

## Wärme- und Stoffübertragung

### Interne Arbeitssitzung des Fachausschusses „Wärme- und Stoffübertragung“ der Verfahrenstechnischen Gesellschaft (VTG) im VDI

Unter Leitung des Obmanns, Prof. Dr.-Ing. U. Grigull, Lehrstuhl und Institut A für Thermodynamik an der Techn. Hochschule München, fand am 7. und 8. April 1970 in Münster/Westfalen die interne Arbeitssitzung des Fachausschusses „Wärme- und Stoffübertragung“ statt<sup>1)</sup>. Auf dieser von etwa 90 Mitgliedern und Gästen besuchten Veranstaltung wurden 17 Vorträge gehalten, über die im folgenden kurz berichtet wird.

### Gleichung zur Berechnung des Wärmeübergangs im Kreuzstrom an Rohrbündel

Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. H. Hausen (Vorgetragen von Dr. J. Schröder), Lehrstuhl und Institut für Thermodynamik und Verfahrenstechnik der Technischen Hochschule Hannover.

Die Art, wie Grimson die Abhängigkeit der von Pierson und Hoge gemessenen Wärmeübergangszahlen von den Teilungsverhältnissen in Form von Kurven oder Tabellen dargestellt hat, ist unbefriedigend. G. Hirschberg und später A. Schack in der 7. Auflage seines Buches „Der industrielle Wärmeübergang“ haben sich bereits bemüht, den genannten Zusammenhang durch eine empirische Formel wiederzugeben. Es wurde erörtert, wie man zu einer wesentlich vollkommeneren Gleichung gelangen kann, die nicht nur die Abhängig-

keit von den Teilungsverhältnissen genauer darstellt, sondern auch den Einfluß von  $Re$  auf diese Abhängigkeit zu berücksichtigen gestattet.

In der Diskussion wurde darauf hingewiesen, daß sich in der Arbeit von Pierson für einige Teilungsverhältnisse merkwürdige Werte für den Exponenten  $n$  ergeben. Dies liegt daran, daß die Kurve der gemessenen Wärmeübergangszahlen bei kleinen  $Re$ -Zahlen abknickt. Läßt man diesen kleinen  $Re$ -Bereich außer Betracht, so ergeben sich wesentlich einfachere Gleichungen für die Nußelt-Zahlen. Neuere Messungen (F. Scholz) lassen vermuten, daß die von H. Hausen getroffenen Verallgemeinerungen nicht ohne weiteres zulässig sind.

### Analytische Berechnung der thermischen Wirksamkeit mehrstufiger Gas/Feststoff-Wärmeübertrager

Dipl.-Ing. B. Vosteen, Institut für Wärme- und Brennstofftechnik der Technischen Universität Braunschweig

Um den Wärmeübergang von einem Gas (Wärmeträger) an einen feinkörnigen Feststoff (Wärmegut) in gestuftem Gegenstrom zu bewirken, werden z. B. in der Zementindustrie, aber auch in anderen Zweigen der Verfahrenstechnik sog. „Schwebegaswärmeaustauscher“ verwendet. Diese mehrstufigen Gas/Feststoff-Wärmeübertrager bestehen aus Rohrabscheider-Stufen oder Kammer-Stufen (Mischkammern) in gegensinniger Schaltung.

Gas und Feststoff kommen in einer jeden Stufe unmittelbar in Berührung. Da man eine vollkommene Trennung von Gas und Feststoff am Austritt aus einer Stufe nicht verwirklichen kann, reißt das aufsteigende Gas einen Teil des Feststoffs in die nächst höhere Stufe mit sich. So entstehen Feststoffkreisläufe zwischen benachbarten Stufen, d. h. das Kapazitätsstromverhältnis Feststoff/Gas ändert sich von Stufe zu Stufe.

1) Bericht über die vorangegangene Sitzung s. diese Zeitschr. 41, 930/37 [1969].

In der referierten Arbeit wurden zwei idealisierte Gas/Feststoff-Wärmeübertrager theoretisch untersucht. Der eine besteht nur aus Rohrabscheider-Stufen, der andere dagegen nur aus Kammer-Stufen. (Fast alle Schwebegaswärmeaustauscher bekannter Bauarten sind als Mischformen beider anzusehen.) Es wurde nachgewiesen, daß sich die Temperaturen von Gas und Feststoff in den Stufen praktisch vollständig ausgleichen (Stufe als Gleichgewichtseinheit). Dabei werden die in der Zementindustrie üblichen Kornfeinheiten vorausgesetzt. Hierbei wurden erstmals geschlossene analytische Berechnungsgleichungen für den thermischen Wirkungsgrad  $\eta$  und den kalorischen Gütegrad  $\Phi$  (Betriebscharakteristik) entwickelt, die – ähnlich wie die bekannten Formeln für gewöhnliche Zwei-Phasen-Wärmeübertrager mit fester Trennwand zwischen den Phasen – nur die Betriebsparameter enthalten: das vorgegebene Gesamtkapazitätsstromverhältnis, die Stufenzahl sowie die für die Feststoffkreisläufe maßgebenden Strömungsparameter, d. h. die Abscheidegrade der Abscheider bzw. die Trenngrade der Kammern.

Bisher nicht recht verständliche Unterschiede der thermischen Wirksamkeit solcher Gas/Feststoff-Wärmeübertrager verschiedener Bauart lassen sich, wie die Auswertung der Berechnungsgleichungen zeigt, unter Berücksichtigung der Feststoffkreisläufe sowohl erklären wie vorausberechnen.

Wie in der Diskussion festgestellt wurde, ist unter der Annahme von Gleichgewichtsstufen der untersuchte Gas/Feststoff-Wärmeaustauscher in Kaskadenanordnung mit einer Rektifizierkolonne vergleichbar, und die hierfür übliche graphische Darstellung liefert ein anschauliches Bild der technischen Vorgänge. Der allgemeine Aufbau des Rechen-Modells (keine Gleichgewichtsstufen) bietet dagegen den Vorteil, daß es fortlaufend erweitert werden kann. Damit lassen sich auch andere Probleme, wie die Entsäuerung oder der Austausch mit von Stufe zu Stufe veränderlicher Wärmekapazität, untersuchen.

### Sonderprobleme bei einem fluchtenden Wärmeaustauscher<sup>2)</sup>

*Dipl.-Ing. H. G. Groehn und Dipl.-Ing. F. Scholz (Vortragender), Institut für Reaktorbauelemente der Kernforschungsanlage Jülich*

Bei aerodynamischen Untersuchungen einer fluchtenden Rohranordnung waren hinter dem Bündel sehr unterschiedliche Geschwindigkeiten beobachtet worden. Da angenommen werden muß, daß solche Geschwindigkeitsunterschiede innerhalb des Bündels die Gleichmäßigkeit des Wärmestromes und der Temperaturen beeinträchtigen, wurden in verschiedenen Reihen eines fluchtenden Bündels (Rohrdurchmesser  $D = 51$  mm, Querteilung  $S_Q = 2,06 D$ , Längsteilung  $S_L = 1,37 D$ ) die Wärmeübergangskoeffizienten der einzelnen Rohre einer Reihe ermittelt. Es zeigte sich, daß die Geschwindigkeitsunterschiede innerhalb des Bündels nicht verschwinden, jedoch wesentlich geringer sind als im freien Querschnitt hinter den Rohren.

Fragen der Gasmischung innerhalb des Bündels wurden an einem zehnstufigen Bündel mit 9 Rohren je Reihe untersucht. Hierbei konnten alle Rohre von Kühlwasser im Kreuz-Gegenstrom durchströmt werden. Jedoch war durch Aufteilung der Wassermenge in drei Teilzweige eine Abschaltung der Kühlung in einem oder zwei Dritteln des Strömungs-

querschnittes möglich. Messungen der Gastemperaturen in gekühlten und nicht gekühlten Strömungsgassen sowie am Ende des Bündels senkrecht zur Strömungsrichtung und zu den Rohrachsen zeigten, daß bei dieser Anordnung kein nennenswerter Queraustausch innerhalb des Bündels stattfindet.

Da der Anteil des Reibungswiderstandes bei querdurchströmten Bündeln sehr gering ist, eine Erhöhung der Rauigkeit der Rohre sich daher für den Druckverlust nicht stark auswirken sollte, wurde vorgeschlagen, zur Verbesserung des Wärmeüberganges axiale Stolperrippen von geringer Höhe anzuordnen. Diese tragen praktisch nicht zur Vergrößerung der Oberfläche bei sondern verhindern lediglich den Aufbau geordneter, den Wärmeübergang behinderender Grenzschichten. Es zeigte sich, daß bei Anordnung von 16 dünnen und nur 0,5 mm hohen Rippen (die ohne nennenswerten Aufwand im Ziehprozeß der Rohre mit aufgebracht werden können) in einem weiten Bereich der Reynolds-Zahl eine erhebliche Verbesserung der Wärmeübergangskoeffizienten (bis zu 50%) bei nahezu gleichem Strömungswiderstand möglich ist. Die bei dem Bündel aus unberippten Rohren aufgetretenen Unterschiede der Axialgeschwindigkeit hinter dem Bündel traten hierbei nicht auf, was ein weiterer willkommener Vorteil dieser Rohre sein dürfte.

Diskussion: Bei Wärmeaustauschermodellen treten unabhängig von der Re-Zahl, mehr oder weniger zufällig, unsymmetrische Strömungen auf, die Rohre werden dabei unter einem Winkel von etwa 45 rad angeströmt. Es wäre deshalb denkbar, daß es verschiedene stabile Strömungen gibt und daß gerade die vollsymmetrische Strömung instabil ist. Bei den vorliegenden Verhältnissen entspricht die Höhe der Stolperrippen etwa der Grenzschichtdicke. Man hat hier den glücklichen Fall einer Erhöhung des Wärmeübergangs ohne Erhöhung des Druckverlusts. Für fluchtende und versetzte Rohranordnungen liegt gute Übereinstimmung mit den Messungen anderer Autoren vor.

### Ein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen Wärmeübergang und Druckabfall turbulenter Strömungen

*Dipl.-Ing. F. Steimle, Institut für Wärmetechnik der Universität Stuttgart*

Die Erkenntnisse der Hydro- und Aerodynamik können für die Beschreibung des Wärmeübergangs bei turbulenter Strömung besser nutzbar gemacht werden, wenn die bereits bekannten Ansätze der Analogie zwischen Wärmeübergang und Druckabfall verbessert werden. Ausgehend von den Ansätzen von Prandtl und Schlichting wurde ein Zusammenhang hergeleitet, der den bezogenen Druckabfall  $\Delta p/L$ , den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$ , den Massendurchsatz  $\dot{m}$  [kg/s] und Stoffwerte enthält. Zur Beschreibung werden zwei neue Kennzahlen abgeleitet. Mit ihrer Hilfe kann der Zusammenhang ausgedrückt werden durch die Beziehung:

$$Nu_{in} = F_z \cdot SK^n$$

Darin ist  $Nu_{in}$  eine abgewandelte Nu-Zahl und SK eine den Druckabfall kennzeichnende Strömungskennzahl. – Die Auswertung zahlreicher recht unterschiedlicher Untersuchungen ergab einheitlich den Wert  $n = 0,37$  in der oben erwähnten Gleichung. Die unterschiedlichen Strömungsformen kommen in der Größe  $F_z$  zum Ausdruck, die damit eine gute Vergleichsgröße ist. – Aus den Analogiebetrachtungen ergab sich eine die Grenzschicht charakterisierende Größe der Quotient  $\dot{m}/\eta$  [m], der anstelle der Bezugslänge tritt. Ferner

2) Die Arbeit erscheint nach Abschluß noch laufender Versuche demnächst in dieser Zeitschrift.

wurde nachgewiesen, daß bei turbulenter Strömung der Exponent der Pr-Zahl immer halb so groß ist wie der Exponent der Re-Zahl.

Für die Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte wird eine neue Art der Mittelwertbildung von allgemeiner Gültigkeit angegeben.

Diskussion: Durch Transformation der unabhängigen Variablen unter Benutzung der Analogie, erhält man eine neue Beziehung für den Wärmeübergang. Die Analogiebeziehungen gelten nur für Fälle mit überwiegendem Reibungswiderstand; Messungen zeigten jedoch, daß die mit den Analogiebeziehungen abgeleitete Strömungskennzahl SK auch für Probleme mit Formwiderstand charakteristisch ist. Die Strömungskennzahl SK wird aus dem gemessenen Druckabfall und dem Massendurchsatz berechnet, so daß die Definition einer kennzeichnenden Länge bei dieser Darstellung entfällt. Die angegebene Beziehung gestattet eine allgemeine und einfache Darstellung der Wärmeübergangszahlen.

### **Einfluß von Thermodiffusion, Diffusionsthermik und Enthalpietransport auf den gekoppelten Stoff- und Wärmeübergang im Rohr**

*Dipl.-Ing. L.-P. Röhl, Lehrstuhl und Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Berlin*

Zusätzlich zur Diffusion und Wärmeleitung treten in einem Gemisch im stofflichen und thermischen Ungleichgewicht die molekularen Transportvorgänge Thermodiffusion und Diffusionsthermik auf. Außerdem ist mit den sich gegeneinander bewegendenden molekularen Stoffströmen stets ein Enthalpietransport verbunden. Diese theoretische Untersuchung soll zur Klärung der Einflüsse von Thermodiffusion, Diffusionsthermik und Enthalpietransport auf den Stoff- und Wärmeübergang in binären Gasgemischen bei laminarer Rohrströmung beitragen. Vereinfachend wurden die Gültigkeit der Geschwindigkeitsverteilung nach *Hagen* und *Poiseuille*, konstante Stoffwerte sowie ein gegenüber der Konvektion vernachlässigbarer Anteil der axial gerichteten molekularen Transportvorgänge vorausgesetzt. Die Transportgleichungen konnten für folgende Fälle numerisch gelöst werden:

- 1.) konstante Werte der Temperatur und der Konzentration an der Rohrwand;
- 2.) eine konstante Temperatur und eine verschwindende Massenstromdichte an der Rohrwand.

Näherungsweise ist der erste Fall beispielweise bei der Kondensation eines Dampfes in Anwesenheit von Inertgas gegeben. Der zweite Fall tritt bei der teilweisen Entmischung zweier Gase unter der Einwirkung der durch eine Heizung oder Kühlung verursachten Thermodiffusion auf.

Die Transportvorgänge im Rohr werden anhand der örtlichen Konzentrations- und Temperaturverteilungen erläutert. Die Ergebnisse zeigen, daß ein wesentlicher Einfluß der Thermodiffusion bei geringen Konzentrations- und größeren Temperaturunterschieden zu erwarten ist. Ein größerer Anteil der Diffusionsthermik am Wärmeübergang setzt dagegen geringere Temperatur- und höhere Konzentrationsunterschiede voraus. Der Enthalpietransport dürfte in Gemischen mit sehr unterschiedlichen spezifischen Wärmen der Komponenten sowie bei höheren Massenstromdichten nicht zu vernachlässigen sein. Mit abnehmender Lewis-Zahl des Gemisches

ist eine wachsende Bedeutung der Thermodiffusion, der Diffusionsthermik und des Enthalpietransports für den Stoff- und Wärmeübergang verbunden.

Diskussion: Bei der teilweisen Trennung eines Gasgemisches tritt zunächst eine starke Entmischung infolge Thermodiffusion und dann eine Rückvermischung infolge Diffusion auf. Es wurde festgestellt, daß in extrem günstigen Fällen der Einfluß der Thermodiffusion einige Prozent betragen kann, im allgemeinen sind die Effekte jedoch so schwach, daß sie für technische Fälle (Kühl- oder Trennprozesse) keine Bedeutung haben.

### **Anwendung des Prandtlischen Grenzschichtmodells auf den Wärmeübergang an Flüssigkeiten mit stark temperaturabhängigen Stoffeigenschaften bei erzwungener Strömung**

*Dr.-Ing. G. Grass, Dr.-Ing. H. Herkenrath (Vortragender) und Dr.-Ing. W. Hufschmidt, CCR Euratom, Ispra/Italien*

In den gebräuchlichen Darstellungen des Wärmeübergangs an eine in einem Kanal strömende Flüssigkeit,  $Nu = f(Re, Pr)$ , wurden die infolge ihrer Temperaturabhängigkeit unterschiedlichen Stoffeigenschaften in Wandnähe (W) und im turbulenten Kern (B für Bulk) bisher in der Regel durch Korrekturfaktoren der Form  $(\eta_B/\eta_W)^m$ ,  $(\lambda_B/\lambda_W)^n$  oder  $(c_p/c_{pB})^p$  berücksichtigt. Bei sehr starker Veränderlichkeit der Stoffwerte über den Kanalquerschnitt liefern diese Darstellungen jedoch keine befriedigenden Ergebnisse.

In der vorgetragenen Arbeit wurde aus dem Prandtlischen Grenzschichtmodell eine physikalisch begründete neue Beziehung zur Beschreibung des Wärmeübergangs bei unterschiedlichen Stoffwerten entwickelt. Im Prandtlischen Modell ergibt sich der Gesamtwärmeübergangswiderstand (reziproker Wert der Wärmeübergangszahl) als Summe der Teilwiderstände für den turbulenten Kern und die laminare Grenzschicht. Setzt man bei unterschiedlichen Stoffeigenschaften folgerichtig in den ersten Summanden die entsprechende Bulk-Stoffeigenschaften, in den zweiten die Stoffeigenschaften in Wandnähe ein und berechnet die im Prandtlischen Modell auftretenden Konstanten nach *Petukhov*, so erhält man eine neue Wärmeübergangsformel, in welcher neben der auf Bulk-Temperatur bezogenen Prandtl-Zahl  $Pr_B$  die auf Wandtemperatur bezogene Prandtl-Zahl  $Pr_W$  auftritt. Die Prandtl-Zahl selbst erscheint also hier als örtlich veränderliche Stoffgröße und nicht wie gewöhnlich als mittlere Kenngröße. Die neue Formel geht für konstante Stoffeigenschaften in die bekannte *Petukhov*-Formel über, welche für diesen Fall erfahrungsgemäß in weiten Bereichen zutrifft.

Die Darstellung wurde insbesondere anhand des Wärmeübergangs an Wasser bei überkritischen Drücken, und zwar im Bereich der pseudokritischen Temperatur überprüft. Obwohl die Prandtl-Zahlen in Kern und Wandnähe sich unter diesen Bedingungen im Verhältnis bis zu 1 : 60 unterscheiden, ergab die neue Formel weniger als 10% mittlere Abweichung von den Meßwerten. Die Beziehung erlaubt natürlich auch eine Beschreibung der Wärmeübertragung bei unterkritischen Drücken, wenn infolge hoher Wärmestromdichten sich die Stoffwerte über den Querschnitt stark ändern.

Wie in der Diskussion festgestellt wurde, ist die sprunghafte Änderung der Pr-Zahl im wesentlichen durch den Verlauf der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  bedingt. Die Stoffübergangszahl  $\beta$  verhält sich ähnlich wie die spezifische

Wärmekapazität  $c_p$ . Es wäre deshalb zu vermuten, daß selbst bei höheren Re-Zahlen die freie Konvektion in der Grenzschicht von Einfluß ist. In der Diskussion konnte diese Frage nicht zufriedenstellend geklärt werden.

### Vereinfachte Berechnung der Stoffübertragung bei turbulenter Strömung mit Hilfe eines mittleren treibenden Potentials<sup>3)</sup>

*Dr.-Ing. K. Elgeti, Farbenfabriken Bayer AG, Leverkusen*

Nach den Ergebnissen einiger neuer experimenteller Untersuchungen von *Heyser, Marschall* und *Gerhart* läßt sich die Stoffübertragung bei turbulenter Strömung nach den Gesetzen der Analogie zwischen Wärme- und Stoffübertragung berechnen, wenn man zusätzlich die sogenannte Stefan-Korrektur für den Stoffübergangskoeffizienten anwendet. Sie berücksichtigt, daß der Stofftransport in der Grenzschicht nicht äquimolar ist. Bei einer Kanalströmung wird wegen dieser Korrektur und wegen der Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit und der Stoffwerte der Vorgang bisher immer schrittweise berechnet. Man kann aber zunächst unter den Voraussetzungen konstanter Stoffwerte Strömungsgeschwindigkeiten und Partialdrücke an der Kanaloberfläche ein mittleres treibendes Potential für den gesamten Kanal definieren, mit dessen Hilfe sich die übertragene Stoffmenge unmittelbar berechnen läßt. Dieses Potential ist eine dimensionslose Größe, die ähnlich wie die mittlere treibende Temperaturdifferenz bei Kreuzstrom aus einem Diagramm entnommen werden kann und nur von den Partialdrücken am Anfang und am Ende des Kanals abhängt. Die Anwendung des Verfahrens auf Messungen anderer Autoren, bei denen sich Stoffwerte, Strömungsgeschwindigkeiten und Partialdrücke an der Oberfläche in Strömungsrichtung stark änderten, zeigt, daß sich die gemessenen Ergebnisse mit geringen Fehlern rechnerisch wiedergeben lassen, wenn man zur Bestimmung des Stoffübergangskoeffizienten die Reynolds- und die Schmidt-Zahl arithmetisch zwischen Eintritt und Austritt mittelt.

In der Diskussion wurde ergänzend mitgeteilt, daß bei laminarer Strömung die angegebene Näherung über einen großen Partialdruckbereich anwendbar ist. Das Verhältnis von Eintritts- zu Austrittspotential war bei den Messungen im Extremfall etwa drei zu eins.

### Untersuchungen über den Flüssig/Flüssig-Wärmeaustausch

*Dipl.-Ing. Ferrarini, Institut für Kalorische Apparate, Kälte- und Verfahrenstechnik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich*

Dem Wärmeübergang zwischen zwei nichtlöslichen Flüssigkeiten, wovon sich die eine als disperse Phase in Tropfenform durch die andere, kontinuierliche Phase bewegt, wird in letzter Zeit im Rahmen der Gewinnung von Süßwasser aus Meerwasser erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt. Trotz einer bereits ansehnlichen Zahl von Veröffentlichungen fehlen bisher genügend gesicherte Berechnungsunterlagen. Es wurde von Untersuchungen berichtet, die diese Lücke schließen sollen.

Die Versuchsanlage und die Meßmethoden wurden kurz beschrieben. Speziell erwähnenswert sind dabei die Maßnahmen zur Erzielung einer einheitlichen Tropfengröße.

Der Wärmetransport im Tropfeninnern wie auch in der umgebenden Flüssigkeit ist von denselben hydraulischen Größen abhängig. Die Übergangszahlen auf beiden Seiten der Grenzfläche sind demnach nicht voneinander unabhängig. Dies führt auch dazu, daß Hydrodynamik und Wärmeaustausch im Tropfenhaufen viel enger miteinander verknüpft sind als beim konventionellen Austauscher mit metallischer Trennwand. Es war deshalb notwendig, sich sowohl mit den Bewegungsgesetzen als auch mit den Austauschgesetzen zu beschäftigen. Von den Verhältnissen im Kugelhaufen ausgehend, konnten für beide Gesetzmäßigkeiten halbempirisch Beziehungen hergeleitet und experimentell bestätigt werden. Die Beziehungen geben eigene und fremde Meßresultate gut wieder.

Ergänzend wurde in der Diskussion mitgeteilt: bei den eigenen Messungen betrug der Tröpfchendurchmesser etwa 4 bis 8 mm, die Reynolds-Zahl lag im Bereich  $200 < Re < 3000$  und die Prandtlzahl im Bereich  $2 < Pr < 4$ ; als Flüssigkeiten wurden Wasser und ein dünnflüssiges Mineralöl verwendet. Die Wärmeaustauschzahl  $K_T$ , bezogen auf die Austauschfläche, war etwa  $500 \text{ W/m}^2\text{grd}$  und  $K_V$ , bezogen auf das Volumen, betrug etwa  $150 \cdot 10^3 \text{ W/m}^3\text{grd}$ . Diese kleinen Werte für die Wärmeaustauschzahlen sind durch die kleinen Temperaturdifferenzen im Bereich von  $2 < \Delta T < 20 \text{ K}$  bedingt.

Es wurde vorgeschlagen, statt der Kombination Wasser/Mineralöl die Paarung Wasser/Quecksilber zu verwenden. Wegen der hohen Dichte des Quecksilbers dürfte eine Erhöhung der Wärmeaustauschzahl zu erwarten sein.

### Wärme- und Stofftransport bei natürlicher Strömung in Gasgemischen an einer senkrechten Wand

*Prof. Dr.-Ing. K. Stephan (Vortragender) und Dr.-Ing. A. Schaber, Institut für Thermodynamik der Technischen Universität Berlin*

Bei der Wärmeübertragung an Mehrstoffgemische vor einer senkrechten, ebenen Wand findet durch Diffusion und Thermodiffusion eine Entmischung statt, die ihrerseits den Wärmeübergang beeinflusst. Die mathematische Beschreibung derartiger Probleme führt auf ein System gekoppelter partieller Differentialgleichungen, die man numerisch nach der Methode der nichtlinearen Überrelaxation (nonlinear overrelaxation) lösen kann. Dabei zeigt sich, daß Diffusion und Diffusionsthermik auch dann, wenn die Molmassen der Gasbestandteile sehr verschieden und die Temperaturdifferenzen groß sind, den Wärmeübergang nur wenig beeinflussen.

Im Unterschied zu dem praktisch vom Konzentrationsprofil unabhängigen Wärmetransport erwies sich der Stofftransport stark vom Temperaturprofil abhängig. In Wandnähe stellte sich eine merkliche Entmischung ein, die mit der Temperaturdifferenz, dem Unterschied in den Molmassen und mit fallendem Druck anwächst.

Für die Entmischung ergab sich eine einfache Näherungsbeziehung, deren Ableitung darauf aufbaut, daß das Temperaturprofil erhalten bleibt. Die hieraus berechneten Konzentrationen stimmen sehr gut mit denen der exakten Rechnung überein. Wie aus der Näherungsbeziehung folgt, erfahren

3) Die Arbeit wird in dieser Zeitschr. 42, Heft 22 [1970] veröffentlicht.

auch Gase, deren Komponenten annähernd gleiche Molmassen haben, eine wenn auch im allgemeinen geringe Entmischung durch Thermodiffusion.

Die Diskussion ergab, daß bei Xenon/Helium-Gemischen die größte Entmischung an der Wand etwa 15% betrug. Im allgemeinen ist die Entmischung wesentlich kleiner und eine technische Anwendung dürfte sich wegen der notwendigen hohen Stufenzahl nicht lohnen. Mit den Untersuchungsergebnissen kann ein Meßverfahren zur Bestimmung des Verhältnisses von Thermodiffusion zu Diffusionskoeffizient entwickelt werden.

### Verhalten von Dampfblasen in einer unterkühlten Flüssigkeit bei Zwangskonvektion

*Dipl.-Ing. D. Hein (Vortragender), Dipl.-Ing. W. Köhler, MAN Nürnberg und Prof. Dr.-Ing. F. Mayinger, Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Hochschule Hannover*

Für die thermodynamische Auslegung eines Kernreaktors ist der Dampfblasengehalt ein wesentlicher Parameter. Wird, wie es bei Leichtwasserreaktoren der Fall ist, das Kühlmittel gleichzeitig zur Moderation herangezogen, so ist die Leistung vom örtlichen Moderatoranteil und somit vom Dampfvolumentgehalt abhängig. Zur Bestimmung des Dampfgehaltes sind neben Aussagen über den Siedebeginn die Kenntnis über das Verhalten, d. h. über das Wachsen und Kondensieren von Dampfblasen in einer unterkühlten Flüssigkeit bei Zwangskonvektion notwendig.

Nach Abschluß der Untersuchungen über den Siedebeginn wurden die Arbeiten zur Verbesserung der Kernauslegung mit der Erfassung weiterer Einflußgrößen fortgesetzt. Bestimmt wurden der Ablöseradius sowie die Wachstums- und Kondensationsgeschwindigkeit von Dampfblasen an einem Stabbündel bei Zwangskonvektion. Die Messungen wurden bei einem Systemdruck von 3 bar mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera vorgenommen. Es konnten dabei zwei in ihrem Entstehen und weiteren Verhalten unterschiedliche Blasentypen beobachtet werden: Blasentyp I ist durch ein langsames Wachsen gekennzeichnet. Bis die Dampfblase ihr maximales Volumen erreicht, bewegt sie sich mit der Strömung weiter, wobei sie stets in Kontakt mit der überhitzten Grenzschicht bleibt.

Im Gegensatz hierzu bilden sich Blasen vom Typ II explosionsartig. Die Dampfblase dringt nahezu senkrecht in den unterkühlten Flüssigkeitskern ein und kondensiert rasch.

Durch Variieren von Strömungsgeschwindigkeit, Unterkühlungsgrad und Heizflächenbelastung konnte sowohl jeder Blasentyp einzeln als auch beide gleichzeitig beobachtet werden. Der Einfluß der beiden Blasentypen auf den örtlichen Dampfgehalt, den Wärmeübergang und den Zweiphasendruckverlust wird angegeben.

In der Diskussion wurden die vorgetragenen experimentellen Ergebnisse über das Auftreten des Blasentyps I und II bestätigt. Es wurde beobachtet, daß möglicherweise von ein und demselben Keim sowohl Blasen von Typ I als auch vom Typ II ausgehen. Zwischen den beiden Blasentypen sind kontinuierliche Übergänge beobachtet worden. Es wurde vorgeschlagen, die Effekte beim Blasentyp II in einer Siedepumpe für Satelliten auszunutzen. Ferner wurde darauf hingewiesen, daß eine klare Gesetzmäßigkeit über das Auftreten von laminaren bzw. turbulenten Effekten z. Zt. noch nicht existiert. Ausschlaggebend für den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  sind Blasen vom Typ II.

### Blasenverdampfung an Heizwandoberflächen mit künstlichen Dampfblasenkeimstellen

*Dipl.-Ing. K. Schimmelpfennig, Institut für Wärmeübertragung der Technischen Universität Berlin*

Um zu untersuchen, welchen Einfluß die Oberflächenbeschaffenheit von Heizwänden auf das Siedeverhalten von Flüssigkeiten hat, wurde ein Verfahren zur galvanoplastischen Oberflächenbehandlung zwecks Erzeugung künstlicher Dampfblasen-Keimstellen entwickelt. Mit diesem Verfahren können auf gut polierten und entfetteten metallischen Oberflächen in einer elektrolytisch aufzubringenden Metallschicht Vertiefungen von unterschiedlicher Gestalt und beliebiger Dichte erzeugt werden, wobei der kleinste reproduzierbare Öffnungsdurchmesser der Keimstellen bei ca. 8  $\mu\text{m}$  liegt.

An derartig präparierten Heizflächen wurde in ersten Versuchen Wasser unter Atmosphärendruck zum Sieden gebracht. Bei Erreichen einer von der Keimstellengeometrie und dem Keimstellenöffnungsdurchmesser abhängigen Wandüberhitzung stellte sich eine Momentanaktivierung aller Keimstellen ein. Die an den künstlichen Vertiefungen entstandenen Blasen lösten sich fast gleichzeitig von der Heizfläche und stiegen in der auf Sättigungstemperatur gehaltenen Flüssigkeit empor. Die Plattenoberflächentemperatur sank infolge endlicher Temperaturleitfähigkeit des Wandmaterials unter den für eine Blasenbildung notwendigen Wert. Hatte sich die Heizwand erholt und die thermische Grenzschicht die für das Blasenwachstum notwendige Dicke wieder erreicht, wurden alle Keimstellen gleichzeitig aktiv und der Vorgang wiederholte sich. Innerhalb des mit Intervallsieden bezeichneten Bereiches (von  $\dot{q} = 1,6 \cdot 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{h}$  bis  $\dot{q} = 3,2 \cdot 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ , bei einer Keimstellendichte von  $n = 1,8 \cdot 10^4 \text{ m}^{-2}$ ) konnte der Wert der maximalen Temperaturdifferenz zwischen Heizwandoberflächen- und Flüssigkeitstemperatur nicht überschritten werden ( $\Delta T_{\text{max}} = 9,8 \text{ K}$ ), da bei Erreichen dieses Wertes sofort wieder Blasenbildung und Verdampfung einsetzte. Der Verlauf der Siedekurve hat in diesem Bereich also eine unendliche Steigung. Erst bei Erhöhen der aufgeprägten Heizflächenbelastung über  $3,2 \cdot 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{h}$  wurde infolge Zunahme der turbulenten Flüssigkeitsbewegung kontinuierliches Sieden beobachtet. Die erhaltenen Meßergebnisse stimmten sehr gut mit einer von *Han* und *Griffith* aufgestellten Modellvorstellung überein, die von der gleichen Keimstellenanordnung ausgeht, wie sie den vorliegenden Versuchen zugrunde lag (Anordnung der Vertiefungen auf den Ecken gleichseitiger Dreiecke): Die Heizfläche wird während des Siedens in zwei Wärmeübertragungsgebiete aufgeteilt. Im ersten wird die Wärme nur durch natürliche Konvektion übertragen. Das betrifft den Bereich zwischen den Blasen außerhalb ihres Einflußbereiches. Im zweiten wird durch das Abreißen der Blasen von der Heizfläche ein Teil der in der thermischen Grenzschicht gespeicherten Wärme in kältere Flüssigkeitszonen transportiert. Eine entsprechende Flüssigkeitsmenge gelangt durch diesen hydrodynamischen Vorgang an den Blasenentstehungsort und wird durch einen instationären Wärmeleitvorgang auf die zur Blasenreubildung notwendige Temperatur erwärmt.

Versuche im Unterdruckbereich zeigten, daß infolge der Abnahme des Systemdruckes der Blasenabreißdurchmesser und damit die Größe des Blasen einflußbereiches zunimmt. Damit verringert sich der Anteil des Wärmeüberganges durch freie Konvektion, was sich in einer größeren Steigung der Verdampfungskurve bemerkbar macht.

In der Diskussion wurde mitgeteilt, daß die Rauigkeit der Keimstellen unter 1  $\mu\text{m}$  lag und daß eine Ablösefolge

zwischen 1 und 4 s beobachtet wurde. Auffallend war, daß die Blasen über die gesamte Beobachtungsdauer von etwa  $\frac{1}{2}$  Stunde synchron abhoben. Als Ursache für diese Gleichzeitigkeit dürfte nicht die Herstellgenauigkeit der Keimstellen sondern vielmehr eine Selbststeuerung des Systems in Frage kommen, d. h. die Blasen bzw. Keimstellen beeinflussen sich gegenseitig, eventuell über Druckwellen. Weiterhin fiel auf, daß keine Wartezeit für die Aktivierung der Keime beobachtet wurde.

#### Eine Studie über konvektive Strömungen in Flüssigkeiten<sup>4)</sup>

*Dr. H. Hannes (Vortragender) und Dipl.-Phys. R. Weber, Ingenieur-Abteilung für Angewandte Physik der Farbenfabriken Bayer AG, Leverkusen*

In einer Flüssigkeitsküvette mit offener Oberfläche spielen sich als Folge der Verdunstung charakteristische Konvektionsvorgänge ab, die mit Hilfe eines Mach-Zehnder-Interferometers beobachtet und qualitativ gedeutet wurden. Bei Gemischen kann es neben der Konvektion auch zu Schichtungerscheinungen kommen. Die Konvektion entsteht z. B. dadurch, daß die Flüssigkeit in Oberflächennähe infolge der Verdunstung abkühlt, d. h. spezifisch schwerer wird und absinkt. Zu einer stabilen Schichtung kann es im allgemeinen nur bei Gemischen kommen, wenn die dichtere Komponente leichter verdunstet und auf diese Weise die obere Schicht spezifisch leichter wird als das Innere der Flüssigkeit. Es hängt in einem solchen Falle von den Stoffdaten der beteiligten Komponenten ab, ob die durch die Abkühlung bedingte Konvektion oder die Schichtungstendenz überwiegen. Wenn umgekehrt die leichtere Komponente auch leichter verdunstet, so addieren sich beide Effekte, und es ergibt sich in jedem Falle Konvektion.

Bei wässrigen Lösungen tritt infolge der geringen Verdunstung des Wassers fast nur der Stoffeffekt auf. Dagegen findet man bei organischen Lösungsmitteln meist ein Zusammen- bzw. Gegenwirken von Stoff- und Temperatureffekt. Die Vorgänge werden häufig durch andere Stoffeigenschaften, wie Zähigkeit oder Oberflächenspannung, modifiziert. Bei sehr zähen Gemischen können z. B. metastabile Schichtungen auftreten, die dem natürlichen Dichtegradienten gerade entgegengerichtet sind. In einer oberflächennahen Schicht (3 bis 8 mm) kommt es in bestimmten Fällen zu einer wirbelartigen Konvektionsbewegung, die nicht allein durch Dichteunterschiede, sondern vor allem durch Grenzflächenkräfte verursacht wird.

Der Vortrag zeigte — auch an Hand eines kurzen Filmstreifens — Beispiele derartiger Vorgänge, und es wurde versucht, die beobachteten bzw. möglichen Erscheinungen in eine einfache Systematik einzuordnen. Eine praktische Bedeutung haben diese Untersuchungen vor allem für die Technik der Sedimentationsanalyse, sowie überall dort, wo bei empfindlichen optischen Messungen größere Flüssigkeitsküvetten benutzt werden, etwa für Immersionszwecke oder in der Spektroskopie.

Diskussion: Die Versuche wurden bei Zimmertemperatur ausgeführt; die Küvette hatte 2 cm Dmr. Es wurde vorgeschlagen, die angegebene Systematik, bei der nur Effekte durch Dichteunterschiede berücksichtigt wurden, auf Vorgänge zu erweitern, die durch unterschiedliche Oberflächenspannungen ausgelöst werden. Gegebenenfalls lassen sich mit der Oberflächenspannung metastabile Dichteschichtungen als stabile Schichtungen erklären.

#### Tropfenkondensation von Quecksilber

*Dr.-Ing. M. Kollera, Institut A für Thermodynamik der Technischen Hochschule München*

Die ersten Kondensationsversuche mit Quecksilber wurden im Jahre 1956 von *Misra* und *Vonilla* veröffentlicht. Weitere Arbeiten auf diesem Gebiet folgten von *Gelman*, von *Sukhatme* und *Rohsenow* und von *Ivanovskii*, *Milovanov* und *Subbotin*. Die gemessenen hohen Temperaturdifferenzen zwischen dem Quecksilber-Dampf und der Kühlfläche ließen sich nicht allein durch die Wärmeleitung im Kondensat erklären. Vielfach wurde daher ein zusätzlicher Widerstand an der Phasengrenzfläche beim Übergang der Teilchen von der dampfförmigen in die flüssige Phase angenommen. Die Deutung dieses Phasenübergangswiderstandes, die auf Arbeiten von *Hertz* und *Knudsen* zurückgeht, erscheint jedoch nicht befriedigend. Aus diesem Grunde wurde versucht, vorgefundene und eigene Meßergebnisse durch gasdynamische Strömungsvorgänge zu erklären. Diese Strömungsvorgänge, die bei allen Dämpfen mit hinreichend kleiner Dichte von praktischer Bedeutung sind, legen schließlich bei Schallgeschwindigkeit des Dampfes eine Begrenzung des Massenstroms sowohl bei der Kondensation als auch bei der Verdampfung fest. *Hertz* hat diese Begrenzung des Massenstroms bei der Verdampfung von Quecksilber als erster beobachtet und von *Knudsen* wurde sie als die maximale Verdampfungsgeschwindigkeit des Quecksilbers bezeichnet. Bereits Spuren von Inertgas ( $< 1$  ppm), die im Dampfstrom mitgeführt werden, bauen vor der Kondensatoberfläche ein Gaspolster auf, das durch seinen Diffusionswiderstand die Nachlieferung des Dampfes erheblich behindert.

Diskussion: Der im Grenzfall mit Schallgeschwindigkeit auf die Kondensatfläche zuströmende Dampf ist übersättigt. Die Unterkühlung reichte jedoch für eine spontane Kondensation im Dampfstrom nicht aus. Die vorgetragene Ansicht, daß bei Quecksilber der Phasenübergangswiderstand gleich Null und der Kondensationskoeffizient gleich eins ist, wurde allgemein bestätigt.

#### Zur Abhängigkeit der Zähigkeit, Wärmeleitzahl und Oberflächenspannung siedender Flüssigkeiten vom Druck

*Dr.-Ing. D. Gorenflo (Vortragender) und G. Kullmann, Thermodynamisches Institut der Universität Karlsruhe (TH)*

Messungen der Wärmeübergangszahl  $\alpha$  beim Blasensieden verschiedener organischer Stoffe, insbesondere von Kältemitteln, haben gezeigt, daß die relative Druckabhängigkeit von  $\alpha$  in einem großen Druckbereich durch eine einheitliche Funktion des mit dem kritischen Druck normierten Siededruckes beschrieben werden kann. Das legt die Frage nahe, inwieweit solche einheitliche Beziehungen nicht nur für  $\alpha$ , sondern auch für die einzelnen Stoffwerte der siedenden Flüssigkeit, die die Wärmeübergangszahl beeinflussen, — oder für Kombinationen dieser Stoffwerte — gelten. Da sich die Flüssigkeit im Siedezustand befindet, beschreibt eine Druckfunktion dabei neben der Druckabhängigkeit vor allem auch die Abhängigkeit der betreffenden Stoffgröße von der Temperatur.

In der vorliegenden Untersuchung wurden in Anlehnung an Betrachtungen von *Borischanskij* et al.<sup>5)</sup> für eine größere Zahl von organischen Flüssigkeiten aus der Literatur ent-

4) Zur Veröffentlichung in dieser Zeitschrift vorgesehen.

5) *V. M. Borischanskij, J. J. Novikov u. S. S. Kutateladze: Int. Developments in Heat Transfer, Part II, S. 475, New York 1963.*

nommene Werte der Zähigkeit  $\eta$ , der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und der Oberflächenspannung  $\sigma$  in Abhängigkeit vom normierten Siededruck  $\pi = p_s/p_{kr}$  aufgetragen. Dabei ergab sich im erfaßten Druckbereich ( $10^{-4} \leq \pi \leq 0,9$ ) eine ähnliche Abnahme der genannten Stoffgrößen mit steigendem Druck. Zur Beschreibung der relativen Druckabhängigkeit dieser Stoffgrößen  $w$  konnten einheitlich Funktionen des folgenden, einfachen Typs verwendet werden:

$$\ln w/w_B = a + b \ln \pi + c \pi .$$

Dabei bedeutet  $w_B$  den jeweiligen Stoffwert bei einem festen normierten Bezugsdruck. Die Koeffizienten  $a$ ,  $b$  und  $c$  sind innerhalb einzelner Stoffgruppen, z. B. der Halogen-Kältemittel, der Kohlenwasserstoffe und der Alkohole in einem engen Streubereich konstant, unterscheiden sich aber für die verschiedenen Stoffwerte  $\eta$ ,  $\lambda$ ,  $\sigma$ . Die Tatsache, daß bei der Druckabhängigkeit der Wärmeübergangszahl die Unterschiede zwischen den einzelnen Stoffgruppen deutlich geringer sind als beispielsweise bei  $\eta$  oder  $\lambda$ , hängt demnach damit zusammen, daß die verschiedenen Stoffeigenschaften in bestimmten Kombinationen in die Wärmeübergangszahl eingehen. Anhand von zwei Beispielen wurde gezeigt, wie die hier gefundenen Ergebnisse verwendet werden können, um die Brauchbarkeit von Gleichungen aus der Literatur zur Vorausberechnung der Wärmeübergangszahl beim Blasen-sieden zu prüfen.

In der Diskussion wurde darauf hingewiesen, daß infolge neuerer Messungen die Kurven für Wasser etwas anders als angegeben verlaufen. Normiert wurde auf einen Bezugsdruck  $p_B$  zwischen 1 und 2 bar, da der Siededruck der meisten organischen Flüssigkeiten in diesen Bereich fällt.

### **Einfluß von Wärmedurchgang und Strömungsgeschwindigkeit auf die Erstarrung bei turbulenter Rohrströmung**

*Dipl.-Ing. K. Genthner, Institut für Thermodynamik der Technischen Universität Berlin*

Strömt eine Flüssigkeit durch ein Rohr, dessen Wandtemperatur geringer ist als die Erstarrungstemperatur der Flüssigkeit, so bildet sich an der Wand eine Schicht der festen Phase. Die Geometrie dieser festen Phase ist mit dem Strömungsweg und mit der Zeit veränderlich und nähert sich einem stationären Endwert, sobald der Wärmedurchgang zum Kühlmittel gleich dem Wärmeübergang von der flüssigen an die feste Phase wird. Die Geometrie des Endzustandes und die Geschwindigkeit der Phasenumwandlung sind von Interesse für viele technische Aufgaben, bei denen zur Reinigung oder Trennung von Flüssigkeitsgemischen einzelne Komponenten ausgefroren werden sollen. In anderen Fällen, z. B. bei frei verlegten Rohrleitungen oder in Solekühlern, interessiert es, bis zu welcher Kühlung ein Zufrieren verhindert werden kann.

Es wurde der stationäre Endzustand der Phasenumwandlung von Wasser und wäßrigen Lösungen bei turbulenter Strömung in Rohren berechnet, wobei entweder der Mengestrom oder der gesamte Druckabfall als konstant vorausgesetzt wurden. Zu untersuchen war der Einfluß des thermischen Durchgangswiderstandes des Rohres, der Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit und die Frage nach der Stabilität des Erstarrungsprofils. — Kühltemperatur, Eintrittstemperatur und Erstarrungstemperatur haben keinen Einfluß auf die Form der Erstarrungsprofile, sondern lediglich auf die Lage des Erstarrungsbeginns im Rohr. Dagegen wirkt sich

neben der Strömungsgeschwindigkeit der Wärmedurchgangswiderstand zwischen Rohrrinnenfläche und Kühlmittel entscheidend auf die Geometrie der festen Phase aus. Bei konstantem Druckabfall existiert im Bereich niedriger Biot-Zahlen ( $Bi < 2$ ) neben dem stabilen Erstarrungszustand ein zweites, dickeres Erstarrungsprofil, das jedoch instabil ist.

### **Über neuere Strahlungsmessungen an heißen Feuergasen bei hohen Drücken**

*Dipl.-Ing. H. Ziebland, Explosives Research and Development Establishment, Waltham Abbey, England*

Während der Untersuchung des konvektiven Wärmeüberganges von heißen, teilweise dissoziierten Feuergasen theoretisch und experimentell beträchtliche Aufmerksamkeit gewidmet worden ist, sind bisher keine systematischen Arbeiten bekannt geworden, welche sich mit dem Studium der Wärmestrahlung bei Gaszuständen, wie sie in Strahltriebwerken zu finden sind, befassen, nämlich bei Temperaturen bis zu etwa 4000 K bei gleichzeitig erhöhten Drücken.

Abschätzungen der in solchen Systemen durch Strahlung übertragenen Wärmemengen beruhen auch heute noch auf Extrapolationen der Ergebnisse der klassischen Untersuchungen von *Hottel* und *Egbert* (1935) und von *Schmidt* und *Eckert* (1937) an Kohlensäure und Wasserdampf, welche mit Rücksicht auf experimentelle Schwierigkeiten nicht über 1600 K und 1 bar Gesamtdruck ausgedehnt werden konnten.

Um unsere Kenntnisse auf diesem bedeutenden Gebiet zu erweitern, wurden Versuchseinrichtungen entworfen und gebaut, die es gestatten, die Strahlung von Wasserdampf und evtl. anderen Verbrennungsgasen bis zu 4000 K und etwa 100 bar zu messen. Der Gasgenerator, eine mit einem stöchiometrischen Gemisch von Sauerstoff und Wasserstoff betriebene Hochdruckbrennkammer und die verwendeten Meßsonden wurden beschrieben. Die bisher vorliegenden Versuchsergebnisse, welche qualitativ und quantitativ interessante Schlußfolgerungen zulassen, wurden diskutiert.

In der Diskussion wurden die experimentellen Untersuchungen ausführlich besprochen. Bei der Verbrennung traten Gasbeschleunigungen von 30000 bis 40000 g auf. Infolge der hohen Drücke wurde chemische Lumineszenz beobachtet, die Dissoziation der Feuergase war bei Temperaturen von 4000 K erheblich. Emissionserscheinungen als Folge von Rekombinationsvorgängen wurden nachgewiesen. Die mathematische Formulierung des Problems bereitet erhebliche Schwierigkeiten, da in der Brennkammer weder thermisches noch chemisches Gleichgewicht vorliegt.

### **Messung der Temperatur- und Winkelabhängigkeit des Gesamtemissionsgrades fester Stoffe bei Temperaturen oberhalb 1000 K**

*Dr.-Ing. M. Groll und Dipl.-Ing. G. Neuer (Vortragender), Institut für Kernenergie der Universität Stuttgart*

Es wurde eine Anlage beschrieben, mit der die Temperatur- und Winkelabhängigkeit des Gesamtemissionsgrades fester Stoffe bei Temperaturen zwischen 1000 und 3000 K gemessen werden können. Die Messung beruht auf dem Prinzip des Strahlungsvergleichs. Dabei wird der Strahlungsfluß von der Probenoberfläche mit einem Gesamtstrahlungsempfänger gemessen, der vorher an einem schwarzen Körper geeicht wurde.

Aufgrund verschiedener Forderungen, wie große Strahlungsaustrittsöffnung, einfacher, kompakter Aufbau und leichte Handhabung, wurde ein elektrisch geheizter Graphit-Hohlraumstrahler für den genannten Temperaturbereich entwickelt. Der Hohlraum ist durch eine zylindrische, koaxiale Bohrung in einem rotationssymmetrischen Graphit-Körper realisiert. Die Isothermie der Hohlraumwände wird durch unterschiedliche Wandstärke und dadurch bedingte örtlich verschiedene Wärmequellichte erzielt.

Zum Messen des Emissionsgrads werden scheibenförmige Proben mit 15 mm Dmr. und etwa 5 mm Dicke im Vakuum mit einer Elektronenkanone beheizt. Als Gesamtstrahlungsempfänger dient ein Zapfenthermoelement in Verbindung

mit einer Blendenoptik, die etwa 1/8 der Probenoberfläche auf dem Thermoelement abbildet. Die Probenoberfläche wird mit einem photoelektrischen Teilstrahlungs-pyrometer in einer radialen Bohrung gemessen. Die Meßdaten werden digital erfaßt und mittels eines Rechenprogramms ausgewertet.

In der Diskussion wurde mitgeteilt, daß bei den bis jetzt ausgeführten Versuchen die Proben nur senkrecht zur Oberfläche vermessen wurden; die Gültigkeit des Lambert'schen Cosinus-Gesetzes konnte deshalb noch nicht nachgeprüft werden. Es wurde darauf hingewiesen, daß eine große Sammlung russischer Meßwerte vorliegt; dabei ist die Abhängigkeit des Emissionsgrads von der Temperatur fast durchwegs linear.  
*G. Merker u. U. Grigull [VB 1390]*