Effiziente Berechnung von Gleitlagern und Dichtspalten in Turbomaschinen

Sebastian Lang

Band 18

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

FLUID SYSTEM TECHNIK

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz

Effiziente Berechnung von Gleitlagern und Dichtspalten in Turbomaschinen

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

genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Sebastian Roland Lang, M. Sc.

geboren in Heppenheim

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Michael Schäfer
Tag der Einreichung:	23.10.2017
Tag der mündlichen Prüfung:	20.12.2017

Darmstadt 2017

D 17

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 18

Sebastian Roland Lang

Effiziente Berechnung von Gleitlagern und Dichtspalten in Turbomaschinen

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2017

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 978-3-8440-5894-9
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

Die Beherrschung und Berechnung der Rotorbewegung von Turbomaschinen wird mehr und mehr zum kritischen Pfad bei der Entwicklung und dem Betrieb von Turbomaschinen. Das Berechnungsvermögen kann zum Alleinstellungsmerkmal und damit Wettbewerbsvorteil für Turbinen und Pumpenbauer werden. Die Prototypenkosten sind oft so hoch, dass wiederholte Erprobungskosten und Zeiten nicht toleriert werden. Um eine Vorstellung der Größe solcher Turbomaschinen zu bekommen, stelle man sich eine Kesselspeisepumpe eines Kraftwerks mit 1 GW Leistung vor. Die Antriebsleistung der einzelnen Pumpe ist dann von der Größenordnung 10 MW. Die Rotoren haben Längen in der Größenordnung von 10 m und die Gesamtmasse einer einzelnen Pumpe ist in der Größenordnung 100 t.

Die Schwierigkeit der Rotordynamik erwächst im Wesentlichen durch die Kraft der Flüssigkeit auf den Rotor, die sich in Folge der Durchströmung von Ringspalten oder Axialspalten zwischen Rotor und Stator einstellt. Bei Turbomaschinen ist der Strömung in Umfangsrichtung häufig eine Strömung in Meridianrichtung überlagert. Darüber hinaus ist die Eintrittsströmung zumeist, als Folge der Dralländerung im Laufrad, drallbehaftet.

Herr Sebastian Lang hat genau diese Strömung und die Kraftwirkung auf den Rotor im Fokus seiner Forschung. Getrieben durch die Nöte der Industrie hat er sich zu Beginn seiner Forschung die Aufgabe gestellt, ein zeiteffizientes Berechnungswerkzeug zu entwickeln und eine experimentelle Validierung so vorzubereiten, dass der Nachfolger von Herrn Lang, Herr Kuhr, an zwei Prüfständen die beschriebenen Spaltströmungen generisch einstellen kann.

Nun mag man einwenden, dass die Feldgleichungen der Strömungsmechanik seit den 80er Jahren des vergangenen Jahrhunderts zumindest für Newtonsche Flüssigkeiten, sei die Strömung turbulent oder nicht, ohne Probleme gelöst werden können. Hierbei ist einzuwenden, dass der Zeit- und Geldaufwand für 3D-CFD-Rechnungen zur Ermittlung von Lagerkräften in der Entwicklung genauso wenig zu leisten ist, wie wiederholte Prototypvalidierungen. Herr Lang gibt für einen (!) Betriebspunkt 5 h CPU-Zeit auf dem Lichtenberg-Rechner für eine parallele Rechnung auf 16 Kernen an. In seiner Arbeit hat Herr Lang 280 Referenzpunkte berechnet. Das sind beinahe zwei Monate durchgehende CPU-Zeit auf einem Höchstleistungsrechner. Zweitens ist die Lösungsqualität der RANS-Feldgleichungen bei rotierenden turbulenten Strömungen bekanntermaßen nicht zufriedenstellend. Die RANS-Lösungen bilden für Herrn Lang eine Orientierung, aber aus meiner Sicht

keinen Maßstab. Erst kürzlich haben wir gezeigt, dass alte aber bewährte und robuste Integralverfahren der Grenzschichttheorie mit Potenzfunktion als Ansatzfunktionen RANS-Lösungen überlegen sind (Cloos et. al.: Swirl boundary layer and flow separation at the inlet of a rotating pipe; *Journal of Fluid Mechanics* 811 (2017), S. 350-371).

Die eigentliche Validierung der Berechnungsmethode von Herrn Lang erfolgt erst durch die im Aufbau befindlichen Versuche. Dessen ungeachtet konnte Herr Lang die RANS-Lösungen verwenden, um Schwächen seiner Methode zu identifizieren und zukünftige Anpassungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Herr Lang nutzt in seinem Verfahren die bei uns sehr erfolgreich angewendeten Ansatzfunktionen, die ihren Ursprung im Integralverfahren der Grenzschichttheorie haben. Damit hat er die Möglichkeit geschaffen, das Einlaufverhalten in den Spalt wie in der oben zitierten Arbeit über Grenzschichten abzubilden. In der vorliegenden Form ist dies noch nicht enthalten, was die Unterschiede in den Lösungen zwischen der Methode von Herrn Lang und den RANS-Lösungen insbesondere für kurze Spalte erklärt. Herr Lang zieht aus dem Vergleich zwischen beiden Lösungen die richtigen Schlüsse. Die Berechnungsmethode von Herrn Lang ist so modular angelegt, dass eine Erweiterung möglich ist.

Wenn denn nun, wie diskutiert, RANS-Lösung, ob der Kosten und ob der Qualität nicht zum Einsatz kommen, dann mag man einwenden, dass es doch die Reynoldssche Schmierfilmtheorie sowie Bulk-Flow-Ansätze gibt.

Die Reynoldssche Schmierfilmtheorie darf nur zur Anwendung kommen, wenn das Produkt aus relativem Spalt und Umfangsreynoldszahl sehr viel kleiner als Eins ist. Dies trifft bei den Spaltströmungen in Turbomaschinen häufig nur bei Gleitlagern zu, nicht aber bei anderen Spalten, welche auch wesentlich zur Rotordynamik beitragen. Zwar gibt es Anstrengungen, Trägheitskräfte in das Lösungskorsett der Reynoldsschen Gleichung hineinzuzwängen. Physikalisch ist dies jedoch fraglich. Die Natur rächt sich dadurch, dass die Pseudophysik zu numerischer Instabilität führt. Stand der Technik bei Spaltströmungen sind sogenannte Bulk-Flow-Ansätze, die in den 1970er Jahren entstanden sind. Diese ignorieren den Einfluss der Wände auf den Impulstransport. Sie sind asymptotisch nur für unendlich große Reynoldszahlen gültig.

Damit ist ausreichend die Not der Industrie aufgezeigt und die bisher ungenügende Antwort der ingenieurwissenschaftlichen Forschung.

Welche Antwort gibt Herr Lang? Herr Lang nutzt, dass die Spalte dünn sind. Er bestätigt die bekannte Erkenntnis, dass der Druck über die Spalthöhe konstant ist. Seine Methode nennt er CAPM (clearance-averaged pressure model). Er verwendet wie Cloos et. al Potenzgesetzte als Ansatzfunktionen.

Die Funktionen erstrecken sich von der Rotor- und Statorwand bis zur Kanalmitte. Wie oben angesprochen, ist durch diesen Ansatz prinzipiell auch die Drall- und axiale Grenzschicht darstellbar und zwar deutlich effizienter im Vergleich zu teuren und ungenauen RANS- oder gar noch teureren Large-Eddy-Lösungen. In diesem Fall treten jeweils zwei Grenzschichtdicken für Drall und axialen Impuls als zusätzliche abhängige Veränderliche in das Problem. Herr Lang führt sehr elegant und anspruchsvoll eine inspektionelle Dimensionsanalyse durch (vgl. Kap. 4.2.2). Aus rotordynamischer Sicht sind insbesondere die beiden Kraftkomponenten auf den Rotor von Interesse. Herr Lang zeigt, dass relativer Spalt und Reynoldszahl nur in einer bestimmten Kombination in den Gleichungen 4.13 auftauchen. Professor Zierep aus Karlsruhe hat das „scharfe Anschauen der Differentialgleichungen“ als „Methode der Differentialgleichungen“ bezeichnet. Professor Sommerfeld hat die Sommerfeldzahl durch „scharfes Hingucken“ definiert. Er reduziert so bei laminarer Spaltströmung die Zahl der Veränderlichen. Bei turbulenter Lagerströmung ist die Sommerfeldzahl deutlich weniger wichtig. Warum dies so ist, zeigt Herr Lang in Kapitel 4.2.2. Er führt sehr elegant eine modifizierte Reynoldszahl ein, die analog zur Sommerfeldzahl den relativen Spalt berücksichtigt. Dadurch gelingt ihm eine Reduktion der Zahl der Veränderlichen auch für die Spaltströmungen, die trägheitsdominiert sind.

Beim Vergleich mit den RANS-Lösungen, deren Aussagekraft ich oben bereits kritisch bewertet habe, will ich mich auf die wichtigen Kraftkomponenten konzentrieren. Bild 4.10 zeigt den Vergleich von CAPM mit der CFD-Lösung für einen langen Spalt. Das Bild stellt die Kraftkomponenten in Abhängigkeit der Durchflusszahl und des Vordralls dar.

Hier gilt es zu bedenken, dass bekannte und im Einsatz befindliche „effiziente Berechnungsverfahren“ den Einfluss des Vordralls und des axialen Druchflusses entweder nicht (Reynoldssche Schmierfilmtheorie) oder unzureichend (Bulk-Flow-Modell) darstellen können. Vor diesem Hintergrund und dem Vergleich der Rechenzeit - die 18 CFD-Rechnungen benötigen 90 h CPU-Zeit auf einem Höchstleistungsrechner im Vergleich zu 5 Minuten Rechenzeit auf einem Laptop - bewerte ich dieses Ergebnis als ein glückliches Ereignis für die Industrie. In der Tat werden die Ergebnisse und die Methode von Herrn Lang in der Industrie so aufgenommen. „Accelerating the Energiewende“ gilt hier sprichwörtlich: Die Beschleunigung gelingt um den Faktor 1000.

Bei kürzerem Spalt (vgl. Abbildung 4.11) macht sich die nicht berücksichtigte Einlaufströmung bemerkbar. Herr Lang adressiert dies richtigerweise und zeigt den Lösungsweg.

Darmstadt, im Dezember 2017
Peter Pelz

Es gibt nur zwei Probleme im Leben:

(i) Du weißt, was du willst und du weißt nicht, wie du es bekommst.

(ii) Du weißt nicht, was du willst.

Steven Snyder

Vorwort

Als ich in meinem zweiten Jahr als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fluidsystemtechnik der Technischen Universität Darmstadt auf das Forschungsthema der Spaltströmungen in Turbomaschinen einschwenkte, fand ich mich auf einer grünen Wiese wieder: Das Thema war gerade frisch von einem Industriepartner an das Institut herangetragen worden und die Vorbereitungen zu einem ersten Antrag auf Fördermittel steckten noch in den Kinderschuhen. Die Herausforderungen, denen ich in den Folgejahren gegenüber stand, empfinde ich auch rückblickend immer noch als überwältigend und anspornend zugleich.

Die vorliegende Arbeit entstand während sowie im Anschluss an meine Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut. Auf diesem Weg möchte ich allen danken, die zu ihrem Gelingen beigetragen haben.

Allen voran danke ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz für die Betreuung der Arbeit und die konstruktive Zusammenarbeit während dieser Zeit. Die Freiräume und das Vertrauen, welche ich auf dem gesamten Weg von der grünen Wiese bis zur Einreichung dieser Dissertation erfahren durfte, sehe ich als großes Geschenk und nicht als Selbstverständlichkeit. Herrn Prof. Dr. rer. nat. Michael Schäfer möchte ich für die Übernahme des Korreferates sowie den freundlichen und entgegenkommenden Kontakt danken.

Seitdem ich im Februar 2009 als Hiwi an das Institut gekommen bin, habe ich zahlreiche wissenschaftliche Mitarbeiter kommen und gehen sehen. Ich habe erlebt, welche Bedeutung ein guter Zusammenhalt innerhalb einer solchen Gemeinschaft hat und möchte mich deshalb ganz herzlich bei all meinen Kollegen für die schöne Zeit und die vielen fachlichen sowie persönlichen Diskussionen und Gespräche bedanken. Stellvertretend möchte ich Herrn Maximilian Kuhr herauspicken, der mich seit seinem Institutseintritt das schöne Gefühl erfahren ließ, das Forschungsthema in guten Händen hinterlassen zu können.

Auch all jenen Studierenden, die Interesse und Engagement an meinem Forschungsthema gezeigt und es mit ihren Beiträgen vorangebracht haben, möchte ich herzlich danken. Stellvertretend sei hier Herr Robin Robrecht herausgegriffen, der durch seine Bachelorarbeit und langjährige Hiwi-Tätigkeit bei mir zu einem treuen Weggefährten für mich wurde. Es freut mich sehr, dass auch er in den Dienst des Institutes eintreten und das Forschungsthema zukünftig weitertreiben möchte.

Der letzte und wichtigste Dank gilt meiner Familie. Meiner Mutter Heike Lang und meiner Schwester Lisa Lang, dass sie mir stets Rückhalt, Unterstützung und Beistand gegeben haben, wenn die Herausforderungen drohten, mal wieder über mich hereinzubrechen. Meinem Vater Prof. Dr.-Ing. Andreas Lang für die zahlreichen Diskussionen, strategischen Ratschläge und dass er mir als Vorbild stets einen festen Orientierungspunkt gegeben hat. Meiner Verlobten Johanna Fath, die mich in all den Jahren durch Abitur, Studium und jetzt also auch bis zur Einreichung dieser Dissertation begleitet, unterstützt und wo notwendig auch angetrieben hat.

Ich danke euch.

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

Darmstadt, im Oktober 2017
Sebastian Roland Lang

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
1.1 Wissenschaftliche Fragestellung 2
1.2 Zielsetzung und Methodik 6

2 Grundlagen **8**
2.1 Spaltströmungen in Turbomaschinen 8
2.1.1 Charakterisierung 8
2.1.2 Einsatzbedingungen 10
2.2 Betrachtete Problemstellung 12
2.2.1 Generisches Strömungsmodell 13
2.2.2 Annahmen und Einschränkungen 14
2.2.3 Dimensionsanalyse 16
2.3 Effiziente Berechnungswerkzeuge 18
2.3.1 Hydrodynamische Schmierfilmtheorie 19
2.3.2 Bulk-Flow-Ansatz 24
2.3.3 Ansatzfunktionenmodelle 28
2.3.4 Spalthöhenauflösende Methoden 32
2.3.5 Schlussfolgerungen 35

3 Modellbildung **38**
3.1 Axiomatische Beschreibung 39
3.1.1 Herangehensweise 39
3.1.2 Herleitung 41
3.1.3 Vereinfachungen 43
3.1.4 Beschreibende Gleichungen 45
3.2 Empirische Schließung 47
3.2.1 Geschwindigkeitsprofile 47
3.2.2 Wandschubspannungen 52
3.3 Numerische Lösung 57
3.3.1 Räumliche Diskretisierung 59
3.3.2 Numerische Verfahren 60
3.3.3 Berechnung von Druck und Geschwindigkeit 64
3.3.4 Ablaufplan 69
3.4 Voruntersuchungen 71
3.4.1 Verifizierung 71
3.4.2 Gitterstudien 76
3.5 Zwischenfazit 78

4 Validierung **80**
4.1 CFD-Rechnungen als Referenzmethode 81
4.1.1 Netzgenerierung 82
4.1.2 Turbulenzmodellierung 84
4.1.3 Randbedingungen 86
4.1.4 Berechnungsablauf und Gesamtunsicherheiten 87
4.2 Vorbereitung der Parameterstudien 89
4.2.1 Parametrisierung des CAPM 90
4.2.2 Inspektionelle Dimensionsanalysen 94
4.3 Ergebnisse der Parameterstudien 101
4.3.1 Leckage- und Reibungseigenschaften 102
4.3.2 Strömungskräfte 112

5 Zusammenfassung und Ausblick **129**

Literaturverzeichnis **133**

Anhang

A Massen- und Impulserhaltung **142**

B Größenordnungsabschätzungen **147**

C Geschwindigkeitsprofile **157**

D Wandschubspannungsmodellierung **159**

E Verifizierung des CAPM **162**

F Plausibilisierung der CFD-Ergebnisse **164**

G Einfluss der empirischen Modellkonstanten **169**

H Analyse der Geschwindigkeitsprofile **175**