

# **Auslegung von Zentrifugalpumpen zur effizienten, drucksensitiven und atraumatischen Herzunterstützung**

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

vorgelegt von

Roland Graefe

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Steinseifer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Jeschke

Tag der mündlichen Prüfung: 13. April 2015



Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher

Univ.-Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Thomas Schmitz-Rode

**Roland Graefe**

---

**Auslegung von Zentrifugalpumpen  
zur effizienten, drucksensitiven und  
atraumatischen Herzunterstützung**

Ein Beitrag aus dem Institut für Angewandte Medizintechnik der RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Kardiovaskuläre Technik (Leitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Steinseifer).

---

**RWTHAACHEN**  
**UNIVERSITY**

---

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**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, 2015)

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4131-6

ISSN 1866-5349

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Lehr- und Forschungsgebiet Kardiovaskuläre Technik (CVE) im Institut für Angewandte Medizintechnik (AME) im Helmholtz Institut der RWTH Aachen.

Bei dem Institutsleiter Herr Prof. Schmitz-Rode möchte ich mich für Bereitstellung der Rahmenbedingungen bedanken.

Dem Leiter der Kardiovaskulären Technik, Herr Prof. Steinseifer, gilt mein besonderer Dank für die Betreuung dieser Arbeit, der Schaffung exzellenter Arbeitsbedingungen und der Schaffung einer motivierenden, angenehmen Arbeitsatmosphäre.

Herr Prof. Jeschke danke ich für die Übernahme der Berichterfunktion.

Ein weiterer Dank gilt den Kollegen am Institut für die wundervolle und enge Zusammenarbeit über die Jahre, die Unterstützung und nicht zuletzt die konstruktive Kritik. Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Studenten, deren Ergebnisse zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Zuletzt möchte ich mich herzlichst bei meiner Familie für die Unterstützung bedanken und meinen Bruder Richard hervorheben, der in vielen Aspekten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.



## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Stand der Technik.....	3
2.1	Herzerkrankungen und klinische Relevanz .....	3
2.2	Mechanische Herzunterstützung .....	5
2.3	Wirkungsgrad, Drucksensitivität und atraumatische Herzunterstützung .....	10
3	Numerische Strömungssimulation von Rotationsblutpumpen .....	23
3.1	Theoretischer Hintergrund .....	23
3.2	Sensitivitätsstudien zu Simulationseinstellungen .....	32
3.3	Vergleich von Kennlinien und Geschwindigkeitsverteilungen mit eigenen Messergebnissen.....	37
3.4	Vergleich von vorhergesagter Bluttraumatisierung mit publizierten Messergebnissen.....	57
3.5	Bewertung .....	60
4	Statistische Versuchsplanung, Regression und Optimierung.....	63
4.1	Statistische Versuchsplanung.....	63
4.2	Regression .....	66
4.3	Bewertung der verwendeten Regressionsmodelle.....	68
4.4	Modell-basierte Optimierung .....	72
5	Analytische Auslegung .....	75
5.1	Allgemeine Vorgehensweise .....	75
5.2	Auslegung von Laufrad und Leitelementen .....	77
5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	91
6	Numerische Auslegung für eine effiziente Herzunterstützung.....	93
6.1	Statistischer Versuchsplan.....	93
6.2	Numerische Ergebnisse.....	100
6.3	Diskussion der Vorgehensweise und der Ergebnisse.....	117

---

7	Numerische Auslegung für eine drucksensitive Herzunterstützung .....	127
7.1	Statistischer Versuchsplan .....	127
7.2	Numerische Ergebnisse .....	132
7.3	Diskussion der Vorgehensweise und der Ergebnisse .....	139
8	Numerische Analyse der Bluttraumatisierung in radialen Spalten .....	145
8.1	Statistischer Versuchsplan .....	146
8.2	Analytische Betrachtung .....	154
8.3	Numerische Ergebnisse .....	155
8.4	Diskussion der Vorgehensweise und der Ergebnisse .....	167
9	Zusammenfassende Diskussion .....	173
9.1	Gleichzeitige Betrachtung der Effekte auf die drei Zielgrößen .....	173
9.2	Wahl des Spiralentyps .....	178
10	Zusammenfassung und Ausblick .....	179
10.1	Zusammenfassung .....	179
10.2	Ausblick .....	181
11	Literaturverzeichnis .....	182
12	Anhang .....	188
12.1	Konstruktionsparameter der experimentell untersuchten Pumpenkonfiguration .....	188
12.2	Querschnittszeichnung des PIV-Prüfstandes und Testkreislaufes .....	188
12.3	Daten-Träger .....	191