0,0015	0,0015	0,0004
4,21	0,0181	0,0018	0,0163	0,0015	0,0644	0,0001	0,0420	0,0001	0,0390	0,0000	0,0005	0,0004	0,0006
9,71	0,0164	0,0015	0,0154	0,0014	0,0643	0,0000	0,0419	0,0000	0,0390	0,0000	0,0005	0,0004	0,0006
1,98	—	—	—	—	0,0643	0,0000	0,0419	0,0000	—	—	—	0,0005	0,0006
1,98	0,0163	0,0015	0,0150	0,0014	0,0643	0,0000	0,0419	0,0000	0,0390	0,0000	0,0005	0,0004	0,0006
1,29	—	—	—	—	—	0,0000	—	0,0000	—	—	—	0,0005	0,0006
0,00	(0,0162 ₄)	—	(0,0149 ₄)	—	(0,0643)	—	(0,0419)	—	(0,0390)	—	(0,0462)	—	—
R ₀	0,679	—	0,763	—	0,0733	—	0,123	—	0,176	—	8,077·10 ⁻²	—	—

Vgl. Tabelle 43a

von Holborn). Bei Co 2 und Co 3 steigt der Widerstand in den tiefsten Temperaturen wieder an. Das erschwert, ähnlich wie es bei anderen nicht genügend reinen Metallen schon weiter oben angegeben ist, die Reduktion der beobachteten Werte auf ideal reines Material und die Berechnung der

Tabelle 44. Ruthenium

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	44 hex.	Ru 1	$\theta = 426$ berechnet nach Formel (2a)
Herkunft, Verunreinigung	Heraeus 3% Os; 1% Pb; 0,2% Rh; 0,03% Pt; 0,01% Ir gesintert auf Fe nicht untersucht			
Behandlung	—			
Länge Dicke	51,5 mm 2,6 × 2,8 mm			
Abstand der Stromdrähte Abstand d. Spannungsdrähte	52,5 mm 37 mm			
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
—	273,16	1	1	1
—	87,16	0,2106 ₀	0,1394 ₉	0,1373 ₀
—	77,60	0,1754 ₉	0,1011 ₅	0,1011 ₅
—	20,36	0,0829 ₇	0,0002 ₀	0,0007 ₁
772,6	4,21	0,0827	0,0000	0,0000
3,5	1,45	0,0827	0,0000	0,0000
0,7	1,17	0,0827	0,0000	0,0000
—	0,00	(0,0827)	—	—
R_0 in Ω bei 273,16		$4,199_6 \cdot 10^{-4}$		—

charakteristischen Temperatur. Aus den Messungen an Co 2 und Co 3 ergibt sich $\theta = 401$. F. Simon berechnet nach der Lindemannschen Schmelzpunktsformel $\theta = 375$. Nach C. Blom findet man im Mittel den Wert $\theta = 402$.

d) *Rhodium* (Montierungsart 1). (Tab. 46)

Rh 2 ist ein schon früher von Grüneisen und Goens¹⁾ auf elektrische und thermische Leitfähigkeit hin bis zur Temperatur des flüssigen Wasserstoffs herunter untersuchter, ziemlich reiner Draht. Hier sind die Messungen über den elektrischen Widerstand in das Temperaturgebiet des flüssigen Heliums ausgedehnt worden.

Für die charakteristische Temperatur folgt aus unseren r -Werten $\theta = 419$. F. Simon berechnet nach der Lindemannschen Schmelzpunktsformel $\theta = 315$.

1) E. Grüneisen u. E. Goens, *Ztschr. f. Phys.* 44. S. 615. 1927.

Tabelle 45. Kobalt

Atom-Nr. Kristall- system	Metall	27	dichtest Co 2 hex. gepackt	Co 3	Mittel		$\theta = 401$, berechnet nach Formel (2)
Herkunft, Verunreinigung		Heraeus, von A. E. G. ? gesintert (Holborn 1920)	Kahlb. 0,05 % Cr 0,01 % Mn pulv. < 0,05 % Fe				
Behandlung		geglüht b. 500 °C, 2½ ^h im Vakuum	geschmolzen im Vakuum				
Länge Dicke		0,5 mm ϕ 57,6 mm	12,5 mm 2,5 mm				
Abst. d. Stromdr. „ d. Spanngsdr.		57,6 mm 53,0 mm	12,5 mm 8,5 mm				
He Dpfd. mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
—	273,16	1	1	1	1	1	7
—	88,16	—	(0,1509)	0,1901	0,1397	0,1453	0,1512
—	86,92	0,1829	0,1465	—	(0,1355)	0,1410	0,1460
—	78,30	—	(0,1158)	0,1588	0,1065	0,1112	0,1112
—	77,78	0,1516	0,1139	—	(0,1047)	0,1093	0,1093
—	20,45	—	(0,0038 _s)	0,0586 ₇	0,0001 ₁	0,0019 ₃	0,0008 ₄
—	20,42	0,04628	0,0038 ₁	—	(0,0000 ₃)	0,0019 ₄	0,0008 ₄
—	20,41	—	(0,0038 ₄)	0,0585 ₇	0,0000	0,0019 ₄	0,0008 ₄
776	4,22	—	(0,0000)	0,0608	—	0,0000	0,0000
765,0	4,20	0,0426	0,0000	—	—	0,0000	0,0000
4,6	1,51	0,0431	—	—	—	—	—
2,3	1,36	—	—	0,0624	—	—	—
—	0,00	(0,0426)	—	(0,0585 ₇)	—	—	—
R_0 in Ω bei 273,16		$1,604 \cdot 10^{-2}$		$1,324 \cdot 10^{-4}$		—	—

e) Iridium (Montierungsart 1). (Tab. 47)

Das untersuchte Iridium stammt aus einem alten, von Heraeus bezogenen Vorrat Holborns¹⁾ und ist etwas reiner als das von Holborn untersuchte Ir 1.

Aus den auf ideal reines Material reduzierten r -Werten finden wir als charakteristische Temperatur $\theta = 316$. E. Grüneisen²⁾ berechnet aus der Temperaturabhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten $\theta = 283$ und aus dem Verhältnis des

1) L. Holborn, Ann. d. Phys. (4) 59. S. 145. 1919.

2) E. Grüneisen, Handbuch, Artikel „Zustand des festen Körpers“, S. 44.

Tabelle 46. Rhodium

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	45 K. fz.	Rh 2	$\theta = 419$, berechnet nach Formel (2a)
Herkunft, Verunreinigung		Heraeus Gr. u. Goe.	?	
Behandlung		10min (im Vakuum)	1030° C	
Länge Dicke		etwa 35 mm 1,3 × 1,3 mm		
Abstand der Stromdrähte Abstand d. Spannungsdr.		etwa 35 mm 27 mm		
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
—	273,16	1	1	1
—	87,40	0,1466	0,1440 ₆	0,1420 ₉
—	77,60	0,1066	0,1039 ₄	0,1039 ₁
—	20,44	3,53 · 10 ⁻³	0,57 · 10 ⁻³	0,77 · 10 ⁻³
774	4,22	3,09 · 10 ⁻³	0,13 · 10 ⁻³	0,00 · 10 ⁻³
1,8	1,31 ₅	3,00 · 10 ⁻³	0,04 · 10 ⁻³	0,00 · 10 ⁻³
	0,00	(2,96 · 10 ⁻³)	—	—
R_0 in Ω bei 273,16		7,443 · 10 ⁻⁴		—

Tabelle 47. Iridium

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	77 K. fz.	Ir 1	$\theta = 316$ berechnet nach Formel (2a)
Herkunft, Verunreinigung		Holborn Heraeus	?	
Behandlung		2,5 ^h 500° C		
Länge Dicke		35,1 mm 0,5 × 0,8 mm		
Abstand der Stromdrähte Abstand der Spannungsdrähte		35,1 mm 28,8 mm		
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
—	273,16	1	1	1
—	77,73	0,1905	0,1500	0,1500
—	20,42	0,0536	0,00621 ₇	0,00165 ₃
774	4,22	0,0480	0,0003 ₄	0,0000 ₁
1,6	1,29	0,0478	0,0001 ₉	0,0000 ₀
—	0,00	(0,0476 ₈)	—	—
R_0 in Ω bei 273,16		$6,37 \cdot 10^{-3}$		—

Ausdehnungskoeffizienten zur Atomwärme $\theta = 280$, während F. Simon nach der Lindemannschen Schmelzpunktsformel $\theta = 260$ findet. Nach C. Blom erhält man im Mittel $\theta = 268$.

f) Nickel (Montierungsart 1)

Tabelle 48 enthält die Messungen des einen¹⁾ von uns an einem Nickeldraht, der, wie der geringe Restwiderstand zeigt, sehr rein ist. Als charakteristische Temperatur erhält man $\theta = 274$. F. Simon berechnet nach der Lindemannschen Schmelzungsformel $\theta = 375$ und aus den spezifischen Wärmen den Wert $\theta = 370$. Nach C. Blom findet man im Mittel $\theta = 402$.

Tabelle 48. Nickel

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	28 K. fz.	Ni 3	
Herkunft, Verunreinigung		Holborn		$\theta = 472$
Behandlung		in Wasserstoff geglüht		berechnet nach Formel (2)
Länge Dicke		etwa 55 mm 0,5 mm ϕ		
Abstand der Stromdrähte Abstand der Spannungsdrähte		etwa 55 mm 50 mm		
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
—	273,16	1	1	1
—	87,42	0,1179	0,1135	0,1184
—	78,85	0,0919 ₉	0,0873 ₅	0,0873 ₅
—	20,40	6,62 ₃ · 10 ⁻³	1,61 ₀ · 10 ⁻³	0,53 ₁ · 10 ⁻³
769	4,21	5,07 ₉ · 10 ⁻³	0,05 ₈ · 10 ⁻³	0,00 ₀ · 10 ⁻³
2,0	1,34	5,02 ₇ · 10 ⁻³	0,00 ₇ · 10 ⁻³	0,00 ₀ · 10 ⁻³
—	0,00	(5,02 · 10 ⁻³)	—	—
R_0 in Ω bei 273,16		1,80 · 10 ⁻²		—

g) Palladium (Montierungsart 1)

Von den drei untersuchten Palladiumsorten zeigt Pd 3 im Temperaturgebiet des flüssigen Heliums eine geringe Widerstandszunahme, während Pd 1 eine kleine Widerstands-

1) W. Meissner, Ztschr. f. Phys. 38. S. 647. 1926.

Tabelle 49. Palladium

Atom-Nr. Krist.-Syst. Metall	46 K. fz. Pd 1		Pd 2		Pd 3		Mittel aus Pd 1, Pd 2 und Pd 3	$\theta = 270$, berechnet nach Formel (2)
	Heraeus 1921		Heraeus 1924		Heraeus 1927 keine ¹⁾			
	2,5 ^a 500° C		2,5 ^b 500° C		—			
Herkunft, Verunreinigung	27,0 mm 0,6 mm ϕ		60,0 mm 0,5 mm ϕ		34 mm 1,8 mm ϕ			
Behandlung	27,0 mm 22,4 mm		58,7 mm 50,4 mm		34 mm 29,5 mm			
Abst. d. Strom- u. Spanngsdr.								
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
—	273,16	1	1	1	1	1	1	1
—	88,90	—	(0,2197)	0,2220	0,2176 ₂	—	0,2204	0,2203
—	88,16	—	(0,2165)	—	(0,2143 ₃)	0,2798	0,2171	0,2170
—	78,30	—	(0,1739)	—	(0,1704 ₃)	0,2398	0,1739	0,1739
—	77,82	—	(0,1718)	0,1730	0,1683 ₄	—	0,1718	0,1718
—	77,73	0,1916	(0,1714)	—	(0,1679 ₄)	—	0,1714	0,1714
—	20,46	—	(0,0060)	0,00958 ₆	0,00401 ₆	—	0,0049	0,0026
—	20,45	—	(0,0060)	—	(0,00401 ₁)	0,0804	0,0049	0,0026
—	20,42	0,0303	(0,0060)	—	(0,00399 ₃)	—	0,0049	0,0026
776,3	4,22	—	(0,0002 ₀)	—	(0,00006 ₂)	0,0760	0,0001	0,0000
774	4,22	0,0247	(0,0002 ₀)	—	(0,00006 ₂)	—	0,0001	0,0000
765,0	4,20	—	(0,0002 ₀)	0,00565 ₈	0,00006 ₁	—	0,0001	0,0000
213,1	3,16	—	(0,0001 ₁)	0,00562 ₅	0,00003 ₃	—	0,0001 ₆	0,0000 ₆
3,5	1,45	—	(0,0001 ₁)	0,00559 ₅	0,00000 ₆	—	0,0000 ₅	0,0000 ₅
2,3	1,36	—	(0,0001 ₀)	—	(0,00000 ₆)	0,0764	0,0000 ₅	0,0000 ₅
1,4	1,27	0,0245	(0,0001 ₀)	0,00559 ₅	0,00000 ₆	—	0,0000 ₅	0,0000 ₅
0,7	1,17	—	(0,0001 ₀)	0,00559 ₅	0,00000 ₆	—	0,0000 ₆	0,0000 ₆
—	0,00	(0,0244)	—	(0,00559 ₅)	—	(0,0760)	—	—
R_0 in Ω bei 273,16	7,80 · 10 ⁻³	—	2,624 · 10 ⁻²	—	—	1,274 · 10 ⁻³	—	—

1) mit Elementen der Ordnungszahlen 22 bis 92; event. Verunreinigungen mit Karbiden und Oxiden.

abnahme aufweist und Pd 2 zwischen $4,2^\circ$ und $1,17^\circ$ abs. einen konstanten Widerstandswert hat. Pd 2 ist mit seinem niedrigen Restwiderstand von $0,0056 R_0$ die reinste unter den drei Palladiumproben.

Bei Reduktion nach der Matthiessen-Nernstschen Regel erhält man bei den drei Palladiumsorten nicht genau die gleichen r -Werte. Mittelt man die $r_{\text{red.}}$ -Werte trotzdem, so ergibt sich als charakteristische Temperatur $\theta = 270$. F. Simon berechnet nach der Lindemannschen Schmelzpunktsformel $\theta = 260$. Nach C. Blom findet man als Mittelwert $\theta = 268$.

h) Platin (Montierungsart 1)

Es wurde dasselbe Platinstäbchen benutzt, das der eine¹⁾ von uns früher bis herunter zu 20° abs. untersucht hatte. Die früheren und die jetzigen Resultate sind in Tabelle 50 zusammengestellt.

Tabelle 50. Platin

Atom-Nr. Kristallsystem	Metall	78 K. fz.	Pt 1	$\theta = 240$, berechnet nach Formel (2)
Herkunft, Verunreinigung		Heraeus		
Behandlung		einige Zeit auf schwacher Weißglut		
Länge Dicke		etwa 70 mm 2,0 mm ϕ		
Abstand der Stromdrähte Abstand d. Spannungsdr.		etwa 70 mm 63 mm		
He-Dampfdruck mm Hg	Grad abs.	$r_{\text{beob.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$
—	273,16	1	1	1
—	91,4	0,250	0,248	0,248 ₀
—	20,40	$6,07 \cdot 10^{-3}$	$4,44 \cdot 10^{-3}$	$3,61 \cdot 10^{-3}$
767	4,21	$1,68 \cdot 10^{-3}$	$0,04 \cdot 10^{-3}$	$0,01 \cdot 10^{-3}$
2,2	1,35	$1,65 \cdot 10^{-3}$	$0,01 \cdot 10^{-3}$	$0,00 \cdot 10^{-3}$
	0,00	$(1,64 \cdot 10^{-3})$	—	—
R_0 in Ω bei 273,16		$1,911 \cdot 10^{-3} \Omega$		—

Für die charakteristische Temperatur ergibt sich aus den Werten für tiefe Temperaturen $\theta = 240$. E. Grüneisen be-

1) W. Meissner, Ztschr. f. Phys. 38. S. 647. 1926.

rechnet unter Berücksichtigung des ganzen Temperaturbereiches von 4,2 bis 773° abs. nach Formel (5) bei Benutzung der konstanten $a_1 = +0,0003$ und $a_2 = -0,0000004$ den Wert¹⁾ $\theta = 230$, der mit den von ihm aus dem Verlauf der Atomwärme¹⁾ bzw. des thermischen Ausdehnungskoeffizienten²⁾ abgeleiteten Werten genau übereinstimmt, während der von ihm aus dem Verhältnis des Ausdehnungskoeffizienten zur Atomwärme berechnete Wert²⁾ $\theta = 236$ ergibt. F. Simon leitet aus der spezifischen Wärme den Wert $\theta = 220$ bzw. $\theta = 225$ ab. C. Blom findet als mittleren Wert $\theta = 239$.

V. Schlußfolgerungen

Faßt man das Vorhergehende zusammen, so ergibt sich folgendes Bild:

Supraleitend werden die Metalle Quecksilber, Indium, Thallium, Thorium, Zinn, Blei, Tantal und Titan sowie eventuell Ruthenium, ferner nach neuesten Messungen Niobium.³⁾

Andeutungen zur Supraleitfähigkeit finden sich bei Rubidium, Zirkon, Vanadium, Arsen und Antimon. Es ist daher notwendig, die reinen Metalle noch unterhalb 1,2° abs. zu untersuchen. Messungen bis herunter zu 0,9° abs. sind in Leiden teilweise schon durchgeführt.

Die aus dem Widerstandsverlauf berechneten charakteristischen Temperaturen sind in Tabelle 51 in das periodische System der Elemente der durch die Quantentheorie begründeten Form eingetragen. Man sieht, daß danach die Werte in jeder Gruppe mit steigender Ordnungszahl sinken, dagegen in jeder Periode, soweit es sich um die *a*-Gruppen handelt, mit steigender Gruppenzahl steigen, bei den *b*-Gruppen dagegen im allgemeinen sinken.

Zu betonen ist dabei, daß diese Einordnung eigentlich nur für die regulären Metalle Sinn hat. Bei den nichtregulären läßt sich der Widerstand nach Grüneisen und Goens, sofern man Einkristalle hat, nur durch eine Summe von drei

1) E. Grüneisen, Handbuch, Artikel „Metallische Leitfähigkeit“, S. 21.

2) E. Grüneisen, Handbuch, Artikel „Zustand des festen Körpers“, S. 44.

3) W. Meissner u. H. Franz, Ztschr. f. Phys. 63. S. 558. 1930.

Tabelle 51

Periode	Gruppe Ia	Gruppe IIa	Gruppe IIIa	Gruppe IVa	Gruppe Va	Gruppe VIa	Gruppe VIIa	Gruppe VIIIa	Gruppe Ib	Gruppe IIb	Gruppe IIIb	Gruppe IVb	Gruppe Vb	Gruppe VIb	Gruppe VIIb	Gruppe VIIIb		
1	1 H	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2 He		
2	3 Li $\theta=376$	4 Be	5 B	6 C	—	—	—	—	—	—	—	—	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
3	11 Na $\theta=233$	12 Mg $\theta=357$	13 Al $\theta=438$	14 Si	—	—	—	—	—	—	—	—	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
4	19 K $\theta=181$	20 Ca	21 Sc	22 Ti $\theta=342$	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe $\theta=519$	27 Co $\theta=401$	28 Ni $\theta=472$	29 Cu $\theta=355$	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As $\theta=291$	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb $\theta=85$	38 Sr $\theta=171$	39 Y	40 Zr $\theta=288$	41 Nb	42 Mo	43 Ma	44 Ru $\theta=426$	45 Rh $\theta=419$	46 Pd $\theta=270$	47 Ag $\theta=239$	48 Cd	49 In $\theta=198$	50 Sn $\theta=210$	51 Sb $\theta=241$	52 Te	53 J	54 X
6	55 Cs	56 Ba $\theta=133$	57-71 Seltene Erden	72 Hf	73 Ta $\theta=228$	74 W $\theta=385$	75 Re $\theta=310$	76 Os $\theta=316$	77 Ir $\theta=240$	78 Pt $\theta=192$	79 Au $\theta=37$	80 Hg $\theta=140$	81 Tl $\theta=92$	82 Pb $\theta=62$	83 Bi $\theta=62$	84 Po	85	86 Em
7	87	88 Ra	89 Ac	90 Th $\theta=168$	91 Pa	92 U	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Die charakteristischen Temperaturen im Zusammenhang mit dem periodischen System der Elemente.

Debye-Funktionen mit verschiedenen θ -Werten darstellen, und man kann von einem mittleren, temperaturunabhängigen θ -Wert bei nichtregulären Einkristallen nicht sprechen. Vielleicht ist aber trotzdem in einiger Annäherung die Darstellung des Widerstandes durch einen einzigen θ -Wert bei den nichtregulären Metallen möglich, sofern man polykristallines Material hat, bei dem keine Achsenrichtung des Kristallsystems irgendwie bevorzugt ist. Dafür scheint etwas die Einordnung, auch der nichtregulären, als polykristallines Material untersuchten Metalle in Tabelle 51 zu sprechen.

Will man einen Überblick über die Temperatur-Widerstandskurve der Metalle im Zusammenhang mit ihren θ -Werten erhalten, so muß man noch folgendes beachten:

In den Formeln (2), (2a) und (5) zur Berechnung der r -Werte steht im Nenner immer der auf 0°C bezogene Widerstandswert. Hierin steckt aber eine Willkür, die sich darin äußert, daß die berechneten r - T -Kurven sich unter Umständen schneiden können, so daß die Reihenfolge der für verschiedene θ -Werte berechneten Kurven bei verschiedenen Temperaturen verschieden ausfallen kann. Dies erkennt man folgendermaßen: Nach der einfachsten Formel (2a) ist bei einer bestimmten Temperatur T für zwei Metalle 1 und 2 das Verhältnis ihrer r -Werte

$$(7) \quad \frac{r_1}{r_2} = \frac{F\left(\frac{T}{\theta_1}\right)}{F\left(\frac{T}{\theta_2}\right)} : \frac{F\left(\frac{T_0}{\theta_1}\right)}{F\left(\frac{T_0}{\theta_2}\right)} = \frac{1-\psi}{1-\chi}.$$

Ist nun θ_1 nur wenig größer als θ_2 , so kann wegen der mehrfachen Krümmung der Debye-Kurve $\psi \geq \chi$ werden je nach der Stelle, an der $\frac{T}{\theta_1}$ und $\frac{T}{\theta_2}$, sowie $\frac{T_0}{\theta_1}$ und $\frac{T_0}{\theta_2}$ auf der Debye-Kurve liegen.

Von diesem Mangel der Darstellung macht man sich frei, wenn man statt T_0 für jedes Metall seine charakteristische Temperatur θ einführt. Es werde dementsprechend gesetzt:

$$(8) \quad r = \frac{T \cdot F\left(\frac{T}{\theta}\right)}{\theta \cdot F(1)}.$$

Dann erhält man für das Verhältnis $\frac{r_1}{r_2}$ bei einer bestimmten Temperatur T für zwei verschiedene Metalle den Ausdruck

$$(9) \quad \frac{r_1}{r_2} = \frac{F\left(\frac{T}{\theta_1}\right)}{F\left(\frac{T}{\theta_2}\right)} \cdot \frac{\theta_2}{\theta_1}.$$

Ist $\theta_1 > \theta_2$, so ist demnach für sämtliche T -Werte $\frac{r_1}{r_2} < 1$, da sowohl $\frac{F\left(\frac{T}{\theta_1}\right)}{F\left(\frac{T}{\theta_2}\right)}$ als auch $\frac{\theta_2}{\theta_1}$ für alle T -Werte kleiner als 1

ist. Die r -Kurven ordnen sich also unter allen Umständen nach der Reihenfolge ihrer θ -Werte.

Dieser Überlegung entsprechend berechnen wir einerseits aus den nach den Formeln (2), (2a) und (5) ermittelten r -Werten die r -Werte durch Multiplikation mit $\left(\frac{R_0}{R_\theta}\right)_{\text{ber.}}$, andererseits bilden wir die $r_{\text{red.}}$ -Werte durch Multiplikation der $r_{\text{ber.}}$ -Werte mit $\left(\frac{R_0}{R_\theta}\right)_{\text{red.}}$. Hierbei sind die reduzierten Werte entsprechend dem Früheren die mit Hilfe der Matthiessen-Nernstschen Regel aus den beobachteten Werten für ideal reines Material abgeleiteten Werte. Die so ermittelten $r_{\text{red.}}$ - und $r_{\text{ber.}}$ -Werte sind für die drei Temperaturen $T = 77,74^\circ$ abs., $20,4^\circ$ abs. und $4,2^\circ$ abs. in Tab. 52 und in den Figg. 11, 12 und 13 eingetragen. Hierbei sind nicht berücksichtigt die Werte für nichtreguläre Einkristalle.

Daß in den Figuren die berechneten Werte nicht genau auf einer glatt verlaufenden Kurve liegen, hat seinen Grund darin, daß bei den verschiedenen Metallen nicht immer dieselbe Formel, sondern teilweise Formel (2), teilweise Formel (2a) verwendet wurde.

Man sieht, daß bei $77,74^\circ$ abs. die reduzierten r -Werte genau in der Reihenfolge der zugehörigen θ -Werte liegen und daß die Abweichungen zwischen den berechneten und reduzierten Werten nur sehr gering sind. Bei $20,4^\circ$ abs. sind die Abweichungen zwischen den $r_{\text{ber.}}$ - und $r_{\text{red.}}$ -Werten schon so groß, daß die Reihenfolge der reduzierten r -Werte durchaus

Tabelle 52a

Metall	θ	Berechnung von θ nach Formel	$\left(\frac{R_0}{R_\theta}\right)_{\text{ber.}}$	$\left(\frac{R_0}{R_\theta}\right)_{\text{red.}}$	$T = 77,74^\circ \text{ abs.}$	
					$r_{\text{ber.}}$	$r_{\text{red.}}$
Hg	37	2	7,73 ₄	7,87 ₄	2,18 ₂	2,19 ₄
Bi	62	2	4,44 ₁	4,34 ₇	1,21 ₉	1,29 ₈
Rb	85	2	3,72 ₉	3,74 ₀	0,903 ₂	0,905
Pb	92	5	3,29 ₀	3,30	0,821 ₈	0,819 ₇
Ba	133	2a	2,13 ₂	2,04	0,533 ₃	0,510 ₃
Tl	140	2	2,09 ₄	2,17	0,492 ₂	0,510 ₂
Th	168	2a	1,67 ₆	1,77	0,388 ₁	0,409 ₃
Sr	171	2a	1,63 ₈	1,73	0,376 ₃	0,398 ₁
K	181	2	1,59 ₆	1,67	0,342 ₂	0,358 ₀
Au	192	2	1,47 ₁	1,55	0,315 ₁	0,332 ₃
In	198	2a	1,41 ₁	1,49	0,304 ₆	0,321 ₈
Sn	210	2	1,33 ₉	1,38	0,271 ₈	0,282 ₀
Ta	228	2	1,21 ₀	1,25	0,240 ₀	0,246 ₁
Na	233	2	1,20 ₁	1,21	0,220 ₇	0,224 ₈
Ag	239	2	1,16 ₂	1,18	0,217 ₁	0,219 ₉
Pt	240	2	1,15 ₅	1,15	0,217 ₁	0,217 ₈
Sb	241	2	1,14 ₈	1,15	0,217 ₀	0,217 ₁
Pd	270	2	1,01 ₃	1,00	0,173 ₃	0,171 ₄
Zr	288	2a	0,943	(0,945)	0,155 ₄	0,156 ₁
As	291	2	0,933	0,935	0,152 ₃	0,153 ₀
Re	310	2a	0,868	(0,873)	0,133 ₁	0,134 ₀
Ir	316	2a	0,849	0,853	0,127 ₄	0,128 ₀
Ti	342	2a	0,776	(0,777)	0,107 ₂	0,107 ₃
Cu	355	2	0,739	0,738	0,0952	0,0866
Mg	357	2	0,733	0,743	0,0941	(0,0954)
Li	376	2	0,686	0,691	0,0798	0,0804
W	385	2	0,674	0,658	0,0790	0,0772
Co	401	2	0,626	0,610	0,0684	0,0666
Rh	419	2a	0,611	0,614	0,0638	0,0642
Ru	426	2a	0,599	(0,598)	0,0609	0,0608
Al	438	2	0,565	0,575	0,0530	0,0541
Ni	472	2	0,518	0,436	0,0431	0,0366
Cr	495	2a	0,494	(0,435)	0,0379	0,0334
Fe	519	2	0,454	0,367	0,0325	0,0262

θ = charakteristische Temperatur; R_0 = Widerstand bei $273,16^\circ \text{ abs.}$

nicht mehr den θ -Werten entspricht. Dasselbe gilt für die Werte bei 4° abs. Aber sowohl bei 20° als auch bei 4° abs. liegen die Abweichungen zwischen den reduzierten und berechneten Werten, soweit sie vorhanden sind, meist in der Richtung,

Tabelle 52b

Metall	$T = 20,4^\circ \text{ abs.}$		$T = 4,2^\circ \text{ abs.}$		Restwiderstand R bei 0° abs.
	$r_{\text{ber.}}$	$r_{\text{red.}}$	$r_{\text{ber.}}$	$r_{\text{red.}}$	R bei 0° C
Hg	0,492 ₇	0,505 ₇	0,0134	0,0157	0,0000
Bi	0,215 ₈	0,218 ₂	0,00178	0,00739	0,104 ₉ i. M.
Rb	0,118 ₈	0,1717	0,0002 ₂	0,0063 ₆	0,0375
Pb	0,0988 ₀	0,0977 ₈	—	—	0,0000
Ba	0,0363 ₇	0,0485 ₈	0,0006	0,0014	0,0443
Tl	0,0301 ₁	0,0707 ₄	0,0000	0,0035	0,0149
Th	0,0167 ₈	0,026 ₆	0,0000	0,0012	0,0164
Sr	0,0156 ₈	0,043 ₈	0,0000	0,0010	0,093 ₂
K	0,0127 ₆	0,0328	0,0000	0,00289	0,0927
Au	0,0102 ₅	0,00888	0,0000	0,00000 ₃	0,00029 ₁
In	0,0092 ₅	0,0345	0,0000	0,00202 ₇	0,00253
Sn	0,0068 ₉	0,0156 ₈	0,0000	0,000055	0,00075 ₀
Ta	0,0051 ₈	0,0056	—	—	0,0226 i. M.
Na	0,0044 ₉	0,0042 ₁	0,0000	0,00000	0,00323
Ag	0,0041 ₇	0,0038 ₀	0,0000	0,00004 ₄	0,00678 ₇
Pt	0,0041 ₇	0,00510	0,0000	0,00005	0,00164
Sb	0,0041 ₃	0,0154	0,0000	0,0006 ₂	0,0214 i. M.
Pd	0,0026 ₁	0,0049	0,0000	0,0000 ₃	0,0353 i. M.
Zr	0,0021 ₁	0,00488	0,0000	0,0026	0,0394
As	0,0019 ₈	0,0115	0,0000	0,0026	0,0201
Re	0,0015 ₈	0,0015	0,0000	0,0015	0,108 ₅
Ir	0,0014 ₈	0,00531	0,0000	0,00029	0,0476 ₈
Ti	0,00085	0,0086 ₂	0,0000	0,005 ₇	0,209 ₂
Cu	0,00086	0,00038	0,0000	0,00001	0,00031 i. M.
Mg	0,00086	(0,00081)	0,0000	(0,00130)	0,0428 i. M.
Li	0,00067	0,00104	0,0000	0,00124	0,0058 ₀
W	0,00065	0,00051	0,0000	0,00000 ₉	0,0156 i. M.
Co	0,00053	0,00118	0,0000	0,0007 ₃	0,0506 i. M.
Rh	0,00047	0,00035	0,0000	0,0000 ₃	0,00296
Ru	0,0004 ₃	0,00017	0,0000	0,0000	0,0827
Al	0,00036	0,0006 ₃	0,0000	0,0000	0,0163 i. M.
Ni	0,00027	0,00070	0,0000	0,00002 ₄	0,00502 ₇
Cr	0,000 ₂	0,0003 ₁	0,0000	0,000 ₁	0,052 ₆
Fe	0,0001 ₈	0,00058	0,0000	0,0000 ₃	0,0257 i. M.

R_θ = Widerstand bei $\theta^\circ \text{ abs.}$;

$$r_{\text{ber.}} = r_{\text{ber.}} \left(\frac{R_0}{R_\theta} \right)_{\text{ber.}}; \quad r_{\text{red.}} = r_{\text{red.}} \left(\frac{R_0}{R_\theta} \right)_{\text{red.}}$$

daß die reduzierten Werte größer als die berechneten sind. Bei der von uns verwendeten Art der Berechnungsweise erfolgt also bei der Mehrzahl der Metalle der Widerstands-

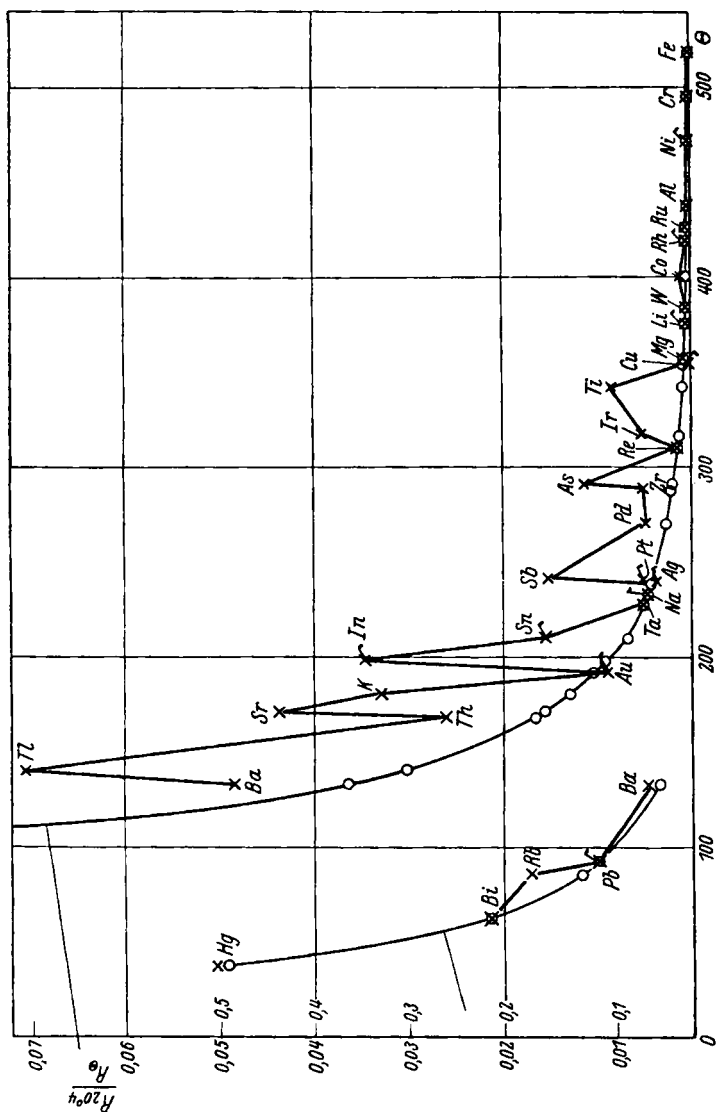
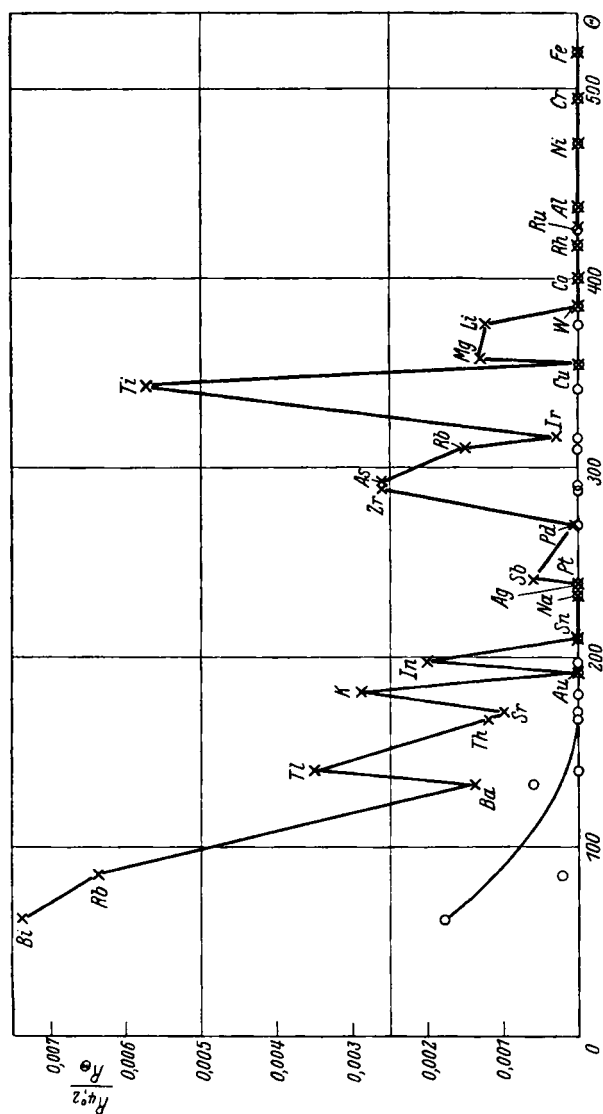


Fig. 12

Erklärung zu Fig. 12:

Abhängigkeit des Verhältnisses $\frac{R_{20,40}}{R_{\theta}} = r_{20,40}$ von der charakteristischen Temperatur θ für berechnete Werte (Kreise) und reduzierte Werte (Kreuze) (die mit einem Fähnchen markierten reduzierten Werte gehören zu den reinsten Metallen mit einem Restwiderstand $\leq 0,007 R_0$)



Abhängigkeit des Verhältnisses $\frac{R_{4,20}}{R_{\theta}} = r_{1,20}$ von der charakteristischen Temperatur θ für berechnete Werte (Kreise) und reduzierte Werte (Kreuze)

Fig. 13

anstieg in tiefen Temperaturen schneller als der Grüneisen-schen Widerstandsformel entspricht, in ganz tiefen Temperaturen also schneller als mit T^4 .

Um festzustellen, ob die Abweichungen zwischen den berechneten und reduzierten Werten etwa darauf zurückzuführen

sind, daß die Reduktion wegen mangelnder Reinheit des Materials nicht genau genug möglich war, sind in Fig. 12 die besonders reinen Metalle durch Fähnchen an den Kreuzen besonders gekennzeichnet. Man sieht aber, daß auch unter diesen solche sind, die stark herausfallen. Durchgängig sind die Abweichungen offenbar um so größer, je kleiner der θ -Wert ist. Dies dürfte damit zusammenhängen, daß der durch die Formel darzustellende Temperaturbereich von 1,2 bis 273° abs., in reduzierten Temperaturen $\frac{T}{\theta}$ ausgedrückt, um so größer wird, je kleiner θ ist, weswegen die Anpassung der berechneten Kurve an die beobachtete Kurve für kleinere θ weniger gut möglich ist, als für große θ . Wir haben auch noch versucht, bei dem sehr reinen Indium eine bessere Übereinstimmung zwischen Berechnung und Beobachtung durch Wahl eines anderen θ -Wertes herbeizuführen. Doch werden dann, wenn man die Abweichungen bei 20,4° abs. klein macht, die Abweichungen bei höheren Temperaturen prozentual unzulässig groß. Alles in allem muß man aber wohl trotzdem sagen, daß die Grüneisensche Widerstandsformel die für ideal reines Material geltenden Widerstandswerte verhältnismäßig gut wiedergibt.

Bei diesen Schlußfolgerungen sind noch nicht berücksichtigt die folgenden Metalle, die zwar untersucht wurden, aber noch nicht genügenden Reinheitsgrad oder ungenügende Kristallform besaßen: Caesium, Beryllium, Calcium, Bor, Gallium, Graphit, Silicium, Cer, Germanium, Vanadium, Molybdän, Uran, Selen, Tellur und Mangan.

Bei Silicium, Graphit und Bor, vielleicht auch bei Tellur und Selen, sind Messungen an Einkristallen erforderlich, um ein richtiges Bild von dem Verhalten ihres metallischen Widerstandes zu bekommen. Derartige Messungen sind in Angriff genommen.

Unzugänglich waren uns noch metallischer Phosphor, Scandium, Yttrium, Masurium, Hafnium und Osmium, sowie die seltenen Erden mit Ausnahme von Cer.

Der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft sind wir für die Unterstützung der vorstehenden Untersuchungen zu großem Dank verpflichtet.

VI. Zusammenfassung

Für den größten Teil der Metalle wird die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur zwischen 1,2 und 273° abs., meist nach neuen Messungen, mitgeteilt. Aus den beobachteten Widerstandswerten werden die für ideal reine Metalle gültigen, soweit dies möglich ist, abgeleitet. Aus letzteren werden die charakteristischen Temperaturen der Metalle nach der Grüneisenschen Widerstandsformel berechnet. Die dabei erhaltenen Resultate werden diskutiert, wobei sich u. a. ergibt, daß es in theoretischer Hinsicht nicht zweckmäßig ist, die Temperaturabhängigkeit des auf den Wert 1 bei 0° C bezogenen Widerstandes zu betrachten. Es empfiehlt sich vielmehr, die beobachteten Widerstandswerte durch den Widerstand bei der charakteristischen Temperatur statt durch den bei 0° C zu dividieren und die Temperaturabhängigkeit der so erhaltenen r -Werte den Betrachtungen zugrunde zu legen.

(Eingegangen 2. Oktober 1930)
