

*Entwicklung eines Lichtleiterverfahrens
zur Charakterisierung von
Mehrphasenströmungen*

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

vom Fachbereich Bio- und Chemieingenieurwesen der Universität Dortmund

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Frank Landwehr

aus

Gelsenkirchen

Tag der mündlichen Prüfung: **20.12.2004**

1. Gutachter: Prof. Dr. techn. P. Walzel

2. Gutachter: Prof. Dr. techn. G. Schweiger

Dortmund 2005

Schriftenreihe Mechanische Verfahrenstechnik

Band 8

Frank Landwehr

**Entwicklung eines Lichtleiterverfahrens zur
Charakterisierung von Mehrphasenströmungen**

D 290 (Diss. Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2005

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2004

Copyright Shaker Verlag 2005

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4219-8

ISSN 1618-2855

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik der Universität Dortmund. Ermöglicht wurde diese Arbeit durch ein Stipendium der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG im Rahmen des Graduiertenkollegs 358, das die Entwicklung neuer optischer Meßverfahren zum Inhalt hatte.

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Prof. Dr. techn. P. Walzel und Dr. H. Wiggers bedanken, die mich während meiner Arbeit stets unterstützten und mir jegliche Freiheiten gewährten. Mein weiterer Dank gilt Prof. Dr. G. Schweiger, der neben seiner Tätigkeit als Sprecher des Graduiertenkollegs auch immer ein Ansprechpartner für fachliche Probleme war. Desweiteren möchte ich mich bei Prof. Dr. A. Neyer für seine Anregungen und seine Unterstützung bei der Entwicklung des Knickkopplers bedanken.

Von ganzem Herzen Danke ich meiner Frau, die mich in jeder Hinsicht unterstützt hat und eine entbehrensreiche Zeit während meiner Promotion auf sich genommen hat.

Vorwort III

Zusammenfassung VII

KAPITEL 1

Einleitung I

1.1. Stand der Technik

KAPITEL 2

Theorie II

2.1. Verfahrensprinzip

2.2. Lichtwellenleiter, Faseroptik

2.2.1. Singlemode Faser

2.2.2. Multimode Gradientenindex Fasern

2.2.3. Multimode Stufenindex Fasern

2.3.1. Lichteinkoppelung bei Einzelsensoren, der Standard Faserkoppler

2.3.2. Lichteinkoppler für Sensorarrays, der Knickkoppler

2.4. Anordnung der Sensoren in einem Array

2.5. Entzerrung des hydrophobierten Sensors

2.6. Signalauswertung

2.6.1. Signalaufnahme und Übertragung

2.6.2. Signalbearbeitung

2.6.3. Fourier - Wavelet Transformationen

2.6.4. Fourier - Transformation

2.6.5. Wavelet - Transformation

2.6.6. Vergleich von Fourier und Wavelet - Analysis

2.7. Natürliche Oberflächenschwingungen und Frequenzen fluider Systeme

2.7.1. Oberflächenschwingungen und Frequenzen von Fluidstrahlen

2.7.2. Natürliche Tropfenfrequenzen viskoser Flüssigkeiten

KAPITEL 3

Versuchsaufbau 51

3.1. Optischer Aufbau

3.1.1. Aufbau der Sensorköpfe von Einzelsensoren

3.1.2. Aufbau eines Faserarray Sensorkopfs

3.2. Experimenteller Aufbau zur Erzeugung von Tropfen

3.2.1. Tropfenerzeugung und Validierung

3.2.2. Strahlerzeugung und Messung

KAPITEL 4

Messergebnisse 61

4. Einzel - Sensor Messungen

4.1. Messung des lokalen Brechungsindex

4.2. Messung der Oberflächenfrequenzen von Fluidelementen

4.3. Parameterstudie zum Filamentaufprall auf Faser - Sensoren

4.4. Messungen in Tropfenströmungen

4.4.1. Tropfen- und Filamentdetektion

4.4.2. Bestimmung von Tropfendurchmessern

4.4.3. Grenzen der Tropfengrößenmessung

4.5. Messungen des Sensor Arrays

4.5.1. Messung der Phasenverteilung mit einem Sensor - Array

4.5.2. Geschwindigkeitsmessung in Mehrphasenströmungen

KAPITEL 5

Anhang 93

I. Rauschfilter 93

A. Fingerprint Algorithmus

B. Waveletrekonstruktion und Wavelet - Multiskalenanalyse

II. Messungen mit dem Sensor Array 106

1. Einstoff Düse

2. Elliptische Kapillare

3. Runde Kapillare

4. rotierende Kapillare

Literaturverzeichnis 111

Lebenslauf

Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war die Entwicklung eines Meßsystems zur Charakterisierung von Mehrphasenströmungen durch die optische Detektion der Phasenverteilung. Das Einsatzgebiet dieses Meßsystems sind Mehrphasenströmungen mit hoher Flüssigkeitsbeladung, wie sie z.B. im Nahbereich von Düsenmündungen oder in Blasensäulen auftreten. Im Vergleich zu existierenden Systemen sollte die Flüssigkeitsbeladung im Meßvolumen keinen Einfluß auf das Meßergebnis haben. Dies wurde erreicht durch Entwicklung eines optischen Sensors, der als invasives Meßsystem direkt in die Strömung eingebracht wird. In der ersten Phase wurde ein Einzel-Sensor entwickelt, aufgebaut und experimentell untersucht. Die hieraus gewonnenen Informationen, z.B. zur Einstellung geeigneter Benetzungseigenschaften, dienten in der zweiten Phase als Basis für den Aufbau eines Sensor-Arrays, mit dem eine Mehrphasenströmung zwei-dimensional visualisiert und vermessen werden kann.

Grundlage des optischen Meßsystems ist, daß die aus einer Faser ausgekoppelte Lichtmenge außer von geometrischen Einflußgrößen vom Brechungsindexverhältniss der Faser zur benetzenden Phase abhängt. Das neu entwickelte Verfahren nutzt diese Abhängigkeit des Auskoppelungswirkungsgrades zur Detektion der an der Sensorspitze anliegenden fluiden Phase aus. Das Meßvolumen eines einzelnen Sensors ist somit auf die benetzte Grenzfläche zwischen Sensorspitze und Fluidelement begrenzt. Beim Aufprall eines Fluidelements auf den Sensor vergrößert sich, sofern der Brechungsindex des Elements größer ist als derjenige der Umgebung, der Auskoppelungswirkungsgrad, und die von der Sensorspitze zurück in die Faser reflektierte Lichtmenge nimmt ab. Die Intensitätsabnahme ist mit einer Photodiode oder einer CCD-Zeilenkamera detektierbar. Nach Kalibrierung des Sensors mit zwei exakt definierten Standards kann der Brechungsindex des an der Sensorspitze anliegenden Fluids aus der Signalintensität bestimmt werden. Sphärische Fluidelemente zeigen Eigenschaften, wie sie von optischen Resonatoren wie z.B. kugelförmigen Linsen bekannt sind. Während der Kontaktzeit von Sensor und sphärischen Fluidelementen steigt die gemessene Signalstärke exponentiell an und zeigt eine deutliche Intensitätsmodulation. Durch Auswertung der Tropfensignale konnte gezeigt werden, dass die gemessenen Modulationsfrequenzen mit den Oberflächenschwingungen der Tropfen identisch sind. Durch Simulation von Tropfenschwingungen und Berechnung der zugehörigen Frequenzspektren ist es möglich, die Tropfengröße und die Relativgeschwindigkeit zum Fasersensor zu berechnen.

Für die Auswertung der Frequenzspektren ist es notwendig, die aufgenommen Rohdaten mit Hilfe eines mathematischen Filters zu entrauschen. Hierzu wurde ein auf der Wavelet-Transformation basierender Entrauschalgorithmus verwendet. Der Waveletfilter benutzt die Multiskalen-Wavelet-Transformation zur Detektion und Eliminierung von weißem Rauschen im Gesamtsignal.

Das entwickelte Sensor Array ermöglicht die Messung der Phasen- und Konzentrationsverteilung einer Substanz in einem zweidimensionalen Schnitt durch die Mehrphasenströmung. Begrenzt wird dieses Meßverfahren lediglich durch die räumlich begrenzte Auflösung von z.Z. 0,6 mm und der maximalen Abtastrate von 120 kHz bei 500 Sensoren.