

## Tropfenmitriß und Flüssigkeitsverteilung bei Ringströmung von Gas/Flüssigkeits-Gemischen

Heinz Langner und Franz Mayinger\*

Herrn Prof. Dr.-Ing. Richard Sinn zum 65. Geburtstag

Bei einer zweiphasigen Gas/Flüssigkeits-Strömung mit hohem Gas- bzw. Dampfanteil fließt ein Teil der Flüssigkeit in Form eines dünnen Films an der Rohrwand, aus dem das schneller strömende Gas über Schubspannungs- und Impulskräfte ständig Flüssigkeitstropfen mitreißt, die sich dann stromabwärts wieder anlagern. Zur Beurteilung von Wärme- und Stoffaustauschvorgängen, aber auch zur Vorhersage des Druckverlustes in stationären Gas/Flüssigkeits-Gemischen ist die Kenntnis der örtlichen und zeitlichen Phasenverteilungsvorgänge und der dabei auftretenden Platzwechselforgänge von vorrangiger Bedeutung.

Fotografische Aufnahmen der Strömung mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitskinematographie lieferten wertvolle Information über die Struktur einer Zweiphasen-Ringströmung und bildeten die Basis für die Erarbeitung theoretischer Ansätze zur Berechnung des Tropfenmassenstroms.

Definiert man einen dimensionslosen Tropfenmassenstrom als das Verhältnis von Tropfenmassenstrom  $\dot{M}_{ENT}$  zu Gesamt-Flüssigkeitsmassenstrom  $\dot{M}_{ges}(1 - \bar{x})$  ( $\dot{M}_{ges}$  Gesamtmassenstrom,  $\bar{x}$  Strömungsdampfgehalt), so erhält man durch Differenzieren der Gl. (1),

$$E = \frac{\dot{M}_{ENT}}{\dot{M}_{ges}(1 - \bar{x})} \quad (1)$$

nach der Kanallänge  $z$  und durch Umstellung nach dem Gradienten  $d\dot{M}_{ENT}/dz$

$$\frac{d\dot{M}_{ENT}}{dz} = \dot{M}_{ges}(1 - \bar{x}) \frac{dE}{dz} - E \dot{M}_{ges} \frac{d\bar{x}}{dz} \quad (2)$$

eine Möglichkeit zur Berechnung der Änderung des Tropfenmassenstroms über die Kanallänge, wenn eine Berechnung der Gradienten  $dE/dz$  und  $d\bar{x}/dz$  gelingt.

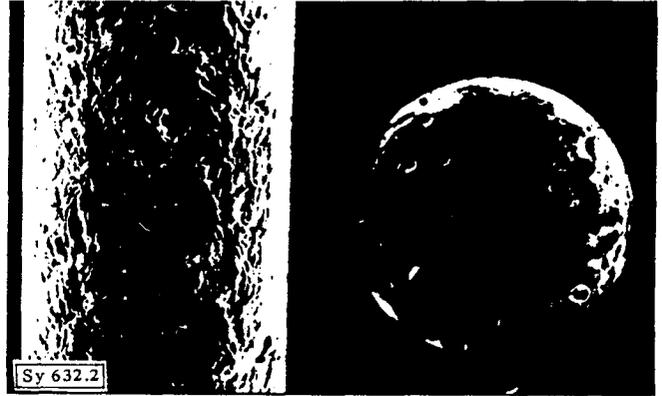


Abb. 2. Vergleich der Meßtechniken.

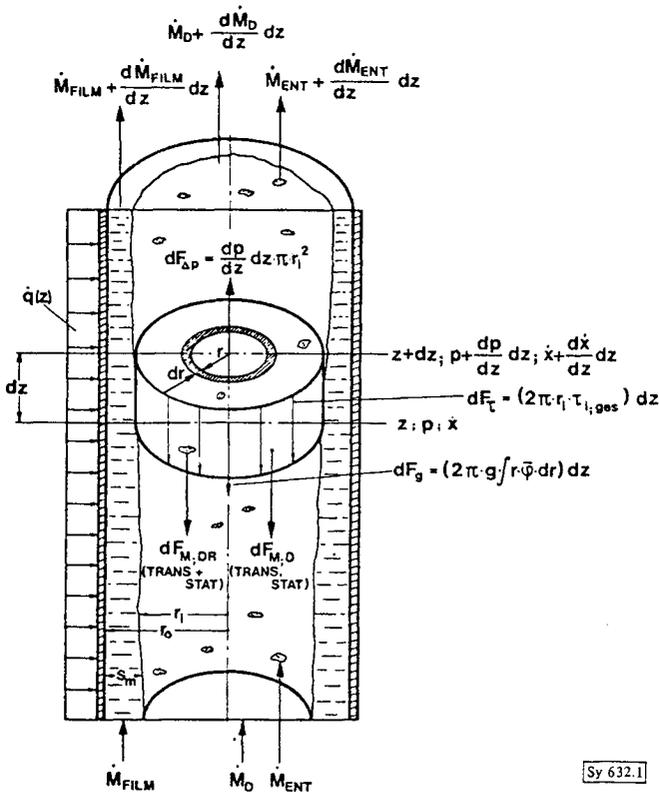


Abb. 1. Impulsbilanz für den Gaskern einer Zweiphasen-Ringströmung mit Entrainment.

Mit Hilfe einer Impulsbilanz für den Gaskern der Ringströmung, s. Abb. 1, wobei die Bilanzgrenze an die Phasengrenzfläche zwischen Dampfkern und Flüssigkeitsfilm gelegt wird, erhält man eine Berechnungsgleichung für den Gradienten  $dE/dz$ :

$$\frac{dE}{dz} = \left[ \frac{2 \cdot \tau_i}{r_i} \frac{dp}{dz} + \frac{\bar{x} + E(1 - \bar{x})}{\bar{x} + E(1 - \bar{x})} \frac{q_D}{q_{FI}} \frac{g}{q_{FI}} \right] \frac{1}{\dot{m}_{ges}^2 \left( \frac{r_0}{r_i} \right)^4 \left[ (\bar{x} + E(1 - \bar{x})) \cdot \left( \frac{1 - \bar{x}}{q_{FI}} \right) + \left( \frac{\bar{x}}{q_D} - \frac{E(1 - \bar{x})}{q_{FI}} \right) (1 - \bar{x}) \right]} + \frac{d\bar{x}}{dz} T_1/T_2, \quad (3)$$

$$T_1 = (\bar{x} + E(1 - \bar{x})) \left( \frac{1}{q_D} - \frac{E}{q_{FI}} \right) + \left( \frac{\bar{x}}{q_D} + \frac{E(1 - \bar{x})}{q_{FI}} \right) (1 - E),$$

$$T_2 = (\bar{x} + E(1 - \bar{x})) \left( \frac{1 - \bar{x}}{q_{FI}} \right) + \left( \frac{\bar{x}}{q_D} + \frac{E(1 - \bar{x})}{q_{FI}} \right) (1 - \bar{x})$$

( $\tau_i$  Grenzflächenschubspannung,  $g$  Erdbeschleunigung,  $p$  Systemdruck,  $r_0$  Rohrrinnenradius,  $r_i$  Radius bei Flüssigkeitsfilmoberfläche).

Durch eine Energiebilanz über die beheizte Länge des Strömungskanals kann die Änderung des Dampfgehaltes über die Kanallänge  $d\bar{x}/dz$  berechnet werden.

Ist nun der in einer Zweiphasenströmung auftretende Gesamtdruckverlust längs des Strömungskanals durch Messung oder durch Berechnung mit einem der bekannten Modelle [1] bekannt, so kann der Tropfenmassenstrom im Gaskern der Ringströmung berechnet werden, wenn zusätzlich eine Möglichkeit zur Berechnung der Grenzflächenschubspannungen existiert. Hierzu bietet sich ein halbempirisches Modell von Levy [2] an, das die Schubspannungen auf der Basis des Prandlschen Mischungsweges berechnet und

\* Dr.-Ing. H. Langner und Prof. Dr.-Ing. F. Mayinger, Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Hannover, Calinstr. 36, 3000 Hannover.

---

zusätzlich den Einfluß von Druck- und Schwerkraften auf die Verformung der Phasengrenzfläche berücksichtigt.

Zur experimentellen Absicherung der entwickelten Theorie wurden Messungen des Tropfenmassenstroms in beheizten Strömungen durchgeführt. Hierfür wurde eine optische Meßmethode gewählt, die es erlaubt, die Strömung in axialer Richtung zu beobachten und zu filmen. Der Vorteil, den diese Meßtechnik gegenüber der bisher häufig bei Strömungsformuntersuchungen angewandten Methode – die Strömung quer zur Strömungsrichtung zu fotografieren – bietet, ist in Abb. 2 demonstriert.

Der senkrechte Blick in die Strömung liefert sehr viel mehr Information über Tropfengröße und -verteilung als die Aufnahme quer zur Strömungsrichtung, die zur gleichen Zeit entstand.

Mit einer eigens für die axiale Strömungsfotografie entwickelten Auswertmethode gelingt die quantitative Bestimmung des Tropfenmassenstroms aus Hochgeschwindigkeitsfilmen oder einer Serie von Einzelaufnahmen.

Der Vergleich zwischen Messung und Rechnung zeigt sowohl für die eigenen Messungen mit dem Kältemittel R 12 als auch für

Referenzwerte aus der Literatur mit Wasser/Wasserdampf-Gemischen befriedigende Ergebnisse [3].

Eingegangen am 25. April 1978

*Schlüsselworte:* Tropfenmassenstrom, Entrainment, Zweiphasenströmung, Ringströmung, Erhaltungssätze, optische Meßtechnik, Phasenverteilung.

[1] Baroczy, C. J.; Chisholm, D.: Chem. Eng. Prog. Symp. Ser. 62 (1965) Nr. 64.

[2] Levy, S.: Int. J. Heat Mass Transfer 9 (1966) S. 171.

[3] Keeys, R. K.; Ralph, R.: The effect of Heat Flux on Liquid Entrainment in Annular Two-Phase Flow in a vertical tube. AERE-Report No. 6294 (1970).

---

*Das vollständige Manuskript dieser Arbeit umfaßt 22 Seiten mit 14 Abbildungen und 14 Literaturziten. Es ist als Fotokopie oder Mikrofiche MS 607/78 erhältlich. Eine Bestellkarte finden Sie am Schluß dieses Heftes.*

---