

Untersuchung der fluiddynamischen Wechselwirkung
zwischen Druckstößen und Anlagenkomponenten
in Kreiselpumpensystemen

Der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades

D O K T O R – I N G E N I E U R

vorgelegt von

Andreas Ismaier

Erlangen – 2011

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

Tag der Einreichung:	13.07.2010
Tag der Promotion:	17.12.2010
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. R. German
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. E. Schlücker Prof. Dr.-Ing. P. F. Pelz

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Prozessmaschinen und
Anlagentechnik

Band 11

Andreas Ismaier

**Untersuchung der fluiddynamischen Wechsel-
wirkung zwischen Druckstößen und Anlagen-
komponenten in Kreiselpumpensystemen**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2011

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., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9779-4

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

Das, wobei unsere Berechnungen versagen, nennen wir Zufall.

Albert Einstein

Vorwort

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit entstanden von November 2006 bis Mai 2010 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Zum Gelingen der Arbeit haben verschiedene Personen beigetragen, bei denen ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.

An erster Stelle danke ich den Mitarbeitern der Firma Areva NP, die nicht nur die Finanzierung dieses Forschungsprojektes ermöglicht haben, sondern mich auch in vielfältiger Weise mit Rat und Tat unterstützt haben. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Dr. Schnellhammer, der mir durch seine große praktische Erfahrung und sein fundiertes theoretisches Wissen viele wertvolle Denkanstöße gegeben hat. Herrn Neumann danke ich für das stetige Interesse an meiner Arbeit und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Bei Frau Feulner möchte ich mich für die vielen fachlichen Gespräche und die freundschaftliche Zusammenarbeit bedanken. Herrn Dr. Hartmann danke ich für unsere immer sehr konstruktiven Projektbesprechungen.

Herrn Prof. Schlücker möchte ich für die Möglichkeit danken, dass ich an diesem höchst interessanten Promotionsthema arbeiten durfte. Er hat mir Freiraum zu selbstständigen und eigenverantwortlichen Arbeiten gegeben und ermöglichte mir durch abwechslungsreiche und herausfordernde Industrieaufträge auch die Mitarbeit an aktuellen verfahrenstechnischen Problemstellungen.

Herrn Prof. Pelz danke für die Übernahme des Zweitgutachtens, sowie Herrn Prof. König und Herrn Prof. Willner für die Mitwirkung in der Prüfung und die angenehme Atmosphäre im Rigorosum.

Meinen Kollegen/-innen am Lehrstuhl danke ich für die fachlichen Gespräche und das freundschaftliche Verhältnis. Mein besonderer Dank gilt dabei meinem langjährigen Zimmerkollegen Stefan Blendinger für die interessanten, teilweise philosophischen Diskussionen über Ventile, Kavitation und Druckstöße und die unzähligen hilfreichen Tipps und Ideen. Bei Hans Bühner möchte ich mich für die vielen Kleinigkeiten bedanken, die das Arbeiten am Lehrstuhl angenehm gemacht haben. Bedanken möchte ich mich weiterhin bei den Werkstattmitarbeitern und Technikern des Lehrstuhls,

insbesondere bei der ehemaligen „Meisterin“ Christine Schöpplein und Piotr Reichel-Lesinanski, ohne die der Aufbau des Versuchsstandes nicht möglich gewesen wäre.

Darüber hinaus haben Christoph Knollmann, Christoph Keller, Peter Wittmann, Moritz Koch und Tom Heimbrecht durch ihre Studien- und Diplomarbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Vielen Dank für euer Engagement!

Schließlich gilt mein herzlicher Dank meinen Eltern, die mir diesen Weg ermöglicht und mich dabei immer unterstützt haben.

Andreas Ismaier im Dezember 2010

Titelbild:

Bildung von Dampfkavitation im Schnellschlussventil während eines Druckstoßes (Aufnahme mit einer Hochgeschwindigkeitskamera mit 10.000 Bildern pro Sekunde).

Abstract

Mechanical loadings on pipe systems caused by water hammer belong to the most important and most difficult to calculate design loadings in pipes and can lead up to the rupture of the piping. By control procedures, on and shut-down processes, the sudden loss of pumps or unexpected operating conditions such as substantial pressure fluctuations can occur in piping systems. Such loads have to be considered right from the planning and computation stage. These computations are especially important for plants with environmentally hazardous substances as they occur in the chemical industry and in nuclear power plants. Despite this fact even today the fluid dynamic interaction between water hammer and pipe systems is not completely understood. Therefore the aim of this thesis is to investigate fluid dynamic effects by the use of experimental and numerical methods: The behaviour of main components in a DN 100/PN 63 pipe system like centrifugal pump, pipe elbow and damping devices (resonator, pulsation damper and safety relief valves) is determined while a pressure wave is passing.

Centrifugal pumps generate in piping systems noticeable pressure pulsations with an amplitude up to 25% related to average pressure. Measurements indicated that pulsating centrifugal pumps can damp pressure surges generated by fast valve closing. But not only damping effects are possible; also an amplification of the pressure amplitude can be observed. This can happen in case of a self-excited oscillation between the pressure surge and an additional elasticity (in this case a moveable valve-disc). The energy source that drives the oscillation is the pump. Furthermore it is presented that pressure surges pass centrifugal pumps almost unhindered, because they are hydraulically opened.

In literature pipe bends were also regarded as hydraulic open. But with the use of high-dynamic measuring technique (sampling rate up to 50 kHz) it could be proven that pipe bends reflect pressure waves partially.

In order to keep the pressure amplitude, caused by inevitable pressure surges, as limited as possible, air vessels and pressure relief valves can be used in principle. However, both methods require a careful design and positioning in the piping system, as a wrong appliance can also lead to an increase of the pressure surges.

All described phenomena can be simulated with 1-dimensional fluid codes. So it is possible to identify and avoid critical operating conditions.

1	Einleitung	1
2	Druckstöße in flüssigkeitsgefüllten Rohrleitungen	5
2.1	Ursachen für Druckstöße.....	5
2.2	Ausbreitung von Druckwellen.....	6
2.2.1	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit.....	8
2.2.2	Reflexion von eindimensionalen Wellen.....	9
2.2.3	Überlagerung von eindimensionalen Wellen.....	13
2.2.4	Eigenfrequenzen von Fluidsäulen.....	14
2.2.5	Beispiel einer Druckwellenausbreitung auf Grund eines Ventilschnellschlusses.....	15
2.3	Einfluss der Ventilschließcharakteristik.....	17
2.4	Druckstoßberechnung.....	20
2.4.1	Analytische Grundlagen.....	20
2.4.2	Numerische Berechnungsmethoden.....	24
2.5	Maßnahmen zur Druckstoßvermeidung und -reduzierung.....	28
2.5.1	Primäre Maßnahmen.....	29
2.5.2	Sekundäre Maßnahmen.....	29
3	Versuchsanlage und Messtechnik	31
3.1	Rohrleitung und Kreiselpumpe.....	31
3.2	Schnellschlussventil.....	33
3.3	Messtechnik und Datenerfassung.....	36
4	Ursache und Wirkung von Druckstößen in der Versuchsanlage	39
4.1	Erzeugung von Druckstößen.....	39
4.2	Ausbreitung und Reflektion von Druckwellen.....	42
4.3	Bestimmung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit.....	44
4.4	Fluid-Eigenfrequenzen der Versuchsanlage.....	45
4.5	Reproduzierbarkeit der Versuche.....	46
5	Wechselwirkung zwischen Druckstößen und Komponenten	51
5.1	Kreiselpumpen.....	51
5.1.1	Druckpulsation von Kreiselpumpen.....	52
5.1.2	Wellendurchgang.....	57
5.1.3	Dämpfende Wirkung.....	62

5.1.4 Verstärkende Wirkung	65
5.1.5 Zusammenfassung Kreiselpumpenwirkung	81
5.2 Rohrbögen	82
5.3 Kombination verschiedener Rohrwerkstoffe	96
5.4 Dämpfende Elemente	100
5.4.1 Windkessel	100
5.4.2 Resonatorwirkung des Ventilgehäuses	107
5.4.3 Sicherheitsventile	111
5.4.4 Zusammenfassung Dämpfung	116
6 Zusammenfassung	117
7 Symbolverzeichnis	121
8 Literaturverzeichnis	123
Anhang	131