Last und Lastausgleich zykloidenverzahnter Schraubenpumpen

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

genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Joachim Thurner

aus Erlangen

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Andreas Brümmer
Tag der Einreichung:	06.08.2013
Tag der mündlichen Prüfung:	13.11.2013

Darmstadt 2013

D17

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 3

Joachim Thurner

Last und Lastausgleich zykloidenverzahnter Schraubenpumpen

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2014

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., 2013

Copyright Shaker Verlag 2014
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2625-2
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

Kontext

Schraubenpumpen werden als Förderpumpen in der Öl- und Gasindustrie, als Einspritzpumpen für Gasturbinen und Triebwerke, als Schmiermittelpumpe für hydrostatische Lager und in Spezialanwendungen auf der Antriebsseite hydrostatischer Getriebe verwendet. Insbesondere die Öl- und Gasindustrie ist ein wachsender Markt. Dadurch, dass die technischen Herausforderungen zur Förderung von noch in der Erde verbliebenem Öl und Gas steigen, bilden sich für viele Bereiche des Maschinenbaus Chancen, auf diese Herausforderungen mit technischen Lösungen zu reagieren.

Zwei Eigenschaften empfehlen Schraubenpumpen:

Erstens können in wälzgelagerten Schraubenpumpen Öl, Gas, Wasser und suspendierte Partikel als Mehrphasengemisch bei - im Vergleich zu Turbomaschinen - hohen Systemwiderständen, d.h. hohen Druckdifferenzen gefördert werden. Diese Eigenschaft führt zum Erfolg der Schraubenpumpe bei Förderaufgaben in der Öl- und Gasindustrie gerade in den vergangenen Jahren.

Zweitens erweist sich die kinematische Pulsationsfreiheit von Schraubenmaschinen vorteilhaft für Einspritzpumpen von Gasturbinen und speziellen hydrostatischen Getrieben, so z.B. bei Aufzugsantrieben.

In den genannten Anwendungen ist eine hohe Zuverlässigkeit unabdingbar. Tatsächlich rangiert die Zuverlässigkeit oft vor der Energieeffizienz oder den Investitionskosten. Dies wird unmittelbar daran deutlich, dass wälzgelagerte Schraubenpumpen für die Ölförderung in Wassertiefe von bis zu 3000 m eingesetzt werden. Ein Versagen der Pumpe in diesem Einsatzumfeld ist tunlichst zu vermeiden. Kommt es dennoch zum Versagen, so ist es Praxis, die schadhafte Pumpe auf dem Meeresboden zu belassen und mit viel Zeit und finanziellem Aufwand durch eine neue Pumpe zu ersetzen.

Ordnet man alle Fluidenergiemaschinen nach der Schnelllaufzahl, so finden sich Schraubenpumpen weit oberhalb der translatorischen Verdrängermaschinen, im Überlappungsbereich zwischen Zahnradpumpen und langsamläufigen, d.h. radialen Turbomaschinen.
Aufgrund der vergleichsweise hohen Schnellläufigkeit ist der Material- und Raumbedarf deutlich kleiner im Vergleich zu translatorischen Maschinen, die zudem eine deutlich größere Anzahl bewegter Bauteile aufweisen, d.h. in der Kinematik komplexer sind.

Bei großen Einspritzpumpen für Gaskraftwerke wünscht man sich heute Druckdifferenzen, die bei Hubkolbenmaschinen üblich sind und derzeit von Schraubenpumpen nicht erreicht werden. Diese liegen heute - je nach verwendeter Ölviskosität meist unter 100 bar. Gewünscht sind Druckdifferenzen wie sie Hubkolbenmaschinen gebräuchlich sind, d.h. ca. 300 bar. Damit würden sich auch neue Anwendungsmöglichkeiten bei der hydrostatischen Leistungsübertragung in Getrieben mobiler und stationärer Arbeitsmaschinen ergeben.

Schraubenpumpen mit hydrodynamischer Spindellagerung, die Untersuchungsgegenstand von Herrn Thurner sind, haben eine konstruktiv „eingebaute“ Versagensgrenze. Die Querkraft auf

Laufspindeln einer dreispindeligen Pumpe ist proportional der Druckdifferenz. Entsprechend der Gleitlagertheorie von Arnold Sommerfeld ist die dimensionslose Exzentrizität eine eindeutige Funktion der dimensionslosen Lagerlast, d.h. der Druckdifferenz. Ab einer kritischen Druckdifferenz streift die Spindel die Rauheitserhebungen der Bohrung. In diesem Betriebspunkt kann es sehr schnell zum Versagen der Pumpe in Form von Fressen des Läufers im Gehäuse kommen.

Die Forschungsfrage

Herr Dr.-Ing. Joachim Thurner stellt sich zwei Forschungsfragen, deren Beantwortung aufeinander aufbaut:

1. Wie kann die Einsatzgrenze von dreispindeligen, hydrodynamisch gelagerten Schraubenpumpen vorhergesagt werden?
2. Wie kann die in der Konstruktion begründete Einsatzgrenze durch alternative konstruktive Lösungen überwunden werden?

Die Beantwortung der ersten Forschungsfrage ist von hoher Bedeutung für den sicheren Betrieb der Maschine. Derzeit existieren im Wesentlichen empirische Untersuchungen zur Festlegung der Einsatzgrenze von Schraubenmaschinen. Damit ist die Schraubenmaschine ein typischer Vertreter für klassische Maschinenbauprodukte, deren Erfolg auf drei Fakten beruht. Erstens den kreativen Ideen von Ingenieuren, die im Fall der Schraubenpumpe aber zumeist älter als ein halbes Jahrhundert sind, zweitens der Fertigungstechnologie und drittens dem Materialverständnis.

Die zweite Frage, der sich Herr Thurner zuwendet, stellt das Lagerungsprinzip der Schraubenpumpe prinzipiell in Frage und verspricht eine kreativ-konstruktive Lösung. Dies ist dahingehend erfrischend, da die Ingenieurwissenschaften sich heute zunehmend zu einer die Technik beschreibenden Wissenschaft entwickeln. Dies war nicht immer so. So entwickelte Hermann Föttinger an der TU Berlin das hydrodynamische Getriebe, welches an der TH Karlsruhe zum Trilok-Wandler weiterentwickelt wurde. Heute finden sich hydrodynamische Getriebe bei Windturbinen, Gasturbinen, Lokomotiven und im Antriebsstrang von PKWs. Durch die von Herrn Thurner gestellte Frage rückt der Maschinenbau im wahren Sinne des Wortes, in das Zentrum einer wissenschaftlichen Arbeit.

Die Methode

Meinem Vorschlag folgend hat Herr Thurner in seiner wissenschaftlichen Arbeit die drei Spindeln der Pumpe zunächst in der Abwicklung betrachtet und die Strömungsmechanik in den engen Spalten mittels Reynoldsscher Schmierfilmtheorie behandelt. Dabei untersucht er die Gültigkeit der Schmierfilmtheorie, die ein quasistationäres Strömungsfeld voraussetzt. Dies ist nur gegeben, wenn die Diffusionszeit der Rotation kleiner als die Eigenzeiten oder aufgeprägten Zeiten des Systems ist. Diese notwendige Bedingung für die Gültigkeit der Schmierfilmtheorie ist bei den betrachteten Schraubenpumpen erfüllt. Die publizierten Vorarbeiten von Herrn Thurner, die auch eine Stabilitätsanalyse der Rotordynamik enthalten, sind in der vorliegenden Dissertationsschrift nicht näher behandelt, was ich sehr bedauere, da eine wissenschaftliche Leistung auch in der historischen Entwicklung erst klar hervortritt. Herr Thurner nutzt in den Vorgängerarbeiten die Linearität der Reynoldsschen Schmierfilmgleichung, indem er Lösungen superponierte. Dieses Vorgehen ist von hoher Eleganz.

In der vorliegenden textlich sehr knappen Dissertationsschrift wird zunächst die Kinematik der Schraubenpumpe beschrieben. In Ausführlichkeit und Genauigkeit der algebraischen

Geometriedarstellung ist dieser Teil der Arbeit sonst an keiner anderen Stelle der wissenschaftlichen Literatur zu finden. Dabei betätigt sich Herr Thurner auch im Bereich der Technikwissenschaft, indem er die nur in russischer Sprache verfügbare historische Arbeit von Žmud übersetzen lässt und wesentliche kinematische Überlegungen von Žmud nachvollzieht und ergänzt. Auch dieser Teil der Arbeit bleibt bei Herrn Thurner unerwähnt.

In Experimenten am Institut für Fluidsystemtechnik konnte erstmals nachgewiesen werden, dass die Laufspindeln sich unter der Querkraft infolge Druckbeaufschlagung erheblich biegt. Bis dahin wurde angenommen, dass die Spindeln in Schraubenpumpen sich wie starre Rotoren bewegen. Das beobachtete Verhalten nutzt Herr Thurner, um die, in seinen oben genannten Vorgängerarbeiten erarbeiteten Methoden der Fluid-Struktur-Wechselwirkung radikal zu vereinfachen. Allein dieses vereinfachte Modell wird in der vorliegenden Schrift gewürdigt. Dabei ist die vereinfachte Hypothese von Herrn Thurner nunmehr, dass die Spindel so biegeweich ist, dass Last und Tragkraft eines jeden Steigungssegments im Gleichgewicht ist. Um die Berechnung der Last zu beschleunigen, nutzt Herr Thurner hydrostatische Überlegungen im Zusammenspiel mit Gleitlagerberechnungen. Mit diesem Vorgehen gelingt Herrn Thurner die Vorhersage der kritischen Betriebsbedingungen mit erstaunlicher Zuverlässigkeit. Mit den nicht zitierten eigenen Vorarbeiten und den hier dargestellten neuen Ergebnissen ist ein wesentlicher Schritt von einer empirischen Maschinenauslegung zu einem physikalisch-technisch begründeten systematischen Vorgehen gelungen.

Es ist die Frage zu stellen, wie Herr Thurner dimensionsanalytische Überlegungen nach dem Bridgman-Postulat, nämlich „der absoluten Bedeutung relativer Größen“ verwendet. In der Tat finden sich an einigen Stellen in der Arbeit von Herrn Thurner Ergebnisse, dimensionsanalytisch begründet sind. Dies betreffen seine Überlegungen zur Leckage und zum verallgemeinerten, d.h. dimensionslosen Betriebszustand der Pumpe. Beides sind zielführende und neue Überlegungen, die sich sicherlich in der Wissenschaft und Industrie durchsetzten werden.

Innovation

Herr Thurner nutzt sein Wissen dahingehend, um die Last und die hydrodynamische Lagerreaktion, und damit die Lagerung, gänzlich in Frage zu stellen. In kreativer Art ersetzt er die hydrodynamische Lagerung durch eine hydrostatische. Hydrostatische Lager haben zumeist den Nachteil einer aufwendigen externen Druckversorgung, was das Gesamtsystem komplex und aufwendig macht. Nun ist es aber auch möglich den Druckaufbau der Pumpe unmittelbar zu nutzen. Dies hat Herr Thurner in sehr kreativer Weise genutzt, indem er die Spindeln selbst als Drehschieberventile gebraucht. Der Fertigungsaufwand für hydrostatische Lagerung liegt zwar über dem der hydrodynamischen Lagerung, jedoch ist der Investitionsaufwand in vielen Anwendungen deutlich von geringerer Priorität als die Systemzuverlässigkeit, wie oben ausgeführt ist.

Der neue konstruktive Ansatz verspricht eine Erweiterung der Einsatzgrenze und es ist zu erwarten, dass durch die Lösung aktuelle Herausforderungen der Energiewirtschaft gerade bei Einspritzpumpen für Gasturbinen gelöst werden können. Voraussetzung ist, dass die Industrie das unternehmerische Risiko auf sich nimmt, neue Konzepte zur Produktreife zu führen. Die Versuche von Herrn Thurner erscheinen wie ein Lichtstreifen am Horizont.

Vorwort

Die Ihnen vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fluidsystemtechnik zwischen 2010 und 2013.

An dieser Stelle möchte ich Professor Pelz danken, der mir die Möglichkeit gab die Arbeit am Institut für Fluidsystemtechnik in diesem Umfang durchzuführen und Professor Brümmer von der Technischen Universität Dortmund für die Übernahme des Koreferats.

Weiterhin danke ich Philipp Rossow, Sven Stockert und Tobias Kuhl, die bei mir zum Thema Schraubenspindelpumpe studentische Abschlussarbeiten durchgeführt haben, meinen Projektpartnern Herrn Frank Holz und Herrn Dr. Klaus Räbiger für die vertrauensvolle Zusammenarbeit, und der mechanischen Werkstatt des Instituts unter Leitung von Herrn Udo Trometer für die Durchführung zahlreicher und aufwändiger Modifikationen.

Ich hoffe die vorliegende Arbeit ermöglicht künftigen Forschern und Entwicklern einen vereinfachten Zugang zum Gebiet der Schraubenpumpe und liefert überzeugende Antworten auf technische Frage- und Problemstellungen, die diesen Maschinentyp schon sehr lange begleiten.

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbständig verfasst habe.

Darmstadt, im August 2013

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung ... 1
1.1 Entwicklung der Schraubenpumpen ... 1
1.2 Einsatzbereiche unterschiedlicher Pumpentypen ... 8
1.3 Aufbau der Versuchspumpe ... 10
1.4 Zielsetzung der Arbeit ... 12
1.5 Wissenschaftliche Vorarbeiten ... 13
2 Profiltheorie ... 14
2.1 Zykloidenprofil ... 14
2.2 Theoretisches Fördervolumen ... 18
2.3 Hydrostatische Achslasten ... 23
2.4 Hydrostatische Achsmomente ... 25
2.5 Axiale Verzahnungskräfte ... 26
2.6 Minimale Förderlänge ... 27
2.7 Fördergeometrien mit geschlossenen Kammern ... 28
3 Förderverhalten ... 30
3.1 Schraubenpumpen-Prüfstand ... 30
3.2 Idealer und realer Förderstrom ... 32
3.3 Leckagewege ... 33
3.4 Optimierung mittels Dichtscheiben ... 36
3.5 Wirkungsgrade ... 38
3.6 Modellierung der volumetrischen Effizienz ... 40
4 Messungen zur Einsatzgrenze ... 42
4.1 Verlagerung der Laufspindel ... 42
4.2 Messung des Reibmoments ... 48
4.3 Einlaufverhalten ... 50
5 Berechnung der Einsatzgrenze ... 52
5.1 Berechnung hydrostatischer Lasten ... 52
5.2 Berechnung der hydrodynamischen Lagerkraft ... 56
5.3 Einsatzgrenzenvorhersage ... 57
6 Hydrostatischer Lastausgleich ... 62
6.1 Axialer Lastausgleich ... 62

6.2 Konzept des lateralen Lastausgleichs ... 64
6.3 Auslegung lateraler Lastausgleich ... 66
6.4 Konstruktion des ersten Prototyps ... 67
6.5 Messtechnische Untersuchung des ersten Prototyps ... 69
6.6 Konstruktion des zweiten Prototyps ... 75
6.7 Messtechnische Untersuchung des zweiten Prototyps ... 77
7 Zusammenfassung ... 81
8 Quellen ... 83
8.1 Literatur ... 83
8.2 Schutzrechte ... 84
8.3 Internet-Quellen ... 84
9 Anhang ... 85
9.1 Eigenschaften Mineralöl ... 85
9.2 Skript mit analytischen Berechnungen ... 86
Lebenslauf ... 89