

Strömung mehrphasiger Systeme

Von Franz Mayinger

1. Übergeordnete Probleme und Übersichtsarbeiten

Die Behandlung und Beschreibung von Strömungsvorgängen geht in der Regel von den Erhaltungssätzen für Masse, Energie und Impuls aus. Man kann dabei die Lagrangesche oder die Eulersche Betrachtungsweise heranziehen. In mehrphasigen Gemischen existieren nahezu immer Geschwindigkeitsunterschiede und damit Relativbewegungen zwischen den Phasen. Ein zweiphasiges System muß deshalb konsequenterweise mit zwei Geschwindigkeitsfeldern beschrieben werden, und man kann bei der Aufstellung der Erhaltungssätze ganz generell nach zwei verschiedenen Methoden vorgehen, nämlich: jede Phase wie ein Fluid für sich betrachten (two-fluid model) oder einem Vorschlag von N. Zuber [1] folgend eine Bewegungsgleichung für das gesamte Gemisch ansetzen, wobei Austauschvorgänge zwischen den Phasen durch spezielle Erhaltungssätze berücksichtigt werden müssen (drift-flux model).

Die Diskussionen über die Vor- und Nachteile dieser beiden Möglichkeiten für die Darstellung der Erhaltungssätze haben in den vergangenen beiden Jahren vor allem durch ein Buch von M. Ishii [2] intensiv zur Diskussion gestanden. Ishii behandelt dort grundlegend die thermo- und fluid-dynamische Theorie von Gas-Flüssigkeits-Strömungen.

Bei den Ansätzen nach dem „two-fluid model“ besteht die Schwierigkeit, die Austauschgrößen zwischen den Phasen als Verbindungsglieder zwischen den beiden Bewegungsgleichungen physikalisch richtig sowie für den Vorgang ausreichend darzustellen und in eine mathematisch handhabbare Form zu kleiden. Bei den numerischen Lösungsverfahren treten dabei häufig rein rechnerisch bedingte Instabilitäten auf, die auf ungeeignete Ansätze für die Wechselwirkungen zwischen den Phasen zurückzuführen sind. Zur Vermeidung solcher Schwierigkeiten wurde z. B. vorgeschlagen [3], daß diese Wechselwirkungs-Ansätze Ableitungen erster Ordnung nach der Zeit und nach den Ortskoordinaten enthalten sollen.

Diese Schwierigkeiten treten beim „drift-flux model“, in dem das Strömungsverhalten des gesamten Gemisches in einer Bewegungsgleichung beschrieben wird, nicht auf. Die Relativbewegung zwischen den Phasen ist

Die letzte Übersicht dieser Thematik erschien in Fortschritte der Verfahrenstechnik Bd. 14, S. 14/23. Düsseldorf: VDI-Verlag 1976.

Prof. Dr.-Ing. Franz Mayinger ist Inhaber des Lehrstuhls für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Hannover.

dann jedoch durch zusätzliche Bilanzbetrachtungen zu berücksichtigen. Hierfür muß jedoch in der Regel die Strömungsform bekannt sein, und es ist wesentlich, wie die zeitliche und örtliche Mittelung des Strömungsfeldes erfolgt. Ausführlich setzt sich mit diesen Fragen *J. M. Delhaye* [4] auseinander. Für den speziellen und theoretisch noch am ehesten zugänglichen Fall der Ringströmung behandeln *M. Ishii*, *T. C. Chawla* und *N. Zuber* [5] Ansätze für die Erhaltungssätze und für die Phasenwechselwirkungen. Sie berücksichtigen dabei insbesondere auch die Einflüsse der Schwerkraft, der Schubspannungseffekte zwischen den Phasen als Funktion der Welligkeit bzw. Rauigkeit der Phasengrenzfläche und verschiedener Strömungsformen im Flüssigkeitsring. Die vollständige Darstellung der Erhaltungssätze ist sehr umfangreich, und *G. Yadigaroglu* und *R. T. Lahey jr.* [6] machten interessante Vorschläge für die Ableitung vereinfachter Ansätze. Sie stellten die Erhaltungssätze auch in der Lagrangeschen Betrachtungsweise dar, wobei sie die Geschwindigkeiten auf den Massenschwerpunkt bezogen und Schwerpunkte für Impuls und Energie einführten.

Für eine andere spezielle Strömungsform, nämlich die Blasenströmung, wurden von *O. V. Voinov* und *A. G. Petrov* [7] Überlegungen zur Aufstellung der Bewegungsgleichungen angestellt. Sie gehen jedoch von einer anderen Betrachtungsweise als die bisher zitierten Autoren aus.

Wer von diesen speziellen, aber doch grundlegenden Überlegungen der Darstellungsformen zweiphasiger Strömungen noch wenig berührt ist und vielmehr eine auf dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik beruhende Einführung in die Fluidodynamik von Gas-Flüssigkeits-Gemischen sucht, der sei auf einen Übersichtsautsatz von *G. F. Hewitt* und *F. Semeria* [8] verwiesen. Hier werden sowohl theoretische Ableitungen als auch eine Reihe empirischer Ansätze für stationäre und instationäre Strömung beschrieben. Der Aufsatz behandelt auch die praktische Anwendung auf Dampferzeuger. Einen interessanten Überblick über Forschungsergebnisse in den letzten Jahren geben die Proceedings des „Advanced Study Institute on Two-Phase Flows and Heat Transfer“ [9]. Die im August 1976 in Istanbul abgehaltene Tagung, über die diese Proceedings informieren, hatte einmal den Zweck, neueste Forschungsergebnisse aus den Gebieten Strömungsformen, Dampfgehalt, Schlupf, Druckverlust und Instabilitäten vorzustellen, sie versuchte aber auch in einer Reihe von Übersichtsvorträgen den letzten Stand des Wissens in der Zweiphasenströmung zusammenzufassen. Ebenfalls in dem Bestreben, die neuesten Ergebnisse auf dem Gebiet der Zweiphasenströmung zu vermitteln, wurde von *J. Huhn* und *J. Wolf* [10] das Buch „Zweiphasenströmung“ verfaßt. Es wendet sich nach Aussage der Autoren vor allem an den in der Praxis tätigen Ingenieur, und deshalb wird der Stoff so dargeboten, daß nach einer Beschreibung des betrachteten Vorgangs und nach der Diskussion der darauf wirkenden Einflußgrößen Berechnungsunterlagen für die praktische Anwendung mitgeteilt werden, wobei auf die Darlegung von theoretischen Modellen und auf mathematische Herleitungen meist verzichtet ist. Das Buch enthält eine sehr umfangreiche Zusammenstellung der russischen Literatur, ist aber bei Zitaten von in englischer Sprache verfaßten Arbeiten nicht immer auf dem neuesten Stand.

Für den Praktiker, dem es nicht so sehr um die theoretischen Zusammenhänge der fluiddynamischen und thermodynamischen Einflußgrößen bei Zweiphasenströmungen geht, sondern der vielmehr die Anwendung auf die täglichen Ingenieurprobleme im Vordergrund sieht, ist die numerisch-mathematische Behandlung der theoretischen Modelle und Gleichungssysteme von primärem Interesse. Ihm könnte eine Arbeit von *J. R. Travis* und Mitarbeitern [11] weiterhelfen.

Ein übergeordnetes Problem bei zweiphasigen Strömungen ist auch die Frage, inwieweit Modellversuche auf Originalbedingungen übertragbar sind und in welchem Maß es möglich ist, Aussagen aus experimentellen Ergebnissen zu verallgemeinern, um damit Vergleiche anstellen zu können. Bei den Modellversuchen in Zweiphasenströmungen geht es dabei meist nicht um eine Maßstabsverringern, da hier die Blasengröße oder auch der engste Heizflächenabstand, z. B. bei Rohrbündeln, bald Grenzen setzen; man ist vielmehr bestrebt, mit Modellfluiden geringer Verdampfungswärme — z. B. Kältemitteln — mit vertretbarem Versuchs- und Energieaufwand repräsentative Ausschnitte aus energie- und verfahrenstechnischen Apparaten testen zu können. Der Versuch, einen Überblick über den Stand des Wissens der Ähnlichkeits- und Modellgesetze für Zweiphasenfluide zu geben, ist in einem Aufsatz von *F. Mayinger* [12] unternommen. Es wird dort darauf hingewiesen, daß Umrechnungen allein auf der Basis von Kennzahlen nur bei einfachen Phänomenen möglich sind und in der zweiphasigen Strömung weit stärkere Einschränkungen für Ähnlichkeitsgesetze gelten, als man dies bei der einphasigen gewohnt ist. Für kompli-

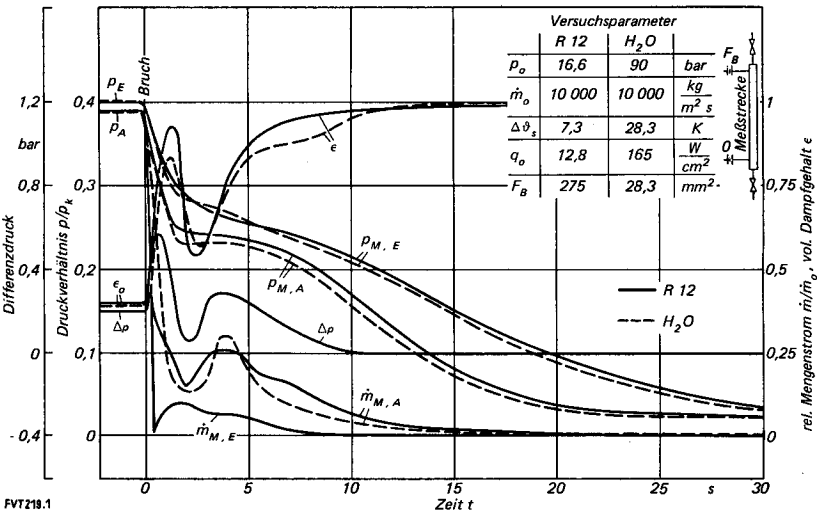


Bild 1. Zeitlicher Verlauf von Druck p , Mengenstrom $\dot{m}$, örtlichem volumetrischem Dampfgehalt ϵ bei Nachbildung des Kühlmittelverluststörfalles in Wasser und in Kältemittel R 12.

zierte und kombinierte Phänomene, z. B. wenn Wärmeübergang, Druckverlust und Mischungsvorgänge zusammenwirken, lassen sich Ähnlichkeitsbetrachtungen nur aufgrund von detaillierten mathematischen Beschreibungen durchführen, wozu in der Regel ein Rechenprogramm benötigt wird. Dann allerdings läßt sich die Ähnlichkeit weitgehend wahren, wie Bild 1 zeigt, in dem die thermohydraulischen Vorgänge eines Kühlmittelverluststörfalles — nachgebildet in Wasser und im Kältemittel R 12 als Modellfluid — verglichen sind. Eine wesentlich stärkere Rolle als in einphasigen Fluiden spielen die thermodynamischen Eigenschaften des Modellfluids.

Auf Detailprobleme der Ähnlichkeitsgesetze gehen Arbeiten von *A. K. Chesters* [13] sowie von *V. D. Shestakov* und *L. G. Trachev* [14] ein. *Chesters* behandelt die Anwendbarkeit dynamischer Ähnlichkeitskriterien auf isotherme Gas-Flüssigkeits-Strömungen und leitet sechs dimensionslose Gruppen aus den Erhaltungssätzen ab. Er weist jedoch die Gültigkeit seiner Überlegungen experimentell nicht nach. *Shestakov* und *Trachev* beschränken sich auf die Blasendynamik und versuchen, allgemein gültige Gesetze abzuleiten.

2. Strömungsformen, Dampfgehalt und Schlupf

Für eine Beschreibung der Zweiphasenströmung muß außer der örtlichen Strömungsgeschwindigkeit auch die Dichteverteilung des Fluids, also die Verteilung der Phasen über den Strömungsquerschnitt bekannt sein. Untersuchungen der Phasenverteilung und der Strömungsformen in Gas-Flüssigkeits-Gemischen werden seit vielen Jahren durchgeführt, haben bis jetzt aber in der Regel nur zu empirischen Darstellungen, meist in Form von Strömungskarten — z. B. nach Vorschlägen von *Collier* oder *Baker* — geführt, die nur für ein Fluid eines bestimmten thermodynamischen Zustandes gelten. Eine Verallgemeinerung der Collierschen Strömungskarte versucht *K. Zetzmann* [15]. Einen neuen Vorschlag für die graphische Darstellung der Bereiche der verschiedenen Strömungsformen machen *J. M. Mandhane* und Mitarbeiter [16].

Für horizontale und leicht geneigte Rohre geben *Y. Taitel* und *A. E. Dukler* [17] Kennzahlen zur Aufstellung allgemein gültiger Strömungskarten an, von denen in Bild 2 ein Beispiel gezeigt ist. Als Einflußgrößen verwenden sie den Druckverlust der beiden Phasen sowie den Auftrieb des Gases. Sie betrachten fünf verschiedene Strömungsformen, und ein Vergleich mit Meßergebnissen ergibt gute Übereinstimmung. Die Strömung von Zweiphasengemischen ist immer statistischen Schwankungen unterworfen, die — wie *O. C. Jones* und *N. Zuber* [18] zeigen — die Strömungsformen beeinflussen können.

Experimentell werden Untersuchungen zur Bestimmung der Strömungsformen meist durch visuelle Beobachtung, aber auch mit elektrischen Tastsonden durchgeführt. Die rein visuelle Methode birgt die Gefahr von Fehlschlüssen in sich, wenn nur quer zur Strömungsrichtung beobachtet wird. *H. Langner* [19] hat deshalb einen Vorschlag von *Hewitt* wieder aufgegriffen und eine optische Einrichtung benutzt, die eine axiale Beobachtung der Strömungsverteilung erlaubt. Sie ermöglicht ihm, in der Ringströ-

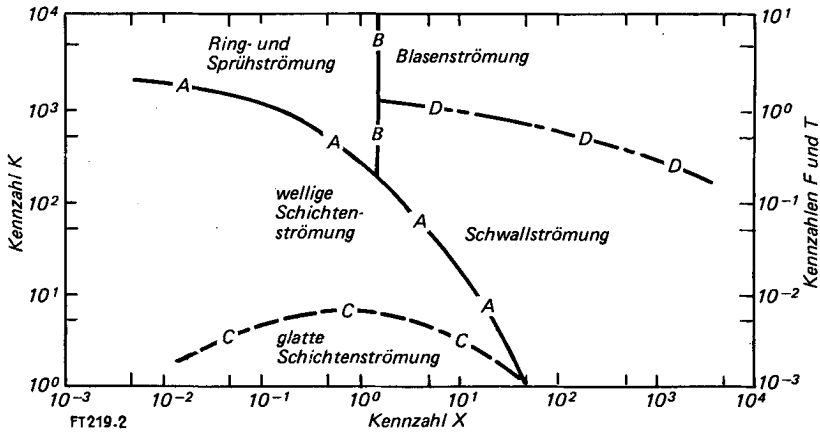


Bild 2. Strömungsformen in horizontalen und leicht geneigten Kanälen als Funktion der Kennzahlen X , F , T und K nach [17].

$$X = \left[\frac{(dp/dl)_{fl}}{(dp/dl)_g} \right]^{1/2} \quad F = \sqrt{\frac{\rho_g}{(\rho_{fl} - \rho_g)}} \frac{w_g}{\sqrt{d_{hyd} g \cos \alpha}}$$

$$T = \left[\frac{(dp/dl)_{fl}}{(\rho_{fl} - \rho_g) g \cos \alpha} \right]^{1/2} \quad K = \left[\frac{\rho_g w_g^2 w_{fl}}{(\rho_{fl} - \rho_g) g \nu_{fl} \cos \alpha} \right]^{1/2}$$

d_{hyd} hydraulischer Durchmesser, g Fallbeschleunigung,

dp/dl Druckverlust, w Geschwindigkeit, α Winkel,

ν kinematische Viskosität; der Index g bezieht sich auf die Gasphase und der Index fl auf die Flüssigkeit. Die Ordinaten sind wie folgt zuzuordnen: F zu den Kurven A und B, K zu Kurve C und T zu Kurve D.

mung die Aufteilung der flüssigen Phase auf den Ring und auf die im Gaskern eingelagerten Tropfen zu bestimmen, wie Bild 3 am Beispiel einer beginnenden Ringströmung in einem Rohr von 10 mm Durchmesser zeigt. Visuelle Untersuchungen zur Strömungsverteilung wurden auch von *H. Soliman* [20] sowie von *M. Farukhi* [21] vorgenommen. *Soliman* untersuchte kondensierende Gemische, und *Farukhi* behandelt das vor allem in der Dampferzeugertechnik interessante Problem der Flüssigkeitsverteilung in gewinkelten Rohren. Den örtlichen Wassergehalt in Rohrbögen und damit den Einfluß der Fliehkräfte auf die Strömungsverteilung untersuchten *I. N. Nigmatulin* und Mitarbeiter [22].

Für den Impuls- und Wärmeaustausch zwischen den Phasen sind Informationen über das Verhalten der Phasengrenzfläche [23], über die Turbulenz — insbesondere bei Blasenströmung [24; 25] — sowie über die Geschwindigkeitsverteilung [26] notwendig. Die letztgenannte Arbeit von *Y. Sato* und *K. Sekoguchi* [26] unterscheidet zwischen der von der Gasblasenexistenz unabhängigen und bereits im einphasigen Fluid vorhandenen Turbulenz und einem zusätzlichen Turbulenzgrad, der durch die Rührwirkung

der Blasen verursacht wird. *Sato* leitet daraus zwei unabhängige Schubspannungsansätze ab. Allgemeine Untersuchungen über die Eigenschaften der Zweiphasenströmung und ihrer Strömungsformen sind in [27 bis 29] dargestellt.

Eng verknüpft mit der Strömungsform ist der vom Unterschied der Phasengeschwindigkeiten bestimmte örtliche Dampfgehalt ε des Gemisches. In der Literatur existiert eine Reihe von Korrelationen und theoretischen Ansätzen zu seiner Berechnung. Einen interessanten Vergleich stellte *D. Butterworth* an, der in [30] kurz kommentiert ist. Er geht von der einfachen Beziehung

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + A \left(\frac{1 - \dot{x}}{\dot{x}} \right)^a \left(\frac{\rho_g}{\rho_{fl}} \right)^b \left(\frac{\eta_{fl}}{\eta_g} \right)^c}$$

aus, in der als Variable nur der Martinelli-Parameter enthalten ist, und berechnet die Werte für die Konstante A sowie für die Exponenten a , b und



Bild 3. Photographische Aufnahme der Gas-Flüssigkeits-Verteilung in einem vertikalen beheizten Rohr bei Übergang zur Ringströmung.

Rohrdurchmesser 10 mm; Aufnahme von *H. Langner* [19].

c nach verschiedenen, in der Literatur vorhandenen Modellen für den Dampfgehalt (z. B. nach *Zivi*, *Turner* und *Wallis*, *Lockhart* und *Martinelli*, *Thom* sowie nach *Baroczy*), die er dann in einer Tabelle gegenüberstellt.

Weitgehend unerforscht sind noch Grenzfälle wie z. B. der Dampfgehalt bei instationären Vorgängen, worüber *G. L. Wedekind* u. a. [31] berichten.

Unsicherheiten existieren auch für die Vorhersage des Dampfgehaltes bei unterkühltem Sieden. Hierfür gibt es zwar in der Literatur eine Reihe theoretischer Modelle und experimenteller Daten, aber die Übereinstimmung sowohl von Theorie und Messung als auch der Meßergebnisse untereinander läßt zu wünschen übrig. Einen neuen Beitrag über die axiale Verteilung des Dampfgehaltes bei unterkühltem Sieden lieferte *L. Maróti* [32].

Bei Ringströmung wird Flüssigkeit durch die Impuls- und Scherkräfte des Gases bzw. Dampfes in Form von Tropfen aus dem Flüssigkeitsring in den Gasstrom getragen; man spricht dabei vom sogenannten Entrainment. Der Mechanismus der Tropfenablösung wurde früher schon verschiedentlich — z. B. von *Benett* und *Hewitt* — in der Literatur behandelt. Neue Ansätze legt *M. Ishii* [33] vor. Er geht von Rollwellen auf der Flüssigkeitsoberfläche aus, nimmt an, daß die Gasströmung diese Wellen unterschneidet und leitet daraus ein Kriterium für das Einsetzen der Tropfenablösung ab. Seine Theorie gibt Meßergebnisse zufriedenstellend wieder.

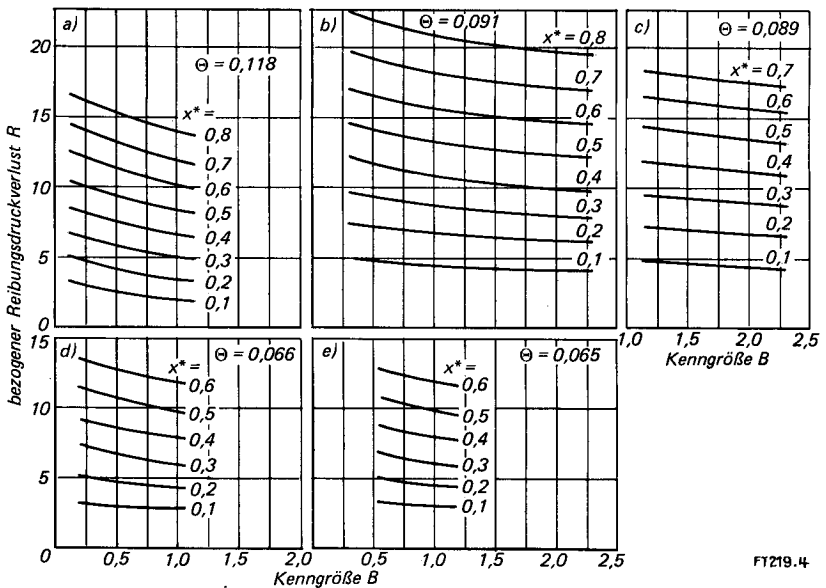
Den Sonderfall der vertikal abwärtsgerichteten Zweiphasenströmung untersuchten *D. R. Webb* und *G. F. Hewitt* [34]. Sie zeigen, daß bei Ringströmung die mittlere Dicke des Flüssigkeitsfilms sehr stark von Einlaufeffekten abhängt und geben in Form von Strömungskarten Bereiche für die verschiedenen Welligkeitsgrade der Flüssigkeitsoberfläche an. Sie unterscheiden insbesondere zwischen regelmäßigen und geriffelten Wellen sowie Doppelwellen.

3. Druckverlust

Gasgehalt in einer Flüssigkeitsströmung steigert bekanntlich den Druckverlust um ein Vielfaches. Für die Auslegung von Rohrleitungen, Armaturen und verfahrenstechnischen Apparaten ist dieser Einfluß des Gasgehaltes von erheblicher Bedeutung, da sonst die Gefahr besteht, Pumpen stark unterzudimensionieren bzw. den erwünschten Strömungszustand nicht zu erreichen. Aus der Literatur sind eine Vielzahl von experimentellen und auch theoretischen Arbeiten zur Bestimmung des Zweiphasen-Druckverlustes bekannt. Die Berechnungsverfahren gehen größtenteils von der ursprünglich von *Martinelli* entwickelten Vorstellung aus, daß sich der Gas einfluß auf den Druckverlust durch einen Zweiphasenmultiplikator berücksichtigen läßt. Bei einem zahlenmäßigen Vergleich der Vorhersage der verschiedenen Rechenmodelle mit Meßwerten stellt man fest, daß jene bei hohen Genauigkeitsansprüchen meist nur in einem engen Parameterbereich Gültigkeit haben. Für generelle, bereichsübergreifende Abschätzungen scheint nach wie vor die bereits 1948 von *Martinelli* angegebene und heute längst zum Stand der Technik gehörende Korrelation am zuverlässigsten zu sein. An diesem Bild ändern auch neuere Untersuchungen [35 bis 37] nichts.

Zum Verständnis des Druckverlustverhaltens tragen die Ansätze mit Hilfe des Zweiphasenmultiplikators kaum bei. *L. Friedel* [38] versucht deshalb eine systematischere Analyse der Größen mit Einfluß auf den Druckverlust, wobei er seine Betrachtungen auf die Ringströmung beschränkt. Beiträge zur Energiedissipation der Strömung resultieren aus der Schub-

spannung zwischen Flüssigkeit und Wand, aus Geschwindigkeitsänderungen des Dampfes vor und hinter Flüssigkeitswellen sowie durch den Tropfenmitriß (Entrainment) in die schnellere Dampfströmung. Einen geringen Beitrag wird schließlich noch die Oberflächenarbeit bei der Wellen- und Tropfenbildung leisten. *Friedel* leitet aus seinen Überlegungen ab, daß die Wandschubspannung, die Stoßverluste in der Dampfströmung und der Tropfenmitriß als wesentliche Größen zu berücksichtigen sind. Für eine konsequente Anwendung der Theorie müßten jedoch das Verhältnis der Geschwindigkeiten von Dampf und Flüssigkeit, die Welligkeitsform der Flüssigkeit und der Entrainmentgrad genau bekannt sein. *Friedel* vereinfacht deshalb seinen Ansatz und muß zwei empirische Konstanten, nämlich einen Faktor und einen Exponenten in seine Gleichung einfügen, um diese den Meßwerten besser anzupassen. Er gibt auch einfache Kennzahlen an, mit denen sich der Druckverlust in Diagrammen universeller als bisher darstellen läßt. Beispiele für Wasser und Kältemittel R 12 sind in Bild 4 gezeigt.



FT 219.4

Bild 4. Bezogener Reibungsdruckverlust nach L. Friedel [38].

$$\text{Ordinate: } R = \frac{(\Delta p / \Delta l)_{2ph}}{(\Delta p / \Delta l)_{fl}} \quad (\text{für H}_2\text{O und R 12})$$

$$\text{Abzisse: } B = Fr_{fl} / Re_{fl}^{0,25} \quad \left| \begin{array}{l} \text{H}_2\text{O} = 1,7 \\ \text{R 12} \end{array} \right|$$

$$\text{Parameter: } \Theta = \left[\frac{(\eta_{fl} / \eta_g)^{0,2}}{(\rho_{fl} / \rho_g)^{0,9}} \right] \quad (\text{für H}_2\text{O und R 12})$$

Fr Froudezahl, Re Reynoldszahl, η dynamische Viskosität, x^* Strömungsdampfgehalt

Wegen der vielfältigeren Strömungsformen scheinen die Verhältnisse in horizontal orientierten zweiphasigen Strömungen noch komplizierter zu sein. Hier hat *J. Bandel* [39] eine sehr systematische, experimentelle und theoretische Untersuchung vorgelegt. Er stellte für adiabate Strömung drei charakteristische Bereiche fest, die mit dem Auftreten spezieller Strömungsformen, nämlich Schichten-, Ringströmung und welliger bis schwallförmiger Strömung, verknüpft sind. Bei kleinen und großen Durchsätzen ist der Einfluß der Massenstromdichte auf den Reibungsdruckverlust ähnlich wie bei turbulenter Einphasenströmung. Da *Bandel* mit keiner der bisher bekannten Beziehungen den gesamten, von ihm gemessenen Strömungsbereich erfassen konnte, stellte er ein neues Berechnungsverfahren auf. Er unterteilte in die drei genannten Strömungsbereiche und gab einfache Gleichungen auf der Grundlage der Einphasendruckverlust-Beziehung an. Mit zusätzlichen Kriterien für die Abgrenzung der einzelnen Strömungsformen kann auch das Übergangsgebiet durch Interpolation erfaßt werden. Die Übereinstimmung — nicht nur mit seinen eigenen Messungen, sondern auch mit einer großen Anzahl experimenteller Ergebnisse aus der Literatur — ist sehr gut, besser als bei den vorher bekannten Beziehungen. *Bandel* untersuchte auch den Einfluß der Heizflächenbelastung auf den Druckverlust. Als weitere neuere Arbeiten über den Druckverlust in horizontalen Rohren sind noch die Untersuchungen von *W. G. Choe* [40], *I. Siegmund* [41] sowie *E. M. Kopalinsky* u. a. [42] zu nennen.

Verfahrenstechnische Anlagen bestehen jedoch nicht nur aus Rohrleitungen; wesentlich größeren Einfluß auf den Druckverlust haben die Strömungsvorgänge an Querschnittsänderungen, in Einlaufbereichen sowie an Umlenkvorrichtungen. Hierüber gibt die Literatur bisher noch wenig Auskunft. Auch in den letzten Jahren sind nur einige Arbeiten zu finden, aus denen sich verallgemeinernde Aussagen ableiten lassen. Dies liegt vor allem daran, daß in Umlenkungen und Querschnittsänderungen abhängig von den ganz speziellen konstruktiven Details eine Phasentrennung auftreten kann, welche die Wechselwirkungen zwischen Gas und Flüssigkeit beeinflusst und damit den Druckverlust stark ändert. Strömungstechnisch am besten zugänglich ist noch die Einlaufzone von Rohren. *I. M. Fedotkin* u. a. [43] untersuchten in ein- und zweiphasigen Fluiden experimentell und theoretisch die Ausbildung der Strömungsformen und den daraus resultierenden Druckverlust in diesen Zonen.

An plötzlichen Querschnittserweiterungen oder auch -verengungen erhebt sich für die Berechnung des Druckverlustes die bisher noch kaum beantwortete Frage, ob und wie sich Dampfgehalt und Schlupf in der Strömung ändern. Man geht deshalb häufig wie *J. Weisman* [44] vereinfachend von homogener Strömung, d. h. gleichen Geschwindigkeiten in Dampf und Flüssigkeit aus. Diese Vereinfachung gilt, wie Versuche gezeigt haben, überraschenderweise relativ gut bei rasch beschleunigten Strömungen unter Druckabsenkung, z. B. beim Abblasen von mit Flüssigkeit und Dampf gefüllten Druckbehältern. Etwas allgemeiner behandelt *Weisman* den zweiphasigen Druckverlust mit Querschnittsänderungen in [45]. Eine generelle Betrachtung des Druckverlustverhaltens in Dampferzeugerrohren ist in [46] zu finden.

4. Instabilitäten

Der Begriff „Instabilität“ wird in der Literatur der Mehrphasenströmung für verschiedene physikalische Phänomene gebraucht. In vereinfachter Betrachtung kann man sie unterteilen in

- niedrigfrequente Mengenstromschwankungen großer Amplituden und
- hochfrequente Dichteänderungen in der Strömung.

Mengenstromschwankungen oder -änderungen ergeben sich aus dem Zusammenwirken von Druckverlust sowie den die Strömung antreibenden Kräften und sind systembedingt. Einen einmaligen bleibenden plötzlichen Rückgang des Mengenstromes, z. B. bei Erhöhung der Heizflächenbelastung, nennt man aperiodische Instabilität, deren Einsetzen in einfachen Fällen mit dem Ledinegg-Kriterium vorhergesagt werden kann. Befinden sich im Kreislauf bzw. im Rohrleitungssystem Räume, die mit kompressiblem Medium — Dampf oder Gas — gefüllt sind, so kann es zu periodischen Instabilitäten kommen, deren Beschreibung eine aufwendige Erfassung des gesamten thermo- und hydrodynamischen Verhaltens erfordert. Hochfrequente Dichteschwankungen im Strömungskanal sind meist eng mit bestimmten Strömungsformen — z. B. Kolbenblasenströmung — gekoppelt. Ihr Einfluß auf den Mengenstrom ist gering und technisch nicht von Interesse. Beide Arten von Instabilitäten sind bei ihrem Einsetzen am einfachsten anhand von Druckschwankungen festzustellen. Eine spezielle Kategorie bilden die sogenannten Parallelkanal-Instabilitäten. Sie können in parallelgeschalteten, über zwei Sammler verbundenen Siederohren auftreten, wenn entweder die Zuflußbedingungen oder die Heizflächenbelastung nicht gleichmäßig und nicht konstant sind. Sie führen zu niedrigfrequenten Mengenstromschwankungen und Umverteilungen in den einzelnen Siederohren, die durch Thermocycling, aber auch infolge Filmsiedens zu Rohrschäden führen können.

Einen Überblick über die Literatur der letzten zehn Jahren auf dem Gebiet der Instabilitäten in Zweiphasenströmungen gibt *A. E. Bergles* [47]. Er geht im Detail auch auf die verschiedenen Rechenmethoden zur Vorhersage der Instabilitäten ein. Von technischer Relevanz sind meist nur die niedrigfrequenten Mengenstromschwankungen, die in der Siedezone hohe Heizflächenbelastung voraussetzen und meist nur in langen Siederohren mit größeren Abströmwiderständen für den Dampf bzw. das Dampf-Flüssigkeits-Gemisch auftreten. Die theoretisch am einfachsten zu behandelnde Ledinegg-Instabilität hat *B. A. Hands* [48] — angewandt auf ein Helium-Gas-Flüssigkeits-Gemisch — nochmals eingehend diskutiert. Mathematische Ansätze, die vor allem den Einfluß des Auftriebes berücksichtigen, bringt *W. S. Childress* [49].

Die Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment bei der Vorhersage sowohl für das Einsetzen der Instabilitäten als auch für deren Amplituden und Frequenz ist immer noch mäßig. *T. M. Römberg* [50] versucht, ein theoretisches Modell anhand einfacher Messungen in einem Siedekanal anzupassen. Über Messungen von Instabilitäten, die durch Änderungen der Heizflächenbelastung hervorgerufen sind, berichten *P. Saha* und Mitarbeiter [51].

In der Praxis interessiert das Stabilitätsverhalten vor allem bei Dampf-erzeugern. *R. Dolezal* [52], *K. Wörrlein* [53] sowie *Gilli* u. a. [46] behandeln in praxisbezogenen Betrachtungen Umlaufzahl, Durchflußverteilung und Kriterien der dynamischen Stabilität bei Verdampfern. Den Sonderfall der instabilen Strömung in horizontalen Rohren untersuchen *I. Nakajima* und Mitarbeiter [54].

5. Kritische Strömungsgeschwindigkeiten

Vor allem Sicherheitsbetrachtungen auf dem Gebiet der wassergekühlten Kernreaktoren im Zusammenhang mit Untersuchungen zum Kühlmittelverluststörfall haben in den letzten Jahren eine Fülle von Arbeiten zur Messung und theoretischen Vorhersage des maximal möglichen, sogenannten kritischen Mengenstromes angeregt. Da bei Gas-Flüssigkeits-Gemischen die Druckfortpflanzungsgeschwindigkeit in jeder Phase unterschiedlich ist, sollte hier der Begriff kritischer Mengenstrom der in der Einphasengasströmung üblichen Bezeichnung Schall- oder Lavalgeschwindigkeit vorgezogen werden.

Der kritische Mengenstrom hängt sehr stark vom thermodynamischen Zustand, von der Strömungsform, aber auch von der Länge des Ausströmrohres ab. In Grenzfällen — bei langen Rohrleitungen — kann der Druckverlust die begrenzende Größe sein. Bei Flüssigkeiten in der Nähe ihres Siedepunktes ist u. U. der Siedeverzug bei der Entspannungsverdampfung zu beachten. Plötzliche Druckentlastungen, z. B. bei Brüchen in Rohrleitungen oder Druckbehältern, können im Bereich geringer Dampfgehalte am einfachsten — in guter Übereinstimmung mit der Wirklichkeit — unter der Voraussetzung homogener Strömung in der Bruchstelle beschrieben werden. Neuere theoretische Arbeiten zur Vorhersage der kritischen Mengenstromdichte wurden von *H. Adachi* [55], *J. A. Bouré* u. a. [56] sowie *Y. V. Mironov* [57] veröffentlicht. *Adachi* geht bei seinen theoretischen Ansätzen von zwei Energiegleichungen aus, von denen die eine die Verhältnisse des ruhenden Fluids im Reservoir und die andere die der Strömung erfaßt. *Bouré* und Mitarbeiter bauen auf ihren früheren Arbeiten auf und gehen vor allem auf kritische Strömungsverhältnisse in langen Rohrleitungen unter Einbeziehung des Druckverlustes ein.

In der russischsprachigen Literatur liegen der Theorie über die kritische Strömung in Gas-Flüssigkeits-Gemischen meist fundamentale thermodynamische Überlegungen zugrunde. Man geht dabei auch häufig von homogener Durchmischung der Phasen aus. *M. E. Deich* u. a. [58] behandeln Gemische, bei denen entweder die gasförmige oder die flüssige Phase als zusammenhängendes Fluid strömen. Er übt starke Kritik an den vor mehreren Jahren veröffentlichten Ansätzen von *Moody*, die verschiedentlich im Rahmen von Betrachtungen der Reaktorsicherheit zur Berechnung von Ausströmvorgängen herangezogen werden.

Unter der Annahme, daß das Gemisch aus idealem Gas besteht, in das kugelförmige Flüssigkeitstropfen eingelagert sind, stellen *A. F. Babitskii* und Mitarbeiter [59] ein System nichtlinearer Differentialgleichungen auf,

für das sie eine numerische Lösung angeben. Diese Arbeit könnte für die Vorhersage von Strömungen in den Niederdruckstufen von Dampfturbinen interessant sein. Während die bisher zitierten Arbeiten alle von eindimensionaler Strömung ausgehen, versucht *M. Bratos* [60] einen zweidimensionalen Ansatz für die Strömung in einer Laval-Düse. Er findet erhebliche Abweichungen gegenüber der eindimensionalen Behandlung.

6. Durchströmung von Apparaten

Neben den Apparaten für verfahrenstechnische Trennprozesse und chemische Reaktoren stehen nach wie vor die Vorgänge im Primärsystem von wassergekühlten Kernreaktoren im Mittelpunkt des Interesses. Allgemeine gültige Regeln aus den veröffentlichten Untersuchungen lassen sich wegen der speziellen konstruktiven und thermodynamischen Gegebenheiten jedes Apparattyps nur schwer ableiten. *J. G. Collier* [61] veröffentlichte eine Übersicht über den Stand des Wissens zum Strömungsverhalten zweiphasiger Fluide in wichtigen verfahrens- und kerntechnischen Komponenten.

Grundsätzliche Folgerungen lassen sich aus strömungsmechanischen Untersuchungen in Apparateilen ziehen. So berichten *P. M. C. Lacey* und *M. A. Patrick* [62] über das Strömungsverhalten bei komplexen Querschnittsänderungen. Reichliche Erfahrung wurde in den letzten Jahren mit großen Versuchseinrichtungen gewonnen, die den Kühlkreislauf von Kernreaktoren nachbilden [63]. Hieraus lassen sich Schlüsse für Apparate und deren Komponenten ziehen. Ein spezielles Problem stellen Pumpen dar, wenn sie aufgrund irgendwelcher Störfälle von einem Zweiphasengemisch beaufschlagt werden [64]. Hier interessiert nicht nur die Drosselwirkung des Laufrades, sondern in Grenzfällen auch ein eventuell verbleibender Rest an Förderhöhe.

Sprühapparate und -kolonnen erfordern für ihre Auslegung die Kenntnis des Tropfenspektrums und Tropfenweges. Beim Eindüsen unter hohem Druck kann eine Verteilung der Tropfen erreicht werden, die die Austauschfläche und damit den Wärme- und Stoffübergang verbessert [65]. Die zusätzliche Kenntnis des Tropfenweges [66] erleichtert schließlich die integrale Beschreibung des Austauschs in diesen Apparaten.

Neue Technologien wurden in jüngster Zeit z. B. im Zusammenhang mit der Förderung aus der Tiefsee und mit der Kohlevergasung in Flözen in Angriff genommen. Für die Förderung von Manganknollen aus der Tiefsee wird das „gas-lift“-Prinzip vorgeschlagen, bei dem man es mit einem Dreiphasensystem zu tun hat. *H. Kato* u. a. [67] berichten über eine Studie für „air-lift“-Pumpen zur Förderung von Feststoffen in Flüssigkeiten und ihren Einsatz in der Tiefseetechnik. Mit dem „air-lift“-Problem beschäftigen sich auch *M. Weber* u. a. [68], deren Messungen deshalb von besonderem Interesse sind, weil sie in relativ großem Maßstab durchgeführt wurden und sich daraus im Vergleich mit anderen Untersuchungen eventuell auch Schlüsse auf den Durchmesser einfluß ziehen lassen.

7. Meßtechnik

In zweiphasigen Fluiden bedeutet die Meßtechnik für den Experimentator eine besondere Schwierigkeit, die sich in jüngster Zeit noch dadurch erhöht hat, daß in zunehmendem Maße auch instationäre Vorgänge untersucht werden müssen. Die in der einphasigen Strömung meist triviale Aufgabe der Mengenstrombestimmung ist in Gas-Flüssigkeits-Gemischen insbesondere bei instationären Vorgängen immer noch nicht restlos gelöst. Am weitesten entwickelt und am einfachsten zu handhaben ist eine Meßsonde, in der ein Turbinen-Durchflußmesser und ein Impulsgeber (drag body) kombiniert sind. Zusammen mit einer Dichtemeßeinrichtung läßt sich aus den Signalen beider Sonden der Volumenstrom bzw. der Massenstrom korrelieren. Neuere Arbeiten schlagen den Einsatz von radioaktiven Spurenelementen (Radiotracern) [69; 70] vor. Hierbei werden verschiedene radioaktive Elemente kurzer Halbwertszeit und unterschiedlichen Strahlungsspektrums der Flüssigkeit sowie dem Gas zugemischt und deren Laufzeit über eine vorgegebene Strecke gemessen. Ein nach dem Prinzip des hydrodynamischen Drehmomentenwandlers arbeitendes Mengenstrom-Meßgerät, ein sogenanntes True-Mass-Flow-Meter schlagen *G. Class* und *M. Cramer* [71] vor.

Dichte- und Dampfgehaltsmessungen werden meist mit der Gamma-Durchstrahlungsmethode durchgeführt. Gammastrahlen haben den Nachteil, daß sie sehr stark im Metall der Kanalwände absorbiert werden und damit der eigentliche Meßvorgang nur noch schwache Signaländerungen hervorruft. Deshalb wird vorgeschlagen, mit Neutronenstrahlen [72] zu arbeiten. Für die simultane Geschwindigkeits-, Konzentrations- und Partikelmeßtechnik in Feststoff-Flüssigkeits-Strömungen empfiehlt *B. Pfau* [73] den Einsatz von Ultraschall. Bei Blasenströmung läßt sich der Gasgehalt auch durch Auszählen und Ausmessen der Gasblasen bestimmen. Hierfür wurde in Grenoble [74] eine optische Sonde entwickelt, die mit Hilfe des unterschiedlichen Reflexionswinkels von Flüssigkeit und Gas arbeitet. Über Untersuchungen zur optischen Beobachtung einer Siedewasserströmung bei hohen Drücken berichten *A. W. Bennett* und Mitarbeiter [75].

Detailliertere Information über die Entwicklung der Zweiphasen-Meßtechnik können die in den beiden letzten Jahren erschienenen Übersichtsaufsätze [76 bis 78] geben. *J. M. Delhaye* [76] stellt neue Meßverfahren vor, insbesondere die soeben erwähnte optische Sonde sowie eine elektrische Widerstandssonde. Er gibt auch Hinweise und Empfehlungen für die Entwicklung neuer Meßverfahren. Eine Zusammenstellung experimenteller Methoden kann auch in den Berichten von *G. F. Hewitt* und *P. C. Lovegrove* [77] sowie von *S. D. Sheppard* [78] nachgelesen werden. Wer die Entwicklung der Experimentiertechnik auf dem Gebiet der zweiphasigen Thermo- und Fluidodynamik in der Bundesrepublik innerhalb der letzten Jahre verfolgen will, sei auf die von *P. Voj* [79] herausgegebenen Proceedings über ein meßtechnisches Symposium verwiesen. *H. O. Möckel* u. a. [80] berichten in einer zusammenfassenden Darstellung über Methoden für hydrodynamische und verfahrenstechnische Messungen in Zweiphasensystemen.

Literatur

- [1] Zuber, N.: Flow excursions and oscillations in boiling, two-phase flow systems with heat addition. Proc. Sympos. Two-phase Flow Dynamics Bd. 1 (1967) S. 1071.
- [2] Ishii, M.: Thermo-fluid dynamic theory of two-phase flow. Paris: Eyrolles, (Scientific and Medical Publication of France, N. Y.) 1975.
- [3] Réocreux, M.: Contribution à l'étude des débits critiques en écoulement diphasique eau vapeur. Ph. D. Thesis Univers. Grenoble 1974.
- [4] Delhaye, J. M.: Instantaneous space and time averaged conservation equations. Proc. Advanced Study Inst. on Two-Phase Flows and Heat Transfer, Istanbul August 1976, Washington DC: Hemisphere Publ. Corp.
- [5] Ishii, M., T. C. Chawla u. N. Zuber: Constitutive equation for vapor drift velocity in two-phase annular flow. AIChE J. Bd. 22 (1976) Nr. 2, S. 283/89.
- [6] Yadigaroglu, G., u. R. T. Lahey jr.: On the various forms of the conservation equations in two-phase flow. Int. J. Multiphase flow Bd. 2 (1976) Nr. 5, S. 477/94.
- [7] Voinov, O. V., u. A. G. Petrov: On the equations of motion of a liquid with bubbles. J. Appl. Mathe. Bd. 39 (1975) Nr. 5, S. 811/22.
- [8] Hewitt, G. F., u. F. Semeria: Aspects of two-phase gas-liquid flow. Design and Theory Sourcebook, Int. Cent. for Heat and Mass Transfer, 5th Semin. Proc. Washington DC: Scripta Book Co. Div. McGraw-Hill, N. Y. 1974. S. 265/317.
- [9] Proc. Advanced Study Inst. on Two-Phase Flows and Heat Transfer, Istanbul August 1976. Washington DC: Hemisphere Publ. Corp.
- [10] Huhn, J., u. J. Wolf: Zweiphasenströmung (gasförmig/flüssig). Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1975.
- [11] Travis, J. R., F. H. Harlow u. A. A. Amsden: Numerical calculation of two-phase flows. Diss. Los Alamos Sci. Lab. N. Mex. (Contract W-7405-eng. 36) Juni 1975.
- [12] Mayinger, F.: Scaling and modelling laws in two-phase flow and boiling heat transfer. Proc. Advanced Study Inst. on Two-Phase Flows and Heat Transfer, Istanbul Aug. 1976, Washington DC: Hemisphere Publ. Corp.
- [13] Chesters, A. K.: The applicability of dynamic-similarity criteria to isothermal liquid-gas, two-phase flows without mass transfer. Int. J. Multiphase Flow Bd. 2, (1975) Nr. 2, S. 191/212.
- [14] Shestakov, V. D. u. L. G. Trachev: Self-similarity in the vapour bubble dynamics. Int. J. Heat Mass Transfer Bd. 18 (1975) S. 685/87.
- [15] Zetzmann, K., u. F. Mayinger: Flow pattern of two-phase flow inside cooled tubes. Proc. Advanced Study Inst. on Two-Phase Flows and Heat Transfer, Istanbul Aug. 1976, Washington DC: Hemisphere Publ. Corp.
- [16] Mandhane, J. M., G. A. Gregory u. K. A. Aziz: A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. Int. J. Multiphase Flow Bd. 1 (1974) Nr. 4, S. 537/53.
- [17] Taitel, Y., u. A. E. Dukler: A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. AIChE J. Bd. 22 (1976) Nr. 1, S. 47/55.
- [18] Jones, O. C., u. N. Zuber: The interrelation between void fraction, fluctuations and flow patterns in two-phase flow. Int. J. Multiphase Flow Bd. 2 (1975) Nr. 3, S. 273/306.
- [19] Langner, H., u. F. Mayinger: Steady state and transient entrainment behaviour in upwards co-current annular flow. Proc. Advanced Study Inst. on Two-Phase Flows and Heat Transfer, Istanbul Aug. 1976, Washington DC: Hemisphere Publ. Corp.
- [20] Soliman, H.: Visual studies of flow patterns during condensation inside horizontal tubes. Int. Heat Transfer Conf. Tokyo, Sept. 1974. Paper Cs 1.6, S. 241/45, Japan Soc. Mech. Engng. Tokyo 1974.
- [21] Farukhi, M.: Visual study of air-water mixtures flowing inside serpentine tubes. Int. Heat Transfer Conf. Tokyo, Sept. 74. Paper B 5.5, S. 205/09, Japan Soc. Mech. Engng. Tokyo 1974.

- [22] *Nigmatulin, I. N., N. I. Semenov u. V. S. Ryzhkov*: Investigation of the true local water contents in curved two-phase flow. *Fluid Mech. Sov. Res. Bd. 3* (1974) Nr. 6, S. 32/38.
- [23] *Wallis, G. B., u. J. T. Kuo*: The behaviour of gas-liquid interfaces in vertical tubes. *Int. J. Multiphase Flow Bd. 2* (1976) Nr. 5, S. 521/36.
- [24] *Serizawa, A., I. Kataoka u. I. Michiyoshi*: Turbulence structure of air-water bubbly flow. Part 2: Local properties. *Int. J. Multiphase Flow Bd. 2* (1975) Nr. 3, S. 235/46.
- [25] *Serizawa, A., I. Kataoka u. I. Michiyoshi*: Turbulence structure of air-water bubbly flow. Part 3: Transport properties. *Int. J. Multiphase Flow Bd. 2* (1975) Nr. 3, S. 247/59.
- [26] *Sato, Y., u. K. Sekoguchi*: Liquid velocity distribution in two-phase bubble flow. *Int. J. Multiphase Flow Bd. 2* (1975) Nr. 1, S. 79/95.
- [27] *Berkuta, A. D., u. a.*: Die Eigenschaften von Zweiphasenringströmung in vertikalen Rohren. *Akad. Nauk Ukrain'skoi RSR, Dopovidi, Ser. A, Fiz. Matemat. ta Tekhn. Nauki* (Jan. 1976) S. 32/34.
- [28] *Heppner, D. B.*: Experiments in two-phase fluids flow regimes. *ASME Pap. No. 75 — ENA s-24* for Meet. July 21—24 (1975).
- [29] *Holmes, T. C., u. T. W. Russell*: Horizontal bubble flow. *Int. J. Multiphase Flow Bd. 2* (1975) Nr. 1, S. 51/66.
- [30] *Butterworth, D.*: A comparison of some void fraction relationships for co-current gas-liquid flow. *Int. J. Multiphase Flow Bd. 1* (1975) S. 845/50.
- [31] *Wedekind, G. L., B. L. Bhatt u. B. T. Beck*: A system mean void fraction model for predicting various transient phenomena associated with two-phase evaporating and condensing flows. *Proc. Advanced Study Inst. on Two-Phase Flow and Heat Transfer, Istanbul Aug. 1976. Washington DC: Hemisphere Publ. Corp.*
- [32] *Maróti, L.*: Axial distribution of void fraction in subcooled boiling. *Hungar. Acad. Sci. Budapest, Central Res. Inst. Physics, Bericht Nr. KFKI-75-52.*
- [33] *Ishii, M.*: Inception criteria for droplet entrainment in two-phase concurrent film flow. *AIChE J.* (März 1975) S. 308/18.
- [34] *Webb, D. R., u. G. F. Hewitt*: Downwards co-current annular flow. *Int. J. Multiphase Flow Bd. 2* (1975) Nr. 1, S. 35/49.
- [35] *Tomida, T., u. F. Yamamoto*: Correlation of data on the apparent friction coefficient in upwards two-phase flow of air liquid mixtures. *J. Chem. Engng. Bd. 8* (1975) Nr. 2, S. 113/18.
- [36] *Oshino, W. T., u. E. Charles*: Vertical two-phase flow. Teil 2: Pressure drop and hold-up. *Canadian J. Chem. Engng. Bd. 52* (1974) Nr. 4, S. 438/48.
- [37] *Maróti, L.*: A model for two-phase frictional pressure drop calculations. *Hungar. Acad. Sci. Budapest, Central Res. Inst. Physics, Bericht KFKI-75-31.*
- [38] *Friedel, L.*: Modellgesetze für den Reibungsdruckverlust in der Zweiphasenströmung. *VDI-Forschungsheft 572. Düsseldorf: VDI-Verlag 1975.*
- [39] *Bandel, J.*: Druckverlust und Wärmeübergang bei der Verdampfung siedender Kältemittel im durchströmten waagerechten Rohr. *Diss. Karlsruhe 1973.*
- [40] *Choe, W. G.*: Flow patterns and pressure drop in horizontal two-phase pipe flow. *Ph. D. Thesis Cincinnati Univ., Ohio, 1975.*
- [41] *Siegmund, I.*: Wärmeübergang und Reibungsdruckabfall bei Zweiphasen-Gas/Flüssigkeitsströmung mit hohem Gasanteil in horizontalen Rohren. *Chemie-Ing.-Techn. Bd. 26* (1974) Nr. 5, S. 272/77.
- [42] *Kopalinsky, E. M., u. R. A. A. Bryant*: Friction coefficients for bubbly two-phase flow in horizontal pipes. *AIChE J. Bd. 22* (1976) Nr. 1, S. 82/86.
- [43] *Fedotkin, I. M., u. a.*: Effect of inlet conditions on the flow formation and pressure losses. *Fluid Mech. Sov. Res. Bd. 3* (1974) Nr. 5, S. 91/94.
- [44] *Weisman, J., A. Husain u. W. G. Choe*: The applicability of the homogeneous flow model of pressure drop in straight pipe and across area changes. *Report COO-2152-16*^{a)}.

^{a)} Die Berichte sind über die Nuclear Regulatory Commission Washington D. C., USA, anzufordern.

- [45] *Weisman, J., u. A. Husain*: Two-phase pressure drop across abrupt area changes. Report COO-2152, January 1975¹).
- [46] *Gilli, P. V., u. a.*: Probleme des Wärmeübergangs, Druckverlustes und der Strömungsinstabilität in thermisch hochbeanspruchten Dampferzeugerrohren. VGB Kraftwerkstechnik Bd. 55 (1975) Nr. 9, S. 589/600.
- [47] *Bergles, A. E.*: Review of instabilities in two-phase flow systems. Proc. Advanced Study Inst. on Two-Phase Flows and Heat Transfer, Istanbul Aug. 1976. Washington DC: Hemisphere Publ. Corp.
- [48] *Hands, B. A.*: A re-examination of the Ledinegg instability criterion and its application to two-phase helium systems, in multi-phase flow systems. Inst. Chem. Engrs, London 1974.
- [49] *Childress, W. S., u. E. A. Spiegel*: Archimedean instabilities in two-phase flows. SIAM Rev. Bd. 17 (1975) Nr. 1, S. 136/65.
- [50] *Romberg, T. M.*: Identification of a boiling channel and comparisons with a theoretical model for coolant flow stability analysis. Triennial World Congress, 6th, Boston and Cambridge Mass., Aug. 24-30, 1975. Proc. Part 2. (A 76-28778 13-63) Pittsburgh, Pa., Instr. Soc. Amer. 1975. S. 211/18.
- [51] *Saha, P., M. Ishii u. N. Zuber*: An experimental investigation of the thermally induced flow oscillations in two-phase systems. ASME Paper No. 75-WA/HT-6, 1975.
- [52] *Doležal, R.*: Die Umlaufzahl als Kriterium der dynamischen Stabilität bei Verdampfern von Zwangsumlaufkesseln. Brennst.-Wärme-Kraft Bd. 27 (1975) Nr. 7, S. 287/90.
- [53] *Wörlein, K.*: Instabilitäten bei der Durchflußverteilung in beheizten Rohrstangen von Dampferzeugern. VGB Kraftwerkstechnik Bd. 55 (1975) Nr. 8, S. 513/18.
- [54] *Nakajima, I., u. a.*: An experimental study on the instability induced by voiding from a horizontal pipe line. ASME Paper No. 75-WA/HT-20, 1975.
- [55] *Adachi, H.*: High speed two-phase flow. Part 1: Theory of axial change of flow parameters and critical flows. Jpn. At. Energy Res. Inst. Heat Transfer Jap. Res. Bd. 3 (1974) Nr. 4, S. 75/88.
- [56] *Bouré, J. A., u. a.*: A contribution to the theory of critical two-phase flow. Energie Primaire Bd. 11 (1975) S. 1/27.
- [57] *Mironov, Y. V.*: Calculation of critical flow of a steam-water mixture. High Temp. Bd. 13 (1975) Nr. 1, S. 101/04.
- [58] *Deich, M. E., u. a.*: Critical conditions in two-phase flows with a continuous vapor or gas phase. Teplofizika Vysokikh Temperatur Bd. 12 (1974) Nr. 2, S. 344/53.
- [59] *Babitskii, A. F., u. B. N. Belousov*: Numerical solution to the problem of the outflow of a two-phase liquid from a nozzle. Vychislitel'naia i Prikladnaia Matematika Bd. 27 (1975) S. 52/58.
- [60] *Bratos, M.*: Two-dimensional, two-phase flow with phase transition in a De Laval nozzle. Pol. Acad. of Sci. Warsaw; Burnat. M. Arch. Mech.-Arch. Mech. Stosov Bd. 26 (1974) Nr. 6, S. 965/79.
- [61] *Collier, J. G.*: Single-phase and two-phase flow behaviour in primary circuit components. Proc. Advanced Study Inst. on Two-Phase Flows and Heat Transfer, Istanbul August 1976. Washington DC: Hemisphere Publ. Corp.
- [62] *Lacey, P. M. C., u. M. A. Patrick*: Fluid flow in complex shapes. Archiwum Termodynamiki i Spalania Bd. 6 (1975) Nr. 2, S. 277/99.
- [63] *Olson, D. J.*: Experiment data report for single and two-phase steady state tests of the 1½ loop MOD-1 semiscale system pump. ANCR-1150, May 1974.
- [64] *Olsen, D. J.*: Single and two-phase performance characteristics of the MOD-1 semiscale pump under steady and transient fluid conditions. ANCR-1165, Oct. 1974.
- [65] *Azhibekov, A. K., u. I. B. Palatnik*: The fragmentation of liquid drops in a gas stream of variable velocity. Akademiia Nauk Kazakhskoi SSR, Vestnik (1975) Nr. 12, S. 40/43.
- [66] *Gauvin, W. H., S. Katta u. F. H. Knelman*: Drop trajectory predictions and their importance in the design of spray dryers. Int. J. Multiphase Flow Bd. 1 (1975) Nr. 6, S. 793/816.

- [67] *Kato, H., S. Tamiya u. T. Miyazawa*: A study of an air-lift pump for solid particles and its application to marine engineering. British Hydrodynamics Research Association (BHRA) 2nd Sympos. on jet pumps, ejectors and gas-lift techniques, Cambridge, Paper G 3 (1975).
- [68] *Weber, M., u. Y. Dedegil*: Transport of solids according to the air-lift principle. BHRA Hydrotransport 4, Banff, Paper H 1 1976, S. 1/23.
- [69] *Löffel, R., u. a.*: Entwicklung von Verfahren zur Massenstrommessung instationärer Zweiphasenströmungen. GfK Nachr. (1975) Nr. 3, S. 22/30.
- [70] *Löffel, R.*: Durchflußmessung mit Radiotracern. VDI-Bericht Nr. 254. Düsseldorf: VDI-Verlag 1976.
- [71] *Class, G., u. M. Cramer*: True mass flow meter — ein Meßgerät zur Messung instationärer Zweiphasenströme. DATF-KTG-Reaktortagung, Nürnberg, April 1975, Nr. 347.
- [72] *Kemeny, L. G.*: Neutronic and acoustic techniques for voidage measurement in two-phase flow. Univ. of NSW, Aust. Australas Conf. on Hydraul. and Fluid Mech. 5th, Proc. Univ. of Canterbury, Christchurch, NZ, Dec. 9-13, 1974, Bd. 1, S. 443/51.
- [73] *Pfau, B.*: Simultane Geschwindigkeits-, Konzentrations- und Partikelgrößenmeßtechnik mit Ultraschall in Zweiphasenströmung. Verfahrenstechnik Bd. 8 (1974) Nr. 2, S. 54/59.
- [74] *Galaup, J.-P.*: Contribution à l'étude des méthodes de mesure en écoulement diphasique; Applications à l'analyse statistique des écoulements à bulles. Diss. Univ. Grenoble 1975.
- [75] *Bennett, A. W., u. a.*: Flow visualisation studies of boiling at high pressure; AERE-R4874 (1975).
- [76] *Delhaye, J. M.*: Measurement techniques for transient and statistical studies of two-phase, gas liquid Flows. ASME Pap. No. 75-Ht-10, Meet. Aug. 11-13, 1975, 16 S.
- [77] *Hewitt, G. F., u. P. C. Lovegrove*: Experimental methods in two-phase flow studies. Electrical Power Res. Inst., Calif. Res. Project 446-1, Final Report, NP 118 (1976).
- [78] *Sheppard, S. D.*: Two-phase flow instrumentation. Studies ORNL-TM-4914 (Juli 1975) S. 32/50.
- [79] *Voj, P.*: Experimentiertechnik auf dem Gebiet der Thermo- und Fluidodynamik. Proc. Fachtagung Kerntechn. Ges. 10. bis 12. März 1976, Berlin (erhältlich beim Deutschen Atomforum Bonn).
- [80] *Möckel, H. O., u. a.*: Methoden für hydrodynamische und verfahrenstechnische Messungen in Zweiphasensystemen. Mitt. VEB-Forschungszentrum Chemieanlagen Dresden und Betrieb des VEB Chemieanlagenbau Staßfurt, Dresden.