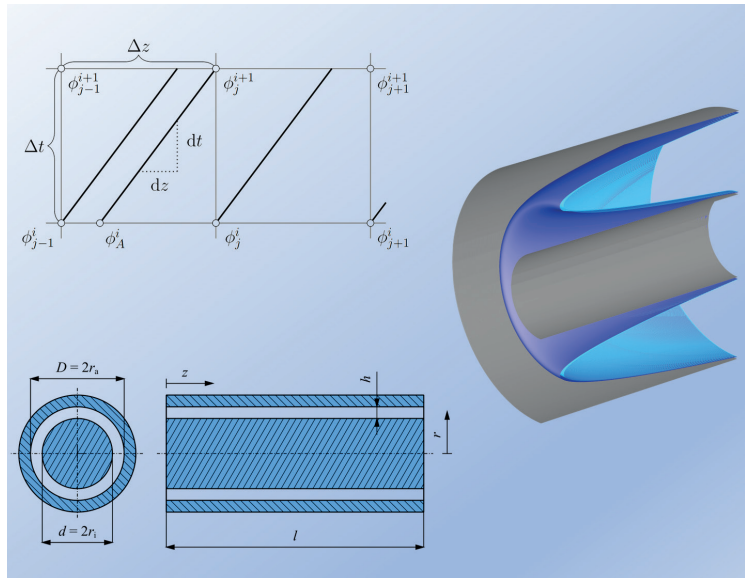


Enrico Pasquini

Eindimensionale Berechnung instationärer Ringspaltströmungen mit thermofluid-dynamischer Betrachtung



Eindimensionale Berechnung instationärer Ringspaltströmungen mit thermofluiddynamischer Betrachtung

One-dimensional Calculation of Unsteady Annular Channel Flows with Consideration of Thermofluid Phenomena

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Enrico Gaspare Pasquini

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Katharina Schmitz

Tag der mündlichen Prüfung: 19.06.2020

Reihe Fluidtechnik

D / Band 101

Enrico Gaspare Pasquini

**Eindimensionale Berechnung
instationärer Ringspaltströmungen mit
thermofluidynamischer Betrachtung**

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2020)

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7496-3

ISSN 1437-8434

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Die Mathematik ist es, die uns vor dem Trug der Sinne schützt und uns den Unterschied zwischen Schein und Wahrheit kennen lehrt.

(Leonhard Euler)

Vorwort und Danksagung

Retrospektiv betrachtet war mein Weg zur Fluidtechnik wohl eher vorbestimmt als zufällig. In meinem ersten Studiensemester (WS 2007/2008) wurde ich an der FH Aachen von Prof. Dr.-Ing. Klaus Witt unterrichtet, in dessen Dissertation über Stoffdaten von Hydraulikflüssigkeiten ich heute von Berufs wegen im Monatsabstand schmökere. Im Sommersemester 2009 las ich dann das erste mal den Schriftzug „ifas“, als Prof. Dr.-Ing. Peter Dahmann (*ifas*-Alumnus Nr. 1) in seiner Hydraulikvorlesung den Umdruck „Grundlagen der Fluidtechnik“ verteilte. Der nächste Kontakt mit einem ehemaligen *ifas*-Mitarbeiter ergab sich im Wintersemester 2011, als Prof. Dr.-Ing. Guy Wennmacher (*ifas*-Alumnus Nr. 2) vertretungsweise die Vorlesung „Konstruktion der Flugzeugstruktur“ hielt. Schließlich lernte ich durch die Veranstaltung „Actuator Systems“ ein halbes Jahr später Herrn Dr.-Ing. Heiko Baum (*ifas*-Alumnus Nr. 3) kennen. Dieser bot mir an, meine Abschlussarbeit bei der *FLUIDON* GmbH zu verfassen, wo ich heute – fünf Jahre nach der Masterarbeit – noch immer tätig bin. Obwohl ich gegenüber einer Branche, in der Volumenströme bilanziert und Kompressions- als Elastizitätsmodule bezeichnet werden, zunächst Skepsis hegte, lernte ich bald, dass auch (oder *gerade*) die Fluidtechnik für den kontinuumsmechanisch interessierten Ingenieur genügend unerforschte Fragestellungen bereithält. Ich hoffe, mit der vorliegenden Dissertation einen kleinen Betrag geleistet zu haben, die fluidtechnische *terra incognita* etwas zu verkleinern.

Die vorliegende Arbeit wäre ohne meinen Doktorvater Herrn Prof. Murrenhoff nicht möglich gewesen, bei dem ich mich für die kontinuierliche wissenschaftliche Betreuung meiner Dissertation und die stets freundliche Beantwortung aller diesbezüglich anfallenden Fragen bedanken möchte. Weiterhin gilt mein Dank Frau Prof. Schmitz für die Durchsicht meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats. Herrn Prof. Abel und Herrn Prof. Heufer danke ich für die Übernahme der Rollen des Vorsitzenden und des Beisitzers bei meiner mündlichen Promotionsprüfung.

Herrn Dr.-Ing. Heiko Baum, der mir in den vergangenen sieben Jahren ein allzeit erreichbarer Mentor war, bin ich zu großem Dank verpflichtet, nicht zuletzt, da durch ihn der Kontakt zum *ifas* überhaupt erst hergestellt wurde. Herrn Filipp Kratschun, M. Sc. (bei der *FLUIDON* auch als „Mitarbeiter X“ bekannt) danke ich für die zahllosen fachlichen – und manchmal auch fachfremden – Diskussionen auf dem Nachhauseweg. Meinem langjährigen Bürokollegen Herrn Dipl.-Ing. (FH) Dirk de Ben danke ich dafür, dass er meine gelegentlichen Gesangsübungen und politischen Agitationsversuche stets gefasst ertrug. Herrn Dipl.-Ing. Benjamin Erzberger sei für seine unermüdlichen – wenn auch häufig fruchtlosen – Bemühungen gedankt, mir („dem Enrico, wa!“) näherzubringen, dass das Hochdeutsche auch

außerhalb des schriftlichen Sprachgebrauchs eine gewisse Daseinsberechtigung besitzt. Bei meiner Mit-Frühaufsteherin Frau Dipl.-Biol. Katja Juschka möchte ich mich für ihre stets herzliche Betreuung in der Ingenieurstagesstätte „Jülicher Straße 338a“ bedanken - find' isch klasse! Herrn Matthias Pätzold danke ich für die täglichen Fachgespräche am Mittagstisch, die kaum ein Themengebiet zwischen den Minkowski-Metriken im \mathbb{R}^4 und der *tatsächlichen* evolutionsbiologischen Bedeutung der Gräfenberg-Zone unberührt ließen.

Meiner lieben Frau Aboli danke ich für ihre grenzenlose Zuneigung, ihre kontinuierliche Unterstützung in allen Lebenslagen und vor allem für ihre unendliche Geduld mit mir und meinen Eigenheiten – nicht nur während meiner Zeit als Doktorand. Bei meinen Eltern bedanke ich mich dafür, dass sie die ausdrücklichen Empfehlungen meines Grundschullehrers ignoriert und mir dadurch den Besuch eines Gymnasiums – und damit in letzter Konsequenz die Anfertigung dieser Arbeit – ermöglicht haben.

Da sie die Fertigstellung derselben leider nicht mehr miterleben konnten, ist die vorliegende Dissertation meinen Großeltern Maria und Peter van Aubel gewidmet.

Aachen, im Juni 2020

Enrico Gaspare Pasquini

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren vorgestellt, welches die Berechnung von instationären Strömungen durch konzentrische Ringspalte im Rahmen einer eindimensionalen Systemsimulation ermöglicht. Das Rechenmodell zeichnet sich dadurch aus, dass trotz des eindimensionalen Ansatzes auch bei stark instationären Strömungen Berechnungsergebnisse von vergleichbarer Qualität wie bei einer mehrdimensionalen Strömungssimulation erzielt werden können.

Die hohe Ergebnisgüte wird erreicht, indem das von ZIELKE für die Kreisrohrströmung entwickelte Berechnungsverfahren zur Berücksichtigung von instationären Druckverlusten auf die Strömungsverhältnisse im Ringspalt übertragen wird. Aufgrund des numerisch ungünstigen Verhaltens der exakten Lösung wird eine einfacher zu handhabende Näherungsgleichung auf Grundlage der ebenen Spaltströmung konstruiert. Zur ressourcensparenden Auswertung der zur Berechnung des Druckverlusts benötigten Faltungsintegrale kommt das von TRIKHA entwickelte und durch SCHOHL verbesserte Rekursionsverfahren zum Einsatz.

Das vorgestellte Rechenmodell bietet durch Berücksichtigung der Energiegleichung darüber hinaus die Möglichkeit, auch thermofluiddynamische Effekte bei der Leitungssimulation abzubilden. Dabei wird neben dem Wärmeübergang zwischen Fluid und Rohr- oder Zylinderwand auch die reibungsbedingte Erwärmung erfasst, sodass mit dem Rechenmodell z. B. temperaturbedingte Änderungen der Viskosität und damit des Durchflusswiderstands analysiert werden können.

Zur numerischen Lösung des entwickelten Differentialgleichungssystems wird im Zeitbereich auf die bewährte Kombination aus dem Charakteristikenverfahren und einem Finite-Differenzen-Schema zurückgegriffen. Um die Ringspaltströmung bei Spezialfällen auch im Frequenzbereich untersuchen zu können, wird eine entsprechende Übertragungsmatrix hergeleitet.

Die Validierung des in die Simulationsumgebung *DSHplus*[®] implementierten Rechenverfahrens erfolgt durch Gegenüberstellung mit experimentellen Befunden und CFD-Simulationsergebnissen.

Abstract

This thesis presents a method for the one-dimensional numerical simulation of transient flows through concentric annular channels. Despite the one-dimensional approach, the computational model is capable of producing results of comparable quality like multidimensional CFD simulation even for highly transient flows.

The high quality of the results is achieved by adapting the ZIELKE method for calculating transient pressure drops in flow through circular pipes to the conditions present in annular channels. Due to the numerically unfavorable behavior of the exact solution, an easier to handle approximation equation is developed based on the similarity to flows through plane channels. In order to enable a resource-saving evaluation of the convolution integrals required to calculate the pressure loss, the recursive method of TRIKHA with the improvement by SCHOHL is employed.

By taking the energy equation into account, the presented model also offers the possibility to include thermofluiddynamic effects during a simulation. In addition to the heat transfer between fluid and pipe or cylinder wall, the friction-related dissipative heating is also considered, so that temperature-related changes in viscosity and thus in flow resistance can be analysed.

For the numerical solution of the developed differential equation system, the tried and tested combination of the characteristic method and a finite-difference scheme is used in the time domain. In order to be able to investigate special cases of annular channel flow also in the frequency domain, the respective transfer matrix is derived.

The numerical scheme is implemented into the fluid power simulation environment *DSHplus*[®] and validated by comparison with experimental findings and CFD simulation results.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Zielsetzung	6
1.3 Aufbau der Arbeit	7
2 Literaturübersicht	9
2.1 Wellenphänomene bei Innenströmungen	9
2.2 Druckverlustberechnung	10
2.2.1 Stationäre Druckverluste	11
2.2.2 Instationäre Druckverluste	11
2.3 Thermohydraulische Phänomene bei Innenströmungen	15
2.3.1 Energiegleichung	15
2.3.2 Wärmeübergang	16
2.4 Lösungsverfahren	18
2.4.1 Verfahren zur Lösung im Zeitbereich	18
2.4.2 Verfahren zur Lösung im Frequenzbereich	21
3 Physikalische Grundlagen	23
3.1 Vereinfachende Annahmen	23
3.2 Thermodynamische Grundlagen	24
3.2.1 Kompressionsmodul	24
3.2.2 Thermische Zustandsgleichung	25
3.2.3 Fundamentalgleichung der Thermodynamik	27
3.2.4 Kalorische Zustandsgleichung	28
3.2.5 Schallgeschwindigkeit	30
3.3 Strömungsmechanische Grundlagen	30
3.3.1 Impulsgleichung	30
3.3.2 Kontinuitätsgleichung	34
3.3.3 Energiegleichung	38

4	Druckverluste in Ringspaltströmungen	43
4.1	Geschwindigkeitsprofil	43
4.1.1	Stationäre Strömung	45
4.1.2	Oszillierende Strömung	47
4.2	Druckverlustberechnung	53
4.2.1	Stationäre Strömung	54
4.2.2	Oszillierende Druckströmung	57
4.2.3	Instationäre Druckströmung mit beliebigem zeitlichen Verlauf	60
4.3	Näherungsweise Druckverlustberechnung	63
4.3.1	Geschwindigkeitsprofil der ebenen Spaltströmung	63
4.3.2	Druckverlust der ebenen Spaltströmung	64
4.3.3	Rücktransformation in den Zeitbereich	66
4.4	Stabilität laminarer Ringspaltströmungen	72
4.4.1	Obere und untere kritische Reynoldszahl	72
4.4.2	Untere kritische Reynoldszahlen von Ringspaltströmungen . .	73
5	Wärmeübergänge in Ringspaltströmungen	79
5.1	Nußelt-Zahl	79
5.2	Thermische Randbedingungen	80
5.3	Ausgebildete Strömungen	81
5.4	Konstante Wärmestromdichte	82
5.5	Nußelt-Zahlen bei konstanter Wandtemperatur	87
5.6	Abschließende Bemerkung zur adiabatischen Mischtemperatur . . .	89
6	Lösungsverfahren	93
6.1	Numerische Lösung im Zeitbereich	93
6.1.1	Grundlagen des Charakteristikenverfahrens	93
6.1.2	Umformung der Erhaltungsgleichungen	98
6.1.3	Charakteristische Form	101
6.1.4	Approximation durch finite Differenzen	103
6.1.5	Numerische Berechnung des Druckverlusts	105
6.1.6	Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit	112
6.1.7	Zeitinterpolation	114
6.1.8	Lösung des algebraischen Gleichungssystems	115
6.2	Lösungsverfahren im Frequenzbereich	116
6.2.1	Grundlagen des Übertragungsmatrizenverfahrens	117
6.2.2	Übertragungsmatrix eines Ringspaltkanals	120
7	Implementierung & Validierung	125
7.1	Implementierung in <i>DSHplus</i> [®]	125
7.2	Übertragungsverhalten eines Ringspalts	126
7.2.1	Versuchsbeschreibung und -parameter	126

7.2.2	<i>DSHplus</i> [®] -Modell	128
7.2.3	Ergebnisse	129
7.3	Druckstoß	131
7.3.1	Versuchsbeschreibung und -parameter	131
7.3.2	Simulationsparameter	135
7.3.3	Ergebnisse	139
7.4	Axiales Temperaturprofil	140
7.4.1	Versuchsbeschreibung	141
7.4.2	Theoretische Lösung	142
7.4.3	Simulationsparameter	144
7.4.4	Ergebnisse	145
8	Zusammenfassung und Ausblick	147
8.1	Zusammenfassung	147
8.2	Ausblick	149
	Literaturverzeichnis	151
	A Abkürzungen	161
	B Lebenslauf	163