

## Durchmesserbestimmung von Blasen in trüben bzw. undurchsichtigen Medien mittels der Phasen-Doppler-Anemometrie

Thomas Wriedt und Klaus Bauckhage\*

Die Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) hat mittlerweile bei der Bestimmung von Geschwindigkeiten und Größen disperser Partikeln in mehrphasigen Strömungen einen breiten Anwendungsbereich gefunden [1]. Sie dient z.B. zur Untersuchung und Optimierung unterschiedlicher Zerstäubungsprozesse, so etwa der Sprühkompaktierung oder Sprühtrocknung. Die Anwendbarkeit der PDA zur Größenbestimmung von Blasen ist demgegenüber bisher weniger untersucht [2, 3], obwohl sich dieses Problem in der Verfahrenstechnik sicherlich ähnlich häufig wie das Tropfengrößenproblem stellt. Beispiele für Prozesse mit dispergierter gasförmiger Phase sind die Kavitation, das Sieden, das Entspannen von Flüssigkeiten oder ihr Begasen zum Zwecke des Stoffübergangs.

---

\* Dr.-Ing. *Th. Wriedt*, Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Badgasteiner Str. 3, 28359 Bremen, und Prof. Dr.-Ing. *K. Bauckhage*, Universität Bremen, FB 4/Verfahrenstechnik, Badgasteiner Str. 3, 28359 Bremen.

### 1 Problemstellung

Schwierigkeiten für die Meßtechnik treten im allgemeinen auf, wenn die kontinuierliche Phase undurchsichtig ist, sie also im Bereich des sichtbaren Lichtes optisch absorbiert bzw. wenn das Medium optisch inhomogen ist und es z.B. aus einer Suspension der Emulsion besteht.

Derartige Schwierigkeiten können allerdings in besonderen Fällen durch eine geeignete Wahl der Wellenlänge des verwendeten Lasers gänzlich oder teilweise überwunden werden. So stehen aus der Halbleitertechnik z.B. Laserdioden im infraroten Bereich (750 bis 1500 nm) zur Verfügung, die die bisher fast ausschließlich verwendeten Gaslaser (488 bis 633 nm) in der Wellenlänge bis um das Dreifache übertreffen. Dadurch reduziert sich für besonders feindisperse, suspendierte Bestandteile deren streuender Einfluß im Medium. Andererseits nimmt mit der Wellenlänge auch der Absorptionskoeffizient von klarem Wasser zu, das in der Regel als Lösungsmittel dient. Daraus resultieren für die betreffenden Messungen unter Umständen trotz des reduzierten Streueinflusses verkürzte Weglängen, die zwischen den Optiken und dem zu vermessenden Objekt verwendet werden können.

### 2 Meßtechnische Untersuchungen

Der Vorteil einer infraroten Wellenlänge für die Größenbestimmung von aufsteigenden Blasen in einem für das sichtbare Licht undurchlässigen, besser: absorbierenden und/oder inhomogenen Medium kann experimentell relativ einfach vorgeführt werden. Als PDA-Meßgerät diente eine Eigenentwicklung, die mit einer Gallium-Aluminium-Arsenid-Laserdiode (830 nm) als Sender und

mit Avalanche-Photodioden als optischen Empfängern bestückt ist [4]. Der Empfänger war zur Detektion des reflektierten Lichtes unter einem off-axis-Winkel von  $82,5^\circ$  aufgestellt. Die Signalanalyse basierte auf der Fast-Fourier-Transformation [5]. Zur Erzeugung von monodispersen Blasen war eine Kanüle mit einem Innendurchmesser von  $60 \mu\text{m}$  am Boden einer Küvette mit einem Querschnitt von  $13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$  angebracht. Mit einem Vordruck von ca. 1 bar konnte ein stetiger Strom von monodispersen Blasen

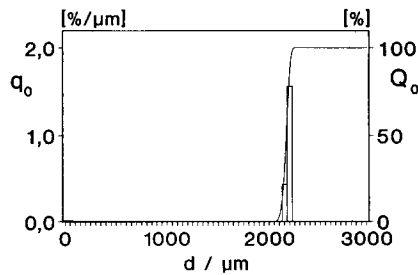


Abb. 1. Anzahlgrößenverteilung von in 100%iger Tinte aufsteigenden, monodispersen Luftblasen.

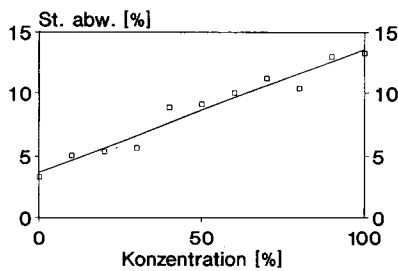


Abb. 2. Standardabweichung der gemessenen Größenverteilung in Abhängigkeit von der Tintenkonzentration.

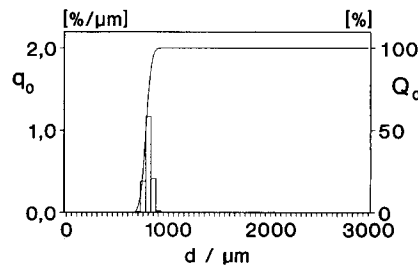


Abb. 3. Anzahlgrößenverteilung von in 0,15%iger Latexkugelsuspension aufsteigenden, monodispersen Luftblasen.

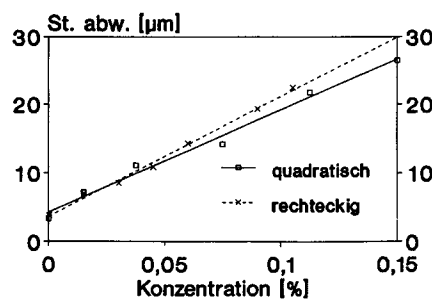


Abb. 4. Standardabweichung der gemessenen Größenverteilung in Abhängigkeit von der Latexkonzentration, a) für eine quadratische Küvette, b) für eine rechteckige Küvette.

mit konstantem Durchmesser, wahlweise im Bereich von  $600$  bis  $2300 \mu\text{m}$  erzeugt werden. Als „undurchsichtiges“ Fluid diente zum einen schwarze Tinte mit einem Brechungsindex  $m = 1,3459 - 0,0001 i$  (bei  $830 \text{ nm}$ ), die mit  $m = 1,351 - 0,0089 i$  im sichtbaren Bereich einen hohen Absorptionskoeffizienten aufweist, bei infrarotem Licht hingegen nahezu transparent ist. Diese Tinte enthält ungelöste Bestandteile von maximal  $500 \text{ nm}$ . Somit sind PDA-Messungen mittels Argon-Ion- oder HeNe-Lasern gänzlich unmöglich. Zum anderen wurde eine Suspension von Latexkugeln mit einem Durchmesser von  $245 \text{ nm}$  in Wasser verwendet.

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in den Abb. 1 bis 4 wiedergegeben. Selbst bei einer Tintenkonzentration von  $100\%$  ist die gemessene Anzahlverteilungsdichte der in der Tinte aufsteigenden Blasen (gleichen Durchmessers) noch sehr schmal (Abb. 1). Wie zu erwarten, verringert sich die Standardabweichung des Blasendurchmessers mit abnehmender Tintenkonzentration in Wasser (Abb. 2).

Die Konzentration der Latexpartikel im zweiten Medium wurde ebenfalls systematisch variiert. Bei einer Massenkonzentration der Latexanteile von  $0,15\%$  ist die gemessene Anzahlverteilungsdichte der Blasen über dem Durchmesser noch wenig verbreitert (Abb. 3). Aus Abb. 4 geht hervor, daß auch hier die Standardabweichung der gemessenen Durchmesserumverteilung linear von der Konzentration der Latexpartikel im Flüssigkeitsvolumen abhängt.

Der Einfluß der Weglänge des Laserlichtes in der Latexsuspension auf die Qualität der Meßergebnisse ließ sich mittels einer Küvette mit einem Querschnitt von  $26 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$  zeigen. Die Weglänge des gestreuten Lichtes durch die Latexsuspension verdoppelt sich in diesem Falle von  $7,5$  auf  $13 \text{ mm}$ . Die Ergebnisse sind ebenfalls in Abb. 4 aufgetragen: Der Anstieg der Standardabweichung nimmt mit der Weglänge zu, bleibt aber über der Latexkonzentration linear. Der Blasendurchmesser wird wiederum richtig bestimmt, wie die photographischen Referenzmessungen in klarem Wasser bestätigen.

### 3 Schlußfolgerung

Es wird deutlich, daß Größenbestimmungen von Partikeln auch in flüssigen „trüben“ oder „undurchsichtigen“ Medien mittels der PDA möglich sind, wenn die einzusetzende Laserwellenlänge ( $\lambda$ ) abhängig von den optischen Eigenschaften der kontinuierlichen Phase speziell dahingehend ausgewählt wird, daß sie im Verhältnis zur Größe ( $d$ ) der darin enthaltenen, feindispersen Bestandteile bestimmte Grenzwerte einhält, so z.B. den Mie-Parameter  $\alpha = \pi d/\lambda < 1$ . Wegen der längeren Wellenlänge ist der Einfluß der im Medium suspendierten feindispersen Bestandteile, die das Licht streuen und dabei (integral) absorbierend wirken, reduziert, so daß mit dieser Wellenlänge PDA-Messungen an sich bewegenden, kugelförmigen Partikeln (hier: Blasen) über größere Weglängen in derartigen Medien oder bei deutlich höheren Konzentrationen (an feindispersen Bestandteilen) im Vergleich zu einer Wellenlänge im sichtbaren Bereich möglich sind.

Der Vorteil einer infraroten Wellenlänge von  $830 \text{ nm}$  kann ferner darin bestehen, daß zahlreiche Medien bei dieser Wellenlänge durchsichtig sind, während sie im sichtbaren Bereich stark absorbierend wirken.

Eingegangen am 2. April 1993 [K 1541]

### Literatur

- [1] Bauckhage, K.; Flögel, H.-H.; Fritsching, U.; Hiller, R.; Part. Syst. Charact. 5 (1988) S. 66/71.

[2] Saffman, M.; Buchhave, P.; Tanger, H.: Proc. Second. Int. Symp. on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon/Portugal, July 2-4, 1984.  
 [3] Breña de la Rosa, A., et al.: Trans. ASME 113 (1991) S. 460/467.  
 [4] Schöne, F.; Dannehl, M.; Wriedt, T.: Third International Conference Laser Anemometry – Advances and Applications, Swansea, 26-29 Sept. 1989, 43.1-43.10.  
 [5] Wriedt, T.; Bauckhage, K.; Schöne, A.: IEEE Trans. Instrum. Meas. IM-38 (1989) Nr. 5, S. 984/990.

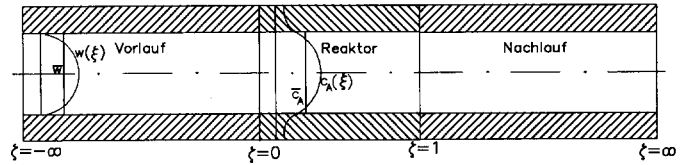


Abb. 1. Gliederung des Modells in 3 Bereiche.

mit den dazugehörigen Anfangs- und Randbedingungen

$$\bar{\theta}(\xi = -\infty, Fo) = 0, \quad \bar{\theta}(\xi, Fo = 0) = 0 \quad (6), (7)$$

und

$$\left. \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \xi} \right|_{\xi = +\infty, Fo} = 0 \quad (8)$$

Bei der Stoffbilanz für die poröse Katalysatorschicht findet die chemische Reaktion 2. Ordnung sowohl an der äußeren geometrischen Oberfläche als auch an der inneren Oberfläche des porösen Katalysators statt [1]. Die Stoffbilanz für den porösen Katalysator ergibt sich in normierter Darstellung zu

$$\frac{\partial x_{A,R}}{\partial Fo} = (\bar{x}_A - x_{A,R}) + (1 + a'\eta) v_A \frac{Da'_{II}}{Sh} x_{A,R} \times \left( \frac{v_B}{v_A} (x_{A,R} - \bar{x}_{A,e}) + \bar{x}_{B,e} \right) \quad (9)$$

mit der Anfangsbedingung

$$x_{A,R}(\xi = -\infty, Fo) = \bar{x}_{A,e} \quad (10)$$

wobei für die Randkonzentration  $c_{B,R}$  nach Aris [5] für gleiche Diffusionskoeffizienten der Komponenten A und B folgende Konzentrationsrelation verwendet wurde:

$$\frac{c_{A,R} - c_{A,e}}{v_A} = \frac{c_{B,R} - c_{B,e}}{v_B} \quad (11)$$

Die mittlere relative Konzentration am Wabenrohrreaktoreintritt  $\bar{x}_{B,e}$  ist ein weiterer frei wählbarer Parameter, für den gilt:

$$0 < \bar{x}_{B,e} < 1 - \bar{x}_{A,e} \quad (12)$$

Die thermische Energiebilanz für die poröse Katalysatorschicht lautet in normierter Darstellung:

$$\frac{\partial \theta_R}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta_R}{\partial \xi^2} - 4 \frac{Da'_{II}}{Le_K} \left( \frac{v_B}{v_A} (x_{A,R} - \bar{x}_{A,e}) \right) \times (1 + a'\eta) - 4 Bi (\theta_R - \bar{\theta}) \quad (13)$$

mit den dazugehörigen Anfangs- und Randbedingungen

$$\theta_R(\xi = -\infty, Fo) = 0, \quad \theta_R(\xi, Fo = 0) = 0 \quad (14), (15)$$

und

$$\left. \frac{\partial \theta_R}{\partial \xi} \right|_{\xi = +\infty, Fo} = 0 \quad (16)$$

Da die chemische Reaktion an einer Phasengrenzfläche stattfindet, deren Temperatur sich über die axiale Lauflänge  $\xi$  ändert, ist

## Instationärer Energie- und Stofftransport im Wabenrohrreaktor

Andreas Rogowski, Rudolf Heinisch  
und Ehrenfried Schütt\*

### 1 Einleitung und Bilanzgleichungen für den adiabaten Wabenrohrreaktor

Instabilitäten chemischer Reaktionen, die als Zünd- und Löschvorgänge gedeutet wurden, waren bisher Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten [3, 6-13]. Im Rahmen dieser Arbeit soll gezeigt werden, daß ausgehend von den Bilanzgleichungen für Stoff- und Energie [2] bei Vorgabe des Geschwindigkeitsprofils im Reaktor diese Instabilitäten modellmäßig beschrieben werden können. Die geometrische Aufteilung des zugrundegelegten Wabenrohrreaktors entspricht dem in [1] vorgestellten Modell und ist Abb. 1 zu entnehmen.

Die instationären Bilanzgleichungen zur Beschreibung der Vorgänge im Wabenrohrreaktor lauten: Die Stoffbilanz für die Gasphase erfährt axiale Konvektion und Diffusion sowie nach [4] den Stoffübergang an die Phasengrenzfläche zwischen Strömungskanal und poröser Katalysatorschicht und lautet in normierter Darstellung<sup>1)</sup>:

$$\frac{\partial \bar{x}_A}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \bar{x}_A}{\partial \xi^2} - Bo \frac{\partial \bar{x}_A}{\partial \xi} - 4 Sh (\bar{x}_A - \bar{x}_{A,R}) \quad (1)$$

Dabei gelten die Anfangs- und Randbedingungen

$$\bar{x}_A(\xi = -\infty, Fo) = \bar{x}_{A,e}, \quad \bar{x}_A(\xi, Fo = 0) = 0 \quad (2), (3)$$

und

$$\left. \frac{\partial \bar{x}_A}{\partial \xi} \right|_{\xi = +\infty, Fo} = 0 \quad (4)$$

Die thermische Energiebilanz für die Gasphase hat in normierter Darstellung die Form:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial Fo} = - \frac{Bo}{Le_G} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \xi} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \xi^2} + 4 Nu (\theta_R - \bar{\theta}) \quad (5)$$

\* Prof. Dr.-Ing. R. Heinisch, Prof. Dr.-Ing. E. Schütt und Dr.-Ing. A. Rogowski, Technische Universität Berlin, Institut für Thermodynamik und Reaktionstechnik, Fasanenstr. 89, 10623 Berlin.

1) Eine Zusammenstellung der Formelzeichen befindet sich am Schluß des Beitrags.