



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Berichte des Fachgebiets für Strömungsmechanik
Uwe Janoske (Hrsg.)

Michael Elfering

AN ACOUSTIC TRANSMISSION
TOMOGRAPHY FOR MEASURING
GAS HOLDUP IN MULTIPHASE
FLOWS





**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

AN
ACOUSTIC TRANSMISSION TOMOGRAPHY
FOR MEASURING GAS HOLDUP
IN MULTIPHASE FLOWS

Dissertation
to obtain a doctoral degree
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

in the
School of Mechanical Engineering and Safety Engineering
University of Wuppertal

Submitted on May 23, 2023 by:
Michael Elfering
from Coesfeld, Germany

1st Reviewer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske

2nd Reviewer: Prof. Dr. rer. nat. habil. Michael Schreiner

3rd Reviewer: Prof. Dr.-Ing. Hans-Arno Jantzen

Date of examination: November 15, 2023

Berichte des Fachgebiets für Strömungsmechanik

Michael Elfering

**An Acoustic Transmission Tomography for
Measuring Gas Holdup in Multiphase Flows**

Shaker Verlag
Düren 2023

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9330-8

ISSN 2195-4100

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

Multiphase flows with gas holdup are found in numerous process engineering applications. A targeted flow and process optimization of the plant technology requires a profound understanding of the process. A vital characteristic of these processes is the spatially resolved gas holdup, which describes the local ratio of the bubble volume to the total volume under consideration.

Determining the gas holdup is the subject of current research due to its relevance for the process understanding in process engineering. Besides the enhanced understanding of the process, the determined gas holdup distribution can be utilized as a basis for optimizing the plant technology or monitoring the process during operation. However, due to the limitations of existing methods, a detailed measurement of entire plants can only be realized to a limited extent in practice.

The concept of gas holdup estimation via acoustic transmission tomography (GATT) described in the patent from Elfering et al. [1] offers an alternative, non-invasive approach to the existing measurement techniques. The concept utilizes the dependence of the speed of sound on the gas holdup (*isothermal Wood correlation*).

In this thesis, a novel acoustic method for tomographic determination of gas holdup distribution, based on this concept, is developed, investigated, and discussed. For this method, a new relaxed nonlinear tomographic reconstruction with a conversion of the reconstructed sound slowness field into a gas holdup distribution is developed and presented.

First, the system is investigated theoretically concerning its sensitivity and possible influencing parameters. High sensitivity, and thus potentially good applicability of the system, is shown at gas holdup between 10^{-5} and 30%. This corresponds to the range usually encountered in technical processes with bubbly flows, such as fermenters, bubble columns, or aerated stirred reactors. Pressure and temperature are shown to be relevant influencing variables, which should be addressed in the reconstruction.

The presented tomographic reconstruction is tested and validated in numerical investigations under precisely defined boundary conditions. The times-of-flight are simulated using the fast marching method (FMM). Targeted optimization of the reconstruction parameters is performed by comparison with a theoretical ideal using an objective evaluation scheme. The reconstruction results of the simulated practice-oriented aeration conditions are substantially similar to the theoretical ideal.

Finally, the proposed method is investigated experimentally in the laboratory. A laboratory test rig is set up, including a test vessel with 3m^3 capacity and

controlled aeration at the bottom of the vessel. First, the proof-of-concept is tested in the gas-free vessel to discuss the practical sensitivity. The maximum reconstruction error of the gas holdup was found to be less than 0.001 % in the gas-free state. A computer-controlled optical comparison measurement system is developed and implemented to evaluate the GATT's reconstruction results in the aerated vessel. Measurements with gas content up to 10^{-3} are performed with the GATT and the optical comparison measurement system, and their results are compared against each other. The results of both systems show a high degree of agreement.

The proposed method provides a promising approach, which is already capable of reconstructing spatially resolved gas holdup distributions with sufficient accuracy. This results in a broad potential field of application for this method in research and development as well as process monitoring in the fields of process engineering.

Kurzfassung

In zahlreichen verfahrenstechnischen Prozessen kommen Mehrphasenströmungen mit Gasgehalt zum Einsatz. Eine gezielte strömungs- und verfahrenstechnische Optimierung der Anlagentechnik erfordert ein tiefgreifendes Prozessverständnis. Eine zentrale Charakteristik dieser Prozesse stellt dabei der orts aufgelöste volumetrische Gasgehalt (*gas holdup*) dar, welcher das lokale Verhältnis des Blasen volumens zum jeweils betrachteten Gesamtvolumen beschreibt.

Die Bestimmung des Gasgehaltes ist aufgrund seiner besonderen Relevanz für das verfahrenstechnische Prozessverständnis Gegenstand aktueller Forschung. Parallel zur Vertiefung des Prozessverständnisses kann auf Basis der ermittelten Gasgehaltsverteilung eine Optimierung der Anlagentechnik sowie die Prozessüberwachung im laufenden Betrieb realisiert werden. Eine detaillierte messtechnische Erfassung ganzer Anlagen ist jedoch bisher aufgrund der Einschränkung heutiger Methoden in der Praxis nur eingeschränkt realisierbar.

Das im Patent von Elfering et al. [1] beschriebene Konzept der akustisch tomographischen Rekonstruktion der Gasgehaltsverteilung bietet hier einen alternativen, nicht-invasiven Ansatz zur bestehenden Messtechnik. Das Konzept nutzt die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit vom Gasgehalt (*isotherme Wood Korrelation*).

Im Rahmen dieser Arbeit wird, aufbauend auf diesem Konzept, eine neuartige akustische Methode zur tomographischen Bestimmung der Gasgehaltsverteilung entwickelt, untersucht und diskutiert. Für diese Methode (GATT) wird eine neue relaxierte nichtlineare tomographische Rekonstruktion mit Überführung des rekonstruierten Schalllangsamkeitsfeld in eine Gasgehaltsverteilung entwickelt und vorgestellt.

Zunächst wird das System theoretisch auf seine Empfindlichkeit und auf mögliche Einflussparameter untersucht. Es zeigt sich eine hohe Empfindlichkeit und damit eine potenziell gute Anwendbarkeit des Systems bei Gasgehalten zwischen 10^{-5} und 30%. Dies entspricht dem Bereich, der üblicherweise bei technischen Prozessen mit Blasenströmungen, wie zum Beispiel Fermentern, Blasensäulen oder begasten Rührkesselreaktoren, auftritt. Druck und Temperatur zeigen sich als relevante Einflussgrößen, welche bei der Rekonstruktion berücksichtigt werden sollten.

Die vorgestellte tomographische Rekonstruktion wird in numerischen Untersuchungen unter präzise definierten Randbedingungen erprobt und validiert. Die Laufzeiten werden hierzu mittels der *Fast Marching Method* (FMM) simuliert. Eine zielgerichtete Optimierung der Rekonstruktionsparameter erfolgt vergleichend zum einem theoretischen Ideal anhand eines objektiven Bewertungsschema. Die

Rekonstruktionsergebnisse der simulierten praxisnahen Begasungszustände weisen hohe Ähnlichkeit mit dem theoretischen Ideal auf.

Abschließend wird die vorgestellte Methode experimentell im Labor untersucht. Es wird ein Laborprüfstand mit einem 3 m^3 fassenden Versuchsbehälter mit kontrollierter Begasung am Behälterboden aufgebaut. Um die praktische Empfindlichkeit zu erörtern, wird das *Proof-of-Concept* zunächst im unbegasteten Behälter erprobt. Es zeigte sich, dass der maximale Rekonstruktionsfehler des Gasgehaltes in diesem gasfreien Zustand weniger als $0,001\%$ beträgt. Zur Bewertung der Rekonstruktionsergebnisse der GATT im quasistationär begasteten Behälter wird ein computergesteuertes optisches Vergleichsmesssystem entwickelt und eingesetzt. Messungen mit einem Gasgehalt bis 10^{-3} werden mit der GATT und dem optischen Vergleichsmessungssystem durchgeführt und verglichen. Die Ergebnisse beider Systeme weisen eine hohe Übereinstimmung auf.

Die vorgestellte Methode ergibt ein vielversprechendes System, welches bereits im jetzigen Stadium in der Lage ist räumlich aufgelöste Gasgehaltsverteilungen mit adäquater Genauigkeit zu rekonstruieren. Es resultiert ein breites potentielles Einsatzgebiet für diese Methode in der Forschung und Entwicklung sowie der Prozessüberwachung in der Verfahrenstechnik.

Preface

At this point, I would like to express my great gratitude to everyone who supported me during the completion of my dissertation.

This thesis was written during my time as a research assistant in the Laboratory of Fluid Mechanics and Simulation at the Münster University of Applied Sciences. It was carried out in cooperative collaboration with the Chair of Fluid Mechanics at the University of Wuppertal. The German Federal Ministry of Education and Research financially supported the work within the research project *TomoGaSe* (16ES0984).

First and foremost, my special thanks go to Professor Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske for supervising the research and for all the productive scientific discussions during the past years. I could always rely on his quick and profound advice.

I would also like to express my special thanks to Professor Dr.-Ing. Hans-Arno Jantzen, on whose professional support I could always rely. I deeply appreciate the freedom I have been granted to elaborate on the subject matter, accompanied by the immense trust that comes with it.

I would like to thank Professor Dr. rer. nat. habil. Michael Schreiner, Professor Dr.-Ing. Axel Schumacher and Professor Dr.-Ing. Fabian Brännström for the interest in my work and for serving on the doctoral committee.

I want to express my gratitude to the (former) employees of the Laboratory of Fluid Mechanics and Simulation at the Münster University of Applied Sciences Dr.-Ing. Sven Annas, Holger Czajka, Jonas Herfurtner, Lasse Kreuzeberg, Torsten Krohner, Marion Leverink, Kai Magel, Henrike Menzel, Georg Messing, Herbert Paschert, Eugen Schmunk and Lukas Weber who were always available for valuable discussions and help. I would also like to thank the student assistants of the laboratory for their practical support in setting up the test rig and assistance in carrying out experiments.

I want to thank my parents for making it possible for me to study and always supporting me when needed. Last but not least, I want to express my sincere gratitude to Isabelle for all her love and patience, especially during the past months when I dedicated extensive time to completing this thesis.

Contents

Abstract	III
Acknowledgments	VII
1 Introduction	1
1.1 Motivation	2
1.2 State of the art	3
1.2.1 Electrical methods	3
1.2.2 Optical methods	5
1.2.3 Methods using ionizing radiation	5
1.2.4 Mechanical methods	5
1.2.5 Ultrasonic tomographic methods	5
1.3 About this work	6
2 Background	7
2.1 Sound propagation	7
2.1.1 Single-phase fluids	7
2.1.2 Multi-phase fluids	9
2.1.2.1 Frequency-dependent sound propagation	9
2.1.2.2 Sound propagation of low frequencies	12
2.1.3 Eikonal equation	14
2.1.4 Acoustic rays	15
2.1.5 Fermat's principle	16
2.1.6 Fast marching method	16
2.2 Time-of-flight tomography	17
2.2.1 Principle of operation	17
2.2.2 Tomographic reconstruction	18
2.2.3 Time-of-flight estimation	20
2.2.3.1 Sound propagation in reverberant environments	21
2.2.3.2 Deconvolution of the room impulse response	22
2.2.3.3 Signal design	23
3 Proposed Method	25
3.1 Overview of the procedure	25
3.2 Data acquisition and preconditioning	27
3.3 Time-of-flight estimation	28
3.4 Tomographic reconstruction	29
3.4.1 Linear tomographic reconstruction	29

3.4.2	Non-linear tomographic reconstruction	30
3.5	Gas holdup estimation	32
4	Theoretical and Numerical Studies	35
4.1	Theoretical studies	35
4.1.1	Factors of influence	35
4.1.1.1	Ambient conditions	35
4.1.1.2	Surface tension and bubble size	36
4.1.1.3	Influence of other phase fractions	38
4.1.2	Sensitivity analysis and error propagation	39
4.2	Numerical studies	41
4.2.1	System arrangement	41
4.2.2	Time-of-flight simulation	41
4.2.3	Evaluation scheme	43
4.2.4	Optimization of SART parameters	44
4.2.5	Consideration of curved paths	46
4.2.6	Interfering fixtures	50
4.2.7	Reconstruction of small features	53
5	Experimental Studies	55
5.1	Laboratory test setup	56
5.1.1	Aeration	56
5.1.2	Measuring equipment	57
5.2	Optical measuring system for comparison	59
5.2.1	Gas holdup estimation	59
5.2.2	Stopping criteria	60
5.2.3	Practical setup	61
5.2.4	Extraction velocity	62
5.2.5	Validation	64
5.3	Reconstruction parameters	65
5.3.1	Time-of-flight estimation	65
5.3.2	Tomographic reconstruction	66
5.4	Experimental reconstruction results	67
5.4.1	Measurement without gas holdup	67
5.4.2	Measurements with gas holdup	67
5.4.3	Reproducibility	73
6	Discussion	75
6.1	Theoretical findings	75
6.2	Numerical findings	76
6.3	Experimental findings	77
6.4	Limitations of research	79
6.5	Practical implementation and future research	80

7 Conclusions and Outlook	81
7.1 Conclusions	81
7.2 Outlook	84
Nomenclature	85
Acronyms	86
List of symbols	87
Literature	95
Supervised Theses	107
List of Figures	109
A Additional Measurement Results	115
A.1 Experimental investigation with interfering fixtures	115
A.2 Reconstruction results without path correction	116
Curriculum Vitae	121