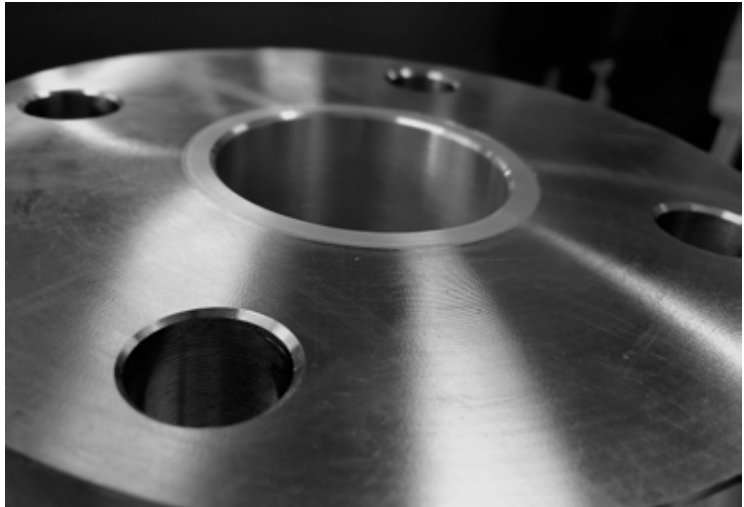


Andreas Kögler

Selbstadaptive Schwingungs- dämpfung und integrierte Monitoringtechnik zur Realisierung flexibler Pumpenmodule



**Selbstadaptive Schwingungsdämpfung und
integrierte Monitoringtechnik zur
Realisierung flexibler Pumpenmodule**

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

zur Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Andreas Kögler

aus Werneck

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

Tag der mündlichen Prüfung: 11.07.2018

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schlücker
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schembecker

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Prozessmaschinen und
Anlagentechnik

Band 36

Andreas Kögler

**Selbstadaptive Schwingungsdämpfung und
integrierte Monitoringtechnik zur Realisierung
flexibler Pumpenmodule**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2018

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 978-3-8440-6132-1

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in der Zeit von 2011 bis 2016 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. An dieser Stelle möchte ich den vielen Personen danken, die zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit einen nicht unerheblichen Teil beigetragen haben.

An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schlücker für die Möglichkeit, die Arbeit an seinem Lehrstuhl durchführen zu können. Die Kombination aus persönlichem Freiraum, Vertrauen und den unzähligen konstruktiven Diskussionen schufen eine sehr produktive und angenehme Atmosphäre, die auch in den schwierigen Zeiten für die nötige Motivation sorgte. Dass man mit seinem Doktorvater abseits fachlicher Themen aber auch mit dem Mountainbike die Alpen überqueren kann, ist sicherlich nicht die Regel! Danke für die schöne Zeit!

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schembecker bedanke ich mich ganz herzlich für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie für sein Interesse an meiner Arbeit, auch im Rahmen des gemeinsamen Forschungsvorhabens ENPRO.

Meinem Gruppenleiter, Herrn Dr.-Ing. Nicolas Alt, möchte ich für die fachliche Betreuung und mentale Unterstützung danken. Sein jederzeit offenes Ohr und die vielen fruchtbaren Diskussionen waren mir ebenso eine große Hilfe, wie sein sachliches und ruhiges Gemüt wenn es einmal "heiß her"ging.

Nur die - oftmals kurzfristige und unkomplizierte - Bereitstellung finanzieller Mittel ermöglichen mir die Fertigstellung dieser Arbeit. Hier möchte ich ganz besonders Herrn Dr.-Ing. Lüder Depmeier danken, der geradezu virtuos die Kapazitäten des Lehrstuhls verwaltete. Gleiches gilt für seine Nachfolgerin, Frau Britta Hoppichler.

Der experimentelle Teil meiner Arbeit am Versuchsstand war nur durch die tatkräftige Unterstützung des technischen Personals des Lehrstuhls realisierbar. Ganz besonders gilt hier mein Dank der Werkstatt unter der Führung von Herrn Oliver Weisert (der jeden Besuch in der Werkstatt zu einem kulinarischen Erlebnis machte und nebenbei Crashkurse im Schweißen, Drehen und Fräsen durchführte) und dem technischen Personal unter Herrn

Piotr Reichel. Euer Beitrag ist gar nicht hoch genug zu würdigen, für mich gehören die Tage „hinten in der Halle“ zu den absoluten Highlights, danke Euch!

Meinen KollegInnen - allen voran natürlich meinen beiden Bürokollegen Michael Dennerlein und Daniel Bassing - danke ich für die allzeit entspannte und angenehme Atmosphäre am Lehrstuhl, die für jede Menge Spaß sorgte, besonders in den stressigen Phasen. Besondere Erwähnung verdient zudem Herr Dr.-Ing. Karsten Opitz, der bereits als Betreuer meiner Studienarbeit meinen Weg an den Lehrstuhl ebnete und schließlich maßgeblichen Anteil an meiner Entscheidung für die Promotion hatte. Schön, dass sich hier echte Freundschaften entwickelt haben!

Durch Ihre Abschlussarbeiten haben zudem Eduard Gebhard, Michael Nielsen, Amrei Evert, Christian Dicke sowie Daniel Haselmann wertvollen Input geliefert und so zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Dafür bedanke ich mich herzlich und wünsche ihnen beruflich und privat alles Gute.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich seit jeher in all meinen Entscheidungen bestärkt hat und mir immer das Gefühl gibt, den richtigen Weg zu gehen. Euer Rückhalt hat mir diese umfangreiche Ausbildung ermöglicht, vielen Dank!
Abschließend danke ich der wohl wichtigsten Person, meiner Verlobten Casandra Munkert. Keiner hat die Hochs und Tiefs der letzten Jahre näher miterlebt und es doch jedes Mal aufs Neue geschafft, mich wieder zu motivieren. Vielen Dank für deine Unterstützung, auf die ich mich jederzeit verlassen konnte. Schön, dass es dich gibt!

Inhaltsverzeichnis

Abstract	vii
1 Einleitung und Zielsetzung der Arbeit	1
2 Konzeption Pumpenmodule	5
2.1 Pulsations- und Schwingungsproblematik - Entwicklung eines universellen Pulsationsdämpferkonzepts	8
2.2 Integriertes Monitoringsystem	9
3 Schwingungsdämpfung in Pumpensystemen	11
3.1 Schwingungsakustische Grundlagen	11
3.1.1 Ausbreitungsformen	12
3.1.2 Eigenschwingungen	15
3.1.2.1 Hydraulische Eigenschwingung	15
3.1.2.2 Mechanische Eigenschwingung	17
3.2 Zustandsgrößen zur Beschreibung von Schwingungsvorgängen	19
3.2.1 Auswertung von Schwingungssignalen im Zeitbereich	19
3.2.2 Schwingungssignale im Frequenzbereich	20
3.2.3 Pegelgrößen	25
3.3 Ursachen und Auswirkungen von Druckpulsationen in Pumpensystemen	27
3.3.1 Pumpen als Schwingungserreger	27
3.3.2 Kavitation	31
3.3.3 Auswirkungen von Druckpulsationen	35
3.3.3.1 Pumpenaggregat	35
3.3.3.2 Rohrleitungssystem	35
3.4 Stand der Technik	36

4 Zustandsüberwachung in Pumpenmodulen	45
4.1 Übersicht und Begriffsdefinition	45
4.2 Stand der Technik	48
5 Versuchseinrichtungen und Messtechnik	53
5.1 Versuchsstände	53
5.1.1 Kreiselpumpen- und Druckstoßversuchsanlage	53
5.1.2 Versuchsanlage Exzenterschneckenpumpe	55
5.2 Messtechnik und Messdatenerfassung	56
5.3 Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Messergebnisse	59
5.3.1 Auswertung zeitgemittelter Größen	60
5.3.2 Frequenzselektive Auswertung	62
6 Experimentelle Untersuchungen	65
6.1 Selbstadaptive Schwingungsdämpfung am Beispiel einer Chemienormpumpe	65
6.1.1 Voruntersuchungen zum Betriebs- und Pulsationsverhalten der Versuchspumpe	65
6.1.1.1 Charakteristische Kennlinien	66
6.1.1.2 Viskositätseinfluss des Fördermediums auf Körperschall und Druckpulsationen	68
6.1.2 Entwicklung eines selbstadaptiven Pulsationsdämpfers nach dem Inline-Prinzip	70
6.1.2.1 Konstruktive Optimierungsschritte - Ansprechverhalten und Dosierbarkeit der Dämpferbeladung	71
6.1.2.2 Grundlegende Charakterisierung des Dämpfungsverhaltens .	80
6.1.2.3 Implementierung eines Mess-, Steuer- und Regelungstechnik-konzepts zur selbstadaptiven Pulsationsdämpfung	111
6.1.3 Transfer auf weitere Pumpensysteme	121
6.2 Konzepte zur Realisierung eines integrierten Monitoringsystems	125
6.2.1 Überwachung der Leistungsaufnahme am Beispiel des Parallelbetriebs	126
6.2.1.1 Voruntersuchungen - Einfluss der Einbauposition	128
6.2.1.2 Parallelbetrieb - Auswirkungen von Drehzahldifferenzen zwischen beiden Pumpen	130

6.2.2	Drehmomentmessungen über die Pumpenantriebswelle	139
6.2.2.1	Entwicklung einer DMS-basierten Drehmomentwelle	139
6.2.2.2	Einsatz des Monitoringsystems im Kreiselpumpensystem	140
6.2.3	Übertragbarkeit auf Exzentrerschneckenpumpensystem	145
7	Zusammenfassung und Fazit	149
	Abkürzungsverzeichnis	157
	Abbildungsverzeichnis	159
	Literaturverzeichnis	168