
Experimentelle Untersuchung und Modellierung der Ausgasung in Drosselströmungen

Hans-Arndt Freudigmann

Band 15



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz

Experimentelle Untersuchung und Modellierung der Ausgasung in Drosselströmungen

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigte

D I S S E R T A T I O N

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Hans-Arndt Freudigmann

aus Tübingen

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Romuald Skoda
Tag der Einreichung:	04.07.2017
Tag der mündlichen Prüfung:	01.11.2017

Darmstadt 2018

D 17

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 15

Hans-Arndt Freudigmann

**Experimentelle Untersuchung und Modellierung
der Ausgasung in Drosselströmungen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5747-8

ISSN 2194-9565

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Gas kann gelöst oder als freies Gas in Hydrauliksystemen vorliegen. Kommt es zur Bildung von freiem Gas, steigt die Nachgiebigkeit des Mediums so stark, dass die Schallgeschwindigkeit unter der des reinen Gases bleibt. Die niedrige Schallgeschwindigkeit und – davon unabhängig – die dämpfende Wirkung von Gasblasen in der tropfbaren Flüssigkeit erleben wir im Geräusch brechender Wellen und beim Anstoßen von Sekt gefüllten Gläsern.

Die Steifigkeit hydrostatischer Getriebe sinkt durch freie Gase dramatisch: unzureichend entlüftete Bremsen funktionieren nicht. Darüber hinaus beschleunigt freies Gas die Ölalterung: gasgefüllte Mikroblasen, sogenannte Keime, sind mit Luft und immer auch mit gasförmigem Kohlenwasserstoff gefüllt. Wird der Keim infolge sinkenden Umgebungsdrucks über die Blackesche Schwelle hinaus aufgezogen, wächst er instabil. Erst dieses instabile Wachsen mit dem anschließenden zwangsläufigen Kollaps darf streng genommen Kavitation genannt werden. Beim Kollaps kommt es zum Entzünden des Brenngemischs und zur Rußbildung.

Neuste Untersuchungen von Peters und Honza¹ an der Ruhr-Universität Bochum sowie von Groß und Pelz^{2,3} an der Technischen Universität Darmstadt führen zu einem neuen Verständnis von Kavitation: ohne Keimbildung durch Gasdiffusion kann es nicht zur notwendigen Instabilität kommen. In der Vergangenheit und auch heute noch wird die Rolle der Verdampfung bei Kavitationsvorgängen völlig überschätzt. So arbeiten kommerzielle CFD-Solver mit pseudophysikalischen Kavitationsmodellen, die auf Verdampfungsraten beruhen.

Für Unternehmen wie die Fa. Bosch sind kondensierte Kohlenwasserstoffe in der Form von Hydrauliköl entweder ein „Maschinenelement“ oder, sofern es sich um Kraftstoffe handelt, Fördermedium das letztlich versprüht und verbrannt wird. Viele Produkte von Bosch für die Automobilindustrie und die Investitionsgüterindustrie erfüllen die Funktion, die Strömung von Kohlenwasserstoffen gezielt zu leiten und regeln. Das Verständnis über Ausgasungsvorgänge ist daher für die Fa. Bosch und vergleichbare Industrieunternehmen unerlässlich.

Herr Freudigmann hat seine forschersiche Heimat in der zentralen Forschung der Fa. Bosch, wobei er insbesondere mit meinem ehemaligen Mitarbeiter, Herrn Tim Groß, und mir selbst in regelmäßigem Austausch stand. Herr Groß bearbeitete am Institut ein analoges Forschungsthema über „Diffusionsgetriebene Keimbildung an Porenkeimen in kavitierenden Strömungen“.

¹F. Peters, R. Honza: A benchmark experiment on gas cavitation. *Exp. Fluids* 55:1786, 2014

²P.F. Pelz, T. Keil, T.F. Groß: The transition from sheet to cloud cavitation. *J Fluid Mech*, 817, 439-454, 2017

³T.F. Groß, P.F. Pelz: Bubble nucleation from surface nuclei in cavitating flows. *J Fluid Mech*, 830, 138-164, 2017

II

Damit ergibt sich die interessante Situation, dass sich zwei Forschungsarbeiten im Wettbewerb und Austausch befinden. Da der Zugang zum gleichen Gegenstand unterschiedlich gewählt ist, ergeben sich interessante Synergien.

Herr Freudigmann stellt sich die Frage nach der Ausgasung in einer generischen Drosselströmung. Hierfür verwendet er eine Drosselgestalt, die in der zentralen Forschung der Fa. Bosch bereits eine längere Tradition hat. Er stellt sich die Frage nach den Mechanismen der Luftausgasung in dieser Drosselströmung. Er fragt, wie der Ausgasungsmechanismus modelliert werden kann, um Hydrauliksimulation auf eine physikalisch-axiomatische Basis zu stellen. Hierzu ist zu sagen, dass Ausgasungsvorgänge und Kavitationsvorgänge heute noch mit empirisch basierten Modellen (oben wurden diese Modelle kritisch als pseudophysikalisch tituliert) durchgeführt werden. Simulationen werden dann häufig an bestehenden Komponenten kalibriert. Die Berechnung wird zum Selbstzweck; eine gewünschte a-priori virtuelle Produktauslegung im Sinne der VDI2221 ist bei empirischen Modellen nicht möglich. Herr Freudigmann leistet mit seiner Arbeit einen Beitrag, diesen häufig unbewussten oder verschwiegenen Missstand abzustellen.

In Kapitel 2 der vorliegenden Arbeit wird der Gleichgewichtszustand von gelösten Gasmischungen in Flüssigkeiten behandelt. Hervorzuheben sind hier die umfangreichen Daten über die Löslichkeit. Als Beispiel seien die sehr nützlichen Tabellen 2.1 und 2.2 genannt. Die Grundlagen der Drosselströmungen in Kapitel 2.2 werden benötigt, um mittels inspektioneller Dimensionsanalyse die notwendige Darstellung seiner Versuchsergebnisse vorzubereiten.

Mit großer Sorgfalt führt Herr Freudigmann die schwierigen Mehrphasenströmungsversuche durch. Mit gleicher Sorgfalt kümmert er sich um die Auswertung der optischen Messergebnisse. Die Versuche und Auswertung einschließlich der Kalibration und Analyse der Messunsicherheit beanspruchten den Hauptteil der Forschungstätigkeit von Herrn Freudigmann. Die der Gasdynamik analoge Modellierung ist elegant und baut auf früheren Arbeiten der Boschforschung auf.

Herr Freudigmann zeigt mit seinen Messdaten, dass die Hypothese „Verdampfung und Ausgasung geschehen zeitgleich“ nicht haltbar ist. Damit rückt die zweite Hypothese, dass Diffusion in eine dampfgefüllte Blase der relevante Vorgang ist, in den Mittelpunkt. Die zweite Hypothese führt zu einem Modell, das zumindest in der Größenordnung die Ausgasung beschreibt.

Die vorliegende Monographie ist sehr lesenswert und folgt dem vermeintlichen Galilei Zitat: „Man muss messen, was messbar ist, und messbar machen, was noch nicht messbar ist“.

Darmstadt, am 20.10.2017

Peter Pelz

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Industriepromotion im Zentralbereich Forschung und Voraentwicklung der Robert Bosch GmbH. An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Peter Pelz vom Institut für Fluidsystemtechnik der Technischen Universität Darmstadt für die Betreuung der Arbeit bedanken. Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Romuald Skoda vom Lehrstuhl für Hydraulische Strömungsmaschinen der Ruhr-Universität Bochum für sein Interesse an dieser Arbeit und die freundliche Übernahme des Koreferates.

Herrn Dr. Dr. Uwe Iben bin ich für die stetige fachliche und strategische Unterstützung und Förderung im Verlauf dieser Arbeit sehr verbunden. Meinen Kollegen Dr. Aaron Dörr, Dr. Ronny Leonhard, Nina Bretz, Fabian Wolf, Carina Issinger und allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen in der ARF3 sowie den wissenschaftlichen Mitarbeitern vom Institut für Fluidsystemtechnik, insbesondere Tim Groß und Christian Schänzle, verdanke ich viele hilfreiche Erkenntnisse aus fachlichen Diskussionen. Weiter bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Björn Rocker und bei Herrn Dr. Jörg Ziuber für die Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit. Mein Dank gilt auch den Studenten, die mich im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten unterstützten.

Schließlich danke ich Johanna und meiner Familie für die Geduld und den Rückhalt.

Tübingen, im Sommer 2017
Hans-Arndt Freudigmann

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgasung in Hydrauliksystemsimulationen	3
1.2	Wissenschaftliche Fragestellung und Gliederung	5
2	Grundlagen	7
2.1	Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten	7
2.2	Drosselströmung	10
2.2.1	Durchflussverhalten einer Drossel	12
2.2.2	Kavitation in Drosselströmungen	15
3	Experimentelle Untersuchung der Ausgasung	19
3.1	Konzeption des Prüfstands	19
3.1.1	Vorbetrachtung zum Prüfstandskonzept und Anforderungsprofil	20
3.1.2	Messtechniken zur Blasenerkennung in Zweiphasenströmungen	20
3.1.3	Grundlagen der Schattenwurftechnik und optischer Aufbau . .	22
3.2	Beschreibung des Prüfstands	30
3.2.1	Messstrecke	30
3.2.2	Hydraulikkreislauf	32
3.3	Datenerfassung und Auswertung	33
3.3.1	Druckmessung	33
3.3.2	Gasgehalt der Flüssigkeit vor der Drossel	34
3.3.3	Gasgehalt der Flüssigkeit stromab der Drossel	35
3.4	Auswertung der Schattenaufnahmen der Strömung	36
3.4.1	Korrektur der unschärfebedingten Fehler	37
3.4.2	Blasenerkennung und -charakterisierung	43
3.4.3	Validierung, Unsicherheiten und Grenzen des Algorithmus . . .	48
3.5	Messunsicherheiten	50
3.5.1	Unsicherheit der Eingangsgrößen	51
3.5.2	Unsicherheit der Ergebnisgrößen	53
3.6	Versuchsdurchführung	53
3.6.1	Messung der Massenstromcharakteristik	53
3.6.2	Messung der Ausgasung	54
3.6.3	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	54

4	Ergebnisse und Diskussion der experimentellen Untersuchung	55
4.1	Durchflusscharakteristiken der Drosseln	55
4.2	Qualitative Beschreibung der Ausgasung	58
4.3	Quantitative Beschreibung der Ausgasung	61
4.3.1	Vorbetrachtungen zur Erfassung des ungelösten Gasanteils	61
4.3.2	Einfluss des Vor- und Gegendrucks	64
4.3.3	Einfluss der Drosselabmessungen	66
4.3.4	Rüchlösung von ungelöstem Gas	68
4.3.5	Einfluss des Gasgehalts der Flüssigkeit vor der Drossel	70
4.3.6	Versuche mit n-Dodecan	72
4.3.7	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	72
4.4	Empirische Beschreibung der Ausgasung	74
5	Modellierung der Ausgasung	77
5.1	Hypothesen zur Ausgasung im Zusammenhang mit Dampfkavitation	78
5.2	Beschreibung der Drosselströmung	79
5.2.1	Wandreibungsverluste	80
5.2.2	Thermische und energetische Zustandsgleichungen	82
5.3	Beschreibung der Ausgasung	89
5.3.1	Hypothese 1 – Ausgasung beim Verdampfungsprozess	89
5.3.2	Hypothese 2 – Stofftransport über die Phasengrenzfläche	90
5.4	Ergebnisse und Diskussion	95
5.4.1	Ergebnisse der Drosselmodellierung	95
5.4.2	Ergebnisse der Ausgasungsmodellierung	98
5.4.3	Diskussion	99
	Zusammenfassung	105
A	Galerie	115
A.1	Ausgasung aus mit Luft gesättigten Flüssigkeiten	115
A.2	Empirische Formulierung des Durchflusskoeffizienten	116
A.3	Verwendete Sensoren	118
A.4	Getestete Lichtquellen	118
A.5	Skizzen und Fotos des Strömungskanals	121
A.6	Aufnahmen der Drossel einlaufseiten	122
A.7	Massenstromcharakteristiken	123
A.8	Stoffdaten der verwendeten Flüssigkeiten	124
A.9	Thermodynamische Größen	124
A.10	Dimensionsloses Gleichungssystem für die Drosselströmung	127
A.11	Gemischdichte eines Strahls	127