

Experimentelle Untersuchung von Teilkavitationszuständen in oszillierenden Verdrängerpumpen

Der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Doktorgrades

Dr.-Ing.

vorgelegt von

Karsten Opitz

aus Karlsruhe

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung:	23.07.2015
Vorsitzende des Promotionsorgans:	Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schlücker Prof. Dr.-Ing. Romuald Skoda

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Prozessmaschinen und
Anlagentechnik

Band 27

Karsten Opitz

**Experimentelle Untersuchung von Teilkavitations-
zuständen in oszillierenden Verdrängerpumpen**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3985-6

ISSN 1614-3906

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

*„Ein guter Anfang braucht Begeisterung,
ein gutes Ende Disziplin.“*
Prof. Dr. H.-J. Quadbeck-Seeger

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Professor Dr.-Ing. E. Schlücker möchte ich für die Möglichkeit danken, an seinem Leihstuhl zu promovieren. Die fachlichen Diskussionen und sein großes Interesse haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Vielen Dank für das entgegengebrachte Vertrauen und den gewährten Freiraum zum selbstständigen Arbeiten und Denken.

Bei Herrn Professor Dr.-Ing. R. Skoda bedanke ich mich für die Übernahme des Zweitgutachtens und das Interesse an meiner Arbeit.

Meinen Kollegen und Kolleginnen möchte ich für fünf wunderbare Jahre von ganzem Herzen danken. Diese Zeit war einfach überragend. Neben den spannenden und herausfordernden Industrie- und Forschungsprojekten, die mich fachlich und menschlich weitergebracht haben, war immer Zeit für das Zwischenmenschliche. Vielen Dank für die geschlossenen Freundschaften.

Mein besonderer Dank gilt Alexander Beer, Bao Nguyen und Oliver Weisert für die hervorragend ausgeführten Arbeiten in der Werkstatt, Piotr Reichel, Alexander Reichenberg und Werner Sippl für ihre tatkräftige Unterstützung rund um den Versuchsstand sowie Regina Quispe für das Anfertigen vieler Zeichnungen.

Darüber hinaus haben Michael Rubel, Andreas Kögler, Christoph Bernhagen, Markus Bosser sowie Julian Paulus durch ihre Studien- und Diplomarbeiten zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Julia, die mich immer bestärkt und unterstützt hat, insbesondere in der letzten sehr arbeitsreichen und freizeitraubenden Phase. Meiner Tochter Klara möchte ich für ihr Lächeln danken, das mich stets zum Fertigstellen dieser Arbeit motiviert hat.

Nürnberg, im Juli 2015

Karsten Opitz

Inhalt

Vorwort.....	i
Inhalt.....	iii
Abstract.....	vii
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung	1
1.2 Zielsetzung und Methodik	3
2 Grundlagen der oszillierenden Verdrängerpumpentechnik.....	5
2.1 Bauformen und Komponenten	6
2.1.1 Antriebe	6
2.1.2 Pumpenköpfe	7
2.1.3 Druckgesteuerte Pumpenventile	8
2.2 Betriebsverhalten	10
2.2.1 Wirkprinzip.....	10
2.2.2 Fördercharakteristik.....	11
2.2.3 Förderstrom und volumetrischer Wirkungsgrad	14
2.2.4 Reale Verdrängungskinematik	15
2.2.5 Druck- und Förderstropulsation	16
2.2.6 Pulsationsdämpfer	19
3 Grundlagen der Kavitation.....	21
3.1 Definition.....	21
3.2 Kavitationsarten und -erscheinungsformen	22
3.2.1 Pseudokavitation	22
3.2.2 Gaskavitation.....	23
3.2.3 Dampfkavitation.....	23
3.2.4 Erscheinungsformen.....	24
3.3 Entstehungsmechanismus	25
3.3.1 Kavitationskeime	25
3.3.2 Zugfestigkeit von Flüssigkeiten.....	27
3.3.3 Gleichgewichtsbedingungen	28
3.4 Dynamik der Dampfblasenkavitation	30
3.4.1 Dynamik im freien Fluid	33
3.4.2 Dynamik in Wandnähe.....	39
3.5 Kavitationserosion.....	42
3.5.1 Mechanismus der Kavitationserosion	45
3.5.2 Materialverhalten bei Kavitation	48

3.5.2.1	Kavitationswiderstand	48
3.5.2.2	Materialauswahl anhand des Kavitationswiderstandes	51
4	Kavitation in oszillierenden Verdrängerpumpen	53
4.1	Ursachen für das Auftreten von Kavitation in oszillierenden Verdrängerpumpen ..	53
4.1.1	Strömungskavitation	53
4.1.2	Expansionskavitation	54
4.2	Kavitationszustände	54
4.2.1	Haftkraftinduzierte Kavitation	55
4.2.2	Vorübergehende Kavitation	57
4.2.3	Teilkavitation	57
4.2.4	Vollkavitation	57
4.3	Kavitationsphänomene	57
4.4	Auslegungsrichtlinien	61
4.4.1	API Standard 674 3rd Edition	61
4.4.2	NPSH-Werte als Auslegungsrichtlinie	63
4.4.2.1	Bestimmung des $NPSH_A$ -Wertes	64
4.4.2.2	Bestimmung des $NPSH_R$ -Wertes	65
4.4.3	DIN EN ISO 16330	68
4.4.4	Kavitationsvermeidung bei hydraulischen Membranpumpen	71
4.5	Mathematische Modellierung der Strömung bei Kavitation	72
4.5.1	Mathematische Betrachtung der Strömung bei Kavitation	74
4.5.2	Bisherige Untersuchungen des Modells	78
5	Versuchseinrichtungen und Messtechnik	81
5.1	Versuchsstand Simplex-Plungerpumpe	81
5.1.1	Aufbau	81
5.1.2	Pumpenkopf	82
5.1.3	Messtechnik und Datenerfassung	84
5.2	Optische Messverfahren	85
5.2.1	Hochgeschwindigkeitskameratechnik	85
5.2.2	Particle Image Velocimetry	85
5.2.3	Ventilhubverlauf	88
6	Verifizierung des strömungsmechanischen Kavitationsmodells	91
6.1	Auswertung der Strömungsprofile	91
6.2	Betrachtung der Geschwindigkeitsverläufe bei Teilkavitation	97
6.2.1	Beginnende Teilkavitation	97
6.2.2	Fortgeschrittene Teilkavitation	98
6.2.3	Ausgeprägte Teilkavitation	100
6.3	Verifizierung der Modellparameter	103
6.4	Druckstöße durch Kavitationsrückbildung	107

7	Schädigungs- und Störungspotential von Teilkavitationszuständen	109
7.1	Beginnende Teilkavitation	111
7.1.1	Entstehungsmechanismus.....	111
7.1.2	Entstehungs- und Rückbildungsorte	116
7.1.3	Analyse der Blasenzerfallsdynamik	120
7.1.4	Bewertung	122
7.2	Fortgeschrittene Teilkavitation	123
7.2.1	Entstehungsmechanismus.....	123
7.2.2	Entstehungs- und Rückbildungsorte	123
7.2.3	Analyse der Blasenzerfallsdynamik	127
7.2.4	Bewertung	129
7.3	Ausgeprägte Teilkavitation.....	130
7.3.1	Entstehungsmechanismus.....	130
7.3.2	Entstehungs- und Rückbildungsorte	130
7.3.3	Analyse der Blasenzerfallsdynamik	133
7.3.4	Bewertung	135
7.4	Verschleißuntersuchungen bei Teilkavitation	137
7.5	Einfluss der konstruktiven Pumpenkopfgestaltung auf das Kavitationsverhalten	143
7.5.1	Zuströmung in den Arbeitsraum.....	143
7.5.2	Einfluss des Schadvolumens.....	144
8	Zusammenfassung	149
9	Literaturverzeichnis.....	153
10	Symbolverzeichnis	161
11	Lebenslauf.....	167