

# ABSOLUTBESTIMMUNG DER WÄRMELEITFÄHIGKEIT VON FLÜSSIGKEITEN—I

## KRITISCHE VERSUCHE AN EINER NEUEN PLATTENAPPARATUR

W. FRITZ und H. POLTZ

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

(Received 9 November 1961)

**Zusammenfassung**—Es wird eine neue Plattenapparatur beschrieben, bei welcher ein stationärer Wärmestrom senkrecht durch eine dünne ebene Flüssigkeitsschicht mit breitem Schutzring von oben nach unten strömt. Mit dieser Versuchseinrichtung wird die Wärmeleitfähigkeit von Wasser bei 25°C und von Methanol bei 20°C gemessen. Die Dicke der Flüssigkeitsschicht wird zwischen 0,5 und 5 mm geändert, die Temperaturdifferenz zwischen 3 und 8 grad. Die Ergebnisse zeigen, dass Konvektion in solchen Schichten früher eintritt, als meist angenommen wird und dass es schwer ist, eine geringere Messunsicherheit als  $\pm 0,5$  Prozent zu erreichen.

### 1. EINLEITUNG

IN DEN bisher vorliegenden Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Flüssigkeiten ist am meisten das stationäre Lamellenverfahren angewendet worden, bei welchem die Wärme senkrecht von oben nach unten durch eine meist nur 1 bis 3 mm dicke horizontale Flüssigkeitsschicht (Lamelle) strömt. Zahlreiche Arbeiten sind auf Wasser als Prüfflüssigkeit beschränkt.

Die erste Untersuchung im grösseren Temperaturbereich (Wasser von 0° bis 80°C) und mit Ergebnissen, die im ganzen noch heute gültig sind, ist von Jakob [1] durchgeführt worden. Für die Güte dieser Arbeit spricht, dass auch die Fehlerabschätzung "auf etwa 1 Prozent" fast richtig gewesen ist; die Werte von Jakob aus dem Jahre 1920 weichen von der neuesten Mittelkurve für die Wärmeleitfähigkeit von Wasser um nicht mehr als  $\pm 2$  Prozent ab. Vergleicht man damit die reale—nicht die oft zu optimistisch abgeschätzte—Messunsicherheit auch in ganz neuen Arbeiten, die günstigstenfalls etwa  $\pm \frac{1}{2}$  bis  $\pm 1$  Prozent betragen mag, so ist der gegenüber den Jakob'schen Versuchen in 40 Jahren erzielte Fortschritt recht gering, vor allem im Hinblick auf die ganz wesentliche Verbesserung der experimentellen Ausrüstung. Als Beispiel sei die sehr sorgfältige Untersuchung von Challoner und Powell [2] erwähnt,

in welcher angegeben wird, dass das benutzte Gerät absolute Werte der Wärmeleitfähigkeit "accurate to within 1 Prozent" liefere.

Im nachstehenden Bericht wird eine neue Apparatur beschrieben, die eine weitergehende Variation der Versuchsbedingungen erlaubt, als es bisher meist möglich war. Diese erste Untersuchung beschränkt sich auf Messungen an zwei Flüssigkeiten (Wasser und Methanol) und verfolgt im wesentlichen die Absicht, die möglichen Fehlerquellen aufzuzeigen, kritisch zu diskutieren und zu zeigen, welche Grenzen der Messunsicherheit für eine zuverlässige Absolutbestimmung offenbar in Kauf genommen werden müssen.

In einem zweiten, später folgenden Bericht sollen vor allem organische Flüssigkeiten behandelt werden.

### 2. GESICHTSPUNKTE FÜR DAS ZU ENTWICKELNDE MESSVERFAHREN

Bei der Auswahl des Messverfahrens wurde es für richtig angesehen, das stationäre Plattenverfahren beizubehalten. Es hat den Vorteil einfacher und übersichtlicher geometrischer Verhältnisse und damit zuverlässiger Bestimmung der Abmessungen. Ausserdem erlaubt es am einfachsten eine Variation der Schichtdicke, die ein wesentlicher Punkt der vorliegenden

Untersuchung ist. Nach folgenden Richtlinien wurde vorgegangen:

2.1 Die Flüssigkeitsmessschicht von etwa 122 mm Durchmesser sollte durch einen Schutzring der gleichen Flüssigkeit von 35 mm Breite gegen Wärmeverluste nach aussen abgeschützt sein. Sie hat daher keine freie Oberfläche und wird von keiner störenden Verdunstung beeinflusst.

2.2 Die Schichtdicke sollte in Grenzen zwischen 0,5 und 5 mm variabel sein. Es war zu erwarten, dabei ein Bild vom Einfluss der Konvektion auf die Wärmeleitung zu gewinnen. Ausser der Schichtdicke sollte innerhalb vernünftiger Grenzen das Temperaturgefälle in der Flüssigkeitsschicht geändert werden können.

### 3. DIE VERSUCHSEINRICHTUNG

In Abb. 1 ist der Hauptteil der Messapparatur dargestellt. Die zu untersuchende Flüssigkeit befindet sich in Form einer dünnen ebenen Schicht in dem horizontalen Spalt A zwischen zwei ebenen Kupferplatten B und K. Die plangeschliffene und geläppte Kühlplatte B aus Kupfer von 8 mm Dicke gehört zum Unterteil der Apparatur und ist auf einen flachen, starkwandigen, im Innern mit Leitrippen für die Kühlflüssigkeit versehenen Messingtopf C aufgelötet. C wird von Kühlwasser aus einem Ultrathermostaten durchflossen. An der oberen Kante des Unterteils ist eine ringförmige Überlaufrinne D angelötet.

Zum Oberteil der Apparatur gehören die Heizplatte E und die Schutzhaube F. Die Heizplatte wurde aus einer Kupferscheibe G (Abb. 2) hergestellt, die bis auf einen 1 mm dicken Randring 2,5 mm tief ausgedreht ist; der so entstandene Raum dient zur Aufnahme der Heizwicklung H aus 0,5 mm starkem Chromnickeldraht, der mit Teflonschlauch isoliert und in ein dünnes Kupferrohr eingezogen ist. Nach dem Einbringen der vorbeschriebenen Heizwicklung wurde der Innenraum der Kupferplatte G zur Verbesserung des Wärmekontaktes vollständig mit Zinn (Sn) ausgegossen (vgl. Abb. 2). Der Wicklungsraum ist durch eine Kupferplatte von 4 mm Dicke abgeschlossen (Gesamtdicke der Heizplatte 10 mm, Durchmesser 122 mm).

Die Schutzhaube F überdeckt die Heizplatte E an der oberen Stirnfläche wie am Rand voll-

ständig und endet in einem 35 mm breiten Schutzring L. Die Unterfläche K der Heizplatte E und die ebenfalls plangeschliffene und geläppte Unterfläche des Schutzringes L liegen in einer Ebene. Der Innenraum J der Schutzhaube ist mit Leitblechen versehen und wird von Wasser aus einem zweiten Ultrathermostaten durchströmt. Heizplatte und Schutzhaube sind mit Hilfe von kleinen Abstandstücken aus Eternit M durch Luftspalte getrennt (Abb. 2). Die Spaltweite an der oberen Stirnfläche beträgt 2 mm, am kreisförmigen Randspalt O nur 1 mm. Mittels dreier 0,3 mm starker Stahldrähte N (Abb. 1), die durch enge Bohrungen im Oberteil der Schutzhaube hindurchführen, wird der Heizkörper fest gegen die Abstandstücke zwischen Heizkörper und Schutzhaube gepresst, so dass das ganze Oberteil mit der Heizplatte ein starres System bildet.

Um ein Eindringen von Flüssigkeit in den ringförmigen Randspalt O zwischen Heizplatte E und Schutzhaube F zu verhindern, wurde dieser durch einen angelöteten Ring P aus 0,05 mm starkem Neusilberblech überbrückt (Abb. 2). Die Kanten der beiden Teile wurden vorher ein wenig ausgedreht, damit der Neusilberring nicht über die untere Fläche von Heizkörper und Schutzhaube hinausragt. Daraufhin wurde die gesamte untere Fläche nochmals plangeschliffen und geläpft.

An den unteren Aussenrand wurde ein nach unten weisender Ring R aus Messingblech angelötet, derart, dass dieser Rand bei zusammengesetzter Apparatur in die Mitte der Rinne D hineinragt. Diese Anordnung wirkt nach dem Einfüllen der Flüssigkeit in den Messpalt als Flüssigkeitsdichtung. Man hat damit zwei Vorteile erreicht: Die Flüssigkeitlamelle zwischen den Kupferplatten muss nicht wie bei manchen früheren Apparaturen durch die Grenzflächenkräfte am Rand (Randmeniskus) festgehalten werden, was besonders bei organischen Flüssigkeiten Schwierigkeiten bereitet; ausserdem ist die Verdunstung am Rand nur gering und geht ganz zu Lasten der Schutzheizung; sie braucht daher nicht als Wärmeverlust berücksichtigt zu werden. Aufgrund der vorbeschriebenen Anordnung darf man sich die gesamte Flüssigkeitsschicht in eine Messlamelle von 122 mm Durchmesser in der Mitte und in

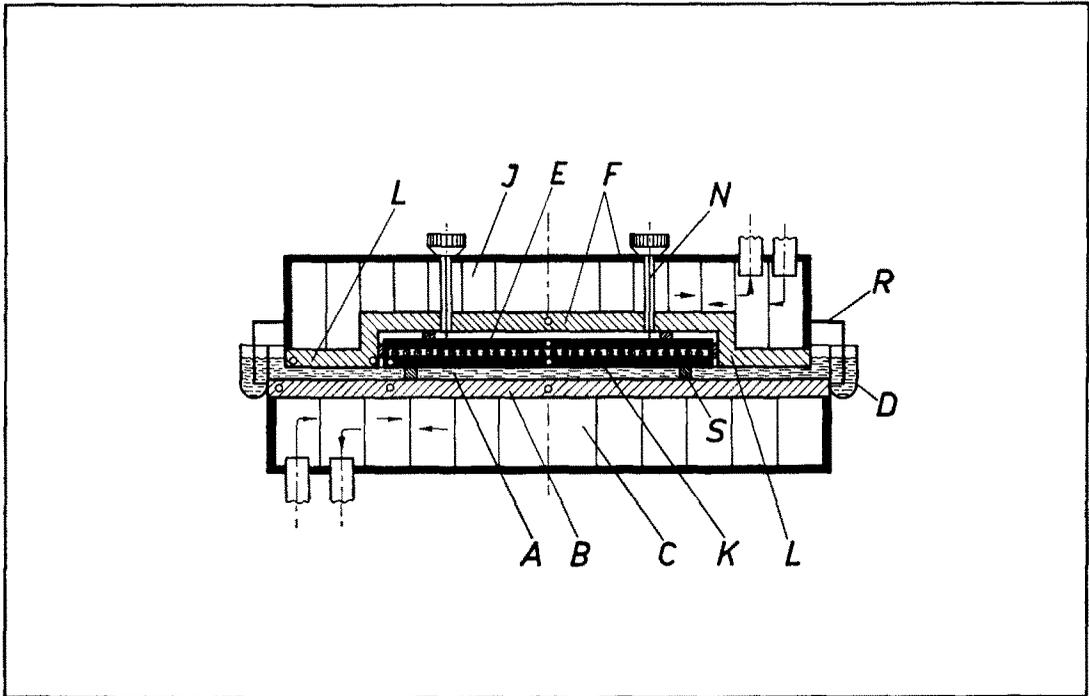


ABB. 1. Versuchseinrichtung

- A, Flüssigkeitlamelle;
- B, Kühlplatte;
- C, Kühlgefäß;
- D, Überlaufrinne;
- E, Heizplatte;
- F, Schutzhaube;

- J, Innenraum der Schutzhaube;
- K, Kupferplatte (zur Heizplatte gehörig);
- L, Schutzring;
- N, Spanndraht;
- R, Abschlussring;
- S, Distanzstücke aus Glas.

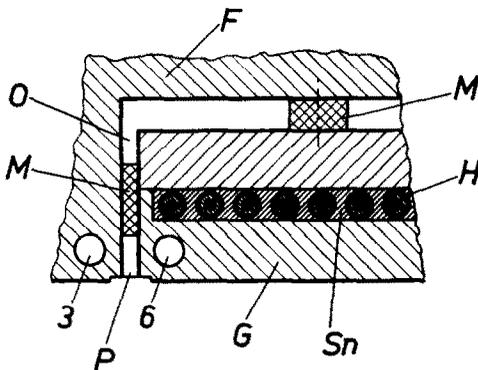


ABB. 2. Schnitt durch die Heizplatte

- G = K (Abb. 1.), untere Kupferplatte der Heizplatte E;
  - H, Heizwicklung;
  - M, Distanzstücke aus Eternit;
  - O, Randspalt;
  - P, Neusilberbrücke.
- 6-3 Temperaturmessstellen.

eine Schutzringlamelle von 35 mm Breite (Aussendurchmesser 195 mm) aufgeteilt vorstellen. Die Schutzringlamelle wird vom gleichen Wärmestrom durchflossen wie die Messlamelle (gleiche Temperaturdifferenz zwischen den Kupferplatten am Rand L und in der Mitte). Es ist somit dafür gesorgt, dass in der Messlamelle ein verzerrungsfreies, homogenes, d.h. verlustfreies Temperaturfeld herrscht.

Die Schichtdicke der untersuchten Flüssigkeit war jeweils durch drei gleich dicke Distanzstücke von 4,1 mm Durchmesser aus Geräteglast 20 gegeben. Es standen insgesamt sechs Sätze von Distanzstücken zur Verfügung mit Dicken von 0,5 bis 5 mm; sie waren planparallel geschliffen und stimmten für jeden Satz in der Dicke auf  $\pm 1\mu\text{m}$  überein. Sie wurden von Zeit zu Zeit neu vermessen, um der Abnutzung Rechnung zu tragen. Die Dicke der Flüssigkeits-

schicht wurde gleich der mittleren Dicke der Distanzstücke angenommen. Dies erschien als zulässig und zweckmässig aufgrund von Messungen der Oberflächenrauigkeit der geläpften Kupferoberflächen und der mit Hilfe eines Mikroskops gemachten Beobachtung, dass die Rauigkeitserhebungen der Kupferoberfläche durch den Andruck der Glasoberfläche abgeflacht wurden.

Der Unterteil der Apparatur ist fest auf einem runden, auf drei Stellschrauben ruhenden Metalltisch montiert, der auch eine gewisse Schrägstellung der Apparatur ermöglicht. Durch die Platte des Metalltisches sind die Zuleitungen für die Heizung und für neun Thermoelemente vakuumdicht hindurchgeführt. Über die ganze Apparatur ist eine mit zwei Schaugläsern ausgestattete Metallglocke gestülpt, so dass der Raum unter der Glocke evakuiert werden kann.

#### 4. MESSEINRICHTUNGEN

Für die Temperaturmessung waren geeichte Kupfer-Konstantan-Thermoelemente Nr. 1–9 eingebaut. Diese wurden in kürzeren Zeitabständen bei innerhalb der Apparatur überall gleicher Temperatur miteinander verglichen, um die Messunsicherheit der in die Auswertung der Messungen eingehenden Temperaturdifferenzen durch Anbringen entsprechender kleiner Korrekturen zu verringern.

Die Lage der Thermoelemente geht aus Abb. 1 und 2 hervor. Es sind zur Messung der jeweiligen Temperatur eingebaut:

3 Thermoelemente in die Heizplatte, 3 in die Kühlplatte, 3 in die Schutzhaube.

Die Spannung der Thermoelemente wurde unter Anwendung der Kompensationsschaltung nach Lindeck und Rothe und unter Benutzung eines Spiegelgalvanometers mit einer Empfindlichkeit von  $0,7 \text{ mm}/\mu\text{V}$  als Nullinstrument an einem geprüften Präzisionsdrehspulinstrument abgelesen.

Die Heizleistung (Wärmestrom) wurde aus den mit geprüften Präzisionsdrehspulinstrumenten gemessenen Grössen Spannung und Stromstärke berechnet. Der Nebenschluss für die Spannungsmessung zweigte unmittelbar am Eintritt der Heizzuleitungen in den Heizkörper ab. Zuleitungen und Heizdraht waren so dimen-

sioniert, dass der Wärmefluss durch die Zuleitungen bei der Berechnung der Wärmeleitfähigkeit nicht berücksichtigt zu werden brauchte.

#### 5. DURCHFÜHRUNG DER VERSUCHE

Vor dem Einfüllen der Flüssigkeit in den Messpalt wurde der Raum unter der Vakuumglocke mit einer Ölrotationspumpe evakuiert, so dass sich die Messapparatur in einem Vakuum von einigen Torr befand. Nach dem Absperren der Pumpleitung und Schrägstellen des Tisches erfolgte das Füllen mit der vorher völlig entgasen Flüssigkeit durch ein eingelötetes Metallrohr, das an der tiefsten Stelle in den Messpalt einmündete. Durch die Schaugläser der Vakuumglocke konnte das Einlaufen Flüssigkeit in die Überlaufrinne beobachtet und damit die vollständige Füllung des Messpalt fest festgestellt werden.

Das Einfüllen der Messflüssigkeit unter Vakuum brachte vor allem den wichtigen Vorteil, dass bei sehr zähen Flüssigkeiten keine Gasblasen in der Flüssigkeitsschicht auftraten. Nach Inbetriebnahme der Heizung, Einregelung aller Temperaturen und dem Erreichen des stationären Zustandes wurde unter Beobachtung der Temperatur an der Kupferplatte K Luft bis zum Ausgleich mit der normalen Atmosphäre in die Vakuumglocke eingelassen. Etwa vorhandene Blasen hätten sich hierbei stark verkleinert, was eine Erhöhung des bereits stationären Wärmestromes durch die Flüssigkeitsschicht und damit ein Absinken der Temperatur von K bewirkt hätte. Aus der Unveränderlichkeit dieser Temperatur beim Lufteinlassen wurde daher auf ausreichende Blasenfreiheit geschlossen.

Merkliche Verdunstungsverluste der eingefüllten Flüssigkeit traten wegen des Abschlusses durch die Metallglocke während der Messungen nicht auf, vgl. Abschnitt 3.

Bei den ersten Versuchen wurde festgestellt, dass aus den mit schnelllaufenden Pumpen arbeitenden Ultrathermostaten auf das Versuchsgerät Erschütterungen übertragen wurden, welche die Messergebnisse beeinflussen. In der Folge wurden das Versuchsgerät und die Thermostaten getrennt auf Schaumgummi gelagert; eine Verbindung besteht nur noch über die wasserführenden Gummischläuche.

Um eine möglichst gute Konstanz der Tem-

peratur der für die kältere Seite verwendeten Thermostatenflüssigkeit zu erreichen, wurde der diese Seite speisende Thermostat nicht unmittelbar mit Leitungswasser, sondern mit der Flüssigkeit eines zweiten, auf eine ein wenig kältere Temperatur eingestellten Hilfsthermostaten gekühlt.

Jede Messreihe bestand aus sechs innerhalb einer Stunde in gleichen Zeitabständen durchgeführten Ablesungen der Spannungen sämtlicher Thermoelemente und der Heizleistung. Die Ablesungen wurden stets in der Reihenfolge der Elemente 1–9 und dann nach Kommutieren in entgegengesetzter Reihenfolge durchgeführt, um etwa an Kontaktstellen auftretende unerwünschte Thermospannungen zu eliminieren. Um sicherzustellen, dass bei den Messungen jeweils der stationäre Zustand erreicht war, wurden mit demselben Einbau mehrere Messreihen nacheinander ausgeführt. Ferner wurden die Messungen für alle Schichtdicken bei zwei Füllungen mit der gleichen Flüssigkeit (zwei Einbauten) wiederholt.

## 6. VERBLEIBENDE WÄRMEVERLUSTE UND IHRE KORREKTION

Bei der Einregelung der für die Messung massgebenden Temperaturen wurde angestrebt, dass alle Temperaturen in der Heizplatte und längs der Schutzhaube möglichst gleich sind. In Wirklichkeit verbleiben stets kleine Temperaturdifferenzen, die geringe zwischen Heizplatte und Schutzhaube übergehende Wärmeströme zur Folge haben. Sie können aber z.B. aus den Abmessungen des Spaltes zwischen beiden und den bekannten Wärmeleitzahlen der den Spalt ausfüllenden Luft und der Abstandstücke aus Eternit berechnet werden und sind von der gemessenen Heizleistung abzuziehen. Im einzelnen treten auf

6.1 Wärmestrom zwischen der oberen Stirnfläche der Heizplatte E und der Schutzhaube durch den Luftspalt von 2 mm Dicke und die kleinen Abstandstücke aus Eternit (M, Abb. 2), zu berechnen mit Hilfe der Wärmeleitfähigkeit der Luft (bei rd. 28°C):  $\lambda = 0,0225 \text{ kcal/m h grad}$  und der des Eternits  $\lambda = 0,6 \text{ kcal/m h grad}$ .

6.2 Wärmestrom zwischen dem ringförmigen Rand der Heizplatte und dem Rand der Schutzhaube (vgl. Abb. 2) infolge einer kleinen Tem-

peraturdifferenz, zu berechnen aus den Abmessungen des Luftspaltes O (1 mm breit) und denen der kleinen Abstandstücke M aus Eternit.

6.3 Wärmestrom zwischen der Heizplatte und dem Schutzring L durch die Neusilberbrücke P, zu berechnen aus der Differenz der Thermoelemente 6 und 3 (Abb. 2) und den Abmessungen der Brücke (1 mm lang), vgl. den letzten Absatz von Abschnitt 6.

6.4 Wärmestrom durch die drei Distanzstücke L aus Glas (4,1 mm Durchmesser) zwischen Heiz- und Kühlplatte. Die Distanzstücke aus Glas wurden zur Verbesserung des Wärmekontaktes stets mit ein wenig Glycerin an die Kupferplatten angekoppelt. Der durch das Glas fließende Wärmestrom lässt sich aus den Abmessungen der Distanzstücke und aus der gemessenen Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Glases ( $\lambda = 1,02 \text{ kcal/m h grad}$ ) berechnen. Die Messfläche wurde um die Fläche der Glasdistanzstücke vermindert.

6.5 Temperaturdifferenz zwischen den Temperaturmessstellen in den Bohrungen von Heizplatte und Kühlplatte und der Oberfläche beider Kupferplatten, zu berechnen aus der Wärmeleitfähigkeit des Kupfers und dem Abstand zwischen der Mitte der Bohrungen und der Oberfläche.

6.6 Ausser den bisher genannten Korrekturen muss folgender Punkt noch beachtet werden: Auch aus der Neusilberbrücke P, die den Spalt zwischen den Unterflächen von Heizplatte und Schutzring L abdeckt, fließt der gleiche Wärmestrom zur Kühlplatte wie aus der Heizplatte bzw. aus dem Schutzring L. Diese Annahme erscheint korrekt, weil die Temperaturdifferenz in der dünnen Neusilberbrücke für den Zustrom dieser Wärme aus Heizplatte bzw. Schutzring verschwindend klein ist, so dass die Neusilberbrücke die gleiche Temperatur hat wie die Heizfläche K und der Schutzring L. Es kann daher angenommen werden—wie es bereits M. Jakob getan hat—dass dieser Wärmestrom zur Hälfte von der Heizplatte und zur Hälfte von der Schutzhaube einströmt. Er kann direkt berechnet oder ebenso exakt dadurch berücksichtigt werden, dass als effektive Leitungsfläche nicht die Oberfläche der Heiz-

platte, sondern die um die halbe Spaltfläche vermehrte Fläche eingesetzt wird. Es bedeutet dies eine Korrektur von der Größenordnung von rd. 1 Prozent.

Die Richtigkeit dieser Korrekturen wurde durch Versuche nachgeprüft, bei welchen sich anstelle der Flüssigkeit Luft im Spalt befand, wobei zwischen der Heizplatte und der Schutzhaube verschiedene grosse Temperaturdifferenzen künstlich eingeregelt wurden. Durch zusätzliche Veränderung der Dicke der Luftschicht, ähnlich wie bei den Flüssigkeiten, erhielten wir aus diesen Messungen den bekannten Wert der Wärmeleitfähigkeit für Luft nach Abzug des Anteils für Wärmestrahlung. Der Gesamtemissionsgrad der Kupferflächen B und K war für den vorliegenden Temperaturbereich experimentell zu etwa  $\epsilon = 0,06$  ermittelt worden.

Die vorstehend beschriebenen Messungen wurden auch vor der Anbringung der Neusilberbrücke P zwischen Heizplatte E und Schutzring L durchgeführt und nach dem Zusammenbau wiederholt. Aus den beiden Messfolgen konnte der Wärmeleitungswiderstand der Neusilberbrücke kontrolliert und damit bei den Messungen an Flüssigkeiten der durch die Brücke fließende kleine Wärmestrom aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten der Brücke sicher ermittelt werden (vgl. Abb. 2).

## 7. MESSERGEBNISSE

Für die ersten Messungen mit der neuen Apparatur wurden Wasser und Methanol  $\text{CH}_3(\text{OH})$  ausgewählt. Wegen der hohen Ultraabsorption dieser Stoffe darf mit einiger Sicherheit erwartet werden, dass ein zusätzlicher Energietransport durch die Flüssigkeitsschicht hindurch infolge Wärmestrahlung im Temperaturbereich der Versuche vernachlässigbar ist (Emissionsgrad der Kupferplatten  $\epsilon = 0,06$ ). Deshalb gilt für die Auswertung:

$$\lambda = \frac{(\varphi - \Sigma v) \cdot s}{A \cdot \Delta t}$$

Dabei ist

- $\varphi$ , der elektrisch gemessene Wärmestrom,
- $\Sigma v$ , die Summe aller Verlustströme 6.1 bis 6.4,
- $A$ , die Messfläche, korrigiert nach 6.6
- $s$ , die Schichtdicke,

- $\Delta t$ , die Temperaturdifferenz zwischen den Oberflächen K und B (Abb. 1) und,
- $\lambda$ , die Wärmeleitfähigkeit.

Für die Hauptversuche mit  $\Delta t = 5$  grad ist in allen Fällen bis auf 3 Versuche  $\Sigma v < 1$  Prozent.

### 7.1 Wärmeleitfähigkeit von Wasser

Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser wurde bei allen Versuchen bei  $25,0^\circ\text{C}$  mit der Temperaturdifferenz  $\Delta t = 5$  grad für Schichtdicken  $s = 0,5, 1, 1,5, 2, 3$  und  $5$  mm, und für zwei Einbauten gemessen. In Abb. 3 sind die erhaltenen Werte in Abhängigkeit von der Schichtdicke dargestellt. Jeder Punkt in Abb. 3 ist ein Mittelwert aus 3 bis 4 Einzelergebnissen; um dieses Diagramm besser zu verstehen, sind in Tabelle 1 für die Versuche mit  $\Delta t = 5$  grad alle gemessenen 37

Tabelle 1. Messwerte für die Wärmeleitfähigkeit von Wasser für die Temperaturdifferenz  $\Delta t \approx 5$  grad bei verschiedenen Schichtdicken

| Schichtdicke $s$<br>(mm) | Wärmeleitfähigkeit $\lambda$<br>(kcal/m h grad) |                    |                    |                    |
|--------------------------|---|--------------------|--------------------|--------------------|
|                          | 1. Einbau                                       |                    | 2. Einbau          |                    |
|                          | Einzelwerte                                     | Mittelwert         | Einzelwerte        | Mittelwert         |
| 0,499                    | 0,525 <sub>3</sub>                              |                    | 0,523 <sub>1</sub> |                    |
|                          | 0,520 <sub>8</sub>                              |                    | 0,524 <sub>7</sub> |                    |
|                          | 0,522 <sub>5</sub>                              | 0,522 <sub>9</sub> | 0,523 <sub>3</sub> | 0,523 <sub>7</sub> |
|                          |   |                    |                    |                    |
| 0,978                    | 0,522 <sub>2</sub>                              |                    | 0,523 <sub>5</sub> |                    |
|                          | 0,523 <sub>1</sub>                              |                    | 0,523 <sub>3</sub> |                    |
|                          | 0,523 <sub>1</sub>                              | 0,522 <sub>8</sub> | 0,519 <sub>7</sub> | 0,522 <sub>2</sub> |
| 1,491                    | 0,523 <sub>2</sub>                              |                    | 0,523 <sub>1</sub> |                    |
|                          | 0,526 <sub>6</sub>                              |                    | 0,523 <sub>5</sub> |                    |
|                          | 0,522 <sub>0</sub>                              | 0,523 <sub>9</sub> | 0,520 <sub>7</sub> | 0,522 <sub>4</sub> |
| 1,950                    | 0,524 <sub>4</sub>                              |                    | 0,525 <sub>0</sub> |                    |
|                          | 0,522 <sub>2</sub>                              |                    | 0,524 <sub>2</sub> |                    |
|                          | 0,524 <sub>3</sub>                              | 0,523 <sub>0</sub> | 0,525 <sub>4</sub> | 0,524 <sub>9</sub> |
| 2,999                    | 0,529 <sub>8</sub>                              |                    | 0,527 <sub>4</sub> |                    |
|                          | 0,525 <sub>0</sub>                              |                    | 0,529 <sub>6</sub> |                    |
|                          | 0,527 <sub>4</sub>                              |                    | 0,525 <sub>2</sub> | 0,527 <sub>4</sub> |
|                          | 0,525 <sub>3</sub>                              | 0,526 <sub>9</sub> |                    |                    |
| 5,004                    | 0,535 <sub>1</sub>                              |                    | 0,533 <sub>0</sub> |                    |
|                          | 0,535 <sub>7</sub>                              |                    | 0,535 <sub>7</sub> |                    |
|                          | 0,536 <sub>1</sub>                              | 0,535 <sub>6</sub> | 0,534 <sub>1</sub> | 0,534 <sub>3</sub> |

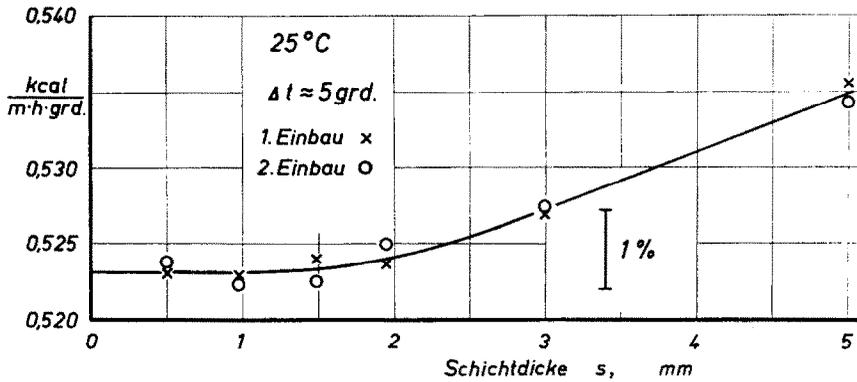


ABB. 3. Gemessene Werte der Wärmeleitfähigkeit von Wasser bei  $25^{\circ}\text{C}$  in Abhängigkeit von der Schichtdicke. Aufgetragen sind die Mittelwerte für jede Schichtdicke nach Tabelle 1.

Einzelwerte aufgeführt. Um noch zu prüfen, wie weit eine Änderung der Temperaturdifferenz  $\Delta t$  die Ergebnisse beeinflusst, wurden gleichartige Versuche mit  $\Delta t = 3 \text{ grad}$  und  $\Delta t = 8 \text{ grad}$  durchgeführt (Abb. 4): Alle drei Kurven haben offenbar einen waagerechten Ast, der der Wärmeleitfähigkeit des Wassers entspricht; für grössere Schichtdicken steigt der gemessene effektive Wert der Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda_{\text{eff}}$ ) infolge der beginnenden Konvektion kräftig an.

Als Kriterium für beginnende Konvektion benutzt man gewöhnlich den bekannten Grenzwert der Rayleigh-Zahl  $Ra = GrPr < 1000$ ;

dieser gilt für den Fall, dass die ebene Flüssigkeitsschicht von unten beheizt wird. Man darf daher den Schluss ziehen, dass bei den vorliegenden Versuchen (mit umgekehrtem Temperaturgefälle, Heizplatte oben) mit Sicherheit keine Konvektion zu befürchten ist, wenn man selbst in diesem den Konvektionseinfluss sehr erschwerenden Fall unterhalb des Grenzwertes  $GrPr < 1000$  bleibt; z.B. ist beim Versuchsfall  $s = 2 \text{ mm}$ ,  $\Delta t = 5 \text{ grad}$  der Wert  $GrPr = 740$ ; für diese Schichtdicken und darunter ist man also sicher.

Ob die höheren Werte für  $\lambda$  bei  $\Delta t = 8 \text{ grad}$

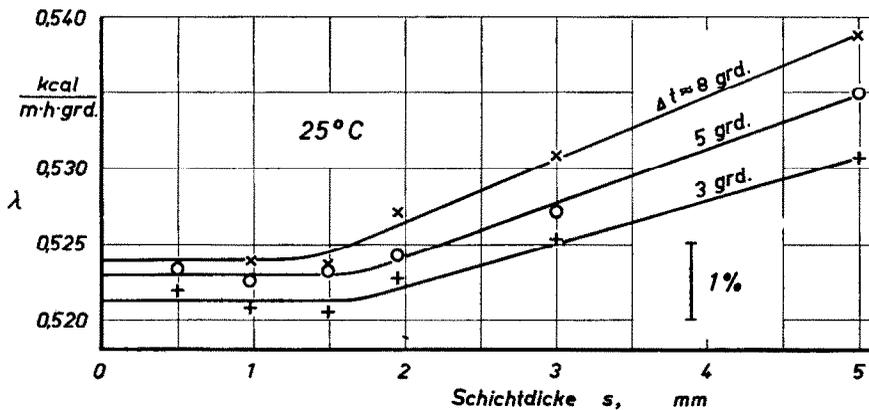


ABB. 4. Gemessene Werte der Wärmeleitfähigkeit von Wasser für verschiedene Schichtdicken und Temperaturdifferenzen.

ebenfalls auf beginnende Konvektion hindeuten oder in die Grenzen der Versuchsstreuung fallen, bleibe dahingestellt. Der Einfluss ist nicht sehr gross;  $\lambda$  steigt von  $0,521_2$  auf  $0,523_8$  kcal/m h grd—das sind etwa 0,5 Prozent Zunahme—zwischen  $\Delta t = 3$  und  $\Delta t = 8$  grd. Zweifellos sollte man aber eine Temperaturdifferenz von 8 grd bei solchen Messungen möglichst nicht mehr anwenden, wie es die meisten Verfasser auch getan haben. Als Ursache einer—wenn auch geringen—Konvektion können ferner kleine Temperaturdifferenzen längs der Heizfläche angenommen werden. Ohne Zweifel beginnen kleine Konvektionsbewegungen bereits viel früher als normalerweise angenommen wird.

Unter Berücksichtigung aller dieser Gesichtspunkte wird nach den Messungen mit  $\Delta t = 5$  grd für die Wärmeleitfähigkeit von Wasser bei  $25,0^\circ\text{C}$  als wahrscheinlichster Wert  $\lambda = 0,523$  kcal/m h grd  $\pm 0,5$  Prozent angenommen. Eine übersichtliche Darstellung der von anderen Autoren gemessenen Werte für die Wärmeleit-

fähigkeit von Wasser mit den entsprechenden Literaturangaben findet sich bei Challoner und Powell [2].

Eine genauere Analyse der Untersuchungen über die Wärmeleitfähigkeit von Wasser zeigt, dass im grossen und ganzen die älteren Werte etwas tiefer liegen und die neueren Messungen fast alle etwas höher. Die etwa ab 1950 erschienenen Veröffentlichungen sind in Abb. 5 eingetragen, in welcher auch der neue Wert aufgezeichnet ist; der letzte stimmt gut mit den bisherigen Ergebnissen überein, wahrscheinlich liegen die Werte von Challoner und Powell (Kurve in Abb. 5) ein wenig zu hoch. Die Versuchswerte von Schmidt und Leidenfrost [10] liegen ein wenig tiefer, sind aber gut verträglich mit dem neuen Wert innerhalb der Grenzen der beiderseitigen Messunsicherheiten.

### 7.2 Wärmeleitfähigkeit von Methanol

Die Messungen an Methanol wurden bei einer mittleren Temperatur von  $20,0^\circ\text{C}$  und einer Temperaturdifferenz von  $\Delta t = 5$  grd in gleicher

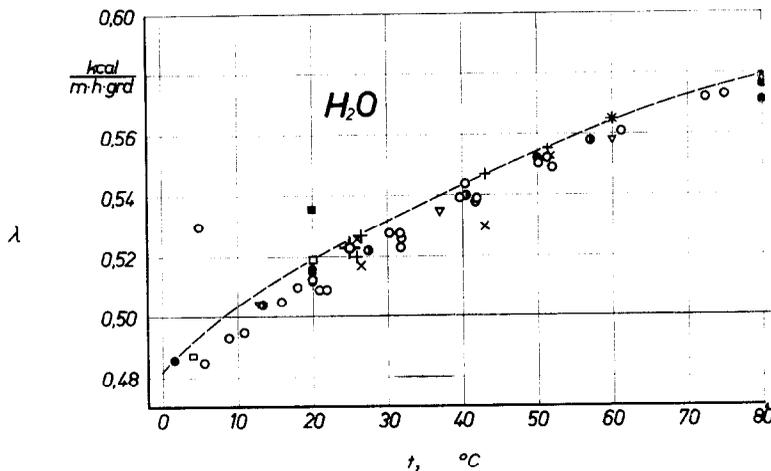


ABB. 5. Versuchswerte der Wärmeleitfähigkeit von Wasser nach verschiedenen Verfassern

- |  |  |
|--|--|
| ○, Schmidt und Mitarbeiter [3, 4, 10]; | * , Dick und McCready [9];                   |
| ●, Riedel [5];                         | □, Gillam und Lamm [11];                     |
| + ×, Challoner, Gundry und Powell [13] | ■, van der Held, Hardebol und Kalshoven [8]; |
| (+ Plattenapparatur,                   | ●, Meyer und Eigen [7];                      |
| × Zylinderapparatur)                   | ▽, van der Held und van Drunen [6],          |
| — — —, Kurve Challoner und Powell [2]  | ◇, eigene Versuche.                          |

Weise wie bei Wasser durchgeführt. Der Wassergehalt des benutzten Methanols lag unter 2‰. Er dürfte die Messwerte nicht merklich beeinflusst haben. Der Verlauf der gemessenen Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Schichtdicke ist in Abb. 6 dargestellt. Die Kurve zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die für Wasser. Der Anstieg der Kurve beginnt bereits bei der Schichtdicke  $s = 1$  mm; er ist für grössere

Schichtdicken wesentlich steiler als bei Wasser. Dies ist wegen der geringeren Zähigkeit des Methanols ( $\eta = 0,59$  cP bei 20°C) zu erwarten: einmal ist der Betrag der Konvektion grösser je kleiner  $\eta$  ist; zum anderen ist der relative Konvektionsanteil am Wärmetransport bei gleicher Schichtdicke wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit grösser.

Den Messergebnissen der Abb. 6 wird für die

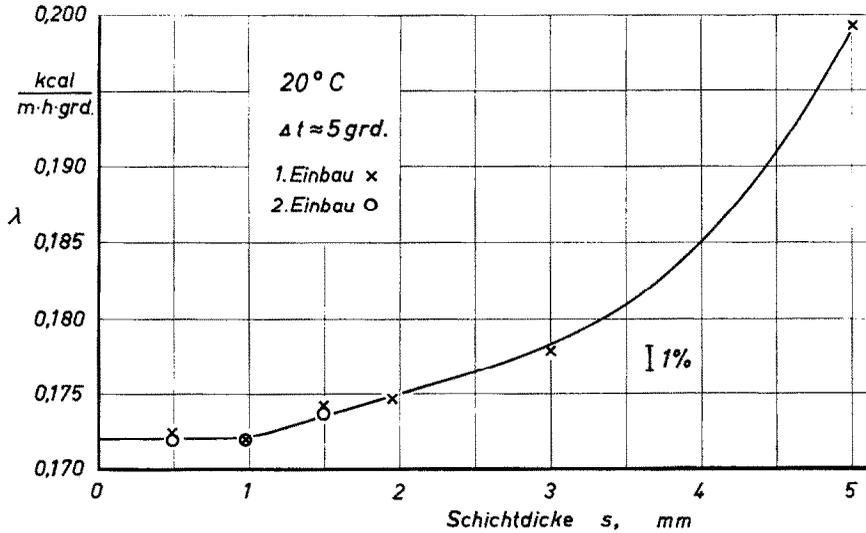


ABB. 6. Gemessene Werte der Wärmeleitfähigkeit von Methanol bei 20°C. Einfluss der Schichtdicke.

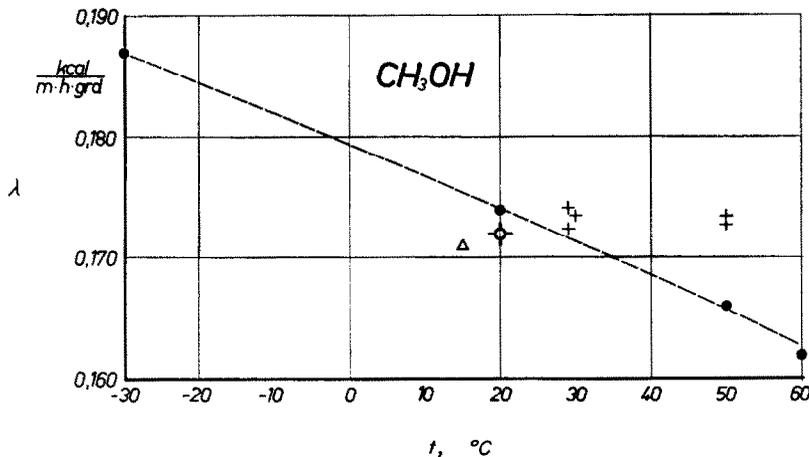


ABB. 7. Versuchswerte der Wärmeleitfähigkeit von Methanol nach verschiedenen Verfassern

●, Riedel 1951 [5];

Δ, van der Held und van Drunen [6];

+ , Mason [12];

⊙, eigene Versuche.

Wärmeleitfähigkeit von Methanol bei 20,0°C als wahrscheinlichster Wert  $\lambda = 0,172$  kcal/m h grd  $\pm 0,5$  Prozent entnommen. In neuerer Zeit wurden gemessen von van der Held und van Drunen [6] der Wert 0,171 bei 15,1°C, von Riedel [5] (1951)  $\lambda = 0,174$  bei 20,0°C und von Mason [12] 0,1735 kcal/m h grd bei 20°C, vgl. Abb. 7.

Auch Dick und McCready [9] haben bei ihren Versuchen an organischen Flüssigkeiten die Schichtdicke variiert ( $s = 0,6$  bis 2,2 mm). Sie fanden eine ziemlich starke lineare Zunahme des gemessenen Wertes von  $\lambda$  mit  $s$  (etwa 8 Prozent). Über analoge Ergebnisse an strahlungsdurchlässigen organischen Flüssigkeiten wird im II. Teil der Untersuchung berichtet werden.

Dem technischen Reg.-Obersekretär Jugel sei an dieser Stelle für den sorgfältigen Bau der Apparatur und seine umsichtige Mitarbeit bei den Messungen besonderer Dank ausgesprochen.

## LITERATUR

1. M. JAKOB, *Ann. Phys.* (IV) **63**, 537 (1920).
2. A. R. CHALLONER und R. W. POWELL, *Proc. Roy. Soc. A* **238**, 90 (1956).
3. E. SCHMIDT und W. SELLSCHOPP, *Forsch. Ing.-Wes.* **3**, 277 (1932).
4. E. SCHMIDT und R. SCHMIDT, *Jahrb. 1939 der Deutschen Luftfahrtforschung* II, S. 59.
5. L. RIEDEL, *Forsch. Ing.-Wes.* **11**, 340 (1940).  
L. RIEDEL, *Chem.-Ing.-Tech.* **21**, 340 (1949).  
L. RIEDEL, *Chem.-Ing.-Tech.* **23**, 321 (1951).
6. E. F. M. VAN DER HELD und F. G. VAN DRUNEN, *Physica* XV, S. 865 (1949).
7. F. MEYER und M. EIGEN, *Z. Naturf.* **8a**, 500 (1953).
8. E. F. M. VAN DER HELD, J. HARDEBOL und J. KALSHOVEN, *Physica* XIX, S. 208 (1953).
9. M. F. DICK und D. W. MCCREADY, *Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs* **76**, 831 (1954).
10. E. SCHMIDT und W. LEIDENFROST, *Forsch. Ing.-Wes.* **21**, 176 (1955).
11. D. G. GILLAM und O. L. LAMM, *Acta Chem. Scand.* **9**, 657 (1955).
12. H. L. MASON, *Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs* **76**, 817 (1954).
13. A. R. CHALLONER, H. A. GUNDRY und R. W. POWELL, *Proc. Roy. Soc. A* **245**, 259 (1958).

**Abstract**—A guarded horizontal parallel plate apparatus was constructed for absolute determination of the thermal conductivities of liquids; the heat flux goes vertically downward through the liquid disk. With this apparatus the heat conductivity of water at 25°C and of methanol at 20°C was measured. The thickness of the liquid disk can be varied between 0.5 and 5 mm, the temperature difference between 3 and 8 °C. The results show that convection in liquid begins at an earlier state than usually is assumed and that it will be difficult to get a better accuracy than  $\pm 0.5$  per cent.

**Résumé**—Un dispositif à plaques parallèles horizontales a été conçu pour la mesure absolue des conceptions thermiques des liquides; le flux de chaleur descend verticalement à travers le disque liquide. On a mesuré avec ce dispositif la conductivité thermique de l'eau à 25° et de l'alcool méthylique à 20°C. L'épaisseur du disque liquide peut varier entre 0,5 et 5 mm la différence de température entre 3 et 8°C. Les résultats montrent que la convection dans le liquide intervient plus vite qu'on ne le suppose habituellement et qu'il sera difficile d'atteindre une précision supérieure à  $\pm 0,5\%$ .

**Аннотация**—Приведено описание прибора для определения коэффициента теплопроводности жидкостей. Тепловой поток направлен вертикально сверху вниз через слой жидкости. С помощью этого прибора была измерена теплопроводность воды при 25°C и метанола при 20°C. Толщина слоя жидкости изменялась от 0,5 до 5 мм, а разность температур от 3 до 8°C. Результаты показывают, что конвекция в жидкости начинается раньше, чем обычно предполагают, и что получение точности большей чем  $\pm 0,5\%$  оказывается затруднительным.