

12. Ueber den Einfluss der Temperatur auf die Wärmeleitung von Gläsern; von J. Krüger.

(Auszug aus der gleichnamigen Inaugural-Dissertation, Jena 1901.)

Die Untersuchung wurde veranlasst durch zwei Arbeiten von Paalhorn¹⁾ und Focke²⁾, deren Gegenstand die Wärmeleitungsfähigkeit verschieden zusammengesetzter Gläser bildete. Die von beiden Autoren für dieselbe Glassorte gefundenen absoluten Werte der Wärmeleitungsfähigkeit unterschieden sich zum Teil um mehr als 30 Proc., auch liess sich dadurch keine genügende Uebereinstimmung herstellen, dass man die Werte beider Autoren auf dasselbe Glas als Einheit reducirte.

Paalhorn bediente sich der Methode von Christiansen³⁾, bei welcher zwei thermische Widerstände, W_a und W_b , in Gestalt kreisrunder planparalleler Scheiben von gleichem Durchmesser miteinander verglichen werden. Aus dem Werte von W_a/W_b und den Dicken der beiden Platten ergibt sich durch eine einfache Rechnung das Verhältnis ihrer Leitfähigkeiten. Nun haben bei diesem Verfahren die beiden Platten während des Versuches nicht gleiche Temperatur. Daher kann man, wenn beide Platten aus demselben Glase bestehen, aus der Verschiedenheit ihrer Wärmeleitungsfähigkeiten auf einen Temperaturcoefficienten der Wärmeleitung schliessen. So schien aus einem derartigen Versuche Paalhorn's hervorzugehen, dass die Wärmeleitung seines mit Nr. 2 bezeichneten Glases (Focke Nr. 25) pro 1° Temperatursteigerung um etwa 0,5 Proc. zunimmt. Ein ähnlicher Schluss liess sich aus anderen Versuchen ziehen, bei welchen ein Bleiglas (Nr. 1; Focke Nr. 20), das mit einer constanten Luftschicht verglichen wurde, successive verschiedenen Temperaturen ausgesetzt war. Doch möchte ich hier gleich hervorheben, dass in diesem Falle die Temperaturänderung verursacht wurde, indem eine dicke Bleiglasplatte durch eine dünnere von *nominell* derselben chemischen Zusammensetzung ersetzt wurde.

1) O. Paalhorn, Inaug.-Dissert., Jena 1894; vgl. auch H. Hovestadt, Jenaer Glas, p. 207 ff. 1900.

2) Th. M. Focke, Wied. Ann. **67**, p. 132. 1899; H. Hovestadt, l. c.

3) C. Christiansen, Wied. Ann. **14**, p. 23 ff. 1881.

Auf die eben erwähnten Versuche, welche Paalhorn ohne eine Erklärung mitgeteilt hatte, verwies Winkelmann¹⁾ in diesem Sinne und zeigte zugleich, dass die relativen Werte von Focke und Paalhorn wesentlich besser übereinstimmen, wenn sie unter Annahme eines Temperaturcoefficienten $\alpha = +0,005$ auf gleiche Temperatur reducirt werden. Es lag somit die Vermutung nahe, dass die Wärmeleitungsfähigkeit der Gläser *erheblich* von der Temperatur abhängt.

Zur genaueren Untersuchung dieses Punktes benutzte ich die Wärmeleitungssäule von Christiansen zunächst in der oben, angedeuteten Weise, d. h. es wurden zwei Platten *a* und *b* desselben Glases miteinander verglichen, wobei die Platte *a* eine ungefähr 18° höhere Temperatur hatte, als die Platte *b*. Die beiden Glasplatten liegen zwischen drei Kupferplatten, I, II, III, von demselben Durchmesser, mit welchen sie durch Glycerinschichten in möglichst innigen Contact gebracht sind. Das Plattensystem — die sogenannte Leitungssäule — wird in axialer Richtung von einem Wärmestrom durchflossen. Bei der Berechnung wurde der Widerstand der Glycerinschichten und Kupferplatten gegen die Widerstände der Glasplatten vernachlässigt, indem ich mich einerseits auf Paalhorn's Angaben über diesen Punkt stützte, andererseits auf Grund der oben erwähnten Paalhorn'schen Versuche zunächst einen Temperaturcoefficienten von beträchtlicher Grössenordnung voraussetzte. Die Methode wurde vervollkommenet durch die genauere Bestimmung eines Correctionsgliedes, welches der äusseren Wärmeabgabe des Plattensystems Rechnung trägt. Auch wurden für die Emissionsconstanten von Glas und Kupfer neuere Werte nach Angaben von Kurlbaum und Wiedeburg benutzt. Ferner wurde besondere Sorgfalt auf die Erreichung des stationären Zustandes verwandt, indem nur solche Versuche Berücksichtigung fanden, bei denen sich die Temperaturen der Kupferplatten innerhalb 10 Minuten um höchstens $0,01^{\circ}$ geändert hatten. Die Richtigkeit der für die äussere Wärmeabgabe aufgestellten Formel wurde sodann auch experimentell nachgewiesen, indem das Plattensystem mit einem Wattemantel von ca. 0,7 cm Dicke

1) A. Winkelmann, Wied. Ann. 67. p. 794. 1899.

umhüllt wurde. Es zeigte sich, dass jetzt künstlich erzeugte beträchtliche Aenderungen in der Umgebungstemperatur auf die Temperaturverteilung im Innern der Leitungssäule keinen merklichen Einfluss ausübten, während bei unverpackter Säule die Temperaturverteilung bereits auf kleinere Aenderungen der Umgebungstemperatur empfindlich reagirte. Hieraus folgte zunächst, dass man bei verpacktem Plattensystem den äusseren Wärmeverlust der Leitungssäule vernachlässigen konnte; da nun ferner die Versuche, welche *ceteris paribus* bei verpackter und unverpackter Säule angestellt wurden, zu gleichen Resultaten führten, wenn man bei ersteren den Wärmeverlust gleich Null setzte, bei letzteren die erwähnte Correction anwendete, so ergab sich hiermit die Richtigkeit der benutzten Correctionsformel.

Trotzdem lieferten die successive mit demselben Glase angestellten Versuche stark verschiedene Werte für den Temperaturcoefficienten, namentlich wenn vor Wiederholung des Versuches die Glycerinschichten erneuert wurden. Es kam sogar vor, dass dasselbe Glas scheinbar einmal eine beträchtliche Zunahme, später eine beträchtliche Abnahme der Leitfähigkeit mit steigender Temperatur zeigte. Manchmal allerdings erhielt man — wie dies auch bei den diesbezüglichen Versuchen Paalhorn's der Fall ist — nach Erneuerung der Glycerinschichten fast genau denselben Wert. Gerade diese bisweilen vorkommende Uebereinstimmung konnte leicht zu einer irrtümlichen Vorstellung über den Einfluss der Berührungswiderstände führen. Um über die Grössenordnung der Berührungswiderstände einen sicheren Aufschluss zu erhalten, wurden dieselben nunmehr direct gemessen. Sie zeigten sich nun zwar bei weitem nicht so gross, dass man aus ihrem Einfluss die enormen Differenzen zwischen Focke's und Paalhorn's Werten zu erklären vermochte, jedoch konnte die durch die „schädlichen Widerstände“ verursachte scheinbare Abhängigkeit von der Temperatur die wirkliche weit übertreffen, sodass die bisherigen Versuche möglicherweise nicht einmal den Sinn des Temperaturcoefficienten richtig wiedergaben. Es war somit notwendig, die Methode derart abzuändern, dass die schädlichen Widerstände keine Rolle spielen konnten.

Der neuen Methode lag folgender Gedankengang zu Grunde. Bei den bisherigen Versuchen erhält man statt des gesuchten

Verhältnisses der beiden Glaswiderstände, w_a und w_b , das Verhältnis $w_a + \epsilon_a / w_b + \epsilon_b$, wenn ϵ_a und ϵ_b die an die Glasplatten grenzenden Berührungsschichten und Kupferschichten bezeichnen. Lässt man nun bei einem zweiten Versuch den Wärmestrom in umgekehrter Richtung durch die Leitungssäule fließen, so hat $w_a + \epsilon_a$ eine weit niedrigere Temperatur als vorher, $w_b + \epsilon_b$ dagegen eine höhere. Infolge dessen wird, falls die Leitfähigkeit des Glases mit wachsender Temperatur steigt, w_a zunehmen, w_b abnehmen, daher $w_a + \epsilon_a / w_b + \epsilon_b$ sich vergrößern; umgekehrt natürlich, falls die Leitfähigkeit des Glases mit wachsender Temperatur fällt. Allerdings werden nicht nur die Widerstände der Glasplatten, sondern auch die schädlichen Widerstände sich infolge der umgekehrten Temperaturverteilung ändern. Hat jedoch der Temperaturcoefficient des Glases dieselbe Größenordnung, wie derjenige des Kupfers und der des Contactwiderstandes, so wird die durch das Glas bewirkte Aenderung von $w_a + \epsilon_a / w_b + \epsilon_b$ die durch ϵ_a und ϵ_b bewirkte Aenderung deutlich überwiegen, da die schädlichen Widerstände immerhin nur einen kleinen Bruchteil der gesamten Widerstände bilden. Bei der genaueren Ausführung wurde auch die Aenderung der schädlichen Widerstände in Rechnung gezogen.

Die definitiven Versuche, welche sich auf drei Glassorten von sehr verschiedener Zusammensetzung erstreckten, zeigten in übereinstimmender Weise, dass die Wärmeleitungsfähigkeit mit steigender Temperatur in sehr geringem Maasse abnimmt. Die Gläser zeigen also dasselbe Verhalten, wie die meisten der in dieser Beziehung untersuchten Körper. Es ergaben sich folgende Resultate:

Glas O 137.

K_2O 16,0 Proc., Na_2O 2,0 Proc., CaO 11,0 Proc., SiO_2 70,6 Proc.,
 As_2O_5 0,3 Proc., Mn_3O_4 0,1 Proc.

Temperaturcoefficient der Wärmeleitung: $\alpha = -(31 \pm 15) \cdot 10^{-5}$.

Glas S 226.

SiO_2 20,9 Proc., PbO 79,0 Proc., As_2O_5 0,1 Proc.

Temperaturcoefficient der Wärmeleitung: $\alpha = -(34 \pm 11) \cdot 10^{-5}$.

Glas O 709.

Na_2O 17,0 Proc., ZnO 12,0 Proc., SiO_2 70,54 Proc., As_2O_5 0,4 Proc.,
 Mn_3O_4 0,06 Proc.

Temperaturcoefficient der Wärmeleitung: $\alpha = -(45 \pm 13) \cdot 10^{-5}$.

Endlich glaube ich für die Differenzen zwischen Focke's und Paalhorn's Werten eine befriedigende Erklärung gefunden zu haben. Bei einer letzten sorgfältigen Durchsicht der Paalhorn'schen Arbeit bemerkte ich nämlich, dass die Platten von nominell gleicher Zusammensetzung nicht nur dann verschiedene Leitfähigkeit zeigten, wenn ihre Temperaturen erheblich differirten, sondern auch wenn sie bei *gleicher Temperatur* der Reihe nach mit einem constanten thermischen Widerstande verglichen wurden. Das Verhältniss der Leitfähigkeiten der Platten erwies sich als von der Temperatur unabhängig. (Die minimale Aenderung mit der Temperatur, welche aus meinen Versuchen sich ergibt, kommt natürlich für die grossen Differenzen in der Leitfähigkeit, um welche es sich hier handelt, nicht in Betracht.) Specieell bei den Bleiglasplatten stimmen die von Paalhorn unter verschiedenen Bedingungen gefundenen Verhältnisse ihrer Leitfähigkeiten so gut untereinander überein, dass ein Zufall ausgeschlossen erscheint. Es scheint mir hieraus fast mit Notwendigkeit hervorzugehen, dass die als gleich bezeichneten Platten in Wirklichkeit von wesentlich verschiedener Zusammensetzung waren.

Für diese Erklärung sprechen noch zwei Gründe, nämlich erstens der Umstand, dass Glasschmelzen von nominell gleicher Zusammensetzung oft in einzelnen Bestandteilen um mehr als 2 Proc. schwanken¹⁾ (insbesondere greifen gerade die Bleigläser leicht die Wandungen des Schmelzofens an und werden auf diese Weise verunreinigt); zweitens die Thatsache, dass auch bei anderen festen Substanzen, z. B. Kupfer, schon geringe Verunreinigungen eine grosse Aenderung der Leitfähigkeit bewirken.

Unter Annahme obiger Erklärung muss man auf eine strenge Vergleichung der Werte von Focke und Paalhorn und a fortiori der Angaben älterer Autoren, welche nur zwischen Crown- und Flintglas unterscheiden, natürlich verzichten.

Fassen wir zum Schluss die oben verzeichneten Resultate der an drei Glassorten angestellten Versuche zusammen, so ergibt sich, dass die Wärmeleitungsfähigkeit pro 1° Temperatursteigerung um 0,031 bis 0,045 Proc. abnimmt.

Jena, Physikalisches Institut, Mai 1901.

1) A. Winkelmann, Wied. Ann. **67**. p. 801. 1899.

(Eingegangen 28. Mai 1901.)