

Strömungsuntersuchung einer gasbeladenen Flüssigkeit im Krümmer

Ingo Kosmowski, Hikmat Al-Ahmad, Walter Lilienblum

Ausgehend von den Möglichkeiten einer mathematischen Modellierung der gasbeladenen Flüssigkeitsströmung werden gezielt experimentelle Untersuchungen zum spezifischen Verhalten derartiger Strömungen durchgeführt. Im Vordergrund stehen der Vergleich von homogener und gasbeladener Flüssigkeitsströmung und die Auswirkungen der Gasbeladung auf das Verhalten der Strömung. Die gewonnenen Aussagen werden gestützt durch Messungen und Beobachtungen zur Phasen- und Geschwindigkeitsverteilung.

Starting from the possibilities of the mathematical modelling of gas entrained liquid flows experimental investigations are systematical provided about the specific behaviour of such flows. As an example it was used the flow in an elbow. In the foreground stand the comparison between the homogeneous flow and the effects of the gas entrainment of the flow behaviour. The statements of the investigation are supported by measurements and visualizations of the phase distribution and the velocity profile.

1. Besonderheiten im Strömungsverhalten gasbeladener Flüssigkeiten

Gasbeladene Flüssigkeiten sind Fluidgemische, bei denen sich ungelöstes Gas in der Flüssigkeit befindet. Liegt das Gas in Form von Blasen vor, so wird die Strömung als Blasenströmung bezeichnet. Bei diesen Strömungen muß davon ausgegangen werden, daß die einzelnen Blasen im allgemeinen unterschiedliche Größen aufweisen. Als bestimmender Faktor für das Gesamtverhalten der Strömung erweist sich ihre innere Struktur. Sie ist dadurch gekennzeichnet, daß jede Blase relativ zur umgebenden Flüssigkeit Eigenbewegungen ausführt, wobei sich die einzelnen Blasen in unterschiedlicher Weise deformieren können und sich die jeweils benachbarten Blasen gegenseitig beeinflussen und vereinigen können. Diese Vorgänge sind mit Effekten im Nachlauf der Blasen verbunden, was dazu führt, daß derartige Strömungen auch unabhängig von ihrer Reynolds-Zahl in der Regel turbulent sind.

Das sich innerhalb einer gasbeladenen Flüssigkeitsströmung einstellende Blasenspektrum bleibt unter Beibehaltung bestimmter Relationen zwischen den Volumenanteilen von disperser Gasphase und flüssiger Dispersionsphase im wesentlichen erhalten. Dabei kann jedoch der sich aufgrund der volumetrischen und stofflichen Zusammensetzung einstellende Dispersionszustand innerhalb gewisser Grenzen variieren. Diese Grenzen werden bestimmt durch die Zugabe grenzflächenaktiver Substanzen und durch mechanische Einwirkungen.

Bei Erhöhung des Gasanteils kann es durch die Koaleszenz der Blasen zu Pfropfenbildungen kommen, womit sich ein Übergang von der Blasenströmung zur Pfropfenströmung vollzieht. Solange jedoch der überwiegende Anteil des Gemischvolumens aus der Flüssigkeit besteht, wird aufgrund des großen Dichteunterschiedes zwischen der Flüssigkeit und dem Gas die Pfropfen- wie auch die Blasenströmung maßgeblich durch die Flüssigkeitsmasse bestimmt. Im Vergleich zur homogenen Flüssigkeitsströmung sind jedoch die mechanischen Wechselwirkungen zwischen den Phasen zu beachten. Hierbei spielen das kinematische Ungleichgewicht der Phasen, die gegensei-

tige Beeinflussbarkeit von Geschwindigkeits- und Phasenverteilung sowie die bei Zweiphasenströmungen besondere Bedeutung der geometrischen Randbedingungen eine Rolle [1].

Als grundlegend für das Gesamtverhalten der Phasen werden insbesondere die Auswirkungen der dispersen Gasphase auf die Anfachung oder Dämpfung der Turbulenz und das Ablöseverhalten der Strömung angesehen, weshalb diese Vorgänge einer näheren Untersuchung unterzogen werden sollen.

2. Möglichkeiten einer mathematischen Modellierung

Bei der Aufstellung der Gleichungssysteme zur Beschreibung von Mehrphasenströmungen kann davon ausgegangen werden, daß sich nicht nur für das Gesamtsystem, sondern auch für die Teilsysteme Bilanzen formulieren lassen. Da sich die Geschwindigkeiten der einzelnen Phasen sowohl untereinander als auch von der barizentrischen Geschwindigkeit unterscheiden, so muß bezogen auf eine Bilanzgröße die Anzahl der Bilanzgleichungen mindestens der Anzahl der im Gesamtsystem vorhandenen Phasen entsprechen. Es bedeutet, daß die Beschreibung einer Zweiphasenströmung die Angabe von jeweils zwei Zusammenhängen für die einzelnen Bilanzgrößen, wie Masse, Impuls und Energie, voraussetzt. Diese Zusammenhänge können entweder summarisch für das Gemisch und eine der beiden Phasen oder gesondert für die beiden beteiligten Phasen hergestellt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, daß zwischen den einzelnen Phasen Zusammenhänge bestehen, womit sich das Gesamtsystem und die Teilsysteme nicht unabhängig voneinander bilanzieren lassen. Deshalb ist es wichtig, möglichst umfassend die Wechselwirkungen zwischen den Phasen zu erfassen und für sie Zusatzformulierungen einzubringen.

Wird entsprechend dem hohen Flüssigkeitsmassenanteil der gasbeladenen Flüssigkeit eine adiabate Strömung angenommen, so ist es vertretbar, in erster Näherung auf die Energiebilanz zu verzichten. Weiterhin wird, wie in der

Kontinuumsmechanik üblich, mit entsprechender Modifikation die Stetigkeit in der Verteilung der einzelnen Größen im Raum und ihre Differenzierbarkeit nach Ort und Zeit vorausgesetzt. Damit ergibt sich bezogen auf die Volumenanteile ε der Phasen $i = F, G$ das Gleichungssystem

$$\frac{d_i \varepsilon_i \rho_i}{dt} + \varepsilon_i \rho_i \nabla \mathbf{v}_i = \sum_{j=F}^G \dot{Q}_{ij}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_i \rho_i \frac{d_i \mathbf{v}_i}{dt} = \varepsilon_i \rho_i \mathbf{g}_i + \nabla^n (\varepsilon_i \boldsymbol{\sigma}_i)^n + \sum_{j=F}^G (f_{ij} - \dot{Q}_{ij} \mathbf{v}_i), \quad (2)$$

$$\frac{d_i}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v}_i \cdot \nabla, \quad (3)$$

$$\sum_{j=F}^G \varepsilon_j = 1 \quad (\varepsilon_G = \varepsilon, \quad \varepsilon_F = 1 - \varepsilon), \quad (4)$$

was durch entsprechende Bilanzgleichungen für die Wechselwirkungen, wie die Kraftdichte der Phasenwechselwirkungen f_{FG} und die Massenströmdichte des Stoffaustausches zwischen den Phasen \dot{Q}_{FG} , zu ergänzen ist. Im weiteren wird zur vereinfachten Beschreibung der gasbeladenen Flüssigkeitsströmung angenommen, daß die Trägheits- und Gewichtskräfte der gasförmigen Phase vernachlässigbar sind und sich die turbulenten Schwankungen und der ständige Wechsel zwischen den Phasen an einem Ort durch entsprechende Mittelwerte beschreiben lassen.

Außerdem erscheint es zweckmäßig, die Einteilung der Phasen so zu wählen, daß zum einen die Strömung des Gemisches und zum anderen die Bewegung der Blasen bzw. Pfropfen beschrieben wird. Diese Betrachtung ist besser dem realen Verhalten von Blasenströmungen angepaßt. Sie entspricht der Vorstellung einer annähernd homogenen Strömung mit in der flüssigen Phase driftenden Blasen.

Mit Einführung der Zylinderkoordinaten r, φ, z ergibt sich durch die Summation der Bewegungsgleichungen für die Phasen als Bewegungsgleichung für die gasbeladene Flüssigkeitsströmung

$$(1-\varepsilon)\rho_F \left(\bar{v}_{Fr} \frac{\partial \bar{v}_{Fr}}{\partial r} + \frac{\bar{v}_{Fr}}{r} \frac{\partial \bar{v}_{Fr}}{\partial \varphi} + \bar{v}_{Fz} \frac{\partial \bar{v}_{Fr}}{\partial z} - \frac{\bar{v}_{Fr}^2}{r} \right) = -(1-\varepsilon)\rho_F g \cos \varphi - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\varphi\varphi}}{r}, \quad (5a)$$

$$(1-\varepsilon)\rho_F \left(\bar{v}_{Fr} \frac{\partial \bar{v}_{F\varphi}}{\partial r} + \frac{\bar{v}_{F\varphi}}{r} \frac{\partial \bar{v}_{F\varphi}}{\partial \varphi} + \bar{v}_{Fz} \frac{\partial \bar{v}_{F\varphi}}{\partial z} + \frac{\bar{v}_{Fr} \bar{v}_{F\varphi}}{r} \right) = -(1-\varepsilon)\rho_F g \sin \varphi$$

$$- \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi}$$

$$+ \frac{\partial \tau_{\varphi z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\varphi}}{r}, \quad (5b)$$

$$(1-\varepsilon)\rho_F \left(\bar{v}_{Fr} \frac{\partial \bar{v}_{Fz}}{\partial r} + \frac{\bar{v}_{F\varphi}}{r} \frac{\partial \bar{v}_{Fz}}{\partial \varphi} + \bar{v}_{Fz} \frac{\partial \bar{v}_{Fz}}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\varphi z}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} \quad (5c)$$

Hinzu kommen die entsprechenden drei Komponentengleichungen für die Gasphase und die Kontinuitätsgleichungen für das Gemisch und für das Gas.

Die weitere Aufbereitung und numerische Umsetzung dieser Gleichungen wird in Anwendung auf den konkreten Fall der Krümmerströmung ausführlich in [1] dargestellt.

3. Gegenstand der experimentellen Untersuchungen

Für die experimentellen Untersuchungen wurde der im Bild 1 dargestellte Versuchsstand verwendet. Unmittelbar hinter der Pumpe befindet sich eine Mischeinrichtung mit austauschbaren Düsen. Die einzelnen Düsen können durch eine separate Kompressorenanlage je nach Erfordernissen mit Luft versorgt werden. Damit lassen sich die Experimente wahlweise an homogenen Flüssigkeiten oder auch an gasbeladenen Flüssigkeiten mit veränderlichem Gasvolumenanteil durchführen.

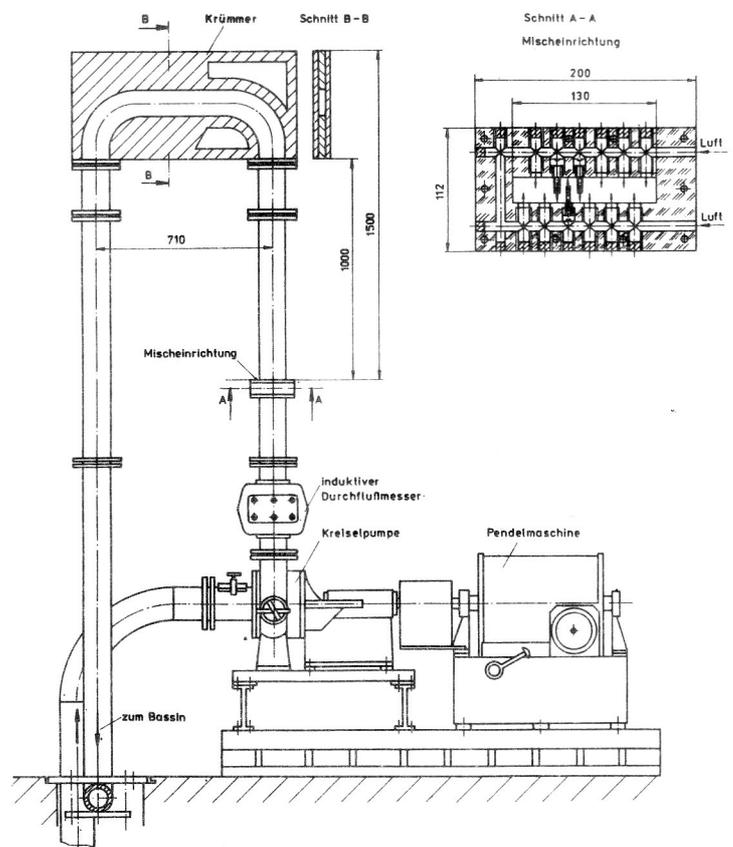


Bild 1 Versuchsstand mit Mischeinrichtung

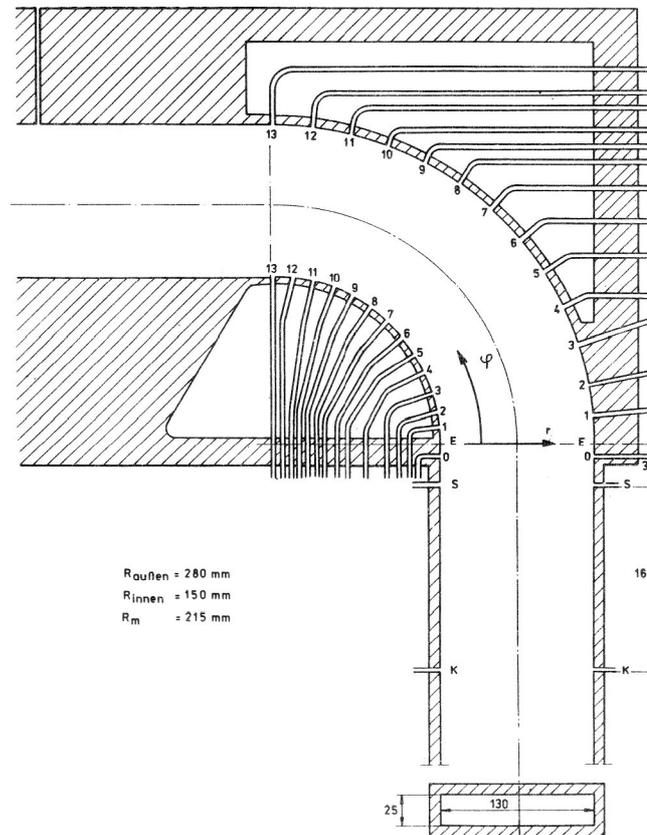


Bild 2
Krümmer mit Druckmeßstellen

Der Versuchsstand eignet sich zur Untersuchung nach oben oder unten gerichteter Rohr- oder auch anderer Kanalströmungen sowie von Strömungen in den Umlenkbereichen. Entsprechend der Konzeption ist es nicht nur möglich, vertikale, sondern auch unter verschiedenen Winkeln geneigte Strömungen zu beobachten und auszumessen.

Wie im Bild 1 dargestellt, ist der im wesentlichen aus Piacryl hergestellte Umlenkbereich so gestaltet, daß sich verschiedene Krümmerformen einstellen lassen. Hierzu ist der Umlenkanal aus austauschbaren PVC-Elementen aufgebaut. Durch zwei Metallrahmen und Schraubenverbindungen wird der aus den Piacrylplatten und Austauschteilen bestehenden Konstruktion die erforderliche Stabilität verliehen.

In seiner Basisversion besteht der Umlenkanal aus einem aufwärts durchströmten Eintrittskrümmers und einem abwärts durchströmten Austrittskrümmers. Die Grundvariante des Eintrittskrümmers zeigt das Bild 2. Hierin sind schematisch auch die Stellen eingetragen, an denen sich die Wanddruckmessungen vornehmen lassen.

4. Übersicht über die eingesetzte Meßtechnik

Zur Charakterisierung des Verhaltens von Gemischströmungen sind neben Kenntnissen über das Druckfeld auch nähere Informationen über die Dichteverteilung wichtig, da sie entsprechend

$$\varepsilon \approx \frac{\rho_F - \rho}{\rho_F} \quad (6)$$

($\rho_G \ll \rho_F$) einen Überblick über die Phasenverteilung gibt.

Gute Erfahrungen in der Dichtebestimmung liegen auf der Basis der Absorption der γ -Strahlung beim Durchgang durch die Gemischströmung vor [2]. Hierbei befindet sich die Strömung zwischen Strahlungsquelle und Detektor. Für die Strahlungsabsorption gilt das Absorptionsgesetz, mit deren Hilfe sich aus den gemessenen Intensitäten bei der Durchstrahlung von Gas, Flüssigkeit und Flüssigkeitsgasgemisch als Mittelwert über die durchstrahlte Länge der örtliche Gasvolumenanteil

$$\varepsilon = \frac{\ln(I_{FG}/I_F)}{\ln(I_G/I_F)} \quad (7)$$

ermitteln läßt.

Wichtige Aufschlüsse über das Verhalten von Gemischströmungen erhält man auch durch Beobachtung und den Einsatz optischer Methoden. Hierzu ist es erforderlich, günstige Sichtverhältnisse zu gewährleisten. Bei einer gewissen Durchsichtigkeit des Gemisches gelingt es, mit Hilfe von fotografischen Aufnahmen und kinematografischen Zeitdehneraufnahmen ausreichende Informationen über die Abmessungen und die Geschwindigkeiten der Blasen zu gewinnen [3]. Sind günstige Bedingungen für eine optische Durchdringungsfähigkeit des Gemisches vorhanden, so ist es auch möglich, zur Bestimmung der Geschwindigkeit der flüssigen Phase die Laser-Doppler-Anemometrie einzusetzen [4]. Da es sich auch in diesem Fall um eine berührungsfreie Meßmethode handelt, werden viele Einflußfaktoren eliminiert, die mit der Einführung von Sonden in Gemischströmungen verbunden sind und das Meßergebnis erheblich beeinträchtigen können.

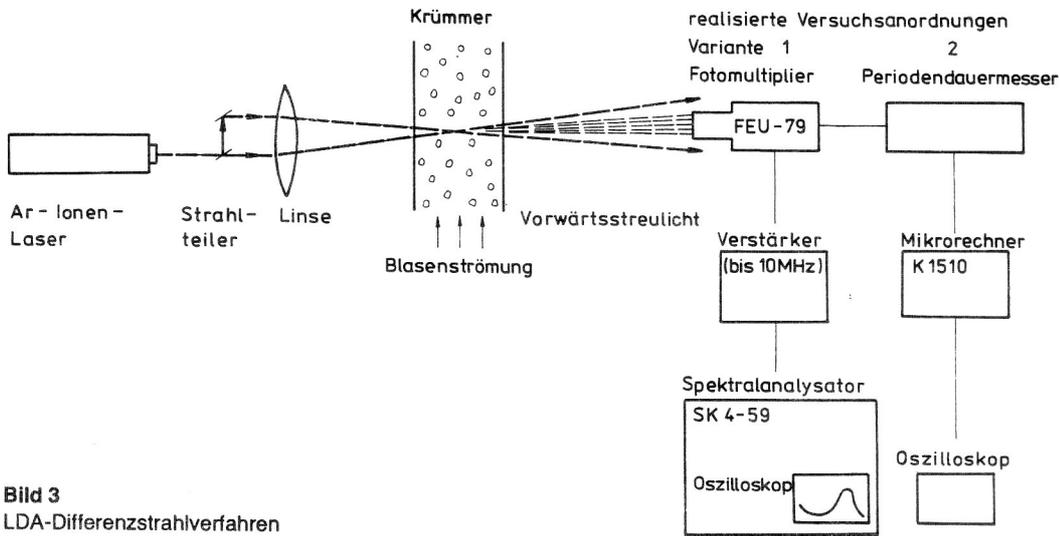


Bild 3
LDA-Differenzstrahlverfahren

Der eingesetzten Laser-Doppler-Anemometrie wurde das Differenzstrahlverfahren zugrunde gelegt, wobei, wie im Bild 3 dargestellt, die Vorwärtsstreuung gewählt wurde.

Zur Erfassung der Doppler-Frequenz und zur Auswertung hinsichtlich der Mittelwertbildung und der Ermittlung des Turbulenzgrades wurde zusätzlich zum Spektralanalysator ein an der Universität Rostock entwickelter Periodendauermesser eingesetzt [5]. Er enthält den Mikrorechner K 1510. Mit diesem Gerät läßt sich beim Durchgang eines Streuteilchens durch das Interferenzfeld im Meßvolumen die Zeitdifferenz des periodisch aufleuchtenden Signals messen. Weiterhin verarbeitet der Mikrorechner K 1510 diese Zeitdauer zwischen den Perioden und rechnet sie in eine Geschwindigkeit um. Bei einer Anzahl solcher von mehreren Streuteilchen ausgehenden Signale wird dann der Mittelwert der Geschwindigkeit und die mittlere quadratische Schwankung berechnet und angezeigt. Über

eine Bildschirmanzeige erfolgt außerdem eine Darstellung des zeitlichen Ablaufes.

5. Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen

Die am Krümmer durchgeführten Druckmessungen ergeben die im Bild 4 dargestellten starken Druckdifferenzen zwischen der Innen- und der Außenwand des Krümmers, so wie es auch aus anderen Untersuchungen bekannt ist. Daraus ist weiterhin ersichtlich, daß in Strömungsrichtung die Druckgradienten innen und außen einander entgegengerichtet sind. Im Vergleich dazu sind für einen ausgewählten Volumenstrom ($\dot{V} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$) im Bild 5 die Druckverläufe bei unterschiedlichen Gasvolumenstromanteilen aufgetragen. Daraus ist sehr anschaulich der Einfluß der Gasbeladung auf die Druckverteilung zu entnehmen. Wie das

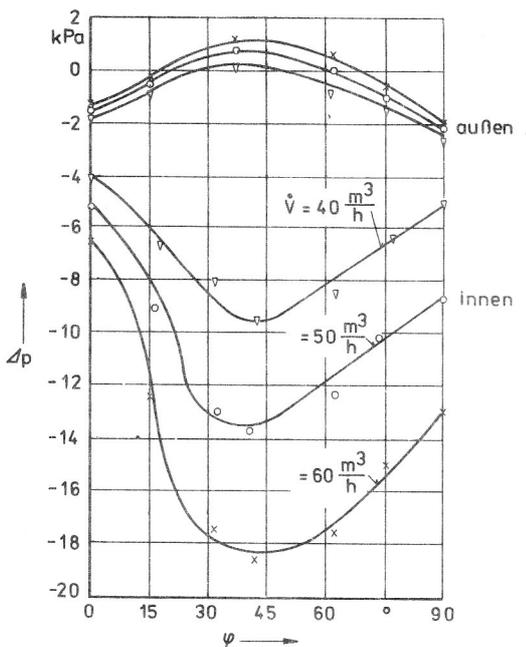


Bild 4
Druckverteilung im Krümmer bei Einphasenströmung

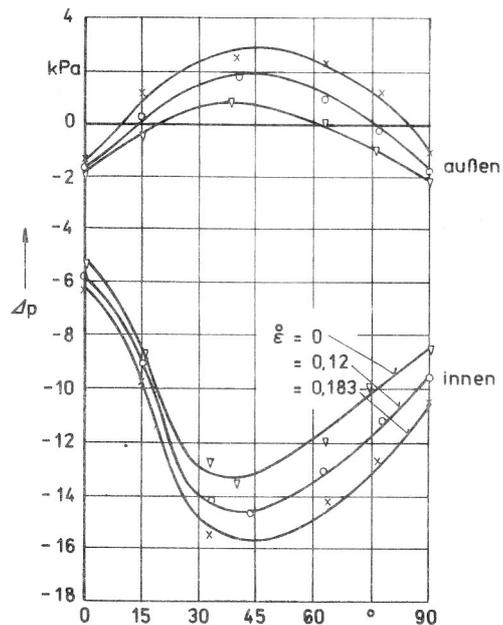


Bild 5
Druckverteilung im Krümmer bei Zweiphasenströmung

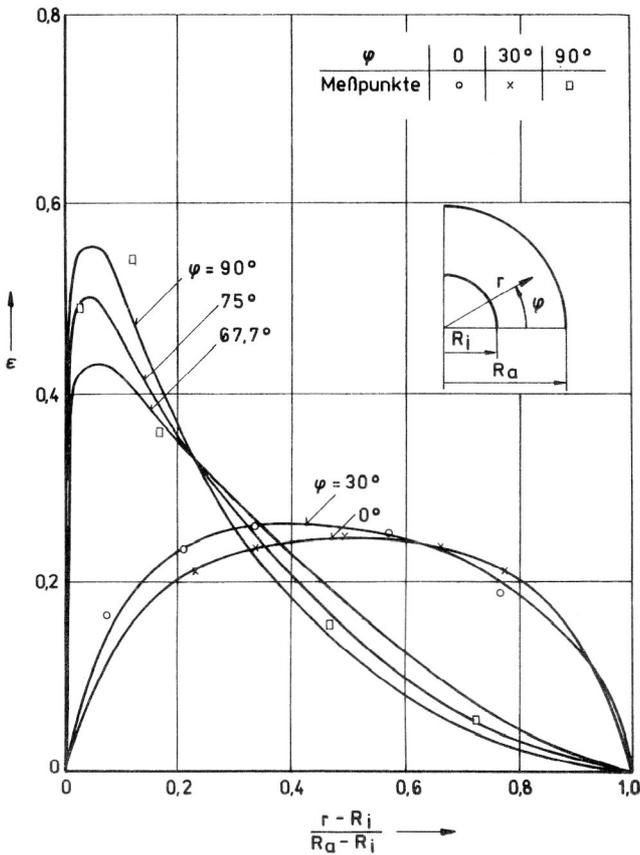


Bild 6
Gemessene und berechnete Phasenverteilung

Bild zeigt, verschiebt sich mit höherem Gasanteil das Druckminimum nach unten und auch weiter nach hinten. Insbesondere letzteres bewirkt im hinteren Krümmerschnitt einen stärkeren Druckanstieg an der Innenseite, in deren Folge eine erhöhte Ablösegefahr besteht.

Im Bild 6 sind Ergebnisse zur Phasenverteilung aufgetragen worden, wobei die aus den theoretischen Betrachtungen gewonnenen numerischen Resultate [1] den Meßwerten aus der Absorption der γ -Strahlung gegenübergestellt wurden. Die Darstellung zeigt den Übergang der anfänglich bei $\varphi = 0^\circ$ und $\varphi = 30^\circ$ vorliegenden ausgeglichenen Gasverteilung zu einer verstärkten Konzentration der Gasphase an der Innenkontur des Krümmers bei höheren Umlenkwinkeln. Die Meßwerte für $\varphi = 90^\circ$ stimmen, wie aus dem Bild zu entnehmen ist, in der Tendenz mit den theoretischen Werten recht gut überein. Auch die fotografischen Aufnahmen bestätigen diese Phasenverteilung. Der Einfluß der Gasbeladung auf die Ablösung, was weiter unten quantitativ belegt wird, steht damit durchaus in einem Zusammenhang.

Im Bild 7 sind die numerisch berechneten Geschwindigkeitsprofile dargestellt. Sie basieren auf der Anwendung des Mischungswegansatzes auf die turbulente Blasenströmung. Hieraus ist ersichtlich, daß es in den Krümmern zur Ausbildung eines Rezirkulationsgebietes kommt, das sich mit wachsendem Umlenkwinkel weiter ausdehnt. Die dargestellten Rechenergebnisse beziehen sich auf meinen konstanten Volumenstrom, wobei der Gasvolumenstromanteil $\varepsilon = 0,12$ beträgt. Dabei erfolgt eine geringfügige

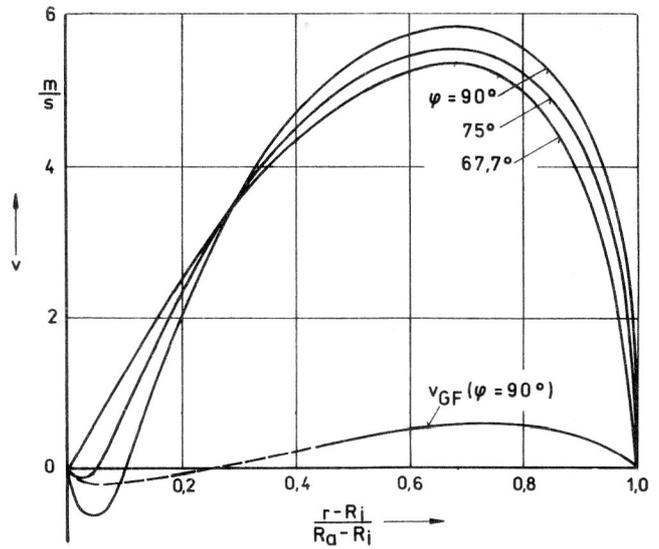


Bild 7
Berechnete Geschwindigkeitsverteilung

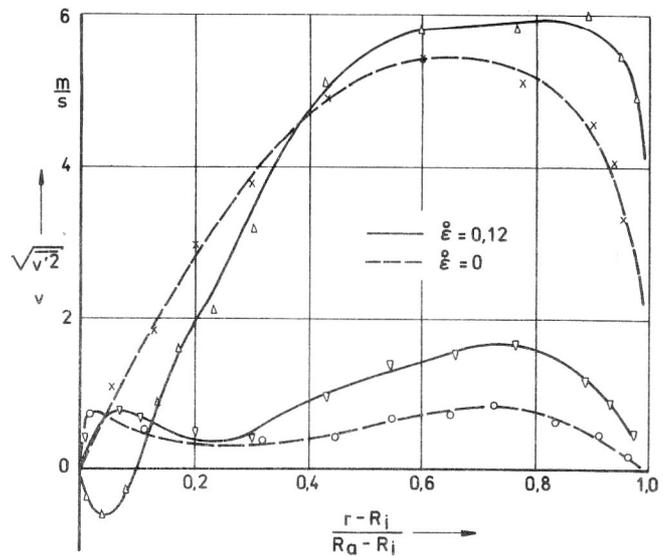


Bild 8
Gemessene Geschwindigkeitsverteilungen und Turbulenzintensitäten

gige Verschiebung des Geschwindigkeitsmaximums in Richtung größer werdender Radiuskoordinate, und der Wert der maximalen Geschwindigkeit erfährt bis zur Austrittsebene eine Zunahme. Für die Betrachtung der Zweiphasenströmung ist weiterhin der örtliche Schlupf eine wesentliche Größe. Er ist insbesondere für die anschließende Diskussion der Turbulenzmeßwerte von Bedeutung. Wie das Bild zeigt, wechselt der Schlupf in radialer Richtung das Vorzeichen. Es resultiert aus der Verzögerungswirkung der Flüssigkeit auf der Innenseite der Krümmung (infolge des Druckanstieges).

Das Bild 8 zeigt die Verifizierung der Geschwindigkeitsverteilung durch Laser-Doppler-Meßwerte. Außerdem sind darin die Turbulenzintensitäten eingetragen. Man sieht einen Anstieg derselben mit wachsender Gasbeladung.

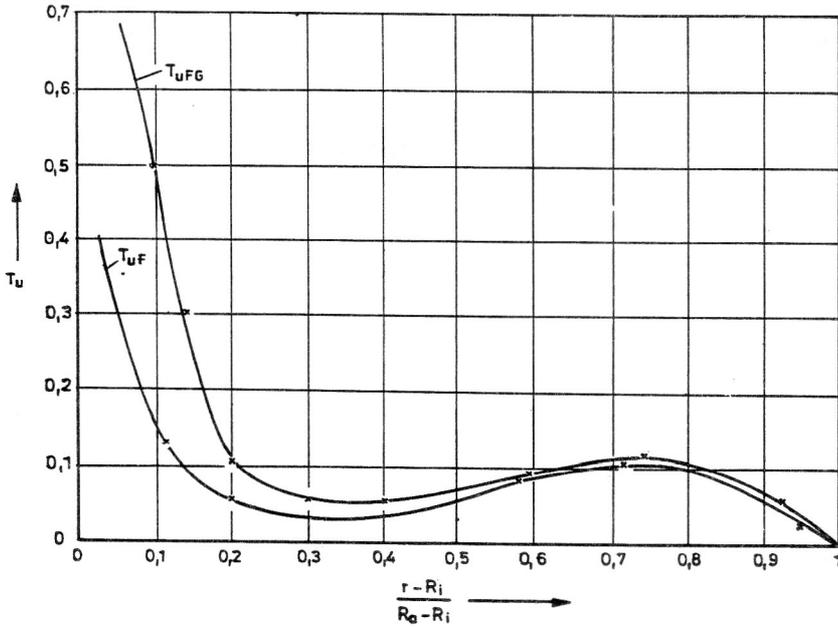


Bild 9
Meßergebnisse für den Turbulenzgrad

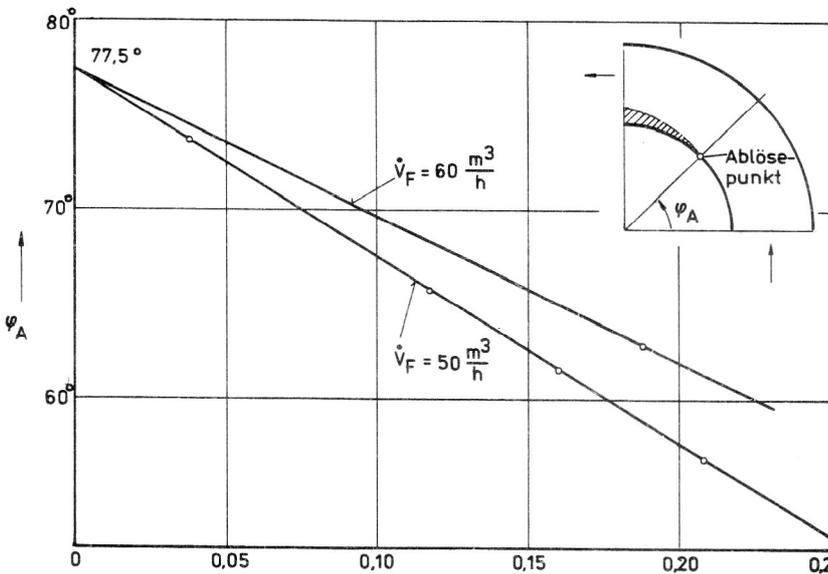


Bild 10
Einfluß der Gasbeladung auf den Ablösepunkt

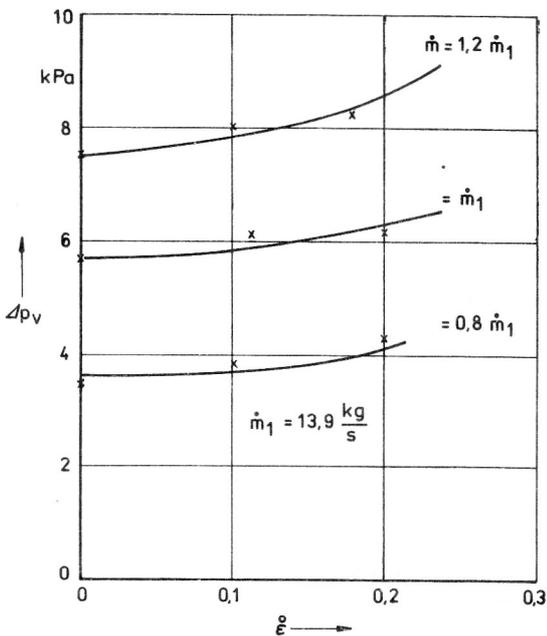


Bild 11
Einfluß der Gasbeladung auf den Druckverlust im Krümmer

Bei diesen Kurven fällt auf, daß die Turbulenzwerte in der Nähe des Außenrandes größer sind als weiter innen. Diese Beobachtung ist nur relativ zu werten.

Wie das Bild 9 zeigt, weist der örtliche Turbulenzgrad eine umgekehrte Tendenz auf. Er ist innen größer (hier bezogen auf einen solchen Umlenkwinkel, wo keine Ablösung auftritt). Aus diesem Bild ist zu entnehmen, daß der Turbulenzgrad bei der gasbeladenen Flüssigkeitsströmung stets höher liegt als bei der homogenen Flüssigkeitsströmung.

Der Einfluß der Gasbeladung auf die Ablösung der Strömung kann am besten durch die Auswertung kinematografischer Aufnahmen in Zeitlupe erfaßt werden. Hiermit läßt sich, wie das Bild 10 zeigt, bei erhöhter Zugabe von Luft eine Verlagerung des Ablösepunktes in den Krümmerein-

lauf, d. h. in Richtung niedrigerer Umlenkwinkel, nachweisen. Dieser Einfluß erweist sich bei geringen Volumenströmen als besonders markant. Der maximale Ablöswinkel liegt bei $77,5^\circ$.

Die Gasbeladung wirkt sich auch insgesamt auf die Krümmenströmung aus. Wie das Bild 11 zeigt, steigen die Druckverluste infolge der Strömungsumlenkung mit wachsender Gasbeladung. Die Ursache hierfür ist in der höheren Reibung und der früheren Ablösung zu sehen. Bei einem Gasvolumenanteil von 0,20 sind die Druckverluste allerdings nur etwa 10–20 % höher als bei homogener Flüssigkeit.

6. Schlußfolgerungen

Zunächst zeigten die Ergebnisse, in welchem Maße eine Zugabe von Luft oder einem anderen Gas die Funktion des Krümmers als Umlenkrichtung beeinträchtigen kann. Höhere Gasanteile bedeuten eine frühere Ablösung an der inneren Begrenzung der Strömung. Diesem negativen Aspekt der Umlenkung von gasbeladenen Flüssigkeitsströmungen läßt sich nur mit vergrößerten Krümmungsradien begegnen, was allerdings mehr Platzbedarf nach sich zieht. Höhere Gasanteile bedeuten aber auch stärkere Verluste infolge der zusätzlichen Reibungserscheinungen. Auch hierfür sind zur Reduzierung der Verluste größere Krümmungsradien ein Weg.

Der wesentlichste Zweck der vorliegenden Untersuchungen besteht jedoch in der Überprüfung der Berechnungsmöglichkeiten von gasbeladenen Flüssigkeitsströmungen. Der Krümmer stellt dabei ein gutes Versuchsobjekt dar, da die Krümmenströmung durch die überlagerte Sekundärströmung, das Auftreten von Ablösungen und die bei gasbeladenen Flüssigkeitsströmungen zusätzliche Problematik der Entmischungserscheinungen der Phasen Bedingungen beinhaltet, die auch für andere komplizierte Ma-

schinenbauteile, z. B. radiale Laufräder von Kreiselpumpen, von Interesse sind. Der Versuch, die auftretende radiale Entmischung unter Einbeziehung der turbulenten Blasendiffusion und der Sekundärströmung zu berechnen, zeigte beim Krümmer übereinstimmende Ergebnisse mit den Meßwerten zur Geschwindigkeits-, Druck- und Phasenverteilung.

Insbesondere die Bereitstellung von Formeln zur Berechnung der Wirbelviskosität ist in diesem Zusammenhang von Bedeutung. Der Einfluß eines Gasvolumenstromanteils von 0,12 im Vergleich zur homogenen Flüssigkeitsströmung zeigt das Bild 12. Die wesentlich höhere Wirbelviskosität des Flüssigkeitsgasgemisches ergibt sich aus deren Hauptanteil ν_{tB} . Er resultiert aus der Schwarmturbulenz der Blasen. Die einzelnen Anteile der Wirbelviskosität sind entsprechend [1] additiv miteinander verknüpft. Die im Bild eingetragenen Anteile $\nu_{tr\varphi}$ und $\nu_{t\varphi z}$ ergeben sich aus der Scherung in φ -Richtung in einer Ebene senkrecht zur r -Koordinate und aus derjenigen in φ -Richtung in einer Ebene senkrecht zur z -Koordinate. Wie das Bild 12 zeigt, ist für ν_{tB} eine Nullstelle dort zu sehen, wo im Geschwindigkeitsprofil ein Wendepunkt (Bild 7) vorliegt. An dieser Stelle verschwindet der Druckgradient und damit auch der Schlupf, welcher für ν_{tB} verantwortlich ist. Auch für $\nu_{t\varphi z}$ gibt es eine Nullstelle. Sie liegt in dem Punkt, wo das Geschwindigkeitsprofil seinen Nulldurchgang hat.

Die Laser-Doppler-Anemometrie erwies sich für die Blasenströmung bis zu örtlichen Gasvolumenanteilen von etwa 0,20 als brauchbare und zweckmäßige Methode. Es bezieht sich hier vor allem auf mittlere Blasendurchmesser von 1 ... 4 mm. Sollten z. B. ähnliche Messungen in einem Pumpenlaufrad vorgenommen werden, so ist zu erwarten, daß wegen der geringeren Blasendurchmesser, die sich infolge einer stärkeren Dispergierung einstellen, der bezo-

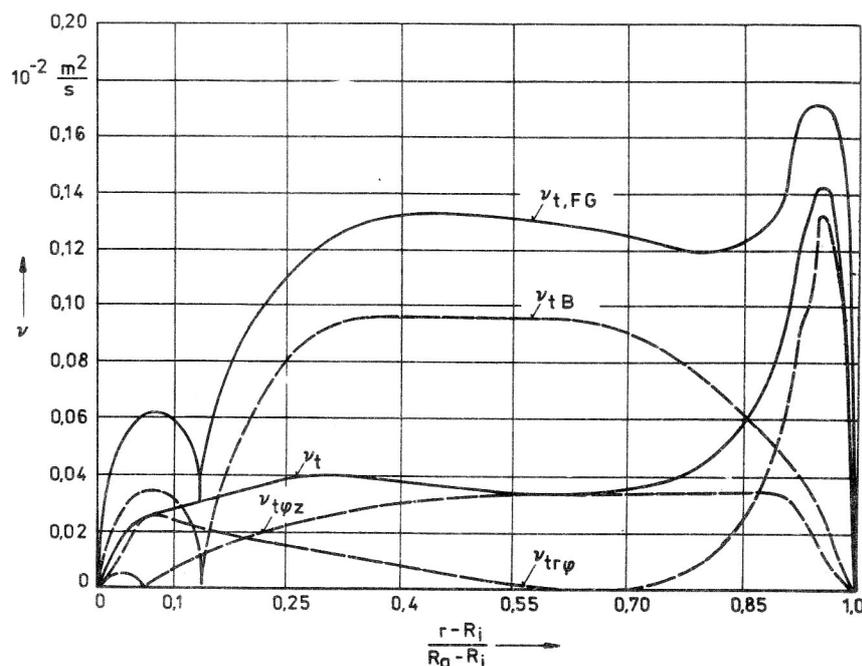


Bild 12
Einfluß der Gasbeladung auf den Verlauf der Wirbelviskosität

gen auf die Laser-Doppler-Anemometrie maximal mögliche Gasvolumenanteil erheblich kleiner ist [4]. Im Ergebnis der Untersuchungen läßt sich feststellen, daß in den Strömungsgebieten, in denen die Durchsichtigkeit gewährleistet werden kann, auf jeden Fall die Laser-Doppler-Anemometrie anderen Meßmethoden, z. B. der Leitfähigkeitsmethode [6], vorzuziehen ist. Es ist nicht nur die Handhabung einfacher, sondern auch die Meßgenauigkeit höher.

LITERATUR

- [1] Kosmowski, I.; Al-Ahmad, H.; Lilienblum, W.: Turbulente Blasenströmung im Krümmer. Technische Mechanik, Magdeburg 12 (1991) 1, S. 51 – 59.
- [2] Kosmowski, I.; Lilienblum, W.: Messung des Durchsatzes von gasbeladenen Flüssigkeitsströmungen. Chemische Technik, Leipzig 33 (1981) 1, S. 20–23.
- [3] Kosmowski, I.; Diedrich, U.: Darstellung der Bewegung eines Flüssigkeitsgasgemisches in Rohren. Wiss. Zeitschr. TH Magdeburg 23 (1979) 1, S. 1 – 4.

- [4] Chodan, I. W.; Lilienblum, W.: Turbulenz und Geschwindigkeitsprofile in einer geneigten Blasen säule. Wiss. Zeitschr. TH Magdeburg 28 (1984) 4, S. 53 – 59.
- [5] Kröger, W.: Ein universelles Verfahren zur Signalauswertung in der Laser-Doppler-Anemometrie. Dissertation, Univ. Rostock, 1984.
- [6] Kosmowski, I.; Wunderlich, B.; Lilienblum, W.: Messung der Größe und Geschwindigkeit von Blasen in Flüssigkeitsgasströmungen. Messen – Steuern – Regeln, Berlin 23 (1980) 10, S. 544 – 548.

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. sc. techn. I. Kosmowski
Doz. Dr. sc. techn. W. Lilienblum
Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik
Technische Universität „Otto von Guericke“
Universitätsplatz 1
O-3010 Magdeburg

Dr.-Ing. Al-Ahmad
Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik
Universität Damaskus