

Wärmedurchgang durch Graphit- und Porzellanrohre in Verdampfapparaten

Von Professor Dr.-Ing. EMIL KIRSCHBAUM, Karlsruhe¹⁾

Im folgenden werden Versuchsergebnisse über die Wärmeleitung von Graphit- und Porzellanrohren mitgeteilt, welche für stark korrodierende Flüssigkeiten in Frage kommen. Während Graphitrohre Wärmedurchgangszahlen aufweisen, die in der Größenordnung der von Metallrohren liegen, haben die Verdampfer mit Porzellanrohren eine sehr niedrige Leistung.

Die Versuche über den Wärmedurchgang durch Graphit- und Porzellanrohre wurden im Apparatebau-Laboratorium der Technischen Hochschule Karlsruhe an einer seit Jahren für ähnliche Messungen benutzten kleintechnischen Versuchseinrichtung durchgeführt. Diese bestand im wesentlichen aus einem Verdampferbrüdenraum und aus einem außen liegenden senkrechten Heizkörper. In diesen wurden jeweils zwei Versuchsrohre mit 2 m Länge eingebaut. Die Graphitrohre hatten einen Innendurchmesser von 28 mm und einen Außendurchmesser von 49 mm, während die entsprechenden Durchmesser der Rohre aus Porzellan 24,6 und 35,8 mm aufwiesen²⁾. Die bei allen Versuchen aus der Kondensatmenge berechnete Wärmedurchgangszahl ist bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser (arithmetisches Mittel zwischen Innen- und Außendurchmesser) und auf die Einheit des Temperaturgefälles zwischen Kondensationstemperatur t_D des Heizdampfes und Siedetemperatur t_S zu dem jeweils im Brüdenraum herrschenden Druck. Die Versuchseinrichtung und -durchführung sind an anderer Stelle eingehend beschrieben³⁾.

Graphitrohre

Zunächst wurden die Graphitrohre untersucht und der Verdampfer mit Zwangsumlauf betrieben, wobei destilliertes Wasser durch das Innere der Rohre mittels einer Pumpe geschickt wurde, die außen mit Wasserdampf beheizt wurden. In diesem Falle hängt die Wärmedurchgangszahl in hohem Maße von der Wassergeschwindigkeit ab. In Bild 1 ist für eine Heizdampf Temperatur

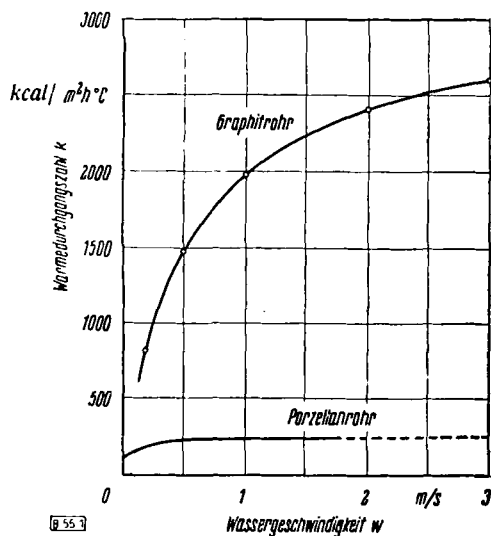


Bild 1

Wärmedurchgangszahl k von Graphit- und Porzellanrohren in Abhängigkeit von der Wassergeschwindigkeit w in den Rohren
Graphitrohr 28/49 mm Dmr. \times 1900 mm Länge
Porzellanrohr 24,6/35,8 mm Dmr. \times 1900 mm Länge

von $t_D = 100^\circ\text{C}$ und für eine mittlere Wassertemperatur von $t_F = 80^\circ\text{C}$ die Wärmedurchgangszahl k [kcal/m²h°C] in Abhängigkeit von der Wassergeschwindigkeit w [m/s] in den Rohren aufgetragen. Es zeigt sich, daß die Wärmedurchgangszahl mit steigender Geschwindigkeit wächst, um bei einer Geschwindigkeit

von $w = 1,5$ m/s einen Wert von $k = 2230$ kcal/m²h°C zu erreichen. Rechnet man aus diesen durch den Versuch erhaltenen k -Werten mit Hilfe bekannter Gleichungen die Wärmeleitzahl λ [kcal/mh°C] für das Graphit, aus dem das Rohr besteht, aus, so ergibt sich ein Wert von $\lambda = 80$ kcal/mh°C. Es sei erwähnt, daß die Wärmedurchgangszahl nach Bild 1 für die Graphitrohre wesentlich höher liegt als diejenige, wie sie bei früheren Versuchen⁴⁾ mit Porzellanrohren und mit Heschotherm-Rohren erhalten worden sind. Für erstere ergab sich für die Wassergeschwindigkeit $w = 1,5$ m/s im Innern der Rohre sowie für ebenfalls von außen mit Wasserdampf beheizte und waagrecht angeordnete Rohre eine Wärmedurchgangszahl $k = 230$ kcal/m²h°C. Dieser Wert beträgt also $1/10$ von demjenigen der Graphitrohre. Für Heschotherm-Rohre liegt bei sonst gleichen Bedingungen die Wärmedurchgangszahl bei $k = 620$ kcal/m²h°C.

Von besonderem Interesse sind die Wärmedurchgangszahlen für selbsttätigen Umlauf, welche für die Graphitrohre in Bild 2 wiedergegeben sind. In ihm ist die Wärmedurchgangszahl k über

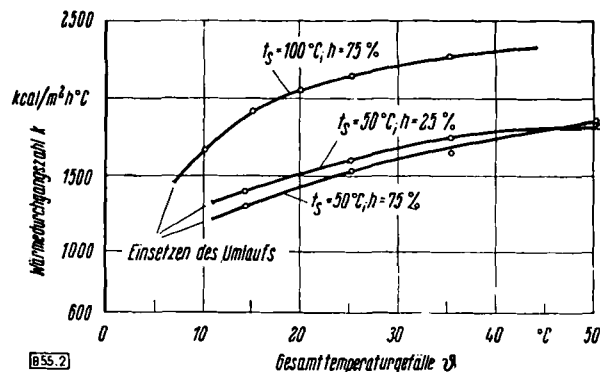


Bild 2

Wärmedurchgangszahl k von Graphitrohren in Abhängigkeit vom Gesamttemperaturgefälle Δ bei verschiedenem scheinbaren Flüssigkeitsstand h und verschiedener Siedetemperatur t_S im Brüdenraum
28,49 mm Dmr. \times 1900 mm Länge

dem Temperaturgefälle $\Delta = t_D - t_S$ aufgetragen. Die oberste Kurve gilt für eine Siedetemperatur $t_S = 100^\circ\text{C}$ und für einen scheinbaren Flüssigkeitsstand von 75%. Es zeigt sich, daß ein Flüssigkeitsumlauf erst bei einem Temperaturgefälle von $\Delta = 7^\circ\text{C}$ sich einstellt und daß die Wärmedurchgangszahl mit steigendem Gefälle zunimmt. Bei $\Delta = 10^\circ\text{C}$ wird $k = 1660$ kcal/m²h°C und bei einem Gefälle von $\Delta = 35^\circ\text{C}$ wird $k = 2270$ kcal/m²h°C.

Wie zu erwarten war, liegen die Wärmedurchgangszahlen bei einer Siedetemperatur von $t_S = 50^\circ\text{C}$ niedriger als bei $t_S = 100^\circ\text{C}$. Gemäß Bild 2 setzt der Umlauf sowohl bei einem scheinbaren Flüssigkeitsstand von $h = 25\%$ als auch $h = 75\%$ bei einem Temperaturgefälle von $\Delta = 11^\circ\text{C}$ ein. Für den erstgenannten Flüssigkeitsstand ergibt sich für $\Delta = 15^\circ\text{C}$ ein Wert $k = 1400$ kcal/m²h°C und für ein Gefälle von 35°C ein Wert k von 1740 kcal/m²h°C. Es kann somit gesagt werden, daß die Graphitrohre Wärmedurchgangszahlen aufweisen, wie sie von Rohren aus Metall bekannt sind.

Porzellanrohre

Wesentlich kleinere Leistungen wurden bei den Versuchen mit Porzellanrohren festgestellt.

¹⁾ An der Durchführung der Versuche waren ehemalige Assistenten des Verfassers, die Herren Dipl.-Ing. Hermann Gmür und Dipl.-Ing. Karl Middendorf beteiligt.

²⁾ Die Graphitrohre lieferte die ehemalige I.G. Farbenindustrie Bitterfeld. Der Baustoff trägt den Namen „Igitur“. Die Porzellanrohre wurden von der Porzellanfabrik Heschel in Hemsdorf (Thüringen) gefertigt.

³⁾ E. Kirschbaum, B. Kränz u. D. Starck, Wärmeübergang in Verdampfapparaten, VDI-Forschungsheft 375, Berlin 1935.

⁴⁾ E. Kirschbaum, Wärmeübergang und Druckverlust in Wärmeaustauschern aus Porzellan, Z. Ver. dtsh. Ing. Beiheft Verfahrenstechnik 1944, S. 6.

In Bild 1 sind die Wärmedurchgangszahlen für Zwangsumlauf eingetragen, während Bild 3 für selbsttätigen Umlauf gilt. Die in Bild 3 eingezeichneten Versuchspunkte ergeben eine Linie, die für eine Siedetemperatur von 50°C erhalten worden ist. Für $t_s = 100^\circ\text{C}$ fällt die Versuchslinie praktisch mit derjenigen für die erstgenannte und niedrigere Siedetemperatur zusammen. Für diese konnte der Flüssigkeitsstand zwischen $h = 50$ und $h = 100\%$ geändert werden, ohne daß dabei verschiedene Meßergebnisse erhalten wurden. Auch der Beginn des Umlaufes war unabhängig

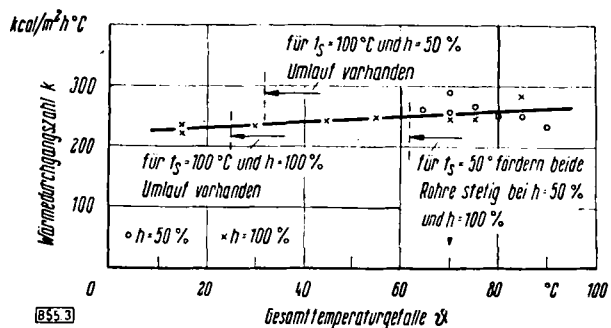


Bild 3

Wärmedurchgangszahl k von Porzellanrohren in Abhängigkeit vom Gesamttemperaturgefälle Δt bei verschiedenem scheinbaren Flüssigkeitsstand h und den Siedetemperaturen $t_s = 50$ und $t_s = 100^\circ\text{C}$ im Brüdenraum
24,6 35,8 mm Dmr. · 1900 mm Länge

von dem Flüssigkeitsstand innerhalb des genannten Bereiches. Der Umlauf setzte für $t_s = 50^\circ\text{C}$ erst bei einem Temperaturgefälle von $\Delta t = 62^\circ\text{C}$ ein. Aber auch dann war der Umlauf noch sehr schwach. Bei kleinerem Temperaturgefälle war kein Umlauf

des siedenden Wassers vorhanden. Praktisch liegen aber diese kleineren Temperaturgefälle vor, so daß der Umlauf bei den praktisch verwendeten Verdampfern mit Porzellanrohren mindestens als schlecht zu bezeichnen ist. Für eine Siedetemperatur von $t_s = 100^\circ\text{C}$ und einen Flüssigkeitsstand von 50% wurde der Beginn des Umlaufes bei einem Temperaturgefälle $\Delta t = 32^\circ\text{C}$ festgestellt und für $t_s = 100^\circ\text{C}$ und für $h = 100\%$ bei einem Gefälle $\Delta t = 25^\circ\text{C}$.

Auch hierbei war der beobachtete Umlauf als sehr schwach zu bezeichnen. Die Förderung der Flüssigkeit in den Rohren war nicht gleichmäßig, sondern stoßweise. Ein starker Umlauf, wie er bei den Graphitrohren beobachtet werden konnte, ergab sich bei den Porzellanrohren überhaupt nicht. Im Hinblick auf den praktischen Betrieb, in dem meist Lösungen einzudampfen sind, ist zu bemerken, daß der schwache, mangelnde oder überhaupt fehlende Umlauf insofern schwerwiegende Nachteile aufweist, als die Lösung in den Rohren eindampft, dort eine höhere Konzentration als im Brüdenraum annimmt, was zu einer Leistungsver schlechterung oder im Grenzfalle zu einem Verkrusten und Zusetzen der Rohre im Innern führen kann.

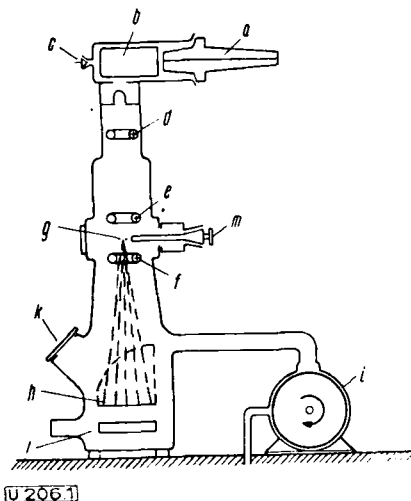
Nach Bild 3 weist die Wärmedurchgangszahl der Porzellanrohre Werte auf, die etwa $\frac{1}{10}$ von denjenigen der Graphitrohre für $t_s = 100^\circ\text{C}$ betragen. Für die Porzellanrohre wurden nämlich bei einem Gefälle von $\Delta t = 15^\circ\text{C}$ ein Wert $k = 225 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ und für ein Gefälle von $\Delta t = 70^\circ\text{C}$ ein Wert $k = 250 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ beobachtet. Diese Wärmedurchgangszahlen sind als sehr niedrig zu bezeichnen.

Die Verdampfer mit Porzellanrohren weisen deshalb eine sehr kleine Leistung auf, oder es ist für eine gegebene Leistung eine sehr große Verdampferanlage erforderlich.

Eingeg. 13. März 1948 [B 55]

Moderner Elektronendiffraktograph

Ein moderner Elektronendiffraktograph, der in der Schweiz von Trüb, Täuber und Co. entwickelt wurde, wird von G. Indun¹⁾ für die industrielle Praxis empfohlen. Gegenüber der Benutzung von Röntgenstrahlen zeichnen sich alle Elektronenbeugungsröhren bei Strukturuntersuchungen durch höhere Empfindlichkeit aus, weil man für Elektronen elektromagnetische Linsen bauen kann, was bei Röntgenstrahlen nicht möglich ist. Die Auswertung von Elektronenbeugungsdiagrammen ist allerdings schwieriger und in den theoretischen Grundlagen noch nicht ganz geklärt. Für die industrielle Verwendung ergeben sich daraus aber keine Schwierigkeiten, weil die hier vorkommenden Materialien untersucht sind und genaue Angaben darüber vorhanden



[U 206.1]

Bild 1. Elektronendiffraktograph

a Entladeröhre; b Kathode; c Lufteinlaß-Ventil; d, e, f elektromagn. Linse; g Präparat; h Leuchtschirm; i Registrierkammer; k Sichtglas; l Molekularpumpe; m Schleuse.

¹⁾ Neue Zürcher Zeitung Nr. 55 vom 25. 2. 1948.

sind, die die Auswertung der Aufnahmen leicht machen. Für das in Bild 1 gezeigte Gerät werden 30 bis 50 kV Hochspannung zum Betriebe gebraucht. Die Entladeröhre a mit horizontaler Kathode b erzeugt 0,05 bis 0,1 mm dicke Elektronen-Strahlbündel, deren Intensität durch Veränderung des Hochvakuums mit einem Luftpfeils-Ventil c geregelt werden kann. Die elektromagnetischen Linsen d und e richten den Elektronenstrahl auf das zu untersuchende Präparat g . Eine dritte Linse f wirkt als „Elektronenlupe“, mit der man wie bei einem Elektronenmikroskop die untersuchte Stelle des Präparates in schwacher Vergrößerung abbilden kann. Das Beugungsbild auf dem Leuchtschirm h kann mit der Registrierkammer i photographiert werden oder durch drei um den Apparat herum angeordnete Sichtgläser k direkt beobachtet werden. Da die Elektronenbeugung bereits durch Schichten von atomarer Dicke hervorgerufen wird, kann zur Evakuierung der Apparatur keine Quecksilber- oder Ölpumpe verwendet werden, sondern nur eine Molekularpumpe l , die gegen eine rotierende Vorvakuumpumpe arbeitet. Die Einführung der Proben erfolgt durch eine Schleuse m , die es gestattet, ohne Aufhebung des Vakuums in jeder Minute eine Untersuchung auszuführen. Für die Untersuchung von Werkstoffoberflächen ist ein besonderer Probenhalter eingebaut, der nach allen Seiten drehbar ist. Die photographischen Platten in der Registrierkammer können ebenfalls durch eine Schleuse ausgewechselt werden, so daß in kontinuierlicher Folge alle 2 min Aufnahmen gemacht werden können. Für Aufnahmeserien benutzt man Filme. Neben der Erforschung der Strukturen von Kristallen, Kristallpulvern, dünnen Oelschichten, Werkstoffen und ihren Oberflächen oder Korrosionsschichten verspricht man sich von den modernen Diffraktographen, daß sie bei der Aufklärung von Oberflächenreaktionen wertvolle Hilfe geben können. Freie Molekeln in der Gasphase können auf ihre Struktur untersucht werden und deren Veränderung bei Adsorption an Oberflächen beobachtet werden. Störend wirkt dabei die bei derartigen Vorgängen auftretende elektrische Aufladung, die dauernd abgeleitet werden muß. Bisher finden solche Oberflächenuntersuchungen an Nylon, Kunstseide, Leder, Lacken, großen Kristallen und Farben statt.

[U 206] -W.