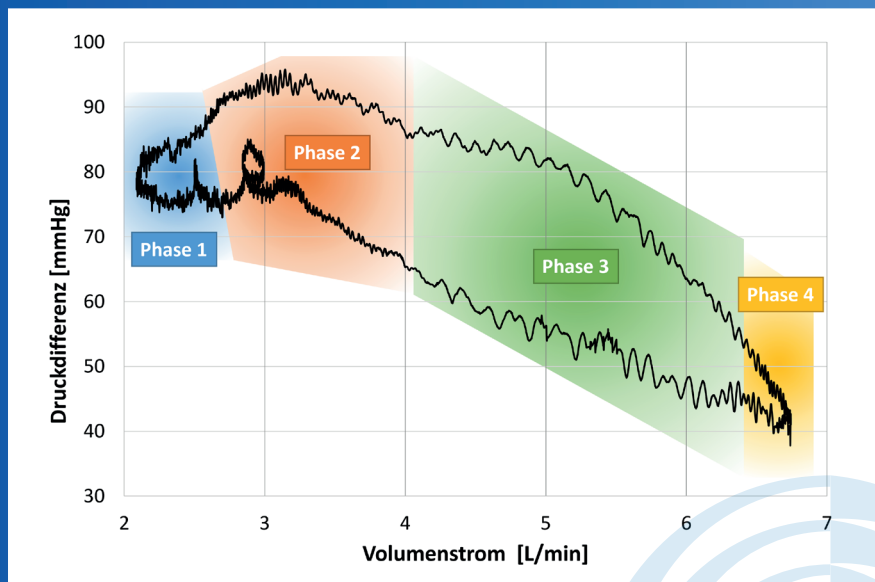


Einfluss der pulsatilen Durchströmung einer axialen Blutpumpe auf den Radialspaltwirbel und Bewertung der resultierenden Blutschädigung

Dr.-Ing. Adrian Wisniewski

Universität
Rostock  Traditio et Innovatio



Einfluss der pulsatilen Durchströmung einer axialen Blutpumpe auf den Radialspaltwirbel und Bewertung der resultierenden Blutschädigung

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

der Universität Rostock

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Adrian Wisniewski, geb. am 22.07.1985 in Berlin
aus Berlin

Rostock, den 20.11.2021

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Strömungsmaschinen

Adrian Wisniewski

**Einfluss der pulsatilen Durchströmung einer axialen
Blutpumpe auf den Radialspaltwirbel und Bewertung
der resultierenden Blutschädigung**

Shaker Verlag
Düren 2022

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8758-1

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

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	I
I. Nomenklatur	IV
Abkürzungsverzeichnis	IV
Verzeichnis von Formelzeichen und Variablen	V
1 Stand der Wissenschaft	1
1.1 Klinische Motivation	1
1.2 Definition von Randbedingungen	2
1.3 Spaltwirbelanalysen	4
1.3.1 Strömungsanalysen in Blutpumpen	4
1.3.2 Strukturdarstellung des Radialspaltwirbels	5
1.3.3 Variation des Radialspaltwirbels	9
1.3.4 Identifikation von Wirbelstrukturen	10
1.4 Blutschädigungsbewertung	11
1.4.1 Verwendung von Schwellwerten	12
1.4.2 Bewertung der Hämolyse durch eine Schädigungsgleichung	12
1.4.3 Bewertung des Anlagerungsrisikos von Thrombozyten	13
1.4.4 Weiterführende Blutschädigungsbewertungen	13
1.5 Ableiten der offenen Fragestellungen	14
2 Methoden	16
2.1 Definition eines repräsentativen Pulsverlaufes	16
2.1.1 Messverfahren	16
2.1.2 Sammlung der Patientendaten	17
2.1.3 Datenanalyse	18
2.1.4 Berechnung einer repräsentativen Pulsatilität	19
2.1.5 Ableitung der Randbedingungen	20
2.2 Simulationsmodell	20
2.2.1 Pumpengeometrie	20
2.2.2 Domäneinteilung und Vernetzung	21
2.2.3 Simulationsvorbereitung	24
2.3 Durchführung der Simulation mit pulsierender Randbedingung	26
2.3.1 Anpassen der dynamischen Randbedingungen an die Kennlinie der Blutpumpe	26
2.3.2 Einbindung der dynamischen Randbedingungen in die Simulation	28
2.4 Identifikation des Radialspaltwirbels	30

2.4.1	Auswertungsgrößen in Schnittebenen	30
2.4.2	Verfahren auf Basis des Geschwindigkeitsgradiententensors	31
2.5	Blutschädigungsbewertung	32
2.5.1	Globale Schwellwertbewertung	32
2.5.2	Hämolysebewertung über Schädigungsgleichungen	32
2.5.3	Bewertung des Anlagerungsrisikos von Thrombozyten	33
2.5.4	Analyse der strömungsmechanischen Verluste	33
3	Ergebnisdarstellung und Diskussion	34
3.1	Ergebnisse Patientenauswertung	34
3.1.1	Erstellung der statische Randbedingungen auf Basis der INCOR®	34
3.1.2	Bedeutung der statische Randbedingungen für die Forschung und Entwicklung	34
3.1.3	Erstellung der dynamischen Randbedingungen auf Basis der INCOR®	36
3.1.4	Bedeutung der dynamischen Randbedingungen für die Forschung und Entwicklung	37
3.1.5	Anpassen der dynamischen Randbedingungen auf die untersuchte Blutpumpe	38
3.1.6	Limitationen der Patientenauswertung	38
3.2	Analyse der pulsierenden Durchströmung	40
3.2.1	Strukturveränderung des Radialspaltwirbels	40
3.2.2	Volumenauswertung des Radialspaltwirbels nach dem Q-Kriterium	50
3.2.3	Einteilung des Pulses in zeitliche Abschnitte	52
3.3	Validierung der Simulationsmethodik	58
3.3.1	Netzstudie	58
3.3.2	Turbulenzmodellvergleich	63
3.3.3	Vergleich der Radialspaltwirbel-Darstellung mit dem Stand der Wissenschaft	66
3.3.4	Pulsreproduzierbarkeit	73
3.3.5	Vergleich der Phasenrepräsentanten	75
3.3.6	Limitationen der Simulation mit pulsierender RB	78
3.4	Schädigungsunterschiede der Phasen	80
3.4.1	Bewertung der Zellschädigung	80
3.4.2	Bewertung des Anlagerungsrisikos von Thrombozyten	83
3.4.3	Vergleich der strömungsmechanischen Verluste	84
3.4.4	Bedeutung für die Auslegung und Anwendung von Blutpumpen	86
4	Zusammenfassung	88
4.1	Motivation	88
4.2	Forschungsfrage	88
4.3	Patientenauswertung	88

4.4	Untersuchung des Radialspaltwirbels mit pulsierender Randbedingung	89
4.5	Blutschädigungsuntersuchung der unterschiedlichen Pulsabschnitte.....	90
5	Ausblick.....	91
6	Literaturverzeichnis	92
7	Abbildungsverzeichnis.....	97
8	Tabellenverzeichnis	103
Anhang		i
A1: Berechnung des Volumenstroms und der Druckdifferenz in INCOR®		i
A2: Einfluss der Viskosität auf das Strömungsverhalten der INCOR®		iii
A3: Explizite Darstellung der Werte der DBCs		iv
A4: Detaillierte Ergebnisdarstellung der Strukturveränderung		v

I. NOMENKLATUR

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BP	Betriebspunkt
CFD	numerische Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics)
DES	Detached Eddy Simulation
dRB	dynamische Randbedingungen
fHb	freies Hämoglobin
LES	Large Eddy Simulation
LVAD	linksventrikuläre Herzunterstützungssysteme
PIV	Particle Image Velocimetry
RANS	Reynolds-averaged Navier-Stokes (Navier-Stokes-Gleichung gemittelt nach Reynolds)
sRB	statische Randbedingungen
TED	turbulente Eddy-Dissipation
TG	Transportgleichung
TKE	turbulente kinetische Energie
RSW	Radialspaltwirbel
VAD	Ventricle Assist Device (Herzunterstützungssystem)
vWF	Von-Willebrand-Faktor
WSS	Wandschubspannung
VZ	Verweilzeit

VERZEICHNIS VON FORMELZEICHEN UND VARIABLEN

LATEINISCHE BUCHSTABEN

C_p	Druckbeiwert
h	Schaufelhöhe
Δp	Druckdifferenz
p	Druck (statisch)
k_i	Platzhalter für einen variierenden Wert
n	Anzahl
t	Zeit, auch verwendet als Verweilzeit
\vec{u}	Geschwindigkeit
\vec{x}	Position / Ort
A_{ij}	Deformationsgeschwindigkeitstensor
B_{ij}	Drehgeschwindigkeitstensor
C	Konstante in der Hämolyseberechnung
H	approximierte Hämolyse
K	Platzhalter für einen konstanten Wert
M	Drehmoment
N	Drehzahl
Q	Q-Kriterium
U_{tip}	Geschwindigkeit d. Schaufeloberkante
V	Volumen
\dot{V}	Volumenstrom
\dot{V}_{des}	Auslegungsvolumenstrom
$Y +$	Grenzschichtauflösung

GRIECHISCHE BUCHSTABEN

α	Konstante in der Hämolyseberechnung
β	Konstante in der Hämolyseberechnung
β_1	Eintrittswinkel
ε	Strömungsabhängiger Korrekturwert zum Ω -Verfahren
η	Wirkungsgrad
ρ	Dichte
τ	Schubspannung
$\vec{\omega}$	Wirbelstärke
Ω	Ω -Kriterium