

Temperatur berührungslos ermitteln

Wärmeleitfähigkeit von Kohlendioxid im kritischen Gebiet wird optisch gemessen

Hans Becker und Ulrich Grigull

Bei Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Flüssigkeiten und Gasen führt Konvektion zu fehlerhaften Ergebnissen. In der Umgebung des kritischen Punktes tritt Konvektion besonders leicht und intensiv auf. Wegen der kurzen Versuchszeiten und der besonders kleinen Temperaturdifferenzen kann bei der instationären optischen Meßmethode Konvektion vermieden werden. Es gibt bei diesem Verfahren sichere Kriterien, Konvektion zu erkennen. Die optisch instationäre Meßmethode wurde schon an Wasser erprobt.

Für alle reinen Wärmeleitungsprobleme ist die Wärmeleitfähigkeit die kennzeichnende Stoffgröße. Aber auch für andere Wärmeübergangsvorgänge ist sie wichtig, weil sie zur Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten gebraucht wird. Neben anderen Stoffgrößen beeinflusst die Wärmeleitfähigkeit die Intensität der freien Konvektion und bei erzwungener Konvektion die übertragbaren Wärmemengen. Bei Festkörpern spielt sie außerdem bei der Berechnung von Temperaturspannungen eine Rolle; doch soll in dieser Arbeit nur auf Flüssigkeiten und Gase, auf sogenannte Fluide, eingegangen werden.

Verhalten der Wärmeleitfähigkeit bei Fluiden

Die Wärmeleitfähigkeit eines Gases hängt zunächst von der Molekülgröße ab. Gase mit kleinen, leichten Molekülen leiten die Wärme allgemein besser als solche mit großen, schweren; daher die besonders hohe Wärmeleitfähigkeit von Wasserstoff. Zwischen etwa 0,02 und 1 bar ist die Wärmeleitfähigkeit praktisch druckunabhängig. Bei höheren Drücken nimmt sie bei konstanter Temperatur mit steigendem Druck immer stärker zu. Komplizierter ist das Verhalten bei konstantem Druck vor allem im Flüssigkeitsgebiet. Im Dichtetemperaturbild — das allerdings bei Ingenieuren weniger gebräuchlich ist — läßt sich das Verhalten der Wärmeleitfähigkeit einfacher beschreiben: Sie nimmt oberhalb gewisser Dichtewerte mit steigender Dichte bei konstanter Temperatur und immer mit steigender Temperatur bei konstanter Dichte zu. Das so skizzierte allgemeine Bild des Verlaufes der Wärmeleitfähigkeit trifft auch für das Flüssigkeitsgebiet zu und gibt die experimentellen Beobachtungen gut wieder. Eine Ausnahme macht das Gebiet um den kritischen Punkt.

Wärmeleitfähigkeit in der Umgebung des kritischen Punktes

Bis vor einem Jahrzehnt waren in diesem Gebiet nur wenige Messungen bekannt. Die Autoren maßen durchweg im kritischen Gebiet

ein Maximum der Wärmeleitfähigkeit [1, 2, 3], das in das allgemeine Bild, das man von der Wärmeleitfähigkeit hatte, schlecht paßte. Da im kritischen Gebiet bereits kleinste Temperaturunterschiede bei konstantem Druck sehr große Dichteänderungen bewirken (der isobare Ausdehnungskoeffizient

$$\alpha = \frac{1}{v} \left(\frac{\delta v}{\delta T} \right)_p$$

geht gegen Unendlich), tritt hier die Konvektion besonders leicht und stark auf. Konvektion ist bekanntlich ein anderer Wärmetransportmechanismus, und daher muß man bei allen Messungen der Wärmeleitfähigkeit sehr darauf achten, Konvektion zu vermeiden. Die früher verwendeten Apparaturen waren nicht für Messungen am kritischen Punkt konzipiert worden. Daher trat auch sicher mehr oder weniger stark Konvektion auf, und so schrieb man das gemessene Maximum der Wärmeleitfähigkeit dem Konvektionseinfluß zu.

Erst Michels, Senger und van der Gulik [4] glaubten, in einer extra für Messungen am kritischen Punkt von Kohlendioxid entwickelten Plattenapparatur Konvektion mit Sicherheit ausschließen zu können. Sie maßen im kritischen Gebiet ebenfalls ein Maximum der Wärmeleitfähigkeit, das allerdings schmaler und niedriger ist als das der früheren Messungen. Immerhin ist nach diesen Messungen 0,2 K vom kritischen Punkt entfernt der Maximalwert noch etwa sechsmal größer als der Wert, den man bei einem maximumfreien Verlauf erwarten dürfte. In einer weiteren Arbeit [5] schätzten sie theoretisch ab, daß die Konvektion auf ihre Messungen keinen Einfluß haben dürfte.

Seither wurde an einer ganzen Reihe von Gasen ein Maximum der Wärmeleitfähigkeit im kritischen Gebiet gemessen, wobei bei den

meisten Arbeiten die Konvektion nicht mit ähnlicher Sicherheit ausgeschlossen werden konnte, wie bei Michels. Bei einer Arbeit [6] ergab sich sogar eine Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Wärmestromdichte, doch könnte es sich dabei um einen systematischen Fehler der Meßmethode handeln.

Klassische stationäre Apparaturen

Bei einer Plattenapparatur, wie sie Michels und seine Mitarbeiter verwendeten (Bild 1), befindet sich die Versuchssubstanz *e* zwischen zwei horizontalen ebenen kreisförmigen Platten *a* und *d*. Um eine gegen Konvektion weitgehend stabile Schichtung zu erreichen, wird die obere Platte *a* elektrisch beheizt, die untere *d* mit einer thermostatisierten Flüssigkeit gekühlt. Die Platte *a* umgibt man zur Vermeidung von unkontrollierbaren Wärmeverlusten mit der Kappe *b*, die von einer Schutzheizung auf genau der gleichen Temperatur wie die der Platte *a* gehalten wird, so daß keine Wärme von *a* nach *b* fließt. Der Schutzring *c* dient zur Homogenisierung des Temperaturfeldes. Auch wenn man die beiden Platten absolut horizontal ausrichtet, kann immer noch durch Randstörungen Konvektion auftreten. Man arbeitet daher mit möglichst kleinen Spaltweiten *s* und kleinen Temperaturdifferenzen. Die Größe der unbedingt zu vermeidenden Wärmeverluste hängt vor allem von der Regelgenauigkeit der Schutzheizung ab. Aus der gemessenen Heizleistung bestimmt man die Wärmestromdichte *q* und berechnet dann mit der gemessenen Temperaturdifferenz ΔT und dem bekannten Abstand *s* zwischen der oberen und der unteren Platte die Wärmeleitfähigkeit λ nach der Gleichung:

$$\lambda = \frac{q}{\Delta T/s} \quad (1)$$

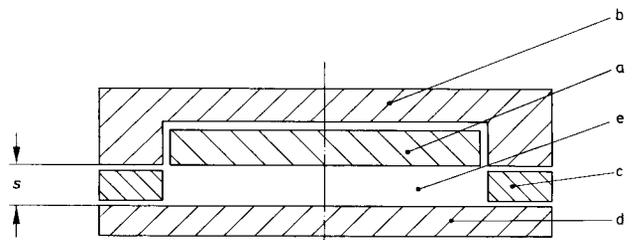
Neben der Plattenmethode wird auch noch die Zylinderanordnung häufiger verwendet. Hier wird der Wärmestrom und die Temperaturdifferenz zwischen zwei konzentrischen Zylindern gemessen. Die Wärme fließt dabei vom inneren zum äußeren Zylinder. Vom Aufbau her ist die Zylindermethode einfacher, da man auf die Schutzheizung verzichten kann. Außerdem ist der innere Zylinder häufig lediglich ein Platindraht (Heizdrahtmethode), der zugleich auch als Widerstandsthermometer verwendet wird. Mit einer Plattenapparatur erhält man jedoch im allgemeinen zuverlässigere Werte, weil sie weniger konvektionsanfällig ist.

Problemstellung für die Messung

Aufgrund von neueren theoretischen Betrachtungen, die auf den Methoden der statistischen Mechanik fußen, und auch wegen der

Bild 1: Schema einer Plattenapparatur

a Heizplatte, b Kappe mit Schutzheizung, c Schutzring, d Kühlplatte, e Versuchsstoff, s Abstand zwischen Heiz- und Kühlplatte



Prof. Dr.-Ing. Ulrich Grigull ist Leiter des Instituts für Thermodynamik an der Technischen Universität München. Dipl.-Ing. Hans Becker ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am selben Institut.

Wer emittieren will, muß es zeigen



Volker Reinert

Seit April 1974 gibt es den „Betriebsbeauftragten für Immissionsschutz“. Er sorgt unter anderem dafür, daß die Anlagen, für die er zuständig ist, mit umweltfreundlichen Verfahren arbeiten, und er bewirkt, daß die entstehenden Produktionsrückstände ordnungsgemäß verwendet werden. Außerdem dringt er darauf, daß neue Verfahren und Erzeugnisse umweltfreundlich sind. So bestimmt es das „Bundesimmissionsschutzgesetz — BImSchG“ vom 15. März 1974 in § 54. Man fragt sich unwillkürlich, was das für ein Mann sein muß — ein Jurist, ein Ingenieur, ein Organisator?

Der Immissionsschutzbeauftragte muß dem Gesetz entsprechend vom Anlagenbetreiber bestellt werden. Für welche genehmigungsbedürftigen Anlagen der Beauftragte notwendig ist, bestimmt der Bundesminister des Innern in einer Rechtsverordnung. Grob umrissen werden es all jene Anlagen sein, deren Emissionen Probleme hervorrufen können.

Überlegt man sich, welche Fähigkeiten der Immissionsschutzbeauftragte besitzen muß und was er im einzelnen leisten soll, zeigt sich, daß er in erster Linie Emissionen nachweisen müssen. In der Tat besagt das BImSchG in § 54: Er muß die Betriebsstätten in regelmäßigen Abständen kontrollieren, Emissionen und Immissionen messen und die Betriebsangehörigen über festgestellte Mängel aufklären. Das bedeutet messen, registrieren, auswerten und immer wieder messen. Die Meßgeräte- und Automatenhersteller haben sich, wie die letzten Ausstellungen zeigten, gründlich auf derartige Aufgaben vorbereitet. Dem Bundesminister des Innern dürfte es schwerfallen, dem BImSchG entsprechend allgemeine Verwaltungsvorschriften über Meßobjekte, Meßverfahren, Meßgeräte usw. zu erlassen, die sicherstellen, daß Verunreinigungen im Bundesgebiet einheitlich erfaßt und ausgewertet werden.

Wesentlich einfacher erscheint es dagegen, zu bestimmen, mit welchen allgemein gültigen Einheiten die Meßwerte anzugeben sind. Die „Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TALuft)“ — eine Verwaltungsvorschrift, die entsprechend § 48 BImSchG erlassen wurde — legt zum Beispiel fest, daß die Meßergebnisse in den Einheiten anzugeben sind, die das „Gesetz über Einheiten im Meßwesen“ vom 2. Juli 1969 nennt. Lediglich die Begriffe sind in der TALuft neu formuliert. So werden die luftverunreinigenden Masseteilchen als Massenkonzentration bezeichnet und in mg/m^3 ausgeworfen. Niedergeschlagene Stäube, bezogen auf die Auffangfläche und die Meßzeit, werden in $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ angegeben. Offen bleibt die Frage, ob für die Emissionsgrenzwerte, die in der TALuft angegeben sind, immer die Einheit gewählt wurde, die den gefährlichen Eigenschaften des jeweiligen Stoffes am besten Rechnung trägt. Es könnte zum Beispiel besser sein, den Maximalwert für Benzin in m^3/m^3 Luft bei einem bestimmten Druck anzugeben und nicht, wie in der TALuft geschehen, in mg/m^3 . Man würde auf diese Weise berücksichtigen, daß Benzin besonders gefährlich ist, wenn es gasförmig vorkommt. Freilich kann jeder Wert umgerechnet werden, aber wenn man schon in einer Verwaltungsvorschrift die richtigen Einheiten wählt, ergeben sich durchsichtigere Meßwerte. Es kann als Schulbeispiel dienen, daß früher die Mengen zu verbrennender Kunststoffe erst in Masseneinheiten angegeben wurden und später sinnvollerweise in Volumeneinheiten.

Mit all diesen Problemen wird sich der Immissionsschutzbeauftragte befassen müssen. Sollte er deshalb ein erfahrener Meßingenieur sein?

V. Reinert

Aussage der Skalentheorie [7] nimmt man heute fast allgemein ein Maximum der Wärmeleitfähigkeit im kritischen Gebiet an. Trotzdem sind die Zweifel, ob es sich hierbei vielleicht um einen Konvektionseffekt handelt, auch heute noch nicht ausgeräumt, ganz abgesehen von der Frage, wie groß dieses Maximum nun tatsächlich ist und ob es in einem so weiten Gebiet anzutreffen wäre, daß dieser Effekt auch von technischem Interesse ist. Um dieses Problem endgültig lösen zu können, ist es notwendig, die Wärmeleitfähigkeit nach einem ganz anderen Meßprinzip zu bestimmen, da es unmöglich erscheint, die Meßgenauigkeit einer stationären Messung gegenüber der Arbeit von Michels und Mitarbeitern wesentlich zu steigern.

Mit dieser neuen Methode sollte man vor allem Konvektion direkt feststellen können. Eine andere Möglichkeit, die Wärmeleitfähigkeit zu messen, ist das instationäre Verfahren, das bisher wenig gebräuchlich war.

Instationäre Meßmethode

Wie der Name sagt, ist bei allen stationären Meßmethoden der Wärmestrom zeitlich und örtlich konstant. An einer Fläche wird die Wärme zugeführt, über eine andere wieder abgeführt. Daneben gibt es das instationäre Verfahren, bei dem eine Fläche als Heizung ausgebildet ist, die zu einem bestimmten Zeitpunkt $t = 0$ eingeschaltet wird. Man beobachtet nun eine Erwärmung des angrenzenden Mediums. Falls die Heizung eine ebene Fläche ist und eine konstante Wärmestromdichte q liefert, wird bei reiner Wärmeleitung dieser Aufheizvorgang durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\vartheta(x, t) = 2 \cdot |a \cdot t \cdot \frac{q}{\lambda}| \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a \cdot t}}\right) \quad (2)$$

ϑ ist dabei die Temperaturerhöhung im Medium gegenüber dem Anfangszustand mit homogener Temperaturverteilung, t die Zeit seit Einschalten der Heizung, x die Koordinate

senkrecht zur Heizfläche, λ die Wärmeleitfähigkeit und

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$$

die sogenannte Temperaturleitzahl, die ein Maß dafür ist, wie schnell sich Temperaturunterschiede in einem Stoff durch Wärmeleitung ausgleichen können. Die Funktion ierfc ergibt sich, wenn man die Gaußsche Fehlerfunktion erf integriert:

$$\operatorname{ierfc}(x) = \int_x^\infty [1 - \operatorname{erf}(\xi)] d\xi$$

Dabei ist die Funktion erf selbst wie folgt definiert:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi$$

Sowohl erf als auch ierfc sind in den bekannten Tabellenwerken aufgeführt und auf Rechenanlagen berechenbar.

Bild 2 zeigt einige Temperaturverteilungen $\vartheta(x, t)$, wie sie sich nacheinander in der Versuchsflüssigkeit einstellen.

Eine Voraussetzung der Gleichung (2) ist noch, daß man die an die Heizfläche angrenzenden Medien als in $\pm x$ -Richtung unendlich ausgedehnt ansehen kann. Für genügend kleine Zeiten t ist diese Bedingungen stets gegeben, da sich dann ab einer gewissen Entfernung von der Heizfläche das Temperaturfeld nicht geändert hat. Um die Stoffwerte a und λ nach Gleichung (2) bestimmen zu können, muß man mindestens an zwei Stellen x_1, x_2 zu einem Zeitpunkt t die gerade erreichte Temperatur messen.

O. Krischer [8] entwickelte nach dieser instationären Methode ein Verfahren für Messungen an Festkörpern. Zur Temperaturmessung verwendete er Thermoelemente. Seine Ergebnisse stimmten mit Literaturwerten gut überein, doch ist das Verfahren nach Krischer für Flüssigkeiten und Gase nicht geeignet. Wollte man λ und a fluider Stoffe instationär messen, so träten bei einer konvektiven Temperaturmessung folgende Probleme auf:

- Alle Temperaturfühler stören das eigentliche Temperaturfeld und zeigen instationäre Vorgänge mit zeitlicher Verzögerung an.
- Wegen der Konvektionsgefahr muß die erwärmte Schicht dünn, die Versuchsdauer kurz sein. Man würde daher mit einem

räumlich ausgedehnten Fühler in einem Gebiet mit starkem Temperaturgradienten messen, so daß die genaue Zuordnung der gemessenen Temperatur zu dem Ort sehr problematisch wäre.

Das optische Meßverfahren

Einen Ausweg aus dieser Sackgasse bietet die optische Temperaturmessung mit Hilfe der Interferometrie, die bei allen klaren Flüssigkeiten und Gasen möglich ist. Da dabei die „Meßfühler“ Lichtstrahlen sind, erfolgt die Messung wechselwirkungs- und trägheitsfrei. Man vermeidet so alle Nachteile der konventionellen Temperaturmessung. Ein zusätzlicher Vorteil ist es, daß diese „Meßfühler“ unendlich dicht nebeneinander liegen, so daß man einem Interferogramm die gesamte Temperaturverteilung quasikontinuierlich entnehmen kann. Eigentlich macht man mit einem Interferometer Brechzahlunterschiede sichtbar, doch ist bei konstantem Druck der Brechungsindex eines Fluides innerhalb kleiner Temperaturintervalle der Temperatur proportional und bei der Wärmeleitfähigkeitsmessung arbeitet man ja mit sehr kleinen Temperaturdifferenzen. Die Arbeitsweise eines Interferometers soll anhand eines Mach-Zehnder-Interferometers erklärt werden, ohne allzusehr ins Detail zu gehen.

Prinzip der Interferometrie

Die von einer kohärenten Lichtquelle a (Bild 3) kommenden Lichtstrahlen werden durch eine Linse b parallelisiert und von einem halbdurchlässigen Spiegel c in zwei Strahlenbündel geteilt, den Meß- und den Referenzstrahl. Diese beiden Strahlenbündel werden an je einem Spiegel d und e reflektiert. Nachdem der Meßstrahl die Versuchszone i durchlaufen hat, wird ihm mit Hilfe eines zweiten halbdurchlässigen Spiegels f der Referenzstrahl wieder überlagert. Ein Objektiv g bildet die Versuchszone auf einem Schirm h (zur direkten Beobachtung) oder auf einem Film (zur fotografischen Registrierung) ab.

Bei einem entsprechend justiertem guten Interferometer sind die optischen Weglängen (optische Weglänge = geometrische Weglänge \times Brechungsindex) des Meß- und Vergleichsstrahles vor dem Versuch gleich lang.

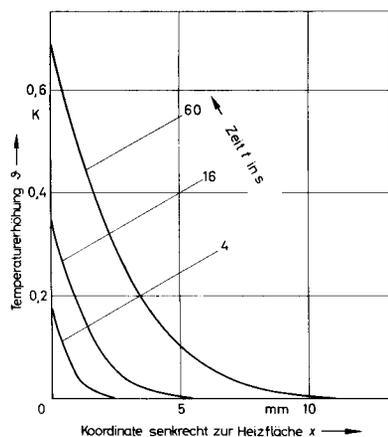


Bild 2: Einige Temperaturverteilungen bei instationärer Erwärmung
Die Daten gelten für $a = 0,15 \text{ mm}^2/\text{s}$. Auf der Ordinate sind willkürliche Einheiten aufgetragen, da die tatsächliche Temperaturerhöhung proportional zur Wärmestromdichte ist — entsprechend Gleichung (2)

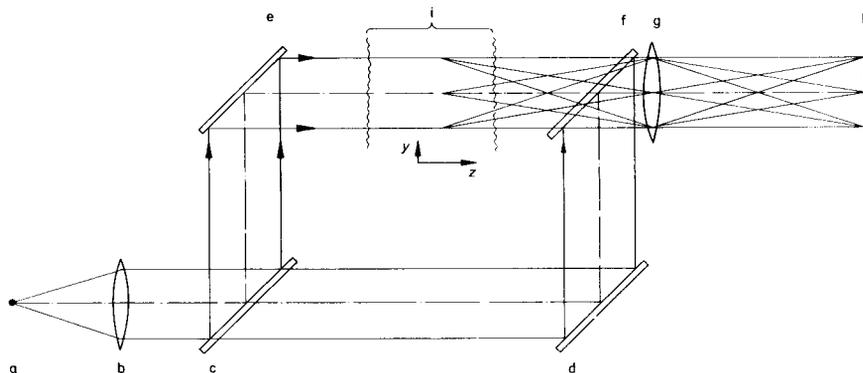


Bild 3: Mach-Zehnder-Interferometer
 a Lichtquelle, b Linse zur Parallelisierung des Lichtstrahles, c und f halbdurchlässige Spiegel, e und d voll reflektierende Spiegel, g Objektiv zur Abbildung der Versuchszone, h Schirm, i Versuchszone

Die beiden Strahlengänge interferieren nach ihrer Wiedervereinigung positiv, verstärken sich also, da wegen der gleichen optischen Weglänge die Phasen gleich sind. Das Beobachtungsfeld erscheint gleichmäßig hell. Diese Einstellung nennt man ein Nullfeld oder ein Feld unendlicher Streifenbreite, weil es keine Interferenzstreifen enthält.

Es sei nun angenommen, daß sich in der Versuchszone der Brechungsindex n örtlich kontinuierlich ändert, und zwar so, daß er längs eines bestimmten Lichtstrahles (z -Richtung) jeweils noch konstant ist, daß es sich also um ein ein- oder zweidimensionales Problem handelt (Änderung in x - und y -Richtung). Dadurch ist die optische Weglänge im Meßstrahlengang nicht mehr konstant, sondern ortsabhängig und damit auch die Phase dieses Strahlenganges. Das Beobachtungsfeld ist jetzt von hellen und dunklen Zonen durchzogen. Ein dunkler Streifen entsteht gerade an den Stellen, an denen gilt:

$$k = [n(x, y) - n_0] \cdot l / \lambda \quad (3)$$

mit $k = 0,5; 1,5; 2,5 \dots$

k ist die Streifenordnung, $n(x, y)$ der örtliche Brechungsindex, n_0 der Brechungsindex des homogenen Anfangszustandes, l die Länge der Versuchszone und λ die Wellenlänge des Lichtes. An diesen Stellen unterscheidet sich die Phase des Meß- von der des Vergleichsstrahles gerade um eine halbe Wellenlänge; die beiden Strahlen löschen sich aus. Helle Interferenzstreifen gibt es an all den Stellen, an denen der Phasenunterschied ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist, an denen also die Streifenordnung k ganzzahlig ist. Die gelegentlich notwendigen Korrekturen dieser Gleichung sollen hier nicht erörtert werden. Wie auf einer Landkarte die Höhenschichtlinien die Linien konstanter Höhe über dem Meeresspiegel angeben, so zeigen die hellen und dunklen Linien eines Interferogrammes die Linien konstanter Brechzahl im Versuchsmodell an. Bei den meisten Anwendungen interessiert die Brechzahl selbst nicht, aber sie ist — je nach den Versuchsbedingungen — eine feste Funktion anderer interessanter Größen, in unserem Fall der Temperatur. Dank dieser Eigenschaft kann man in einem einzigen Interferogramm das gesamte Temperaturfeld eines zweidimensionalen Versuchsmodells in einem bestimmten Moment registrieren, einfach indem man das Interferogramm fotografiert.

Jeder Interferenzstreifen bedeutet jetzt eine Linie konstanter Temperatur. Die Temperaturdifferenz zwischen zwei Streifen hängt von der Modelllänge und vom Versuchsmedium ab und kann eventuell nur ein paar tausendstel Grad betragen.

Versuchsaufbau und Versuchsablauf der optischen Messung

Der fotografischen Registrierung von Temperaturfeldern bedient man sich auch bei der optischen instationären Messung der Temperaturleitfähigkeit und der Wärmeleitfähigkeit. Man stellt dazu eine Küvette a (Bild 4) in die Versuchszone des Interferometers. Die Küvette für die Messungen an Kohlendioxid ist so temperierbar, daß im Inneren die Temperatur auf wenige Tausendstel eines Grades konstant

gehalten wird. Man erreicht so einen völlig homogenen Anfangszustand. Vor dem eigentlichen Versuch wird die Temperatur dieses Ausgangszustandes mit Widerstandsthermometern, der Druck mit einem Druckaufnehmer gemessen. Der Druckaufnehmer wird laufend über ein Kolbenmanometer nachkalibriert. In Lichtstrahlrichtung wird die Küvette durch zwei Fenster b und c abgeschlossen. Im Inneren ist eine horizontale ebene Glasplatte d eingebaut, deren Unterseite mit einer metallischen Schicht bedampft wurde. Diese wird als ohmscher Heizwiderstand verwendet. Der elektrische Strom wird seitlich über je ein ebenfalls aufgedampftes Kontaktband zu- und abgeführt, so daß er quer zur Lichtstrahlrichtung durch die Schicht läuft. Die frei werdende Wärme teilt sich nach einem festen Verhältnis auf das Trägerglas und auf die Versuchssubstanz auf und bewirkt, daß sich beide erwärmen. Bei reiner Wärmeleitung löst sich eine bestimmte Ebene konstanter Temperatur zu einem gewissen Zeitpunkt von der Heizfläche ab und wandert mit abnehmender Geschwindigkeit in die Versuchssubstanz, die sich langsam erwärmt. Bild 5 zeigt im oberen Teil qualitativ ein Brechzahl- bzw. Temperaturfeld zu einer bestimmten Zeit t nach Einschalten der Heizung und im unteren Teil schematisiert das zugehörige Interferogramm.

Solange die Fronten des Wärmestromes weder die Begrenzung der Versuchsflüssigkeit noch die Oberseite der Heizplatte erreicht haben, solange also dort noch keine Temperaturerhöhung eingetreten ist, kann man beide als halbbeschränkte Körper ansehen und somit Gleichung (2) anwenden. Bei reiner Wärmeleitung wird das entstehende Brechzahlfeld durch folgende, aus Gleichung (2) hervorgehende Gleichung beschrieben:

$$n(x, t) - n_0 = \frac{dn}{dT} \cdot \frac{q}{\lambda} \cdot 2 \sqrt{at} \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{x}{2 \sqrt{at}} \right) \quad (4)$$

wobei dn/dT die Ableitung der Brechzahl nach der Temperatur beim Versuchsdruck und der Versuchstemperatur ist. Die Streifenordnung k ergibt sich aus Gleichung (4) mit (3) zu

$$k = \frac{dn}{dT} \cdot \frac{q}{\lambda} \cdot \frac{l}{\Lambda} \cdot 2 \sqrt{at} \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{x}{2 \sqrt{at}} \right) \quad (5)$$

Versuchsauswertung

Zur Versuchsauswertung faßt man Gleichung (5) wie folgt zusammen:

$$k_i = A \cdot B \cdot \sqrt{t} \operatorname{ierfc} [X_i (A \cdot \sqrt{t})] \quad (6)$$

$$\text{mit } A = 2 \sqrt{a} \text{ und } B = \frac{dn}{dT} \cdot \frac{q}{\lambda} \cdot \frac{l}{\Lambda}$$

Die Streifenordnung k_i und den zugehörigen Streifenort x_i kann man direkt aus dem Interferogramm entnehmen. Die Aufnahmezeit t des Interferogrammes wird ebenfalls gemessen (hier durch Mitfotografieren eines Zählers, so daß eine Genauigkeit von ± 10 ms erreicht wird). Im Prinzip würde es genügen, die Streifenordnung und den Streifenort von zwei Streifen eines zur Zeit t aufgenommenen Interferogrammes zu bestimmen, um die Größen A und B zu berechnen, doch werden dabei die Fehler zu groß, weil der Streifenort und die Ordnung nicht genau genug gemessen werden können (Fehler $\Delta k \approx \pm 0,1$; $\Delta x \approx \pm 10 \mu\text{m}$).

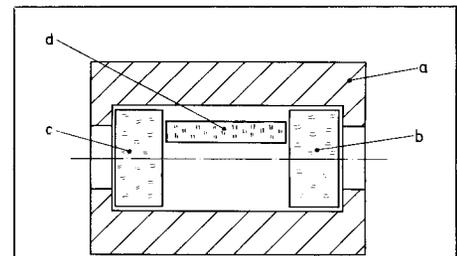


Bild 4: Druckkuvette
a thermostatisierter Kuvettenkörper, b und c Fenster, d Glasplatte mit Heizschicht auf der Unterseite

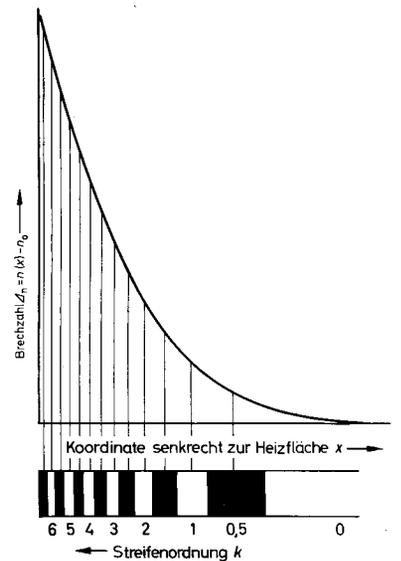


Bild 5: Zusammenhang zwischen Brechzahl, Temperaturfeld und Interferogramm

Unten: Ausschnitt aus einem schematisierten Interferogramm eines instationären Aufheizvorganges, oben: aus dem Interferogramm abgeleitete Brechzahl und Temperaturverteilung ($k \sim \Delta n \sim \Delta T$)

Man nimmt daher statistische Methoden zur Hilfe und wertet oft in mehreren Interferogrammen, die zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen wurden, alle Streifen aus und berechnet daraus mit einem Optimierungsprogramm A und B.

Aus A erhält man direkt die Temperaturleitfähigkeit $a = \lambda/\rho \cdot c_p$. Für viele Stoffe ist ρ und c_p bekannt. In diesem Falle kennt man mit a sofort auch die Wärmeleitfähigkeit λ . Man kann λ aber auch aus dem Experiment selbst bestimmen.

Dazu muß man nur während des Versuches noch die Wärmestromdichte q messen und erhält dann λ aus der Größe B , falls dn/dT bekannt ist. dn/dT läßt sich jedoch auch relativ einfach in einem separaten Experiment im Interferometer bestimmen. Mit dem so, unabhängig von anderen Messungen, erhaltenen λ läßt sich aus a nun $\rho \cdot c_p$ berechnen. Man hat somit einen ganzen Satz von Stoffwerten, die es durch Vergleich mit Literaturwerten gestatten, die Zuverlässigkeit der Meßmethode zu beurteilen.

Genauigkeit und Vorteile

In einer früheren Arbeit [9] wurde die optische instationäre Meßmethode an Wasser bei Umgebungsdruck zwischen 20 und 90 °C erprobt. Diese Messungen erwiesen sich als so genau, daß man sich entschloß, diese Meßmethode auch für Messungen an Kohlendioxid im kritischen Gebiet zu verwenden, um sicher entscheiden zu können, ob die Wärmeleitfähigkeit ein Maximum hat oder nicht und falls diese Frage positiv entschieden wird, wie groß das Maximum ist. Gerade zur Klärung dieses Problems hält man die optische instationäre Meßmethode für besonders geeignet, da sie gegenüber der konventionellen, stationären folgende Vorteile hat:

- Die Anfälligkeit gegen Konvektion ist viel geringer, da die Versuchszeiten sehr kurz sind (zwischen 5 und maximal 60 s). Bei der stationären Methode muß dagegen der Beharrungszustand abgewartet werden, was Stunden dauern kann. Die Konvektion hat bei der instationären Methode sozusagen zum Anlaufen gar keine Zeit.
- Die Konvektionsempfindlichkeit wird bei der instationären Methode auch bei Annäherung an den kritischen Punkt kaum größer, da $dn/d\vartheta$, ähnlich wie der für die Stärke der Konvektion verantwortliche Term $dV/d\vartheta$, gegen unendlich geht. Man erreicht daher mit immer kleineren Temperaturerhöhungen die gleiche Streifenzahl im Interferogramm (siehe Gleichung 5). Bei der stationären Methode kann man die Temperaturdifferenz dagegen nicht senken,

ohne auch die Meßgenauigkeit zu verkleinern.

- Falls tatsächlich Konvektion auftritt, kann man starke Konvektion schon daran erkennen, daß sich die Interferenzstreifen verformen, denn die Konvektion verändert auch das Temperaturfeld. Bei schlechender Konvektion ist dies zwar nicht der Fall, doch ergeben sich dann für die Größen A und B immer wieder andere Werte, wenn man mehrere, zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommene Interferogramme des gleichen Aufheizvorganges einzeln auswertet.

Ein gewisser Nachteil der optischen, instationären Methode ist der größere apparative Aufwand und der größere Zeitbedarf zur Auswertung der Messungen. Das Problem ließe sich mit dem stationären Verfahren jedoch sicher nicht besser lösen, als dies durch Michels und Mitarbeiter bereits geschehen ist.

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, daß bei den Messungen an Kohlendioxid der hohe Druck (der kritische Druck ist 73,8 bar, die Apparatur wurde für 500 bar ausgelegt) in einem normalen Interferometer Schwierigkeiten bereiten würde. Unter der Druckbelastung bögen sich die Küvettenfenster etwas durch, so daß die optischen Wagenlängen nicht mehr an allen Stellen des Strahlenganges gleich wären. Durch den Druckeinfluß ergäbe sich ein Interferenzstreifensystem aus konzentrischen Kreisen, das sich dem Interferenzbild des Temperaturfeldes überlagern, dessen Auswertung erschweren und die Genauigkeit beeinträchtigen würde.

Man löste dieses Problem durch die Anwendung der holographischen Interferometrie [10]. Durch die Holographie ist es möglich, den Druckeinfluß auszuschalten. Man erhält gleichartige Bilder wie in einem normalen Interferometer bei Umgebungsdruck. Auch die Auswertung bleibt gleich, so daß sich an dem beschriebenen Meßprinzip nichts ändert.

Schrifttum

- [1] Sellschop, W.: Wärmeleitvermögen der Kohlensäure in der Nähe ihres kritischen Punktes. *Forsch. Ing. Wes.* 5 (1934) 4, S. 162 bis 172.
- [2] Kardos, A.: Die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Flüssigkeiten. *Z. ges. Kälte-Ind.* 41 (1934) 1, S. 1–6; 2, S. 29–35.
- [3] Guildner, L. A.: Thermal Conductivity of Gases. II Thermal Conductivity of Carbon Dioxide Near the Critical Point. *J. Res. N. B. S. A* 66 No. 4, S. 333, 341–347.
- [4] Michels, A., J. V. Sengers, und P. S. van der Gulik: The Thermal Conductivity of Carbon Dioxide in the Critical Region. II Measurements and Conclusions. *Physica* 28 (1962) 12, S. 1237.
- [5] Michels, A., und J. V. Sengers: The Thermal Conductivity of Carbon Dioxide in the Critical Region. III Verification of the Absence of Convection. *Physica* 28 (1962) 12, S. 1238–1264.
- [6] Simon, H. A., und E. R. G. Eckert: Laminar Free Convection in Carbon Dioxide near its Critical Point. *Int. J. Heat Mass Transfer* 6 (1963) 8, S. 681–690.
- [7] Stanley, H. E.: *Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena.* Oxford: Clarendon Press 1971; insbes. S. 39–60; 175–199.
- [8] Krischer, O.: Über die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, der Wärmekapazität und der Wärmeeindringzahl in einem Kurzzeitverfahren. *Chemie Ingenieur Technik* 26 (1954) 1, S. 42–44.
- [9] Bach, J., und U. Grigull: Instationäre Messung der Wärmeleitfähigkeit mit optischer Registrierung. *Wärme- und Stoffübertragung* 3 (1970) 1, S. 44–57.
- [10] Becker, H., und U. Grigull: Ein holographisches Realzeit-Interferometer zur Messung von Phasenänderungen transparenter Objekte. *Optik* 35 (1972), 2, S. 223–236.

Linien umgrenzen Fehler

Holographieanwendungen in der industriellen Meßtechnik

Hans Steinbichler und Hans Rottenkolber

Mit der holographischen Interferometrie lassen sich nicht nur zerstörungsfrei Werkstofffehler nachweisen, sondern auch Konstruktionsfehler. Sie benötigt nicht wie die Spannungsoptik ein Modell des zu untersuchenden Objektes aus einem optischen aktiven Stoff, sondern macht die Verformungslinien unmittelbar an dem untersuchten Teil sichtbar. Die Linien können dann fotografiert und begutachtet werden. Die Holographie eignet sich vor allen Dingen zur Prüfung solcher Teile, bei denen konventionelle Prüfmethode problematisch sind.

Die holographische Interferometrie ist die Methode mit dem breitesten industriellen Anwendungsgebiet der Lasermesstechnik. Die Grundlagen der Holographie und der holographischen Interferometrie wurden bereits in einer großen Zahl von Veröffentlichungen [1 bis 6] ausführlich beschrieben. In Deutschland wird diese Methode schon seit einigen Jahren auf viele technische Probleme angewendet [7 bis 11].

Die holographische Interferometrie ermög-

licht die bildhafte Messung der Oberflächenverformung von beliebigen technischen Objekten. Diese Methode ist somit ähnlich wie die Spannungsoptik [12] ein Hilfsmittel zur Ermittlung von Konstruktionsfehlern. Spannungsoptische Untersuchungen setzen optisch aktive Stoffe und Modelle voraus. Die holographische Interferometrie gestattet jedoch unmittelbar die berührungslose Messung von kleinsten Verformungen im Mikrometerbereich.

Die Verformungen werden bildmäßig durch Interferenzlinien sichtbar. Dadurch hat die holographische Interferometrie neben der Beurteilung von Konstruktionsmerkmalen

noch einen großen Anwendungsbereich. In der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung kann man durch irreguläre Verformungen der Oberfläche Fehler im Innern des Werkstücks finden. Schwingungsuntersuchungen, wie zum Beispiel Körperschallübertragungen an Kraftfahrzeugteilen, lassen sich holographisch relativ einfach durchführen [13]. Ferner kann man mit der holographischen Interferometrie Höhenschichtlinien mit einstellbarem Abstand erzeugen [11], was bei Formtreueprüfungen und Kopierprozessen, wie beispielsweise Kopierfräsen, eine Rolle spielt.

Prüfung von Bauteilen auf Konstruktionsfehler

Die Interferenzlinien stellen ein Maß für die Oberflächenverformung dar. Unter gewissen Voraussetzungen kann man die Interferenzlinien als Linien konstanter Verformung senkrecht zur Bildebene auffassen [14]. Damit läßt sich die Verformung auf etwa 0,1 µm genau ermitteln. Der wesentliche Vorteil dieser Meßmethode gegenüber konventionellen Methoden ist aber die bildmäßige Information, die hochbeanspruchte Zonen sofort erkennen läßt. Das in Bild 1 gezeigte Kesselglied ist ein Hohlkörper aus Grauguß, bei dem zur Versteifung in die Wand Sicken und zwischen den Innenwänden Innenanker angegos-

sen sind. Der holographisch untersuchte Ausschnitt ist durch einen Kreis gekennzeichnet. Das Verformungsbild des um 1 bar Überdruck

Dr. Hans Rottenkolber ist Geschäftsführer eines meßtechnischen Unternehmens in Obing; Dr. Hans Steinbichler ist Inhaber und Leiter eines Unternehmens für hochauflösende Optik in Obing.

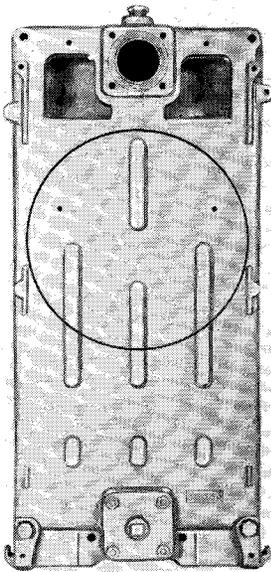


Bild 1: Gegossenes Heizkesselglied. Der mit einem Kreis gekennzeichnete Teil ist in den Bildern 2 und 3 als Interferenzaufnahme gezeigt

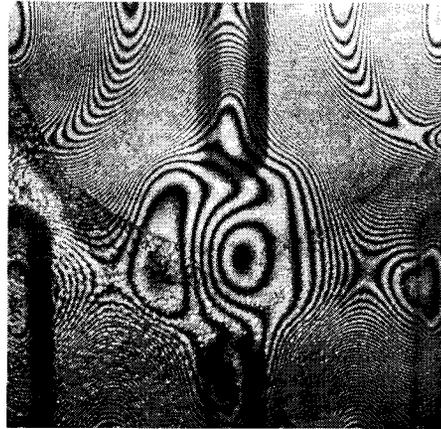


Bild 2: Verformungsbild des in Bild 1 gezeigten Kesselglieds

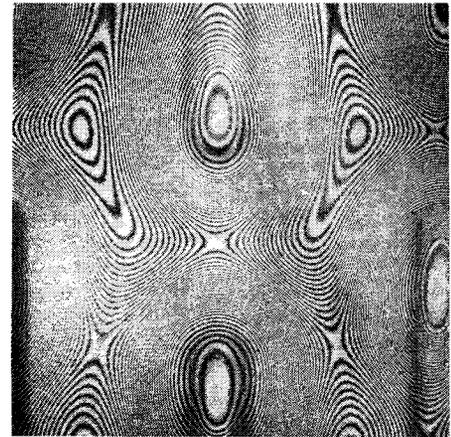


Bild 3: Verformungsbild der verbesserten Konstruktion des Kesselglieds

verformten Kesselglieds zeigt Bild 2. Die Innenanker, die beide Wände zusammenhalten, zeichnen sich durch Ellipsen als Stellen mit geringster Verformung ab. Auffällig ist eine besonders starre Zone ungefähr in der Mitte, die nur wenige Interferenzlinien aufweist. Die Randbereiche dieser starren Zone, die durch besonders dicke Innenanker hervorgerufen wurde, sind nach Aussage dieses Verformungsbildes extrem bruchgefährdet. Tatsächlich ging auch eine ganze Serie dieser Kesselglieder zu Bruch, worauf die Konstruktion geändert wurde. Das Verformungsbild der geänderten Konstruktion zeigt Bild 3. Durch Weglassen eines Innenankers weist dieses Kesselglied statt der starren Region nun eine Sattelfläche und damit eine gleichmäßigere Steifigkeit auf. Mit dieser verbesserten Konstruktion entstanden keine Schadensfälle mehr. Dies hätte sich mit einer holographischen Untersuchung vorhersagen lassen.

In Bild 4 ist das Beispiel einer dynamischen Verformung gezeigt. Es handelt sich um den Befestigungsflansch eines Elektromotors, bei dem nach der „average-time“-Methode [2] eine Ermittlung der Schwingungsform durchgeführt wurde. Die Amplitude steigt von einer Linie zur nächsten um etwa $0,15 \mu\text{m}$ an. Im Betrieb zeigte sich bei diesem Motor eine hohe Geräuschbelastung, dessen Ursache in Bild 4 sofort erkannt werden kann. Der untere Teil des Flansches mit der größten Schwingungsamplitude schlägt bei jeder Schwingung auf sein Gegenlager und erzeugt ein Geräusch. Abhilfe kann durch weitere Befestigungsanschlüsse geschaffen werden.

Prüfung von Bauteilen auf Werkstofffehler

Die Bedeutung der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung wächst in der heutigen Zeit, in der man Rohstoffe zu sparen versucht, ständig. Durch eine zerstörungsfreie Prüfung können Sicherheitsfaktoren verkleinert werden, was eine Rohstoffersparnis (beispielsweise bei Rohren durch eine dünnere Wanddicke) zur Folge hat. Ein weiterer Vorteil ergibt sich trotz des geringeren Werkstoffaufwandes in der größeren Betriebssicherheit. Es wurde bereits eine Reihe von zerstörungsfreien Prüfverfahren entwickelt, von denen Röntgen- und Ultraschallprüfverfahren sowie auch die Thermographie zu den bekanntesten Verfahren zählen. Obwohl das holographische Verfahren das jüngste zerstörungsfreie Prüfverfahren ist, sind seine Vorzüge so überzeugend [15 bis 17], daß man in den nächsten Jahren mit einem großen Anwendungsgebiet rechnen können.

Der Vorteil der holographischen Prüfung liegt darin, daß eine Verformung durch eine wirklichkeitsnahe Beanspruchung des Bauteils gemacht werden kann. Durch die Empfindlichkeit des Verfahrens kann die Beanspruchung weit unter die Bruchgrenze eines Bauteils verlegt werden, so daß Anrißfehler mit Sicherheit vermieden werden können. Die Holographie als zerstörungsfreies Prüfverfahren wird vor allem bei solchen Werkstoffen angewendet, bei denen konventionelle Prüfverfahren zumindest problematisch sind. Dies sind Werkstoffe wie beispielsweise Gummi, Gummi-Metall-Verbindungen, Kle-

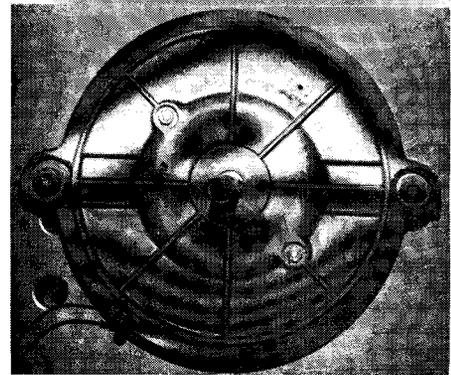


Bild 4: Schwingungsform des Befestigungsflansches eines Elektromotors

beverbindungen, verstärkte Kunststoffe, aber auch zum Teil Metalle.

Ferner wird bisher eine statistische zerstörende Berstdruckprüfung durchgeführt. In den Bildern 5 und 6 ist das holographische Untersuchungsergebnis von präparierten Rohren wiedergegeben. Das in Bild 5 dargestellte Rohr ist fehlerfrei, das in Bild 6 gezeigte Rohr weist in der Rohrmitte eine Schwachstelle auf.

In Bild 7 wurde ein Teil der Lauffläche eines Gürtelreifens untersucht [17]. Der Reifen wurde durch Änderung des Innendrucks verformt. Dadurch verformt sich die gesamte Lauffläche, was sich an den annähernd waagerechten Linien (Grundmuster) zeigt. Die ringförmigen Linien zeigen jene Verformung an, die durch eine (eingebaute) Lagenlösung in der Karkasse hervorgerufen wurde. Erschwerend auf die Erkennbarkeit des Fehlers wirken sich die waagerechten Linien und die Profilstruktur des Reifens aus.

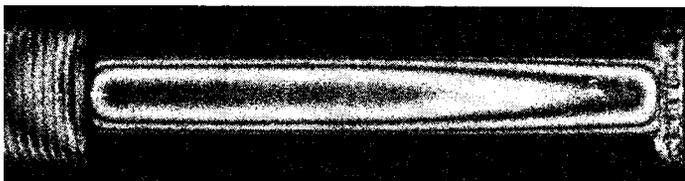


Bild 5: Holographische Untersuchung eines Kupferrohres (Durchmesser 10 mm) ohne Schwachstelle

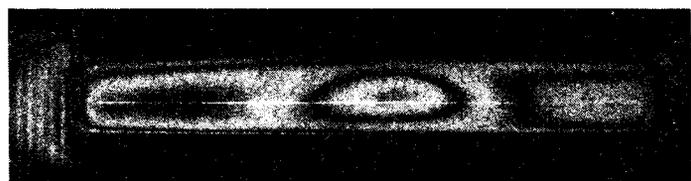


Bild 6: Holographische Untersuchung eines Kupferrohres mit einer Schwachstelle in der Rohrmitte