

Fabian Guse

***Analysis of the Influence of Bubbly Liquids
on the Dynamics of Fluid Power Systems***

Analysis of the Influence of Bubbly Liquids on the Dynamics of Fluid Power Systems

Einflussanalyse blasenhaltiger Flüssigkeiten auf die Dynamik hydraulischer Systeme

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen
Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Fabian Guse

Berichter/in: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Katharina Schmitz
Univ.-Prof. DI Dr. Rudolf Scheidl

Tag der mündlichen Prüfung: 13.05.2022

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Reihe Fluidtechnik

D / Band 112

Fabian Guse

**Analysis of the Influence of Bubbly Liquids
on the Dynamics of Fluid Power Systems**

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

Copyright Shaker Verlag 2022

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 978-3-8440-8653-9

ISSN 1437-8434

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

The great tragedy of science –
the slaying of a beautiful hy-
pothesis by an ugly fact.

(Thomas Henry Huxley)

Vorwort und Danksagung

Wie sehr hat sich dieses Zitat immer wieder bewahrheitet und ich musste akzeptieren: Forschung bedeutet *“zwei Schritte vorwärts, einen Schritt zurück”*. Bloß gut, dass diesem rückwärtigen Schritt immer wieder zwei vorwärts gerichtete folgen.

Diese Arbeit entstand während meiner fünfjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für fluidtechnische Antriebe und Systeme (ifas) der RWTH Aachen. Mein besonderer Dank für die Unterstützung und Betreuung gilt meiner Doktor Mutter Frau Professor Katharina Schmitz. Zudem danke ich ganz herzlich Herrn Professor Rudolf Scheidl für die sorgfältige Durchsicht der vorliegenden Arbeit sowie die Übernahme des Koreferats. Auch Herrn Professor Bergs möchte ich an dieser Stelle für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danken.

Dabei entstand die vorliegende Arbeit im Zeitraum zwischen 2018 und 2021 im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projektes *“Entwicklung und Implementierung eines Rechenverfahrens zur Berücksichtigung der Blasendynamik des im Fluid enthaltenen ungelösten Gases bei der simulativen Druckschwingungsanalyse von Niederdruckhydraulikleitungssystemen”* in Kooperation mit der Firma FLUIDON GmbH. Für die interessanten Diskussionen und fruchtbaren Treffen möchte ich insbesondere den Herren Dr.-Ing. Enrico Pasquini, Dr.-Ing. Benedikt Müller sowie Dr.-Ing. Heiko Baum von der Firma FLUIDON danken, die mich im Rahmen des Projektes mit ihrem außerordentlichen Fachwissen unterstützt haben.

Für die Übernahme des Lektorats der vorliegenden Arbeit danke ich Frau Dr. Cornelia Wallisfurth sowie Herrn Dr.-Ing. Enrico Pasquini.

Meine Zeit am ifas war geprägt von kollegialem, wissenschaftlichen Austausch und einer herzlichen zwischenmenschlichen Interaktion, die ich hoffe auch in Zukunft nicht missen zu müssen. Dafür möchte ich mich bei allen wissenschaftlichen Mitarbeitern, allen Festangestellten und allen Studierenden bedanken. Ihr macht das ifas zu dem, was es ist: Ein Ort, an dem man gerne forscht. Stellvertretend danke ich insbesondere meinen Studenten Lukas und Arne, die des Öfteren zusammen mit mir die *“Extrameile”* gelaufen sind.

Danken möchte ich auch meinen Eltern für ihre Unterstützung mit Rat und Tat: Denn letzten Endes bin ich das Ergebnis eurer Erziehung. Auch Dir, liebe Naphi, danke ich für die grenzenlose Unterstützung und Dein Verständnis in dieser nicht immer einfachen Zeit.

Aachen, im Mai 2022

Fabian Guse

Abstract

Hydraulic systems and components are subject to increasing demands with respect to power density, versatility and durability. One key aspect is to reduce the risk of resonance, which has an adverse effect on the controllability and durability of the system. In order to assess the system behavior during the design process, simulation has become an indispensable tool. However, accurate modelling and simulation of fluid power systems requires a good knowledge of the fluid's properties and especially its compliance.

If undissolved air is present in the form of bubbles, dynamic effects may need to be considered during the analysis in addition to the well-known (quasi-)static effects. In this work, the compressibility for a fluid containing gas bubbles is derived using the Rayleigh-Plesset equation, which describes the bubble dynamics. The results suggest that dynamic effects can be taken into account by introducing a complex-valued bulk modulus, which implies that a pressure change and an associated change in the mixture's density do not necessarily have to occur simultaneously. Utilizing the complex-valued bulk modulus in frequency domain, it is shown that each bubble within the two-phase mixture can be modelled as a mass-spring-damper system – implying that every bubble possesses a natural frequency and an individual damping characteristics. Using the transmission line theory, the effect of the mixture dynamics on a pipe is demonstrated, emphasizing the need to improve current computational methods. With the help of the subsequently developed solution in the time domain, these effects can be implemented in modern simulation tools. A numerical realization of the model into a commercial simulation software utilizing the method of characteristics is also presented.

Finally, an experimental setup is presented which allows the demonstration of two different phenomena associated with bubble dynamics: A reduction of the speed of sound and an increase of pressure wave attenuation. The test setup allows both impulse and harmonic (sinusoidal) excitation. Bubbles are generated using a capillary principle and a parallel water flow. It is shown that a lognormal distribution accurately approximates real bubble distributions. By comparing the frequency response functions of a two-phase fluid and a single-phase fluid, cancellation effects are confirmed, proving the dynamic influence of bubbles in a liquid.

Kurzfassung

An hydraulische Systeme und Komponenten werden immer höhere Anforderungen in Bezug auf Leistungsdichte, Flexibilität und Lebensdauer gestellt. Hinsichtlich des Betriebs gilt es dabei vor allem, die Gefahr von Resonanz zu reduzieren. Dabei können Druckschwingungen, die sich in fluidtechnischen Rohrleitungssystemen ausbreiten, zu Systemresonanz führen, was sich wiederum negativ auf die Steuerbarkeit und die Lebensdauer des Systems auswirkt. Um das Systemverhalten bereits während des Auslegungsprozesses beurteilen zu können, hat sich die Simulation als unverzichtbares Werkzeug etabliert. Eine akkurate Modellierung und Simulation von fluidtechnischen Systemen erfordert jedoch gute Kenntnisse über die Eigenschaften des Fluides und insbesondere ihrer Nachgiebigkeit oder Kompressibilität.

Wenn ungelöste Luft in Form von Blasen vorhanden ist, müssen unter bestimmten Bedingungen neben den bekannten (quasi-)statischen Effekten auch dynamische Effekte bei der Analyse berücksichtigt werden. In dieser Arbeit wird ein Modell für die Kompressibilität einer mit Gasblasen beladenen Flüssigkeit unter Verwendung der Rayleigh-Plesset-Gleichung aufgestellt, welche die Blasendynamik beschreibt. Dabei zeigt sich, dass dynamische Effekte durch die Einführung eines mathematisch komplexwertigen Kompressionsmoduls berücksichtigt werden können. Dies impliziert, dass eine Druckänderung und eine damit einhergehende Änderung der Dichte des Gemisches nicht notwendigerweise simultan erfolgen müssen. Unter Verwendung des hergeleiteten Kompressionsmoduls im Frequenzbereich wird gezeigt, dass jede Blase im zweiphasigen Gemisch als Masse-Feder-Dämpfer-System modelliert werden kann, sodass jede Blase eine Eigenfrequenz und Dämpfungseigenschaften besitzt. Mit Hilfe der Vierpoltheorie wird die Auswirkung der Gemischdynamik auf ein Rohr gezeigt, wodurch die Notwendigkeit einer Verbesserung der derzeitigen Berechnungsmethoden demonstriert wird. Auf Basis der anschließend entwickelten Lösung im Zeitbereich können diese Effekte in moderne Simulationstools implementiert werden. Eine numerische Umsetzung des Modells wird zudem durch Implementierung in das Charakteristikenverfahren vorgestellt.

Abschließend wird ein Versuchsaufbau präsentiert, der eine Validierung blasendynamischer Effekte auf Basis von zwei hierfür charakteristischen Phänomenen ermöglichen soll: Die Änderung der Schallgeschwindigkeit sowie der Dämpfung. Der Versuchsaufbau basiert auf einer Impulsanregung und einer harmonischen (sinusförmigen) Anregung. Die Blasen werden mit Hilfe eines Kapillarprinzips und einer parallelen Wasserströmung erzeugt. Es wird gezeigt, dass reale Blasenverteilungen durch eine logarithmische Normalverteilung akkurat wiedergegeben werden. Durch den Vergleich der Frequenzgänge eines zweiphasigen und eines einphasigen Fluids werden Auslöschungseffekte bestätigt, wodurch der dynamische Einfluss von Blasen in einer Flüssigkeit bewiesen wird.

Table of Contents

Nomenclature	iii
Abbreviations	ix
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Scope and Structure of this Work	2
2 Fundamentals of Resonance and Fluid Properties	5
2.1 Resonance in Liquid-Filled Piping Systems	6
2.2 Quasi-Static Sonic Speed	9
2.3 Dynamic Models for Two-Phase Mixtures	14
3 Bubble Properties and Distribution	17
3.1 Introduction to Bubble Dynamics	17
3.2 Rayleigh-Plesset Equation	19
3.3 Computational Fluid Dynamics (CFD) and Static Cavitation Models	23
3.4 Linearized Rayleigh-Plesset Equation	26
3.5 Bubble Size Distribution	33
4 Frequency-Domain Solution	39
4.1 Complex-Valued Bulk Modulus Including Bubble Dynamics	40
4.2 Mixture Properties due to Fluid-Bubble Interaction	45
4.3 Assessment of System Resonance Effects Using Transmission Line Theory	60
5 Time-Domain Solution	69
5.1 Derivation of a Time-Domain Solution	70
5.2 Method of Characteristics	76
5.3 Assessment of Time-Domain Solution	82
6 Experimental Setup and Validation	91
6.1 Review of Experimental Approaches	92
6.2 Experimental Setup	95

6.3	Impulse Investigations	101
6.4	Harmonic Investigations	105
6.4.1	Speed of Sound	105
6.4.2	Cancellation Effects	112
7	Conclusion and Outlook	117
7.1	Conclusion	117
7.2	Outlook	119
	Bibliography	121
A	Appendix: Similitude Theory	133
B	Appendix: DSHplus Simulation Model	135
C	Curriculum Vitae	137