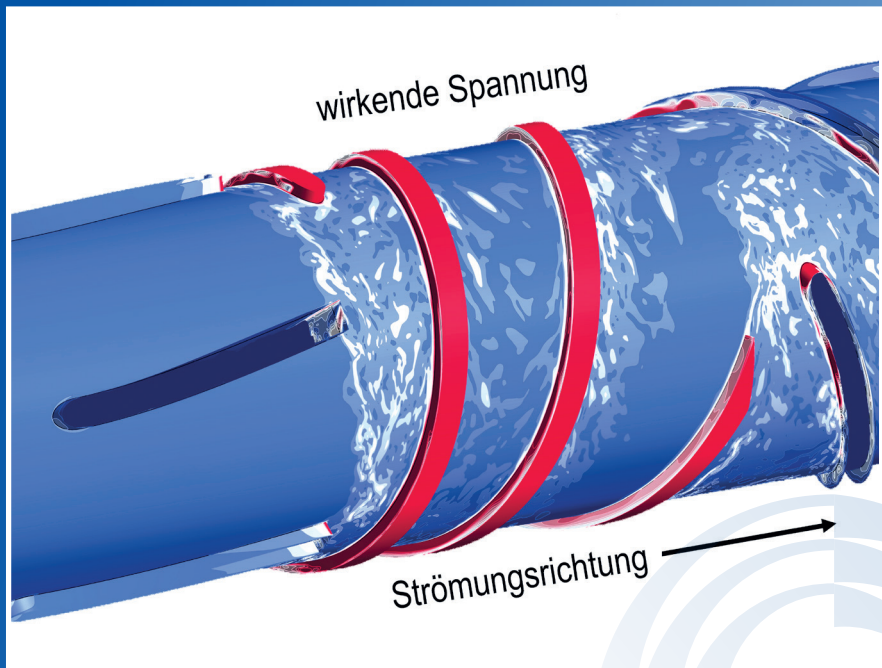


Erforschung der Strömung in einem Herzunterstützungssystem unter Berücksichtigung des Turbulenzeinflusses auf die Blutschädigungsvorhersage

Dr.-Ing. Benjamin Torner

Universität
Rostock  Traditio et Innovatio



Universität
Rostock



Traditio et Innovatio

ERFORSCHUNG DER STRÖMUNG IN EINEM
HERZUNTERSTÜTZUNGSSYSTEM UNTER
BERÜCKSICHTIGUNG DES TURBULENZEINFLUSSES
AUF DIE BLUTSCHÄDIGUNGSVORHERSAGE

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
der Universität Rostock

vorgelegt von

Benjamin Torner
aus Rostock

Rostock, 2019

Gutachter:

Prof. Dr. Frank-Hendrik Wurm , Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmaschinen

Prof. Dr. Hermann Seitz, Universität Rostock, Lehrstuhl für Mikrofluidik

Jahr der Einreichung: 2019

Jahr der Verteidigung: 2019

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Strömungsmaschinen
herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Frank-Hendrik Wurm

Benjamin Torner

**Erforschung der Strömung in einem Herz-
unterstützungssystem unter Berücksichtigung
des Turbulenzeinflusses auf die
Blutschädigungsvorhersage**

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Rostock, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7750-6

ISSN 2749-957X

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

*»Was wir wissen, ist ein Tropfen;
was wir nicht wissen, ein Ozean.«*

Sir Isaac Newton

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Strömungsmaschinen (ITU) der Universität Rostock. Während dieser Zeit haben mich zahlreiche Menschen unterstützt und zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Frank-Hendrik Wurm danke ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die fruchtbaren Gespräche und die wissenschaftlichen Freiräume, die es mir ermöglichten, mich vertieft mit dem Forschungsthema auseinanderzusetzen.

Bei meinen aktuellen und ehemaligen Kollegen am Lehrstuhl für Strömungsmaschinen möchte ich mich für die engagierte Zusammenarbeit, die Hilfsbereitschaft und die anregenden Gespräche bedanken. Mein besonderer Dank gilt hierbei meinem Arbeitsgruppenkollegen Lucas Konnigk, der mich bei der Bearbeitung des Forschungsthemas immens unterstützte und immer ein offenes Ohr für Probleme hatte. Auch Dr. rer. nat. Günther Steffen möchte ich erwähnen, der mir bei der Gittererstellung sehr geholfen hat.

Weiterhin möchte ich mich bei all meinen Studenten bedanken, die mir im Zuge ihrer wissenschaftlichen Arbeit oder als wissenschaftliche Hilfskraft bei den Experimenten, der Prüfstandauslegung und den numerischen Berechnungen geholfen haben. Hervorheben möchte ich meine Studentin Nada Abroug, die dank ihrer künstlerischen Ader einen großen Beitrag zu der Abbildungserstellung geleistet hat.

Ich möchte mich zudem beim Norddeutschen Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen (HLRN) bedanken, ohne dessen Rechenzeiten die Strömungssimulationen nicht hätten durchgeführt werden können.

Auch möchte ich mich bei Adrian Wisniewski, Dr.-Ing. Henning Kroll und Dr.-Ing. Kim-Peter Winterwerber von der Berlin Heart GmbH bedanken. Sie halfen mir sehr bei der Prüfstandauslegung und waren immer hilfsbereit in den zahlreichen Diskussionen.

Meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, Großeltern und meiner Freundin Johanna, gilt mein größter Dank. Vielen Dank für euren fortwährenden Rückhalt, eure bedingungslose Unterstützung und euer Vertrauen. Danke Johanna, dass Du mir immer das Gefühl gibst, das Richtige zu tun.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	IV
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	4
2.1 Ventricular Assist Devices (VADs)	4
2.2 Experimentelle Analysen der Strömung und Blutschädigung in VADs	7
2.2.1 Messung von Strömungsgrößen	7
2.2.2 Arten und Messung strömungsinduzierter Blutschädigung	9
2.3 Numerische Analysen der Strömung und Blutschädigung in VADs	16
2.3.1 Numerische Modellierung der Strömung in VADs	16
2.3.2 Numerische Blutschädigungsvorhersage	21
2.4 Berücksichtigung turbulenter Spannungen in der Blutschädigungsvorhersage	28
2.5 Fragestellungen und Lösungsweg zur Beantwortung der Forschungsfragen . .	34
3 Verwendete Methoden	37
3.1 VAD-Modell und Rechendomäne	37
3.2 Numerische Methoden	38
3.2.1 Large-Eddy Simulation: Definition und Turbulenzmodellierung	38
3.2.2 Rechengittererstellung	42
3.2.3 Berechnete Betriebspunkte des VAD	45
3.2.4 Rechenverlauf, Rand- und Anfangsbedingungen	46
3.2.5 Numerische Einstellungen und Fluiddefinition	48
3.3 Experimentelle Methoden	49
3.3.1 Acrylmodell und Prüfstand	50
3.3.2 Fluid, Messverlauf und verwendete Messtechnik	54
3.4 Eingesetzte Methoden für die Auswertung	55
3.4.1 Messunsicherheitsberechnung der experimentellen Daten	55
3.4.2 Definition einer Vergleichsspannung für das gesamte Strömungsfeld . .	57
3.4.3 Methoden zur Qualitätsprüfung der LES-Rechnungen	60
3.4.4 Verwendete Blutschädigungsvorhersagemodelle	66
4 Ergebnisse und Diskussion	68
4.1 Verifikation und Validierung der Simulationen	68
4.1.1 Qualitätsprüfung im turbulenten Strömungsfeld	68

4.1.2	Qualitätsprüfung der berechneten Scherspannungsfelder	72
4.1.3	Validierung des numerischen Modells mittels der Förderhöhe	76
4.2	Numerische Untersuchung der Strömung und der Blutschädigung im VAD . .	79
4.2.1	Analyse des turbulenten Strömungsfeldes	79
4.2.2	Betrachtung der Vergleichsspannungen im Strömungsfeld	96
4.2.3	Einfluss von turbulenten Spannungen auf die Blutschädigungsvorher- sage	103
5	Zusammenfassung, Limitationen und neue Forschungsfragen	111
	Literaturverzeichnis	i
	Abbildungsverzeichnis	xvi
	Tabellenverzeichnis	xx