

Einfluß der Gasbeladung auf Flüssigkeitsströmungen

Ingo Kosmowski

Für die gasbeladenen Flüssigkeitsströmungen, bei denen keine Ablösung auftritt, wird eine homogene Betrachtung des Gemisches vorgenommen, aus der sich Orientierungen für die Ausbildung des Strömungsfeldes in einem Kanal ergeben, die entsprechend dem sich einstellenden Schlupf zu korrigieren sind. Durch Anwendung dieser Methode auf die Strömung in dem Laufradkanal einer Kreiselpumpe konnten Ergebnisse erzielt werden, die qualitativ mit den Experimenten korrespondieren. Untersuchungen an einem ruhenden Kanal ergaben einen Einblick in das räumliche Phasenverhalten der turbulenten Strömung und quantitative Angaben zur örtlichen Phasen- und Geschwindigkeitsverteilung in einer Kanalströmung.

1. Einleitung

In zunehmendem Maße gewinnen Zweiphasenströmungen, bedingt vor allem durch ihr verstärktes Auftreten in der Verfahrens- und Energietechnik, an Bedeutung. Die aus einem Gemisch von gasförmiger und flüssiger Phase bestehenden Strömungen weisen vielfältige Formen der Phasenverteilung und komplizierte Austauschvorgänge zwischen den Phasen auf. Durch die sich zeitlich und örtlich vollziehenden Veränderungen des Bewegungszustandes der Phasen wird die theoretische Behandlung derartiger Strömungen erheblich erschwert.

Da in den seltensten Fällen eine auf die Massen- und Kräfteverhältnisse bezogene Gleichwertigkeit der Phasen vorliegt, ist es üblich, von der dominierenden Phase auszugehen. Entsprechend dem Anteil der Zweitphase wird eine Korrektur im Vergleich zur einphasigen Strömung vorgenommen.

Mit der Beibehaltung des Kontinuumsbegriffs kann die disperse Phase gemeinsam mit dem Trägerfluid in Form eines Pseudofluids berücksichtigt werden. Diese Betrachtung gasbeladener Flüssigkeitsströmungen, die für Blasenströmungen mit geringem Gasanteil vertretbar erscheint, führt zu dem homogenen Modell der Zweiphasenströmung, bei dem gleiche Geschwindigkeiten beider Phasen vorausgesetzt werden. Das gasbedingte Kompressibilitätsverhalten wird durch die Änderung der Gemischdichte beschrieben.

2. Homogene Betrachtung der Zweiphasenströmung

Bei gasbeladenen Flüssigkeitsströmungen sind kleine Gasmassenstromanteile vorhanden, wodurch praktisch die gesamte Masse in Form der flüssigen Phase vorliegt und die Kompressibilität im wesentlichen durch die Gasphase bestimmt wird. Durch eine für die Zweiphasenströmung charakteristische Dichte kann bei homogener Betrachtung von den bekannten Grundgleichungen der Strömungsmechanik ausgegangen werden [1]:

Bewegungsgleichung

$$\tau_{ij,i} + \rho f_i = 0 \quad \text{für } x \in V, \quad (1)$$

Kontinuitätsgleichung

$$v_{i,i} = 0 \quad \text{für } x \in V. \quad (2)$$

Zwischen Schubspannung und Deformationsgeschwindigkeit wird der Zusammenhang vorausgesetzt:

Deformationsgeschwindigkeit

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}), \quad (3)$$

Spannungstensor

$$\tau_{ij} = 2\eta e_{ij} - p_{ij}. \quad (4)$$

Die Zähigkeit bei gasbeladener Strömung kann näherungsweise gleich dem Wert für die flüssige Phase gesetzt werden.

Die Grenzen der homogenen Berechnung sind durch die vereinfachte Vorstellung der Phasenverteilung, demzufolge der Blasendurchmesser gegen Null gehen muß und damit auch Übereinstimmung in den Phasengeschwindigkeiten vorliegt, begründet.

Auf die Phasenverteilung haben quer zur Strömung vorhandene Druckgradienten Einfluß. Besonders stark auf den Phasenzustand wirken sich jedoch Strömungsablösungen aus. Sie sind stets mit einer Entmischung der Phasen verbunden. Bei der Einschätzung dieser Gebiete, die durch hohe Gaskonzentrationen gekennzeichnet sind, ist zu beachten, daß Zweiphasenströmungen eher zur Ablösung neigen als Einphasenströmungen [2].

Die Ausbildung des Ablösungsgebietes in einem rotierenden System, das an Stellen relativ geringen Druckes im Strömungskanal entsteht, zeigt deutlich das Auftreten der Phasentrennung [3].

Da bei Zweiphasenströmungen in erster Linie der Mischungszustand der Phasen für das Strömungsverhalten entscheidend ist, gelingt es vielfach, bei guter Durchmischung in Analogie zur Einphasenströmung auf potentialtheoretischer Grundlage Orientierungen für das Druck- und Geschwindigkeitsfeld zu erhalten. Derartige Verhältnisse liegen beispielsweise im ablösungsfreien Bereich des Laufrades von Kreiselpumpen vor. Bedingt durch die hohe Dissipation an der Eintrittskante der Beschaukelung wird ein Dispergieren der Gasphase erreicht, wodurch das Gemisch einen annähernd homogenen Mischungszustand erhält. Der Einfluß der Zulaufströmung zur Pumpe erweist sich dabei als unbedeutend [4].

Durch Programmerweiterung der mehrdimensionalen Berechnung des einphasigen Strömungsfeldes konnten Aussagen zur Druck- und Geschwindigkeitsverteilung im Laufrad einer Kreiselpumpe gewonnen werden.

Die im Strömungskanal vorliegende Druckverteilung bedingt eine bestimmte Phasenverteilung, die nicht zu einer Entmischung führt, aber Gebiete mit unterschiedlichen Gasanteilen zur Folge hat. Entsprechend der Richtungsorientierung des Gases zum geringen Druck können die bevorzugten Blasengebiete durch Auftragung des örtlichen Druckgradienten, sowohl normal als auch tangential zur Stromlinie, eingegrenzt werden. Im Teillastbetrieb bewegen sich die Blasen vorwiegend zur Druckseite und bei Überlast zur Saugseite der Schaufeln. Das Bild 1 zeigt die für den Nennlastbetrieb der Pumpe bei einem Gasvolumenstromanteil von 10 % ermittelte Phasenverteilung. Die Erhöhung des Gasanteils führt zu einer Vergleichmäßigung der Gasverteilung im Laufradkanal.

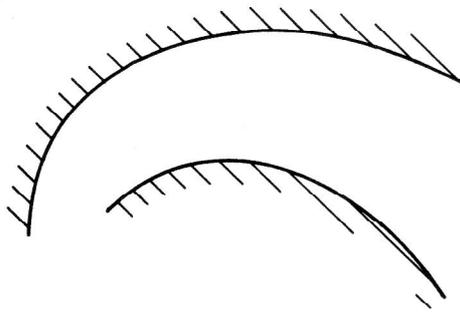


Bild 1
Ermittelte Phasenverteilung für den ablösungsfreien Bereich eines Laufradkanals bei Nennlast

Zwischen visueller Beobachtung und Berechnung ergeben sich für die einzelnen Laststufen gewisse Übereinstimmungen. Die Unsicherheiten der Berechnungsmethode wachsen jedoch mit der Annäherung an den Laufradaustritt durch ablösungsbedingte Abweichungen.

Den zur Einschätzung möglicher schallnaher Gebiete wesentlichen Isotachenverlauf im Laufradkanal zeigt das Bild 2 [5].

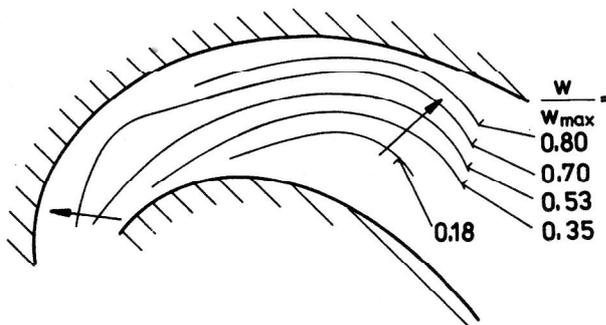


Bild 2
Isotachenverlauf im ablösungsfreien Bereich eines Laufradkanals einer Kreiselpumpe

Die Pfeile geben die Richtung und Stellen des stärksten Anstiegs der Strömungsgeschwindigkeit an.

3. Schlupfbewegung der Phasen

Auf Grund der stark voneinander abweichenden Dichten von Flüssigkeit und Gas und der daraus resultierenden unterschiedlichen Kraftwirkungen auf die Phasen ist die Annahme der Übereinstimmung in den Phasengeschwindigkeiten im realen Verhalten nur bedingt gegeben. Die Berücksichtigung des Schlupfes zwischen den Phasen setzt ihre annähernd gleiche Richtungsorientierung voraus, womit sich die Strömungsbetrachtung auf eine eindimensionale Aufgabenstellung reduziert. Der Bezug auf einen Strömungskanal ist mit der Einführung eines über den Querschnitt gemittelten Wertes für den Schlupf verbunden. Dabei kann der Schlupf durch Beachtung des Zusammenhanges von Gasvolumenanteil und Gasvolumenstromanteil berücksichtigt werden [6]. Auch Ansätze zur Erfassung der Phasenreibung erweisen sich als geeignet [7].

Die Änderung der spezifischen Energie längs einer Stromlinie wird durch die Beziehung ausgedrückt:

$$Y_I = \int_1^2 v_I dv_I + \int_1^2 \frac{dp}{\rho_I} \quad (5)$$

Zur Integration des Druckgliedes muß die Zustandsänderung bekannt sein, die für Wasser-Luftgemische als isotherm zu betrachten ist. In der eingeführten Dichte ist der Schlupf enthalten, für den eine Abhängigkeit vom Druck besteht.

Die Integration ist gegenwärtig nur für spezielle Fälle, für die der Zusammenhang von Schlupf und Druck bekannt ist, beispielsweise Düsenströmungen, möglich.

Bei Anwendung zur Ermittlung der spezifischen Förderarbeit einer Pumpe beim Zweiphasenbetrieb ist entsprechend dem stark positiven Druckgradienten, wobei im Gegensatz zur beschleunigten Strömung ein sich in Strömungsrichtung verringernder Schlupf zu erwarten ist, vom als Mittelwert über Ein- und Austrittsquerschnitt der Pumpe gebildeten Schlupf auszugehen [8].

Für die vereinfachten Bedingungen der homogenen Betrachtung kann die Energieänderung durch die Beziehung

$$Y = \frac{v_D^2 - v_S^2}{2} + \frac{1 - \mu}{\rho_F} (p_D - p_S) + \mu RT \ln \frac{p_D}{p_S} \quad (6)$$

angegeben werden, woraus erkennbar ist, daß im Vergleich zur Flüssigkeitsströmung ein logarithmisches Glied auftritt, mit dem der aus dem Kompressibilitätsverhalten der Strömung bedingte höhere Energiebedarf ausgedrückt wird.

Die Unterschiede zwischen örtlichem und mittlerem Schlupf zeigen Untersuchungen am geneigten Kanal [9], [10]. Das Gas wurde in den Kanal über ein Dispersionsgitter zugeführt, womit sich Blasendurchmesser von 1 bis 5 mm einstellen ließen. Durch einseitige Gasorientierung entsteht, selbst bei fehlendem Flüssigkeitsdurchsatz, eine

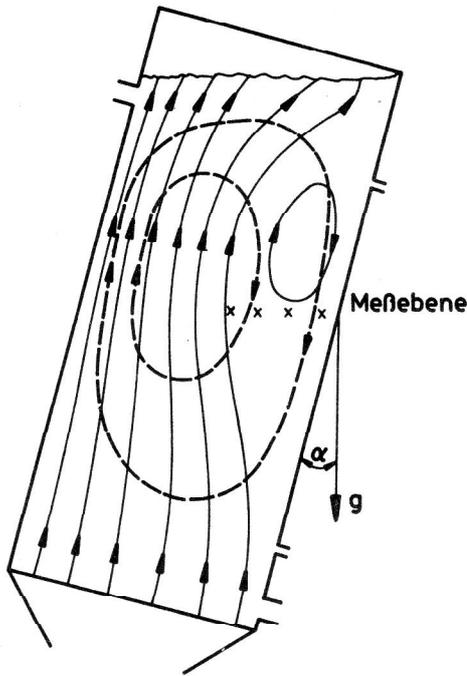


Bild 3
Stromlinienverläufe der flüssigen und gasförmigen Phase im geneigten Kanal

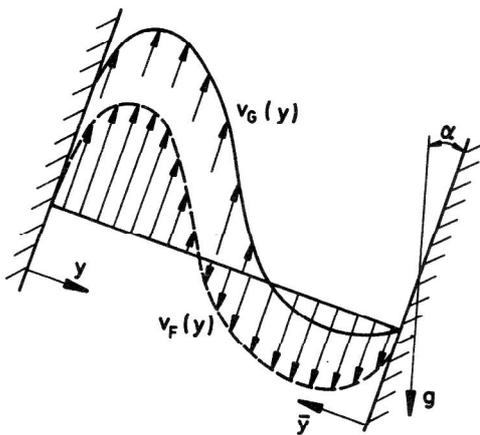


Bild 4
Geschwindigkeitsprofile über den Strömungsquerschnitt des geneigten Kanals

Zirkulation der Flüssigkeit. Zur Darstellung der Flüssigkeitsbewegung werden durch elektrolytische Bildung von Wasserstoff sehr kleine Blasen erzeugt, die sich der Flüssigkeit gut anpassen.

Bei den Versuchen wurden mittlere Gasvolumenanteile, bezogen auf den gesamten Kanal, von $\bar{\epsilon} = 1,5\%$ und 3% eingestellt. Die Auswertung auf Grund von optischen Beobachtungen ergab, daß bereits bei diesen kleinen Gasanteilen eine Phasenorientierung erfolgt, die zu einer erheblichen Beeinflussung der Flüssigkeitsströmung führen kann. Das Bild 3 stellt die Stromlinienverläufe, ausgezogen für die Gasphase und gestrichelt für die Flüssigkeitsphase, dar. In Übereinstimmung damit lassen sich die Geschwindigkeitsprofile sowie die Änderung des

örtlichen Schlupfes über den Querschnitt des Kanals, wie aus dem Bild 4 zu entnehmen ist, darstellen.

4. Gaskonzentrationsverteilung über den Strömungsquerschnitt

Die voran geschilderte einseitige Ausrichtung der Gasphase ist aus unterschiedlichen Kraftwirkungen auf die Phasen zu erklären. Mit der gewählten Kanalneigung wird ersichtlich, daß bereits die kleine senkrecht zur Bewegung gerichtete Komponente der statischen Auftriebskraft für Konzentrationsverschiebungen ausreicht. Als Gegeneinfluß ist der turbulente Massenaustausch vorhanden. Die mechanischen Austauschvorgänge werden damit durch die Beziehung bestimmt [9]:

$$-S_{\Delta} \epsilon \sin \alpha = \sqrt{v_y'^2} l \frac{\partial \epsilon(x, y)}{\partial y} \quad (7)$$

worin der Schlupf durch die Voreilgeschwindigkeit

$$S_{\Delta} = v_G - v_F$$

berücksichtigt wird.

Mit der experimentell zu ermittelnden Größe

$$A' = \frac{S_{\Delta} \sin \alpha}{\sqrt{v_y'^2} l}, \quad (8)$$

folgt durch Integration der Gleichung (7) die Abhängigkeit des örtlichen Gasvolumenanteils:

$$\epsilon = \epsilon_0 e^{-A'y} \quad (9)$$

Entsprechend dem Einfluß der Wand auf die Gasblasen ist eine Korrektur des Gasverteilungsprofils im wandnahen Bereich erforderlich [9].

Durch Fotoaufnahmen und Auszählung der einzelnen Blasen pro Volumeneinheit bei gleichzeitiger Erfassung des Volumens der Blasen wurde die örtliche Gaskonzentration überprüft. Dabei wurden die Deformationen der Blasen, wodurch Abmessungen von $2 \dots 5$ mm in vertikaler und von $1 \dots 3$ mm in horizontaler Richtung auftraten, beachtet. Das Gasverteilungsprofil $\epsilon(y)$, das für $\bar{\epsilon} = 1,5\%$ ermittelt wurde, was bezogen auf die Meße Ebene einem mittleren Gasvolumenanteil von $\bar{\epsilon}_M = 0,65\%$ entspricht, ist im Bild 5 wiedergegeben.

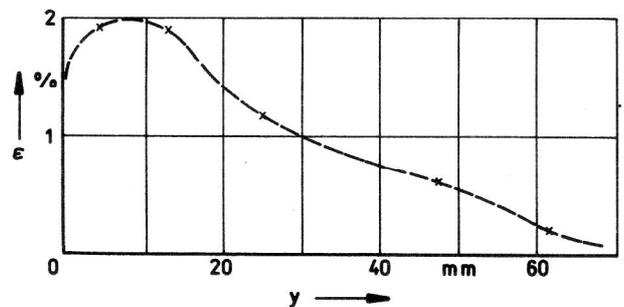


Bild 5
Gasverteilungsprofil beim Gasvolumenanteil $\bar{\epsilon}_M = 0,65\%$

5. Örtliche Geschwindigkeitsverhältnisse im Strömungskanal

Exaktere Angaben zu den Geschwindigkeiten, als sie durch optische Beobachtungen entsprechend Bild 4 zu erzielen sind, läßt die Anwendung der Laser-Doppler-Anemometrie zu [10]. Die Ergebnisse, wie aus dem Bild 6 zu entnehmen ist, zeigen, daß die maximalen Werte der Geschwindigkeit der abwärtsgerichteten Strömung in einem Abstand von $\bar{y} = 5 \dots 10$ mm von der Wand auftreten. Dabei war eine starke Abhängigkeit der Geschwindigkeit vom Gasanteil erkennbar.

Auf der gegenüberliegenden Seite in der Aufwärtsströmung bewegen sich größere Blasen auf Bahnen, bei denen die Quergeschwindigkeit die Größenordnung der Hauptströmung erreicht. Im Bereich größerer Blasen wird die Turbulenz durch den Schlupf der Blasen und die dadurch entstehende durchwirbelte Nachlaufströmung entscheidend beeinflusst. Der Schlupf kann für Blasen größer als 1 mm in einer turbulenten Strömung aus der Beziehung

$$S_{\Delta} = \frac{3}{2} \sqrt[4]{\frac{\sigma g}{\rho_F}} (1 - \epsilon)^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

berechnet werden.

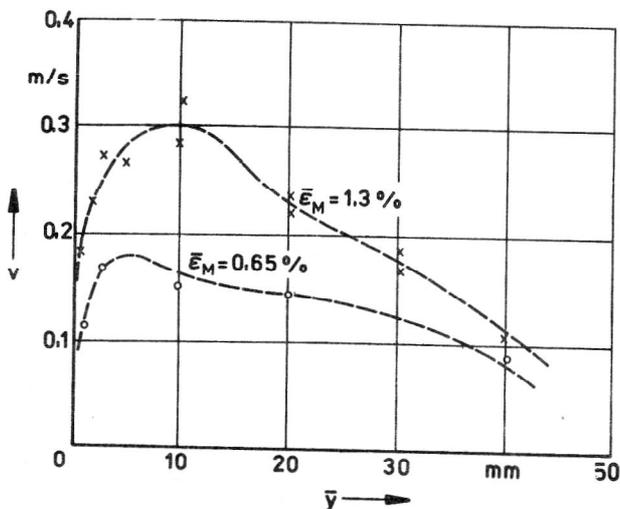


Bild 6
Geschwindigkeitsprofil in Abhängigkeit vom Gasvolumenanteil

Das Schlupfverhalten wurde auf der Seite der Abwärtsströmung durch Beobachtung überprüft. Relativer Stillstand der größten Blasen in vertikaler Richtung trat genau an der Stelle y auf, bei der $v = -S_{\Delta}$ war. Dabei war deutlich noch eine Schwankungsbewegung zu erkennen, für die, abgesehen von der Wandnähe $y \rightarrow 0$ bzw. $\bar{y} \rightarrow 0$, die Übereinstimmung

$$\sqrt{v_x'^2} \approx \sqrt{v_y'^2}$$

besteht.

Durch Messung der Verweilzeit großer Blasen mit Hilfe eines Laserstrahles konnten Rückschlüsse auf die Gasgeschwindigkeit gezogen werden, woraus die Geschwindigkeit der flüssigen Phase resultiert.

Zur Einschätzung der maximalen Strömungsgeschwindigkeit kann vom Schubspannungsverlauf ausgegangen werden. Unter Beachtung des Kräftegleichgewichtes in x -Richtung:

$$\frac{dp}{dx} = -(1 - \epsilon) \rho_F g - \frac{d\tau_{xy}}{dy} \quad (11)$$

läßt sich entsprechend dem bekannten Phasenverteilungsprofil $\epsilon(y)$ und der Bedingung, daß an der Stelle des Maximalwertes der Geschwindigkeit die Schubspannung gleich Null gesetzt werden kann, die Schubspannungsverteilung für die Grenzschicht angeben:

$$\tau_{xy} = l^2 y^2 \frac{dv}{dy} \rho_F (1 - \epsilon) \frac{dv}{dy} - v \frac{d\epsilon}{dy} + \eta \frac{dv}{dy} \quad (12)$$

Für den Mischungsweg wurden keine wesentlichen Unterschiede zwischen beiden Kanalseiten festgestellt. Der Mischungsweg ergibt sich, wie für Einphasenströmungen, aus $l = \kappa y$ mit $\kappa \approx 0,4$, d. h., die Anwesenheit von Blasen, auch größeren, wirkt sich bei kleinen Gasanteilen kaum aus.

6. Messung der Phasenbewegung bei höheren Gasanteilen

Die Anwendbarkeit optischer Methoden, einschließlich der Laser-Doppler-Anemometrie, ist auf kleine Gasanteile begrenzt.

Durch die Entwicklung einer Eindrahtsonde, mit der die Leitfähigkeits- und Kapazitätsmessungen verbunden werden, gelingt es, Blasengrößen und -geschwindigkeit sowie die Blasenverteilung über den Querschnitt auch im Bereich hoher Gasanteile zu bestimmen [11]. Diese kombinierte Meßsonde ermöglicht die gleichzeitige Erfassung mehrerer Meßgrößen und ist zur digitalen Auswertung der Messungen geeignet.

7. Zusammenfassung

Für Näherungsbetrachtungen von Zweiphasenströmungen gibt die homogene Vorstellung der Gemischbewegung gewisse Orientierungen für die Gestaltung des Druck- und Geschwindigkeitsfeldes im Strömungskanal, solange keine Phasenentmischung, die bevorzugt bei Strömungsablösung auftritt, erfolgt. Präzisierungen zur homogenen Darstellung sind auf Grund von Überlegungen zur Einbeziehung des Schlupfes und einer entsprechenden Unterteilung des Strömungsfeldes vorzunehmen. Bei der Berücksichtigung des Schlupfes sind die Unterschiede zwischen den mittleren und örtlichen Werten zu beachten. Untersuchungen an einem geneigten Kanal ergeben in Bezug auf die Verteilung des Gases und der Gas- und Flüssigkeitsgeschwindigkeiten einen Einblick in das Phasenverhalten bei einer turbulenten Strömung. Die Untersuchungen zum räumlichen Phasen-

verhalten bieten die Grundlage zur Präzisierung der Strömungsbetrachtung.

Bezeichnungen

A	Querschnittfläche
A'	Konstante der Phasenverteilung
e	Deformationsgeschwindigkeit
f	spezifische Kraft
g	Schwerebeschleunigung
l	Mischungsweg
p	Druck
R	Gaskonstante
S	Schlupf
T	Temperatur
V	Volumen
v	Absolutgeschwindigkeit
v'	Schwankungsgeschwindigkeit
w	Relativgeschwindigkeit
x,y	Koordinaten
Y	Änderung der spezifischen Energie
α	Neigungswinkel
ϵ	Gasvolumenanteil
η	Zähigkeit
μ	Gasmassenstromanteil
ρ	Dichte
σ	Grenzflächenspannung
τ	Schubspannung

Indizes

D	Druckstutzen
i, j	Komponenten bzw. Ableitungen
I	Impuls
M	Meßebeene
S	Saugstutzen

LITERATUR

- [1] Kosmowski, I., Diederich, U.: Darstellung der Bewegung eines Flüssigkeits-Gasgemisches in Rohren. *Wiss. Z. Techn. Hochsch. Magdeburg* 23 (1979), S. 1 – 4.
- [2] Kosmowski, I., Wunderlich, B.: Betriebsverhalten einer Kreiselpumpe bei der Förderstromregelung durch Luftzuführung. *Pumpen- u. Verdichter – Informationen* (1978) 2, S. 15 – 20.

- [3] Kosmowski, I.: Verhalten von Flüssigkeits-Gasströmungen in rotierenden Systemen. *Pumpen- und Verdichter – Informationen* (1980) 1, S. 34 – 38.
- [4] Kosmowski, I., Lilienblum, W.: Strömungsverhältnisse in einer Pumpenanlage mit Tauchstrahlbegasung der Förderflüssigkeit. *Pumpen- u. Verdichter – Informationen* (1979) 1, S. 17 – 23.
- [5] Kosmowski, I.: Ansätze zur Modellierung von Zweiphasenströmungen am Beispiel der Strömung in Kreiselmotoren. *Wiss. Z. Techn. Hochsch. Magdeburg* 22 (1978), S. 365 – 367.
- [6] Lilienblum, W., Kosmowski, I.: Messung des Durchsatzes von gasbeladenen Flüssigkeitsströmungen. 2. Tagung Strömungsmechanik Magdeburg, 1979.
- [7] Kosmowski, I., Hahnl, W.: Modellvorstellungen zur Betrachtung einer Zweiphasenströmung mit Schlupf. *Chemische Technik* 31 (1979), S. 561 – 562.
- [8] Kosmowski, I.: Zweiphasenströmung in Kreiselpumpen. XI. Kraftwerkstechnisches Kolloquium Dresden, 1979.
- [9] Borodulja, W.A., Kosmowski, I., Lilienblum, W., Chodan, I.W., Pyljow, S.A.: Mechanische Austauschvorgänge bei einem Flüssigkeits-Gasgemisch in einem geneigten Strömungskanal. *Wiss. Z. Techn. Hochsch. Magdeburg* 24 (1980), Heft 4.
- [10] Borodulja, W.A., Kosmowski, I., Lilienblum, W., Chodan, I.W.; Pyljow, S.A.: Experimentelle Untersuchung einer Flüssigkeits-Gasströmung im geneigten Kanal. *Wiss. Z. Techn. Hochsch. Magdeburg* 24 (1980), Heft 4.
- [11] Wunderlich, B., Kosmowski, I., Lilienblum, W.: Messung der Größe und Geschwindigkeit von Blasen in Flüssigkeits-Gasströmungen. 2. Tagung Strömungsmechanik Magdeburg, 1979.

Anschrift des Verfassers:
Prof. Dr.-Ing. Ingo Kosmowski
Technische Hochschule
Otto von Guericke
Sektion Dieselmotoren, Pumpen
und Verdichter
301 Magdeburg, Bierutplatz 5