

Wärmeleitfähigkeit von Dispersionen

Von H. Laederach *, P. Mötteli * und F. Widmer **



H. Laederach



P. Mötteli

Summary

Experimental and theoretical methods for the evaluation of the thermal conductivity of dispersions are described. With some restrictions the former developed "unsteady state method" for measuring the thermal conductivity of liquids can be extended to suspensions and emulsions too. Theoretical models—like the derived "single cell method"—allows to predict the thermal conductivity of dispersion with good accuracy.

1. Einleitung

Die Berechnung der meisten Wärmetransportprobleme und des technisch wichtigen Wärmeübergangs erfordert eine genaue Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit der am

* Dipl.-Ing. H. Laederach und Dipl.-Ing. P. Mötteli sind Mitarbeiter am Institut für Verfahrens- und Kältetechnik

** Prof. Dr. F. Widmer ist Vorsteher des Institutes für Verfahrens- und Kältetechnik der ETH Zürich.

Prozeß beteiligten Stoffe. Es ist daher verständlich, daß der Ermittlung und Messung von Wärmeleitfähigkeiten größte Aufmerksamkeit geschenkt werden muß.

Verschiedene Meßverfahren für Feststoffe, Flüssigkeiten und Gase sind bekannt¹. Die stationären Verfahren beruhen auf den allgemein bekannten Lösungen der Fourierdifferentialgleichungen. Sie erfordern einen hohen experimentellen Zeitaufwand, und zudem wird die Genauigkeit der Messung von Flüssigkeiten und Gasen durch unkontrollierbare Wärmeableitung aufgrund der während des Meßvorgangs einsetzenden Konvektion beeinträchtigt. Dieser Nachteil wird durch die experimentell einfach anzuwendenden instationären Verfahren dank der kurzen Meßdauer behoben. Die numerische Auswertung basiert aber auf mathematisch anspruchsvolleren Gleichungen. Durch die am Institut für Verfahrens- und Kältetechnik von Graßmann und Straumann² entwickelte instationäre Relativmethode läßt sich der mathematische Aufwand wesentlich vereinfachen. Dieses im nächsten Abschnitt kurz beschriebene Verfahren wurde seit 1960 am Institut zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Kältemitteln durch Widmer³, von Gasen durch Jobst⁴, von Elektrolyten durch Chiquillo⁶, von Kältemitteln unter Hochdruck durch Tauscher⁴, von Aromaten durch Bachmann⁵ und von speziellen Salzlösungen durch Müller⁷ im Temperaturbereich von -125°C bis $+300^{\circ}\text{C}$ mit sehr gutem Erfolg eingesetzt und angewandt.

In neuerer Zeit, vor allem im Hinblick auf den Schutz der Umwelt, stellte sich vermehrt das Problem, Disper-

sionen (Emulsionen und Suspensionen) auch durch thermische Verfahren zu trennen, um die einzelnen Komponenten der Wiederverwertung zuzuführen. Das Auslegen derartiger Prozesse erfordert aber die Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit der betrachteten Dispersion als Funktion der Konzentration sowie der geometrischen Form und Verteilung der dispersen Phase. Einer früheren Anregung⁹ folgend, wurde mit dieser Arbeit versucht, das bisher nur für die Messung homogener Stoffe benützte instationäre Relativverfahren auf heterogene Flüssig-flüssig- bzw. Flüssig-fest-Systeme anzuwenden. Einige zum Teil neuentwickelte theoretische Modelle, die den Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit der Dispersion und derjenigen der beteiligten Phasen beschreiben, ließen sich anschließend mit Hilfe der Meßwerte auf ihre Eignung hin überprüfen.

2. Meßverfahren der instationären Relativmethode

2.1. Grundlagen

In dem zu untersuchenden fluiden Medium ist ein dünner Platindraht, welchem elektrisch eine konstante Heizleistung q_0 zugeführt wird, vertikal mit Hilfe einer geeigneten Sonde aufgespannt. Da die produzierte Wärmemenge nur durch Wärmeleitung der umgebenden Flüssigkeit vom Draht weggeführt werden kann, baut sich gemäß Abb. 1 um den Heizdraht herum ein von der Zeit abhängiges Temperaturfeld $T(r, t)$ auf, dessen Differentialgleichung folgendermaßen lautet (2. Fouriersches Gesetz):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \tag{1}$$

Unter Berücksichtigung der problemspezifischen Anfangs- und Randbedingungen wurde diese Differentialgleichung von Carslav-Jaeger¹⁰ gelöst. In dimensionsloser Schreibweise ergibt sich folgende Beziehung:

$$\frac{4\pi \lambda T}{q_0} = \ln \frac{4at}{r_0^2} - 0,5772 \tag{2}$$

Die Gleichung (2) zeigt, daß die Drahttemperatur im unendlich ausgedehnten Flüssigkeitsfeld nach einer sehr kurzen Anlaufzeit asymptotisch mit dem Logarithmus

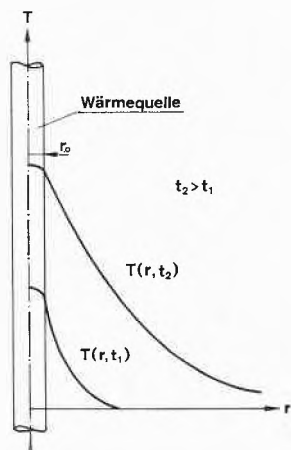


Abb. 1. Prinzip des instationären Hitzdrahtverfahrens mit Temperaturverlauf in dem den Draht umgebenden Medium

der Zeit ansteigt. Werden die in Funktion der Zeit registrierten Drahttemperaturen auf eine logarithmische Zeitskala umgezeichnet, ergibt sich für den Gültigkeitsbereich von Gleichung (2) eine Gerade. Durch Differentiation folgt, daß deren Steigung nur eine Funktion der Wärmeleitfähigkeit λ und der Heizleistung q_0 ist:

$$\frac{dT}{d \ln t} = \frac{q_0}{4\pi \lambda} \tag{3}$$

2.2. Die Messung nach der Relativmethode

Die oben beschriebene umständliche Auswertung läßt sich umgehen, wenn man den Temperaturanstieg des Drahtes unmittelbar als Funktion des Logarithmus der Zeit registriert. Die logarithmische Zeitskala wird dabei durch die Erwärmung eines zweiten ähnlichen Drahtes erzeugt, der sich in einem Medium bekannter Wärmeleitfähigkeit befindet. Es wird damit die Erwärmung des einen Drahtes im Medium mit unbekannter Wärmeleitfähigkeit λ_y mit der Temperaturänderung des andern im Vergleichsmedium verglichen, dessen Wärmeleitfähigkeit λ_x bekannt ist. Aus dem Verhältnis der beiden Temperaturänderungen, die umgekehrt proportional dem Wärmeleitvermögen sind, kann dann auf die Größe der unbekanntes Wärmeleitfähigkeit geschlossen werden. Diese Methode führt zu einer hohen Meßgenauigkeit, da sich teilweise systembedingte Meßfehler kompensieren. Abb. 2 zeigt ein vereinfachtes elektrisches Schalterschema der Meßanlage. Der je im Vergleichsmedium x bzw. im unbekanntes Medium y ausgespannte Draht D dient einerseits als Wärmequelle, andererseits wird er mit Hilfe der angeschlossenen Wheatstonschen Brücken als Widerstandsthermometer benützt. Werden vom Zeitpunkt $t = 0$ an beide Drähte durch die Stromquelle geheizt, so ändern sich deren Temperaturen nach einer Anlaufzeit entsprechend der Beziehung (2). Die zur Temperaturerhöhung des Drahtes proportionale elektrische Widerstandsänderung bewirkt in den Brückendiagonalen die ebenfalls mit dem Logarithmus der Zeit sich ändernden Ausgleichsspannungen.

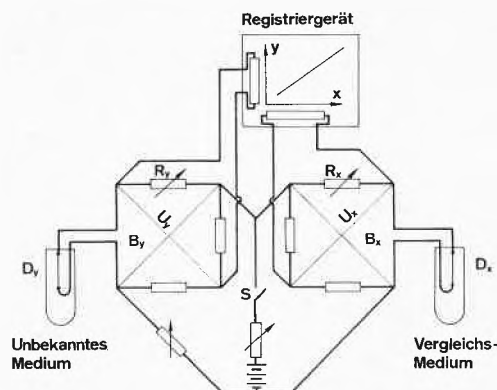


Abb. 2. Vereinfachtes elektrisches Schalterschema der Meßapparatur
 D_x, D_y Meßdrähte
 B_x, B_y Wheatstone-Brücken
 R_x, R_y Variable Widerstände zum Abgleich der Brücken B_x, B_y
 S Schalter

Nach Straumann¹¹ resultiert für die der unbekanntenen Wärmeleitfähigkeit λ_y proportionale Ausgleichsspannung U_y :

$$U_y = A \frac{\lambda_x}{\lambda_y} U_x + C \quad (4)$$

Somit repräsentiert in einem U_x - U_y -Koordinatennetz die Steigung der nach Gleichung (2) definierten Geraden ein Maß für das Verhältnis der beiden Wärmeleitfähigkeiten.

2.3. Übertragung der instationären Heizdrahtmethode auf zweiphasige Gemische

Zunächst ist es nicht offensichtlich, daß das oben beschriebene Verfahren auf zweiphasige Gemische angewendet werden darf. Die dem Verfahren zugrunde liegende Fourierrechnung (1) gilt streng nur für homogene isotrope Stoffe. Für die Anwendung des Verfahrens auf zweiphasige Gemische muß eine an die Teilchengröße der dispersen Phase geknüpfte Bedingung erfüllt sein: Die Durchmesser der Teilchen müssen viel kleiner sein als die Eindringtiefe L , in der während der Meßzeit eine Temperaturerhöhung ΔT meßbar ist. Diese qualitative Aussage ist in Abb. 3 illustriert. Es muß gewährleistet sein, daß während der Meßzeit ein «ausreichend durchschnittlicher» Wert des Systems erfaßt wird (Abb. 3 a). Zu große Teilchen würden, wie Abb. 3 b zeigt, die Messung verfälschen.

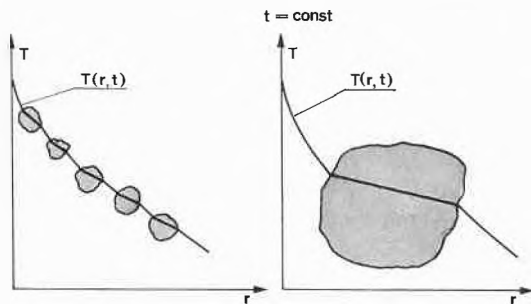


Abb. 3. Einfluß der Größe der dispersen Partikel auf das Temperaturfeld um den Heizdraht

Für die am Institut für Verfahrens- und Kältetechnik benützte Apparatur liegt die Länge L während einer üblicherweise zehn Sekunden dauernden Messung in der Größenordnung von 2 bis 3 mm. Damit können Zweiphasengemische mit Teilchengrößen der dispersen Phase bis zu 0,3 bis 0,5 mm mit guter Genauigkeit ausgemessen werden.

3. Modellvorstellungen zur theoretischen Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Dispersionen

3.1. Modell der geschichteten Phasen

Im inhomogenen Zweiphasensystem lassen sich Leitungsvorgänge der Form $q^* = -\lambda \cdot F \cdot dT/dx$ modellmäßig durch zwei Grenzfälle beschreiben. Als Modell dient ein Einheitswürfel, aufgebaut aus parallelen Schichten der

reinen Phasen. Die einzelnen Schichtdicken ergeben sich nach dem Volumenanteil der entsprechenden Phasen in der betrachteten Dispersion. Im ersten Grenzfall fließt der Wärmestrom q^* parallel zur Schichtung (Abb. 4 a), im zweiten Grenzfall senkrecht zur Schichtung (Abb. 4 b). Diese beiden Grundmodelle stellen extreme Möglichkeiten der geometrischen Anordnung und somit auch für die resultierenden Werte der Wärmeleitfähigkeit einer Dispersion dar.

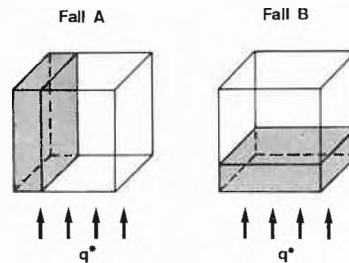


Abb. 4. Modell der geschichteten Phasen mit Orientierung zur Wärmefußrichtung

- a) Wärmefuß parallel zur Schichtung (Fall a)
- b) Wärmefuß senkrecht zur Schichtung (Fall b)

Bei bekannter Wärmeleitfähigkeit der beiden Phasen λ_K bzw. λ_D und gegebener Volumenkonzentration c läßt sich die resultierende Wärmeleitfähigkeit der beiden Grenzfälle leicht bestimmen:

$$\text{Fall a: } \lambda_A = \lambda_K(1-c) + \lambda_D c \quad (5)$$

$$\text{Fall b: } \lambda_B = 1 / \left(\frac{1-c}{\lambda_K} + \frac{c}{\lambda_D} \right) \quad (6)$$

Die tatsächliche Wärmeleitfähigkeit der homogen verteilten Dispersion muß in dem durch die beiden Grenzfälle definierten Intervall liegen. Kerber und Siems⁹ stellten durch Linearkombination der beiden Grundmodelle einen Ausdruck zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von Dispersionen auf.

$$\lambda = \alpha \left[\lambda_K(1-c) + \lambda_D c \right] + \beta \left[1 / \left(\frac{1-c}{\lambda_K} + \frac{c}{\lambda_D} \right) \right] \quad (7)$$

Die Faktoren α und β sind von der Teilchenform der dispersen Phase abhängig. Beispielsweise wird für würfelförmige Partikel angegeben:

$$\alpha = \frac{2}{3}, \quad \beta = \frac{1}{3}$$

3.2. Modell der Elementarzelle

Das Modell der Elementarzelle beruht auf der Vorstellung, daß eine Dispersion mit n verteilten Partikeln aus n identischen Würfelzellen aufgebaut ist, in deren Zentren sich der disperse Stoff als reine Phase befindet (siehe Abb. 5). Jede Elementarzelle muß somit die gleiche Konzentration wie die betrachtete Dispersion aufweisen. Durch diese Bedingung sind auch die charakteristischen Abmessungen der Zelle gegeben. Da dieses Modell eine Variation der Partikelform der dispersen Phase erlaubt,

wurde im Fall a die Form eines Würfels, im Fall b die Form einer Kugel angenommen. Bei Kenntnis des mikroskopischen Aufbaus der Dispersion kann mit Hilfe dieser Modellvarianten die Wirklichkeit relativ genau beschrieben werden.

Fall a: Disperse Phase in Würfelform.

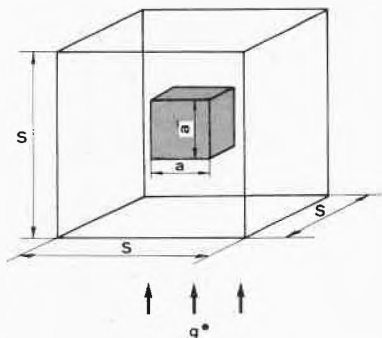


Abb.5a. Elementarzellenmodell: Variante mit eingeschriebenem Würfel

Für die Wärmeleitfähigkeit einer Dispersion nach diesem Modell resultiert¹²:

$$\lambda = \lambda_K (1-c^{2/3}) + c^{2/3} \left[\frac{1-c^{1/3}}{\lambda_K} + \frac{c^{1/3}}{\lambda_D} \right]^{-1} \quad (8)$$

Gültigkeitsbereich: $0 \leq c \leq 1$

Fall b: Disperse Phase in Kugelform.

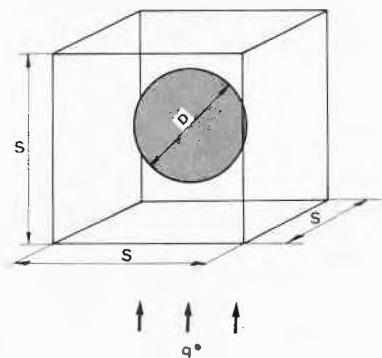


Abb.5b. Elementarzellenmodell: Variante mit eingeschriebener Kugel

Die Herleitung eines Ausdrucks für die Wärmeleitfähigkeit einer Dispersion aufgrund dieser Modellvorstellung ist relativ aufwendig. Nach Baxley¹³ ergibt sich:

$$\lambda = \lambda_K \left(1 - \frac{\pi}{4(1+2n)^2} \right) + \frac{\pi}{4(1+2n)^2} \frac{(0.5+n) \lambda_a \lambda_K}{0.5 \lambda_K + n \lambda_a} \quad (9)$$

$$\lambda_a = \lambda_K \lambda_D \left(\frac{2 \lambda_D}{(\lambda - \lambda)^2} \ln \frac{\lambda_D}{\lambda_K} - \frac{2}{\lambda_D - \lambda_K} \right)$$

$$n = 0.403 c^{1/3} - 0.5$$

Gültigkeitsbereich: $0 \leq c \leq \frac{\pi}{6} = 0,524$

4. Meßresultate und Diskussion

4.1. Messung der Wärmeleitfähigkeit von Suspensionen

Für die Messung mußte eine geeignete Suspension gefunden werden. Die Wahl fiel auf eine Polystyrol-Wasser-Glycerin-Mischung. Durch Zugabe von Wasser oder Glycerin konnte die Dichte der kontinuierlichen Phase genau auf die Dichte von Polystyrol abgestimmt und somit eine Sedimentation während des Meßvorganges vermieden werden. Allerdings erwies sich die Herstellung dieser statisch stabilen Suspension als schwierige Aufgabe, weil geringste Dichteunterschiede das Polystyrol sofort sedimentieren oder aufschwimmen ließen. Zur besseren Benetzung des Polystyrols mußte zusätzlich eine kleine Menge nicht-jonogenes Tensid beigegeben werden; ein Einfluß auf die Messung war nicht feststellbar.

Abb. 6 zeigt die Ergebnisse der Messung bei einer Temperatur von 20 °C im Vergleich zu den Auswertungen der beiden theoretischen Modelle (Elementarzellenmodell, Modell der geschichteten Phasen). Suspensionen mit Polystyrolkugeln von 0,25 bis 0,4 mm und 0,4 bis 0,5 mm Durchmesser wurden bis zu einer Volumenkonzentration von etwa 0,6 m³ Feststoff/m³ Suspension ausgemessen¹⁴. Dabei konnte kein signifikanter Einfluß des Teilchendurchmessers auf die Wärmeleitfähigkeit der Suspension festgestellt werden. Dieses Ergebnis deckt sich mit Angaben anderer Autoren.

Die Wärmeleitfähigkeit einer Suspension ist somit nur abhängig von der Wärmeleitfähigkeit der beiden reinen Phasen und deren Konzentration. Im gültigen Anwendungsbereich des Elementarzellenmodelles bis $c = 0,58$ vermag dieses Modell die Messungen gut wiederzugeben. Das Modell der geschichteten Phasen zeigt dagegen kleine Abweichungen, die vor allem auf die schwierige Wahl der Faktoren α und β zurückzuführen sind.

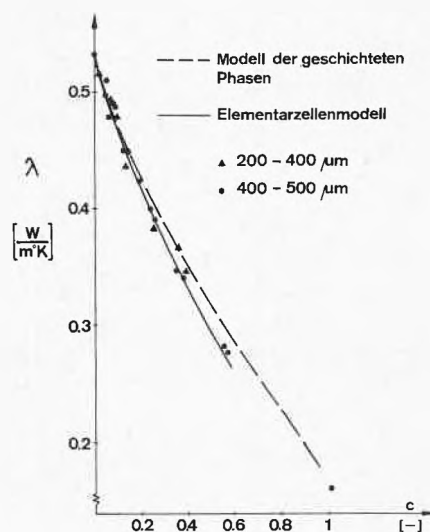


Abb. 6. Vergleich von gemessener und nach Schichten- bzw. Elementarzellenmodell berechneter Wärmeleitfähigkeit für Polystyrol-Wasser-Glycerin-Suspensionen in Abhängigkeit des Feststoffgehaltes

4.2. Messung der Wärmeleitfähigkeit von Emulsionen

Für die Messungen wurde eine Rizinusöl-Wasser-Emulsion ausgewählt. Rizinusöl als eines der spezifisch schwersten Öle zeigte eine geringe Aufrahmtendenz in Wasser. Mit Hilfe kleiner Mengen nichtjonogener Emulgatoren ließen sich Emulsionen verschiedener Konzentration stabilisieren. Der Einfluß der Emulgatoren auf die Wärmeleitfähigkeit durfte aufgrund der geringen Konzentration vernachlässigt werden. Die Resultate der Messungen im gesamten Konzentrationsbereich zwischen reinem Wasser ($c = 0$) und reinem Rizinusöl ($c = 1,0$) bei einer Temperatur von 20°C sind in Abb. 7 dargestellt¹².

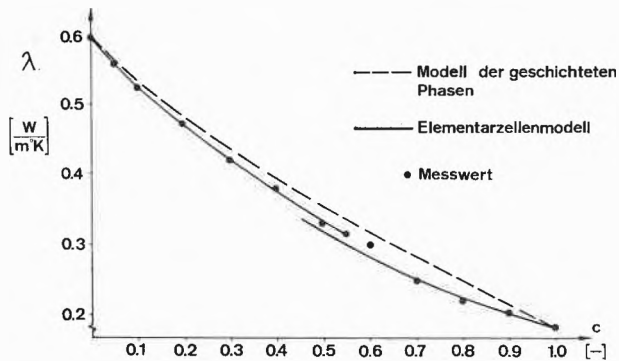


Abb. 7. Vergleich von gemessener und nach Schichten- bzw. Elementarzellenmodell berechneter Wärmeleitfähigkeit für Rizinusöl-Wasser-Emulsionen in Abhängigkeit des Ölgehaltes

Im Bereich $c = 0,55$ bis $c = 0,7$ fand eine Phasenumkehr statt, d. h. mit zunehmender Konzentration des Öls wird die bisher kontinuierliche Phase Wasser zur dispersen Phase. Wie die Resultate zeigen, vermag auch hier das Elementarzellenmodell die Meßdaten mit sehr guter Genauigkeit wiederzugeben. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, daß mit diesem Modell auch der Phasenwechsel simuliert werden kann, im Gegensatz zu dem im Bereich höherer Ölkonzentration ungenaueren Schichtenmodell.

4.3. Beurteilung der Modelle

1. Modell der geschichteten Phasen

Sowohl bei Suspensionen wie auch bei Emulsionen liegen die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten tiefer als die theoretischen Werte. Eine bessere Übereinstimmung durfte aber schon aufgrund der theoretisch nicht exakt erfaßbaren Linearkombinationsfaktoren α und β für kugelförmige disperse Partikel kaum erwartet werden.

2. Modell der Elementarzelle

Die gute Übereinstimmung der theoretischen und experimentellen Werte ist nicht weiter erstaunlich, stellt dieses Modell doch eine wirklichkeitsnahe Beschreibung einer Emulsion dar. Die exakte mathematische Bestimmtheit dieses Modells erlaubt zudem dessen uneingeschränkte Anwendung auf beliebige Dispersionen. Die allgemeine Gültigkeit dieses Ansatzes zeigt folgende Überlegung über den Einfluß des dispersen Teilchenspektrums.

Aufgrund mikroskopischer Betrachtungen einiger Emulsionen wurde festgestellt, daß die disperse Phase aus einem Spektrum verschieden großer Partikel besteht. Durch Auszählen einiger photographischer Aufnahmen konnten sehr viele Tröpfchen mit kleinerem Durchmesser als der mittlere Durchmesser nachgewiesen werden, dagegen nur wenige Tröpfchen mit einem größeren Durchmesser. Da das Volumen der dispersen Phase von der dritten Potenz des Partikeldurchmessers abhängt, beanspruchen diese wenigen großen Tröpfchen einen doch beträchtlichen Volumenanteil des dispersen Stoffes. Diese Tatsache führte zu einer Vorstellung zur Überprüfung des Elementarzellenmodells gemäß Abb. 8.

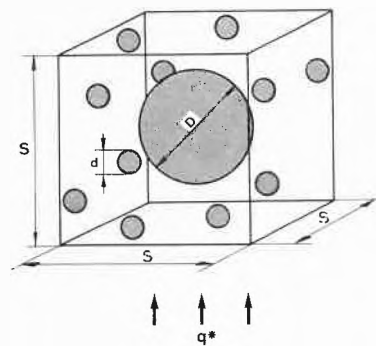


Abb. 8. Erweitertes Elementarzellenmodell zur Überprüfung des Einflusses der Partikelgrößenverteilung auf die Wärmeleitfähigkeit einer Dispersion

Die numerische Auswertung dieses erweiterten Elementarzellenmodells unter Variation des Durchmesserverhältnisses $\frac{d}{D}$, der Anzahl kleiner Tröpfchen m , der Gesamtkonzentration c der Zelle und des Verhältnisses der Wärmeleitfähigkeiten der beiden Phasen zeigte im Vergleich mit den Wärmeleitfähigkeitswerten des einfachen Elementarzellenmodells maximale Abweichungen von 3%. Die Vermutung, daß die Größenverteilung der dispersen Phase einen Einfluß auf die Wärmeleitfähigkeit einer Dispersion ausüben könnte, hat sich somit bestätigt, doch liegt er innerhalb der Meß- und Rechengenauigkeit von Wärmeübergangsproblemen.

5. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt experimentelle und theoretische Methoden zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Dispersionen. Es wird gezeigt, daß die am Institut für Verfahrens- und Kältetechnik entwickelte instationäre Relativmethode auch zur Messung der Wärmeleitfähigkeit heterogener Flüssig-flüssig- bzw. Flüssig-fest-Systeme unter der Bedingung kleiner Partikelabmessungen der dispersen Phase benutzt werden kann.

Nach der Beschreibung des erwähnten Meßverfahrens sowie der Messungen von Testdispersionen verschiedener Volumenkonzentrationen werden geeignete Modelle zur

Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von Dispersionen erläutert.

Der Vergleich der Meßwerte mit den aus den einzelnen Modellvorstellungen resultierenden theoretischen Werten zeigt, daß besonders das neuentwickelte Elementarzellenmodell ausgezeichnete Resultate liefert. Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit einer Dispersion nach dem Elementarzellenmodell erfordert einzig die Kenntnis der Wärmeleitfähigkeiten der reinen Phasen sowie deren Volumenkonzentration; die geometrische Form der dispersen Phase wird durch verschiedene Modellvarianten erfaßt. Mit Hilfe eines erweiterten Elementarzellenmodells wird noch der Einfluß des Partikelgrößenspektrums der dispersen Phase auf die Wärmeleitfähigkeit untersucht, der sich jedoch als unbedeutend erweist.

Verzeichnis der Symbole

<i>A</i>	Apparaturkonstante	[-]
<i>a</i>	Temperaturleitfähigkeit	[m ² /s]
<i>C</i>	Konstante	[V]
<i>c</i>	Volumenkonzentration = $\frac{\text{Volumen disperse Phase}}{\text{Gesamtvolumen der Dispersion}}$	[-]
<i>D</i>	Durchmesser des dispersen Partikels	[m]
<i>d</i>	Durchmesser der kleinen dispersen Partikel	[m]
<i>L</i>	Temperaturreindringtiefe	[m]
<i>m</i>	Anzahl kleiner disperser Partikel	[-]
<i>q₀</i>	Heizleistung je Längeneinheit des Drahtes	[W/m]
<i>q*</i>	Wärmestrom	[W]
<i>R</i>	elektrischer Widerstand	[Ω]
<i>r₀</i>	Radius des Heizdrahtes	[m]
<i>r</i>	Radius	[m]
<i>S</i>	Elementarzellenabmessung	[m]
<i>T</i>	Übertemperatur	[°C]
<i>t</i>	Meßzeit	[sec]
<i>U</i>	elektrische Spannung	[V]
<i>α</i>	Formfaktor	[-]
<i>β</i>	Formfaktor	[-]
<i>λ</i>	Wärmeleitfähigkeit	[W/m grd]

Indizes

<i>D</i>	disperse Phase
<i>K</i>	kontinuierliche Phase
<i>x</i>	Vergleichsmedium
<i>y</i>	unbekanntes Medium

Literaturverzeichnis

- 1 L. Riedel, *Die Messung der Wärmeleitfähigkeit von Suspensionen*, Archiv techn. Messen (1954).
- 2 P. Graßmann und W. Straumann, Ein instationäres Verfahren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Flüssigkeiten und Gasen. *Int. J. Heat Mass Transfer* 1 (1960) 1, 50/54.
- 3 F. Widmer, Messung der Wärmeleitfähigkeit von Flüssigkeiten, insbesondere Kältemitteln, nach einem instationären Verfahren, *Kältetechnik* 14 (1962) 2, 38/41.
- 4 W. Tauscher, *Messung der Wärmeleitfähigkeit flüssiger Kältemittel mit einem instationären Hitzdrahtverfahren*, Diss. ETH, Prom. Nr. 4144, Zürich 1968.
- 5 R. Bachmann, *Messung der Wärmeleitfähigkeit und Schallgeschwindigkeit flüssiger Aromate*, Diss. ETH, Prom. Nr. 4436, Zürich 1969.
- 6 A. Chiquillo Alas, *Messung der relativen Wärmeleitfähigkeit wäßriger Salzlösungen nach einem instationären Hitzdrahtverfahren*, Diss. ETH, Prom. Nr. 3955, Zürich 1967.
- 7 W. T. Müller, *Messung der Wärmeleitfähigkeit und der Schallgeschwindigkeit wäßriger Salzlösungen in Funktion der Temperatur*, Diss. ETH, Prom. Nr. 4808, Zürich 1971.
- 8 W. Jobst, *Messung der Wärmeleitfähigkeit von organischen, aliphatischen Flüssigkeiten und von Gasen nach einem instationären Absolutverfahren*, Diss. ETH, Prom. Nr. 3547, Zürich 1964.
- 9 R. Kerber und W. Siems, Wärmeleitung in 2-Phasensystemen. *Chem.-Ing.-Techn.* 40 (1968) 23.
- 10 H. S. Carslaw und J. C. Jaeger, *Conduction of Heat*, 2nd ed., Clarendon-Press, Oxford 1959.
- 11 W. Straumann, *Ein instationäres Verfahren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Flüssigkeiten und Gasen*, Diss. ETH, Prom. Nr. 3078 (1960).
- 12 H. Laederach, *Wärmeleitfähigkeit von Emulsionen*, Diplomarbeit am Institut für Verfahrens- und Kältetechnik (1974).
- 13 A. Baxley, *Thermal Conductivity of Suspensions*, Diss. University of Arkansas (1967).
- 14 P. Mötteli, *Wärmeleitfähigkeit von Suspensionen*, Diplomarbeit am Institut für Verfahrens- und Kältetechnik (1974).