

Wärmeübergang - optisch gemessen

Zum Jahrestreffen der Verfahreningenieure vom 1. bis 3. Oktober 1968 in Stuttgart

Von Professor Dr.-Ing. U. Grigull, München

Der Wärmeübergang ist seit eh und je einer der Grundvorgänge in verfahrenstechnischen Prozessen, und es gibt wenig Verfahren zur Herstellung von Gebrauchsgütern, in denen der behandelte Stoff nicht erwärmt oder gekühlt werden müßte. Das gilt für die chemische Industrie im engeren Sinne genauso wie für die Nahrungs- und Genußmittelindustrie, die Metallindustrie, die keramische Industrie und viele andere. So ist es auch nicht überraschend, daß zum Beispiel in den USA die neuere Forschung auf dem Gebiet der Wärmeübertragung sehr wesentlich durch die American Society of Chemical Engineers gefördert wurde. Namen wie A. P. Colburn, O. A. Hougen, W. H. McAdams geben hiervon Kenntnis. Auch der in der Bundesrepublik Deutschland für dieses Gebiet zuständige Fachausschuß „Wärme- und Stoffübertragung“ ist ein Organ der „Verfahrenstechnischen Gesellschaft“.

Im letzten Jahrzehnt erfuhr dieses Fachgebiet eine beträchtliche Förderung allein dadurch, daß in der Kerntechnik wie in der Raumfahrttechnik Probleme der Wärmeübertragung eine entscheidende Rolle spielen, ja zum Teil sogar den Auslegungsspielraum für den projektierenden Ingenieur drastisch begrenzen. Man denke nur an den gefürchteten „burn-out“ im Kernreaktor oder an die Bemessung des Hitzeschildes beim Wiedereintritt von extraterrestrischen Flugkörpern. Die Gründung einer neuen Zeitschrift „Wärme- und Stoffübertragung“ trägt diesem gesteigerten Interesse Rechnung.

Um den Wärmeübergang rechnerisch erfassen zu können, benützt man meist einen auf Isaak Newton (1701) zurückgehenden Ansatz, wonach die Wärmestromdichte q (zum Beispiel in W/m^2) an der Oberfläche eines festen Körpers, der von einem strömenden Medium berührt wird, der Differenz der Temperaturen zwi-

schen Wand (T_w) und freier Strömung (T_f) proportional ist. Danach läßt sich schreiben

$$q = \alpha (T_w - T_f)$$

mit der Proportionalitätskonstanten α , die Wärmeübergangskoeffizient genannt wird. Die Einheit von α ist zum Beispiel $W/m^2 \text{ grad}$. Zur Messung von α muß man die Wärmestromdichte q , beispielsweise kalorimetrisch, bestimmen und die beiden Temperaturen T_w und T_f zum Beispiel durch Thermoelemente messen.

Man kann aber auch die Tatsache ausnutzen, daß in unmittelbarer Nähe der festen Wand Wärme nur durch Leitung übertragen wird, daß also dort nach dem Gesetz von Fourier (1822) auch die Beziehung

$$q = -\lambda \frac{d\theta}{dn}$$

gelten muß, wenn λ die Wärmeleitfähigkeit des strömenden Mediums und $d\theta/dn$ den örtlichen Temperaturgradienten an der Wand bedeuten.

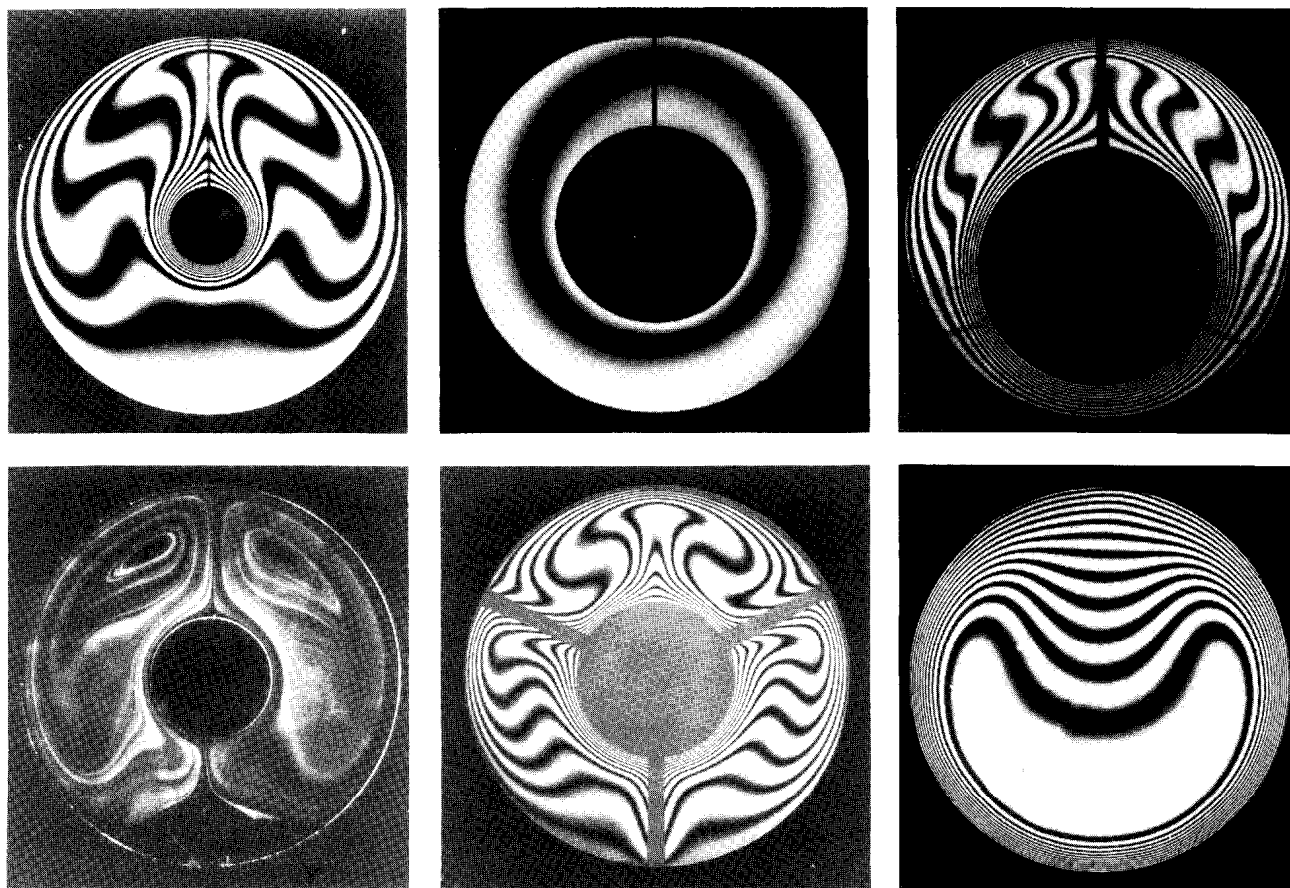


Bild 1 bis 6 (von links nach rechts): Interferenzaufnahmen zur Bestimmung örtlicher Temperaturgradienten auf optischem Weg (Erläuterungen im Text).
Photo (6): U. Grigull und W. Haut

Mit dem so erhaltenen Wert von q kann man dann den gesuchten Wärmeübergangskoeffizienten α nach der Gleichung

$$\alpha = q / (T_w - T_f)$$

berechnen. Die Anwendung dieser zweiten Methode setzt ein leistungsfähiges Verfahren zur Ermittlung des örtlichen Temperaturgradienten voraus. Dieser kann ohne Störung des Feldes auf optischem Wege bestimmt werden, zum Beispiel mit einem Interferometer. Bei einer von L. Mach und L. Zehnder (1892) vorgeschlagenen Anordnung wird ein paralleles Lichtbündel durch einen halbdurchlässigen Spiegel in zwei Teilbündel zerlegt, die beide etwa die halbe Energie des unzerlegten Bündels haben. Das eine Teilbündel durchsetzt das zu untersuchende Temperaturfeld, das zugleich ein Brechzahlfeld ist. Die beim Eintritt ebene Wellenfront wird hierdurch in charakteristischer Weise verformt, so daß dem austretenden Strahl das durchsetzte Brechzahlfeld als Phasenrelief aufgeprägt ist. Weder das Auge noch die photographische Platte können diese verformte Wellenfront registrieren. Sie kann aber dadurch sichtbar gemacht werden, daß man dieses Teilbündel mit dem zweiten, unveränderten Teilbündel zur Interferenz bringt.

Bei geeigneter Justierung des Interferometers sind die entstehenden Interferenzstreifen Linien gleicher Temperatur, also Isothermen. Ein Beispiel eines so aufgenommenen Temperaturfeldes zeigt Bild 1. Es handelt sich um einen mit atmosphärischer Luft erfüllten, horizontalen Ringspalt, dessen Innenzylinder geheizt und dessen Außenzylinder gekühlt ist. Die Übertemperatur des Innenzylinders beträgt 12 grd, zwischen zwei Streifen besteht eine Temperaturdifferenz von 1,3 grd. Man erkennt deutlich die thermischen Grenzschichten am Innen- und Außenzylinder. Der lokale Temperaturgradient wird durch Ausmessen der Streifenabstände für verschiedene Zentriwinkel bestimmt, der mittlere Wärmeübergangskoeffizient läßt sich dann durch Integration über den Umfang berechnen.

Die Empfindlichkeit dieser Methode wird durch Bild 2 demonstriert. Hierbei beträgt die Übertemperatur des Innenzylinders nur 1,2 grd, so daß sich nur ein Interferenzstreifen bilden kann. Die exzentrische Lage dieses Streifens zeigt, daß auch bei kleinen Temperaturunterschieden bereits eine Wärme Konvektion eingesetzt hat, während man bisher annahm, daß in diesen Bereichen noch reine Wärmeleitung herrscht. Das ist für die Messung der Wärmeleitfähigkeit im koaxialen Ringspalt (Methode nach Schleiermacher) von Bedeutung, da die Konvektionsbewegung die Meßergebnisse grob verfälschen kann.

Die Anordnung nach Bild 1 ist auch für die Verfahrenstechnik von Bedeutung. Erwärmt man einen Reaktionsbehälter durch horizontale elektrische Heizstäbe, so kann deren

Oberflächentemperatur bei gegebener Leistung für das betreffende Produkt zu hoch sein, so daß Zersetzung eintritt. Man hilft sich oft so, daß man den Heizstab in ein weiteres Rohr steckt und den Ringraum durch ein wärmeübertragendes flüssiges Medium ausfüllt. Die Heizleistung wird dadurch auf eine größere Oberfläche verteilt, was zur Erniedrigung der Wandtemperatur führt. Aus dem Streifensystem nach Bild 1 ist zu erkennen, daß der untere Halbraum kaum am Wärmetransport teilnimmt. Der dort verhältnismäßig große Streifenabstand bedeutet niedrigen Temperaturgradienten und niedrige Wärmestromdichte. Man kann die Wärmebelastung des äußeren Umfangs vergleichen, indem man das beheizte Innenrohr drastisch nach unten verlegt. Das Temperaturfeld im exzentrischen Ringspalt zeigt Bild 3. Die beste Anordnung ist etwa jene, bei der sich die beiden thermischen Grenzschichten gerade berühren.

Das Interferometer zeichnet nur das Temperaturfeld auf. Infolge der ungleichförmigen Temperatur kann man aber auch den Strömungsverlauf mindestens qualitativ verfolgen. Man erkennt in Bild 1 den aufsteigenden Strom um das erwärmte Innenrohr und die abwärts gerichtete Ausgleichsströmung im Ringraum. Man kann durch Beimischung von Rauch auch die Stromlinien sichtbar machen, wie es Bild 4 zeigt. Charakteristisch für dieses Ringspaltmodell sind die beiden „Augen“, die Kerne zweier symmetrischer Wirbel bedeuten. Ihre Lage hängt von der Geometrie des Ringspalt und dem Temperaturunterschied zwischen innerem und äußerem Zylinder ab. Die geringe Strömungsgeschwindigkeit im unteren Halbraum ist auch in Bild 4 zu erkennen.

Das hier als Beispiel gezeigte Ringspaltmodell ist noch für weitere technische Anwendungen von Interesse. Man projiziert die Übertragung elektrischer Energie statt über Freileitungen durch unterirdisch verlegte Kabel, die sich in einem druckfesten Schutzrohr befinden. Der Ringspalt ist in diesem Fall mit einem inerten Druckgas gefüllt, das zugleich die Übertragung der Jouleschen Wärme vom Kabel an die Rohrwand übernimmt. Zur Zentrierung des Kabels braucht man abstandhaltende Stege (Spacer), die im Ringspalt abgeschlossene Teilräume bilden. Das Temperaturfeld in solchen Teilräumen ist in Bild 5 wiedergegeben. Die Spacer bestanden im Modellversuch aus dünnen Stegen aus Balsaholz. Trotz der geringen Wärmeleitfähigkeit dieses Materials erkennt man die gegenseitige thermische Beeinflussung der einzelnen, für die Strömung völlig abgeschlossenen Teilräume. Das resultierende Temperaturfeld ist zwar gegenüber dem freien Ringraum nach Bild 1 völlig verändert, die Wärmeübertragung am Innenkörper ist aber nicht weniger intensiv, wie man aus der hohen Streifendichte der inneren Grenzschicht erkennt.

In allen bisher behandelten und in einer großen Zahl weiterer Fälle läßt sich das örtliche Temperaturfeld, die Wärmestromdichte und damit der Wärmeübergangskoeffizient α durch Ausmessen der Streifendichte sehr genau ermitteln. Bei der eingangs erwähnten kalorimetrischen Methode ist eine Meßunsicherheit von 5%, bezogen auf α , kaum zu unterschreiten. Literaturangaben, die eine höhere Genauigkeit mitteilen, muß man mit gewisser Skepsis begegnen. Bei der Interferenzmethode kann man den Wärmeübergangskoeffizienten — mindestens in günstigen Fällen — mit einer belegbaren Meßunsicherheit von 2% bis 3% ermitteln. Ein weiterer Vorteil der optischen Verfahren ist, daß sie ohne jeden Eingriff durch Meßorgane auf das Temperaturfeld arbeiten. Die in Bild 2 gezeigte Temperaturverteilung wäre durch Ausmessen mit Temperaturfühlern kaum zu ermitteln. Man erhält aus einer einzigen Aufnahme das gesamte Temperaturfeld, das sich dann — fern vom Interferenzkomparator — auswerten läßt, während das (meist ziemlich teure) Gerät für weitere Arbeit frei ist.

Natürgemäß hat auch die Interferenzmethode ihre Anwendungsgrenzen. Das Modell muß durchsichtig sein, die Abschlußgläser müssen optische Qualität haben und sind daher nicht gerade billig, die Modellgeometrie liegt durch die Gesetze der Optik in verhältnismäßig engen Grenzen fest. Doch kann man sich diesen Forderungen meist recht gut anpassen. Ein besonderes Anwendungsgebiet ist die Ausmessung nichtstationärer Temperaturfelder, die mit anderen Methoden kaum zu bewältigen ist. Ein Beispiel zeigt Bild 6. Es handelt sich um einen senkrechten Schnitt durch einen liegenden zylindrischen Behälter mit Mantelheizung, der bei Versuchsbeginn plötzlich erwärmt wird. Im Inneren bildet sich zunächst ein zur Außenwand konzentrisches Temperaturfeld aus, das durch reine Wärmeleitung zustande kommt. Kurz nach Versuchsbeginn setzt Konvektion ein, die in der thermischen wandnahen Grenzschicht nach oben gerichtet ist. Die dadurch bedingte Ausgleichsströmung im mittleren Teil des Behälters ist nach unten gerichtet, wie es in Bild 6 zu sehen ist. Der örtlich und zeitlich veränderliche Wärmeübergang läßt sich ohne Schwierigkeit bestimmen und es läßt sich die für den Verfahreningenieur wichtige Zeit ermitteln, in der der gesamte Behälterinhalt homogen durchwärmt ist. Erst bei großen Temperaturunterschieden tritt auch im Inneren eine nach oben gerichtete Konvektionsbewegung auf, die der in Bild 6 gezeigten Ausgleichsströmung entgegenwirkt.

Die hier gezeigten Beispiele der optischen Messung der Wärmeübertragung können den möglichen Anwendungsbereich dieser Methode nur andeuten. Der Forschung und Entwicklung eröffnet sich hier ein ergiebiges und ausbaufähiges Feld weiterer Arbeit.