Werk

Titel: Über die elektrische Leitfähigkeit der Metalle in den allertiefsten Temperaturen

Autor: Mahlke, A.

Ort: Berlin

Jahr: 1914

PURL: https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X_0002|log790

Kontakt/Contact

Digizeitschriften e.V.
SUB Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen

info@digizeitschriften.de

Glasart	Typus-nummer	Schmelz-nummer	Mittl. Brechung n_D	Mittl. Dispersion $C-F$	Spez. Gewicht	Linearer Ausd.-Koeff.	Kohäsions-punkt 30 Min.
Schwerstes Silikat-Flint	S 386	S 350	1,8997	0,04121	6,01	$0{,}0_5$ 856	424,8 °
Schweres Flint	O 198	O 4818	1,7977	0,03087	5,14	$0{,}0_5$ 818	456,5 °
Schweres Flint	O 41	O 5791	1,7180	0,02438	4,48	$0{,}0_5$ 833	464,7 °
Fluor-Kron	O 6309	O 6309	1,4721	0,00701	2,34	$0{,}0_5$ 916	481,4 °
Gewöhnliches Leichtflint . . .	O 340	O 5476	1,5777	0,01383	3,20	$0{,}0_5$ 876	483,5 °
Gewöhnliches Flint	O 118	O 6280	1,6133	0,01661	3,94	$0{,}0_5$ 916	485,6 °
Schweres Flint	O 102	O 6209	1,6496	0,01929	3,87	$0{,}0_5$ 875	492,7 °
Extra leichtes Flint	O 378	O 5961	1,5482	0,01188	2,93	$0{,}0_5$ 814	504,9 °
Kron mit hoher Dispersion . .	O 608	O 6060	1,5143	0,00940	2,60	$0{,}0_5$ 867	505,0 °
Phosphat-Kron	S 367	S 433	1,5193	0,00744	2,59	$0{,}0_5$ 921	508,8 °
Schweres Baryt-Flint	O 3269	O 5597	1,6581	0,01816	3,96	$0{,}0_5$ 895	529,6 °
Fluor-Kron	O 6815	O 6815	1,4866	0,00689	2,47	$0{,}0_4$ 1028	535,2 °
Fernrohrflint	O 3439	O 5591	1,5260	0,01007	2,54	$0{,}0_5$ 611	535,8 °
Silikat-Kron	O 3453	O 5903	1,5184	0,00858	2,60	$0{,}0_5$ 886	537,6 °
Silikat-Kron	O 6634	O 6634	1,5127	0,00858	2,57	$0{,}0_5$ 849	541,5 °
UV-Flint	O 3248	O 6224	1,5340	0,00965	2,75	$0{,}0_5$ 916	547,0 °
Baryt-Flint	O 748	O 6427	1,6249	0,01593	3,36	$0{,}0_5$ 876	547,3 °
Gewöhnliches Silikat-Kron. . .	O 203	O 6335	1,5185	0,00880	2,55	$0{,}0_5$ 900	554,7 °
Gewöhnliches Kron	O 6660	O 6660	1,5048	0,00832	2,48	$0{,}0_5$ 789	558,5 °
Baryt-Leichtflint	O 578	O 6015	1,5827	0,01252	3,29	$0{,}0_5$ 823	577,9 °
UV-Kron	O 3199	O 4668	1,5046	0,00779	2,41	$0{,}0_5$ 624	580,8 °
Prismen-Kron.	O 3832	O 6293	1,5166	0,00807	2,54	$0{,}0_5$ 779	583,3 °
Borosilikat-Kron	O 6367	O 6367	1,5088	0,00834	2,50	$0{,}0_5$ 478	586,2 °
Borosilikat-Kron	O 802	O 5168	1,4983	0,00762	2,35	$0{,}0_5$ 550	603,3 °
Baryt-Leichtflint	O 463	O 6536	1,5652	0,01014	3,09	$0{,}0_5$ 774	631,6 °
Schweres Bariumsilikat-Kron. .	O 211	O 5788	1,5732	0,00998	3,20	$0{,}0_5$ 803	632,0 °
Baryt-Leichtflint	O 722	O 6255	1,5805	0,01081	3,24	$0{,}0_5$ 702	632,4 °
Zinksilikat-Kron.	O 15	O 6872	1,5332	0,00918	2,74	$0{,}0_5$ 781	634,1 °
Gelbglas	F 5899	F 5899	1,—	—	2,54	$0{,}0_5$ 931	660,5 °
Schwerstes Baryt-Kron	O 2071	O 5930	1,6122	0,01034	3,54	$0{,}0_5$ 680	674,0 °
Schwerstes Baryt-Kron	O 2994	O 5770	1,6129	0,01086	3,60	$0{,}0_5$ 648	686,4 °
Schwerstes Baryt-Kron	O 2122	O 5847	1,5902	0,00962	3,31	$0{,}0_5$ 587	693,8 °

ten" bezeichnen, die in der Kurve dargestellt sind für das eine Glas.

Der „absolute Kohäsionspunkt" würde demnach diejenige Temperatur sein, bei welcher auch nach unendlich langer Adhäsionszeit eine Verschmelzung zweier ebener Glasstücke im Sinne der Kohäsion nicht mehr eintritt. Damit ist der Temperaturbereich vom festen kalten Glase bis zum deutlich flüssigen erhitzten Glas an einer scharf bestimmbaren Stelle in zwei Teile getrennt: innerhalb des unteren Temperaturgebietes befindet sich das Glas in einem Molekularzustande, der ein Kohärieren nicht erlaubt, darüber aber tritt mit wachsender Temperatur in rasch abnehmender Zeit Kohärenz der sich berührenden Glasstücke ein. Oder mit anderen Worten: unterhalb des „absoluten Kohäsionspunktes" verhalten sich zwei in Berührung befindliche Glasstücke fest, oberhalb werden sie in zunehmendem Maße flüssig, der Trennungspunkt spielt die Rolle einer Grenztemperatur zwischen fest und flüssig, er müßte bei Kristallen mit dem Schmelzpunkt zusammenfallen, für den er bei Gläsern künftig nun einen exakt brauchbaren Ersatz darstellt.

Über die elektrische Leitfähigkeit der Metalle in den allertiefsten Temperaturen. (Nach den Entdeckungen von Kamerlingh Onnes.)

Von Dr. A. Mahlke, Hamburg.

Durch die Herstellung flüssigen Heliums hat *Kamerlingh Onnes* es ermöglicht, in der Erzeugung tiefer Temperaturen dem absoluten Nullpunkte wesentlich näher als bisher zu kommen. Flüssiges Helium siedet unter Normaldruck bei 4,25 ° abs. Läßt man es aber unter vermindertem Druck sieden, so erhält man tiefere Temperaturen, bei 47 cm Druck 3,8 °, bei 5 cm Druck 2,35 °. *Onnes* hat seine Untersuchungen bis 1,6 ° ausdehnen können und hat dabei entdeckt, daß Metalle in diesen allertiefsten Temperaturen plötzlich in einen neuen Zustand übergehen, der sich durch eine ganz außerordentlich große elektrische Leitfähigkeit auszeichnet.

Dieser neue Zustand wurde zuerst beim Quecksilber beobachtet, das von allen Metallen sich am leichtesten rein darstellen läßt. Die Reinheit des Quecksilbers kann so weit gesteigert werden, daß

sich darin beim Durchgange eines elektrischen Stromes kein Widerstand mehr zeigt, den man auf Verunreinigungen zurückführen könnte. Der Widerstand des reinen Quecksilbers wird in den allertiefsten Temperaturen scheinbar gleich Null, solange die Stromdichte in dem Quecksilberfaden unterhalb einer bestimmten Grenze bleibt. Dann ist nämlich die Potentialdifferenz an den Enden des Fadens so klein, daß sie nicht mehr gemessen werden kann. Ihr geringster meßbarer Wert betrug bei den Versuchen 0,03 Mikrovolt ($3 \cdot 10^{-8}$ V). Die Potentialdifferenz übersteigt aber diesen Wert, sobald die Stromdichte im Quecksilberfaden einen gewissen Betrag, den *Schwellenwert,* überschreitet, und wächst dann schneller an als der Strom. Also wächst dann auch der sich rechnungsmäßig ergebende Widerstand und das Ohmsche Gesetz scheint nicht mehr gültig zu sein.

Solange die Temperatur des Quecksilbers unterhalb 4,19° abs. (*Verschwindungstemperatur* des Quecksilberwiderstandes) liegt und die Stromdichte darin den Schwellenwert nicht überschreitet, befindet es sich in einem Zustande übergroßer Leitfähigkeit, so daß es scheinbar widerstandsfrei ist. Der Schwellenwert der Stromdichte, bei dem dieser Zustand aufhört, ist um so größer, je tiefer die Temperatur des Quecksilbers liegt. Berechnet man nun den Bruch aus der kleinsten meßbaren Potentialdifferenz ($3 \cdot 10^{-8}$ V) durch den Schwellenwert der Stromdichte, so erhält man die obere Grenze für den Restwiderstand, welchen das Quecksilber in dem Zustande seiner scheinbaren Widerstandslosigkeit noch besitzen kann. Diese obere Grenze wird also um so mehr erniedrigt, je tiefer man die Temperatur des Quecksilbers sinken läßt.

Beim Siedepunkt des Heliums, also bei 4,25° abs., besteht für das Quecksilber noch das Ohmsche Gesetz. Ein Quecksilberfaden zeigte in dieser Temperatur beim Stromdurchgange von 0,003 A einen Widerstand von 0,0837 Ω und bei der doppelten Stromstärke einen solchen von 0,0842 Ω, so daß die Abweichung innerhalb der Fehlergrenzen lag. Bei 4,20° betrug sein Widerstand nur 0,000 746 Ω für einen Strom von 0,0071 A, und bei 4,19° war er kleiner als $1{,}4 \cdot 10^{-5}$ Ω für die gleiche Stromstärke. Um bei dieser Temperatur noch eine merkliche Potentialdifferenz an den Enden des Quecksilberfadens zu erhalten, mußte die Stromstärke auf 0,014 A erhöht werden. Die Potentialdifferenz war sodann $= 2{,}5 \cdot 10^{-6}$ V für 0,020 A, $= 5 \cdot 10^{-6}$ V für 0,023 A und $= 16 \cdot 10^{-6}$ V für 0,0288 A Stromstärke. Bei 3,65° konnte mit einer Stromstärke von 0,49 A noch keine Potentialdifferenz festgestellt werden; dies war erst möglich bei dem Schwellenwert von 0,72 A. Danach beträgt bei 3,65° abs. der Widerstand des Quecksilbers nur den tausendmillionsten Teil (10^{-9}) von dem bei 0° C. Bei 2,45° abs. wird dieser Bruchteil sogar kleiner als $2 \cdot 10^{-10}$.

Die jähe Abnahme des Widerstandes beginnt für das Quecksilber bei 4,21° und vollzieht sich dann in einem Intervall von 0,02°. Der Widerstand verschwindet beim Sinken der Temperatur allerdings allmählich, doch hat man den Eindruck, als ob die Widerstandsänderung plötzlich eintrete und das allmähliche Verschwinden der Potentialdifferenz der Tatsache zuzuschreiben sei, daß der Faden sich nur allmählich auf seiner ganzen Länge bis zur Verschwindungstemperatur abkühlt und daß nur der Teil, welcher sich unterhalb dieser Temperatur befindet, seinen Widerstand verliert. Dabei hat sich herausgestellt, daß die Verschwindungstemperatur bei verschiedenen Quecksilberfäden nicht völlig identisch ist. Bei zwei Quecksilberfäden, W_{130} und W_{50}, die bei 0° C. 130 und 50 Ohm Widerstand besaßen, wurden für konstante Stromdichten folgende Widerstände gemessen:

Temp.	4,24°	4.210°	4,201°	4,180°
W_{130}	0,0532	0,0128	0,0046	0
W_{50}	0,02445	0,0003	0	0

Solche Unterschiede im Verschwinden des Widerstandes, die gleichfalls bei den Schwellenwerten verschiedener Quecksilberfäden auftreten, werden vermutlich durch zufällige Umstände beim Gefrieren des Quecksilbers veranlaßt. Trotz dieser Beobachtungen ist es aber möglich, daß der gewöhnliche Widerstand des Quecksilbers bei 4,19° ganz plötzlich verschwindet und auch plötzlich wieder auftritt; denn in einem Faden, der unter diese Temperatur abgekühlt ist, kann an irgendeiner Stelle bei Erreichung des für diese Stelle maßgebenden Schwellenwertes eine Erhitzung eintreten, welche den Faden dort über 4,19° erwärmt, so daß von hier aus sich der Widerstand auf eine weitere Strecke hin ausdehnt. Eine solche lokale Wärmeentwicklung macht es auch erklärlich, daß für größere Stromdichten eine um so niedrigere Temperatur erforderlich ist, um zu verhindern, daß von der diese Wärmeentwicklung verursachenden Stelle aus die übrigen Teile des Fadens auf eine Temperatur mit gewöhnlichem Widerstand erwärmt werden.

In tieferen Temperaturen wächst der Schwellenwert des Quecksilbers ganz bedeutend. Ein Quecksilberfaden zeigte bei 2,45° für eine Stromdichte von 1096 Amp. auf das Quadratmillimeter eine Potentialdifferenz von 6,3 Mikrovolt; für 1024 Amp. betrug diese 0,56 Mikrovolt und für 944 Amp. war sie unmeßbar klein bei der gleichen Temperatur. Da nun mit dem Fortfall der Potentialdifferenz auch die Joulesche Wärme verschwindet, so stehen wir vor der staunenswerten Tatsache, daß man durch einen Quecksilberfaden einen elektrischen Strom von 1000 Amp. im Quadratmillimeter senden kann, ohne daß sich die geringste Wärme entwickelt.

Der Schwellenwert der Stromdichte für denselben Quecksilberfaden ändert sich linear mit der Temperatur. Dies führt auf die Vermutung, daß ein *Peltiereffekt* vorliegt, der die Temperatur bis zur Verschwindungstemperatur ansteigen läßt.

Ein solcher kann z. B. durch verschiedene Formen der Kristalle oder durch Spannungen hervorgerufen sein. Bemerkenswert ist, daß der Schwellenwert für das Quecksilber in sehr engen Kapillaren sehr hoch zu sein pflegt.

Versuche mit durch Cadmium oder Gold verunreinigtem Quecksilber zeigten, daß dieses das gleiche Verhalten in Heliumtemperaturen aufweist, wie reines Quecksilber. Allerdings war die Verunreinigung sehr gering, da festes Quecksilber nur sehr geringe Spuren von anderen Metallen aufnimmt (von Zink und Gold weniger als $^1/_{1\,000\,000\,000}$). Da kleine Verunreinigungen keine Wirkung ausüben, so müssen wir auch für ganz reines Quecksilber das Vorhandensein eines Restwiderstandes vermuten. Aber auch stärker verunreinigtes Quecksilber, nämlich das Amalgam, welches zum Belegen von Spiegeln dient, verliert in Heliumtemperaturen scheinbar seinen Widerstand. Dieser verschwindet plötzlich wie bei reinem Quecksilber, aber schon bei einer höheren Temperatur, nämlich bei 4,29° abs. Der Schwellenwert beträgt dabei 0,12 Amp.

Der Umstand, daß Quecksilber bei gewöhnlicher Temperatur flüssig ist, bietet für die experimentelle Handhabung große Schwierigkeiten. Es war daher sehr erwünscht, auch an festen Metallen den Zustand übergroßer Leitfähigkeit beobachten zu können. Bei Gold und Platin konnte dieser bisher nicht festgestellt werden. Ihr Widerstand nimmt in Heliumtemperaturen einen meßbaren, von der Temperatur unabhängigen Wert an. Die Versuche deuten aber darauf hin, daß auch dieser bei hinreichender Reinheit der beiden Metalle verschwindend klein wird. Dagegen ist es gelungen, bei reinem Zinn und bei reinem Blei (von *Kahlbaum* geliefert) dieselben Erscheinungen wie beim Quecksilber zu beobachten. Beim Zinn tritt die plötzliche Abnahme des Widerstandes bei 3,806° ein. Die Verschwindungstemperatur beträgt 3,785°, wobei der Schwellenwert 0,28 Amp. ausmacht. Blei ist sogar schon in flüssigem Helium scheinbar widerstandsfrei. Die Verschwindungstemperatur seines Widerstandes liegt viel höher als der Siedepunkt des Heliums, ungefähr bei 6° abs. Bei 4,29° beträgt sein Schwellenwert noch mehr als 1,3 Amp. Der Widerstand des Zinns ist im Vergleich zu dem bei 0° C. bei 1,8° abs. kleiner als $6 \cdot 10^{-10}$ und der des Bleis sogar kleiner als $0{,}5 \cdot 10^{-10}$. Hiernach scheinen alle Metalle, oder wenigstens ein Teil derselben, in hinreichend niedrigen Temperaturen widerstandsfrei zu werden, wenn sie genügend gereinigt worden sind. Vielleicht tritt dies bei allen plötzlich ein.

Die Feststellung dieser Erscheinungen beim Blei gab Veranlassung zu weiteren Untersuchungen, indem aus mit Seide umsponnenem Bleidraht eine Spule von 1000 Windungen gewickelt wurde. Der Bleidraht hatte $^1/_{10}$ qmm Querschnitt. Der Durchmeser sowohl wie die Länge der Spule betrug 1 cm. Durch diese Spule konnte bei Heliumtemperaturen ein Strom von 0,8 Amp. hindurchgeleitet werden, ohne daß eine meßbare Entwicklung von Joulescher Wärme auftrat. Die Möglichkeit, mit Hilfe dieser Spule ein eisenfreies Magnetfeld von ungewöhnlicher Stärke, etwa 100 000 Gauß, zu erzeugen, hat sich aber als nicht ausführbar erwiesen, da beim Überschreiten einer gewissen Stärke (1 Kilogauß bei 1,8°) des magnetisierenden Feldes der von diesem in der Spule erzeugte Strom den Schwellenwert erreicht und eine plötzliche Wärmeentwicklung auftritt, die den Strom wieder zum Verschwinden bringt. Dagegen hat sich die Fortdauer eines in der Spule hervorgerufenen Magnetfeldes nach Aufhören des magnetisierenden Kraftfeldes experimentell nachweisen lassen. Die in der Spule erzeugte elektrokinetische Energie ist nämlich hinreichend groß, so daß sie nur langsam erschöpft wird.

Zur Ausführung dieses Versuches wurden die beiden Enden der Spule im Knallgasgebläse verlötet. Dann wurde sie in das Kältebad in geeigneter Lage eingeschoben und in einem Feld von 200 Gauß abgekühlt von 0° C. bis 1,8° abs. Der auf diese Weise in der Spule erzeugte Strom dauerte fort nach Entfernung des Feldes von 200 Gauß. Erkennbar war dies daran, daß die Spule einer Kompaßnadel eine Ablenkung erteilte und daß diese Ablenkung ihren Sinn wechselte, als die Spule um eine senkrechte Achse gedreht wurde. Die Bleidrahtspule stellte also einen permanenten Magneten oder einen Molekularstrom im Sinne von Ampère dar. Durch Messungen wurde gefunden, daß in der widerstandsfreien Spule ein Strom von 0,4 bis 0,6 Amp. Stunden hindurch andauerte. Genaue Messungen waren nicht möglich, auch konnte von der Abnahme des Stromes nur die obere Grenze ermittelt werden, die 1 % in der Stunde nicht überschritt. Beim Erwärmen des Apparates verschwindet die Erscheinung sofort. Als die Spule mit ihren Windungen parallel zum induzierenden Feld in den Apparat gebracht wurde, ergab sich auch eine Wirkung, die aber nur ⅛ der früher beobachteten ausmachte.

Um zu beweisen, daß ein elektrischer Strom die Ursache der magnetischen Wirkung der Spule ist, wurden zu beiden Seiten der Lötstelle zwei Drähte mit einem ballistischen Galvanometer verbunden. Nachdem dann durch die Kompaßnadel die magnetische Wirkung der Spule festgestellt war, wurde die Lötstelle aufgetrennt. Da zeigte das Galvanometer sofort einen Ausschlag und die Kompaßnadel ging in ihre ursprüngliche Stellung zurück. Das Bestehen eines elektrischen Stromes in der Spule während ihres magnetischen Zustandes war hierdurch bewiesen. Durch die Einschaltung des Widerstandes im Galvanometer wurde seine Energie erschöpft. Die Spule stellt ein Bild des von *Maxwell* erdachten reibungslosen Mechanismus dar, das man durch die moderne Vorstellung von den Elektronen ergänzen kann. Die Elektronen fahren fort sich im Stromkreis zu