Entwicklung einer künstlichen Herzklappe mit einem Spülstrom für den Einsatz in Herzunterstützungssystemen

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Tobias Timmel
aus Berlin

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Marc Kraft
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Christian Oliver Paschereit
Prof. Dr.-Ing. Klaus Affeld

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 03.12.2009

Berlin 2009
D83

Berichte aus der Medizintechnik

Tobias Timmel

**Entwicklung einer künstlichen Herzklappe
mit einem Spülstrom für den Einsatz
in Herzunterstützungssystemen**

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag
Aachen 2010

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.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8809-9

ISSN 1431-1836

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Labor für Biofluidmechanik der Charité – Universitätsmedizin Berlin unter Leitung von Herrn Professor Dr.-Ing. Klaus Affeld und Herrn Dr.-Ing. Ulrich Kertzscher. Die Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) sowie mit einem NaFöG-Stipendium durch das Land Berlin gefördert, bei denen ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken möchte.

In erster Linie sei meinen beiden Betreuern, Herr Professor Dr.-Ing. Klaus Affeld sowie Herr Prof. Dr.-Ing. Christian Oliver Paschereit vom Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik der TU Berlin, gedankt, die mich mit vielen Anregungen und Diskussionen bei der Arbeit unterstützten.

Weiterhin danke ich allen jetzigen und ehemaligen Kollegen des Labors für Biofluidmechanik und insbesondere Herrn Dr.-Ing. Ulrich Kertzscher und Herrn Dr.-Ing. Leonid Goubergrits, die mit wertvollen Anregungen zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen. Frau Dipl.-Ing. Kerstin Schirrmann danke ich für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner im Laufe der Jahre angewachsenen Familie, die mir den nötigen Rückhalt gegeben hat.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Englische Zusammenfassung – Summary	3
1 Einleitung und Motivation	5
2 Grundlagen	9
2.1 Das Herz-Kreislauf-System	9
2.2 Virchowsche Trias	11
2.2.1 Überblick	11
2.2.2 Blutströmung und Thrombusbildung	15
2.2.3 Interaktion von Blut und künstlicher Oberfläche	18
2.2.4 Blut als Strömungsmedium	21
2.2.5 Laminare und turbulente Strömung im Blutkreis-	
lauf	24
2.2.6 Ablösungen und Rezirkulationen	27
2.3 Komplikationen in Herunterstützungssystemen und in	
künstlichen Herzklappen	28
2.3.1 Herunterstützungssysteme	28
2.3.2 Künstliche Herzklappen	31
2.3.3 Anforderungen an eine ideale künstliche Klappe	
für Herunterstützungssysteme	38
3 Prinzip des Spülstroms	43
3.1 Idee	43
3.2 Vorarbeiten	44
3.3 Vorgehensweise	46
4 Untersuchung des Spülstromprinzips an der Einsegelklappe	51
4.1 Methoden	52
4.1.1 Parametrische Untersuchung nach Taguchi und	
Konstruktion	52
4.1.2 Numerische Berechnung (CFD)	60

4.1.3	Hämodynamische Untersuchung im Herzklappenprüfstand	64
4.1.4	Experimentelle Untersuchung mit der Farbauswaschmethode	71
4.1.5	Experimentelle Untersuchung mit der PIV	73
4.2	Ergebnisse	76
4.2.1	Numerische Berechnung (CFD)	76
4.2.2	Parametrische Untersuchung nach Taguchi	79
4.2.3	Hämodynamische Untersuchung im Herzklappenprüfstand	82
4.2.4	Experimentelle Untersuchung mit der Farbauswaschmethode	82
4.2.5	Experimentelle Untersuchung mit der PIV	84
4.3	Diskussion und Schlussfolgerungen	86
4.3.1	CFD und Parametrische Untersuchung nach Taguchi	86
4.3.2	Hämodynamische Untersuchung im Herzklappenprüfstand	90
4.3.3	Experimentelle Untersuchung mit der Farbauswaschmethode	91
4.3.4	Experimentelle Untersuchung mit der PIV	92
5	Untersuchung des Spülstromprinzips an der Dreisegelklappe	95
5.1	Systemstudie	96
5.2	Methoden	99
5.2.1	Parametrische Untersuchung nach Taguchi und Konstruktion	99
5.2.2	Numerische Berechnung (CFD)	102
5.2.3	Hämodynamische Untersuchung im Herzklappenprüfstand	105
5.2.4	Experimentelle Untersuchung mit der Farbauswaschmethode	108
5.3	Ergebnisse	110
5.3.1	Numerische Berechnung (CFD)	110
5.3.2	Parametrische Untersuchung nach Taguchi	111
5.3.3	Hämodynamische Untersuchung im Herzklappenprüfstand	113
5.3.4	Experimentelle Untersuchung mit der Farbauswaschmethode	113

5.4	Diskussion und Schlussfolgerungen	115
5.4.1	CFD und Parametrische Untersuchung nach Taguchi	115
5.4.2	Hämodynamische Untersuchung im Herzklappenprüfstand	118
5.4.3	Experimentelle Untersuchung mit der Farbauschmethode	118
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	121
6.1	Schlussfolgerungen	121
6.2	Ausblick – Möglichkeiten und Grenzen der Spülstromklappe	122
	Literaturverzeichnis	125
	Anhang	141
A	Versuchsplanung nach Taguchi – ein Rechenbeispiel	143
B	Einsegelklappe: Versuchsplanung, Modellmatrix	147
C	Einsegelklappe: Ergebnisse und Auswertung der CFD	149
D	Dreisegelklappe: Versuchsplanung, Modellmatrix	155
E	Dreisegelklappe: Ergebnisse und Auswertung der CFD	157

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer Aided Design (Computergestütztes Konstruieren)
CFD	Computational Fluid Dynamics (Numerische Strömungsmechanik)
EDV	Enddiastolisches Volumen
ESV	Endsystolisches Volumen
HZV	Herzzeitvolumen
LV	Linker Ventrikel
LVAD	Left Ventricular Assist Device (Linksherzunterstützungssystem)
PIV	Particle Image Velocimetry
PUR	Polyurethan
ROI	Region of Interest (Untersuchungsfenster)
SF	Strahlteilerform
SP	Strahlteilerposition
ST	Strahlteiler
SV	Schlagvolumen

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
α	Winkel	°
β	Winkel	°
η	Dynamische (auch: absolute) Viskosität	Pa s = kg/(m s)
$\dot{\gamma}$	Scherrate	1/s
$\dot{\gamma}_w$	Wandscherrate	1/s
ν	Kinematische Viskosität	m ² /s
ρ	Dichte	kg/m ³
τ	Schubspannung	Pa = N/m ²
τ_w	Wandschubspannung	Pa = N/m ²
A_{τ_w}	Flächen mit bestimmten Wandschubspannungsbereichen	mm ²
b	Ellipsoidlängsachse	mm
D	Durchmesser	m
D_i	Innendurchmesser	m
$\vec{f}$	Feldkraft	m/s ²
f	Frequenz	Hz = 1/s
h_k	Kuppelhöhe	mm
h_s	Höhe der Sinuskuppel	mm
h_{ST}	Strahlteilergröße	mm
L	Länge	m
l_b	Bulbus- bzw. Sinuslänge	mm
l_s	Segellänge	mm
$\overline{\Delta p}_{sys}$	Mittlere systolische Druckdifferenz	mm Hg = 133,3 N/m ²
R	Radius	m
Re	Reynoldszahl	
Re_{krit}	Kritische Reynoldszahl	
r	Radialer Abstand von Gefäßmitte	m
r_s	Verrundungsradius zwischen den Sinussen	mm

r_{ST}	Strahlteilerradius	mm
r_v	Verrundungsradius zwischen Sinus und Strahlteiler	mm
Sr	Strouhal-Zahl	
t_s	Schließzeit	ms
Tu	Turbulenzgrad	
v	Geschwindigkeit	m/s
$\dot{V}$	Volumenstrom	l/min, m ³ /s
v_i'	Schwankungskomponente der Ge- schwindigkeit in x-, y- oder z- Richtung	m/s
$\overline{v_i'^2}$	Gemittelttes Quadrat der Schwan- kungskomponente der Geschwindig- keit in x-, y- oder z-Richtung	(m/s) ²
V_l	Leckvolumen	ml
$v_{\max}$	Maximalgeschwindigkeit	m/s
$\bar{v}$	Mittlere Geschwindigkeit	m/s
V_s	Schließvolumen	ml
Wo	Womersley-Zahl	