

# **Untersuchung des Einflusses hydraulischer und mechanischer Anregungen auf das Betriebsverhalten einer axialen Rohrgehäusepumpe**

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Erlangung des akademischen Grades

**DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)**

genehmigte

**DISSERTATION**

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. (FH) Falk Schäfer**

aus Frankenthal

Tag der mündlichen Prüfung:	12. Dezember 2008
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. S. Ripperger
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. R. Flierl
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. D.-H. Hellmann
	Prof. Dr.-Ing. S. Ripperger

D 386



SAM Forschungsberichte

Band 18

**Falk Schäfer**

**Untersuchung des Einflusses hydraulischer und  
mechanischer Anregungen auf das Betriebsverhalten  
einer axialen Rohrgehäusepumpe**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag  
Aachen 2009

**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.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7933-2

ISSN 1615-6587

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

***„Ein großes Pumpenaggregat  
ist eine Anschaffung fürs Leben.“***

Hans Reising, BASF AG

Kühlwasserversorgung, Werk Ludwigshafen, 2003



## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Strömungsmaschinen und Strömungsmechanik an der Technischen Universität Kaiserslautern.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. D.-H. Hellmann, welcher nicht nur diese Arbeit ermöglicht, sondern mich während meiner gesamten Tätigkeit am Institut stets intensiv unterstützt und begleitet hat. Durch die Bearbeitung zahlreicher Industrieprojekte und fachliche Diskussionen an seinem Lehrstuhl wurde ein wesentlicher Teil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ferner danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Ripperger für die Übernahme des Koreferates und Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Flierl für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ich danke Herrn Dr.-Ing. Falko Schubert (Siemens PG) für seine Erfahrungen und Anregungen zum Thema dieser Arbeit, sowie Herrn Dipl.-Ing. Bernd Kothe (KSB AG) für die konstruktive Zusammenarbeit in zahlreichen Modelluntersuchungen.

Herrn Dr.-Ing. Jürgen Weinerth danke ich für die vertrauensvolle Zusammenarbeit am Lehrstuhl und die Vermittlung der Kenntnisse zur Durchführung von Modellversuchen, sowie Herrn Dr.-Ing. Hartmut Rosenberger für den wertvollen fachlichen Austausch und seine Geduld bei der Beantwortung meiner Fragen.

Allen Kollegen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Strömungsmaschinen und Strömungsmechanik möchte ich meinen Dank für Ihre stete Hilfsbereitschaft aussprechen.

Nicht zuletzt möchte ich meinen lieben Eltern für deren immerwährende Unterstützung herzlich danken.

Frankenthal, im Dezember 2008

Falk Schäfer

---



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.2	Ziel der Arbeit .....	3
<b>2</b>	<b>Rohrgehäusepumpen in Einlaufkammern.....</b>	<b>5</b>
2.1	Axialpumpen .....	5
2.1.1	Grundlagen .....	5
2.1.2	Betriebsverhalten .....	10
2.1.2.1	Allgemein .....	10
2.1.2.2	Kennlinieninstabilität .....	12
2.1.3	Axialschub.....	15
2.1.4	Belastungen durch Verstellhydrauliken.....	20
2.1.5	Belastungen durch die Pumpenperipherie.....	25
2.2	Einlaufkammersysteme .....	26
2.2.1	Gestaltungsrichtlinien .....	26
2.2.2	Stand der Technik von Bauwerksausführungen .....	33
2.3	Physikalische Modellversuche .....	38
2.3.1	Allgemein .....	38
2.3.2	Geometrische und Dynamische Ähnlichkeit .....	40
2.3.3	Kinematische Ähnlichkeit .....	43
2.3.4	Anwendung des Froudeschen Modellgesetzes .....	51
<b>3</b>	<b>Schwingungen an Rohrgehäusepumpen .....</b>	<b>52</b>
3.1	Modellierung eines schwingungsfähigen Systems .....	52
3.2	Mechanische Schwingungen .....	54
3.3	Rotordynamik.....	57
3.4	Schwingungsdiagnose.....	60

3.4.1	Lagergehäuseschwingungen .....	60
3.4.2	Frequenzanalyse .....	61
<b>4</b>	<b>Störungen beim Betrieb von Rohrgehäusepumpen .....</b>	<b>63</b>
4.1	Katalogisierung signifikanter Störeinflüsse .....	63
4.2	Ermittelte Anregungsverteilung .....	67
4.3	Hydraulische Anregungen .....	70
4.3.1	Zuströmverhältnisse .....	70
4.3.2	Einlaufkammer-Design .....	71
4.3.3	Pumpenanordnung .....	71
4.3.4	Anregungen durch die Pumpe .....	72
4.3.5	Anlageneinflüsse .....	74
4.4	Mechanische Anregungen .....	75
4.4.1	Aufstellung der Pumpen .....	75
4.4.2	Anregungen durch die Pumpe .....	75
4.5	Erfahrungen aus der Praxis .....	76
4.5.1	Bestimmung des Betriebspunktes in Anlagen .....	76
4.5.2	Beispiele Physikalischer Modellversuche .....	77
<b>5</b>	<b>Axialpumpenprüfstand .....</b>	<b>89</b>
5.1	Prüfstands Aufbau .....	89
5.2	Messtechnik .....	91
5.2.1	Messung der Prozessgrößen .....	91
5.2.2	Kraftmesswelle .....	92
5.2.2.1	Aufbau .....	92
5.2.2.2	Statische Kalibrierung .....	96
5.2.3	Kardanischer Kraftmessring .....	100
5.2.3.1	Anpassungskonstruktion im Hauptlagerbereich .....	100
5.2.3.2	Festigkeitsnachweis .....	102

5.2.3.3	Statische und Dynamische Kalibrierung .....	105
5.2.4	Schwingungsmesstechnik.....	108
5.2.5	Signalverarbeitung .....	109
5.3	Identifizierung des schwingungsfähigen Systems .....	110
5.3.1	Modalanalyse.....	111
5.3.2	Nachlaufanalyse .....	115
<b>6</b>	<b>Versuche und Ergebnisse.....</b>	<b>119</b>
6.1	Allgemein .....	119
6.2	Nomenklatur der simulierten Anregungen .....	120
6.3	Referenzmessung in einer HI-Standardkammer .....	122
6.3.1	Referenzmessung.....	124
6.3.2	Reproduzierbarkeit.....	134
6.4	Simulation hydraulischer Anregungen .....	137
6.4.1	Gruppe 1 (Unsymmetrie, Drallbehaftete Strömung) .....	137
6.4.2	Gruppe 2 (Wirbelsysteme).....	147
6.4.3	Gruppe 3 (Schaufelteilungsfehler) .....	154
6.4.4	Gruppe 4 (Außermittigkeit über Sumpfeinbauten) .....	165
6.5	Simulation mechanischer Anregungen .....	176
6.5.1	Gruppe 5 (Lagerschäden, Verspannung, Fehlansrichtung).....	176
6.6	Durchgängige und nichtdurchgängige Störungen .....	189
6.6.1	Durchgängige Störungen .....	190
6.6.2	Nichtdurchgängige Störungen .....	191
6.7	Vergleichende Betrachtungen .....	192
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>199</b>
7.1	Zusammenfassung .....	199
7.2	Ausblick .....	201
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>203</b>

8.1	Betreute Studien- und Diplomarbeiten.....	208
<b>9</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>209</b>