

# **Neuartige Messmethode zur zeitlichen und örtlichen Erfassung der wandnahen Strömung in der Biofluidmechanik**

von Diplom-Ingenieurin  
Perrine Debaene  
aus La Gorgue

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

Doktorin der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Günter Clauss

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Christian Oliver Paschereit

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Affeld

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 22 April 2005

Berlin 2005  
D83



Berichte aus der Strömungstechnik

**Perrine Debaene**

**Neuartige Messmethode zur  
zeitlichen und örtlichen Erfassung  
der wandnahen Strömung  
in der Biofluidmechanik**

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag  
Aachen 2005

**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2005

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4116-7

ISSN 0945-2230

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) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand zwischen 2002 und 2004 während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Labor für Biofluidmechanik der Charité, Universitätsmedizin Berlin, unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Affeld. Die Arbeit wurde von der Studienstiftung des deutschen Volkes gefördert, bei der ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken möchte. Durch diese Förderung hatte ich die Gelegenheit, an hochinteressanten Veranstaltungen teilzunehmen, die sehr zu meiner Integration in Deutschland beitrugen und mir die Möglichkeit gaben, einen "Blick über den Tellerrand" zu werfen.

Gedankt sei in erster Linie meinen beiden Betreuern, Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Affeld und Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Oliver Paschereit, die mit großem Interesse die Fortschritte meiner Arbeit begleiteten.

Mein Dank gilt auch Herrn Dr.-Ing. Ulrich Kertzsch, der mich mit vielen Anregungen und wertvollen Diskussionen unterstützte. Herrn Dr.-Ing. Leonid Goubergrits sei für die Strömungsberechnungen und seine Unterstützung ebenso herzlich gedankt.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die gute Zusammenarbeit, insbesondere bei Herrn cand.-Ing. Johannes Grosshauser sowie bei meinem „Sprachlehrer“ Herrn Dipl.-Ing. Tobias Timmel. Ein ganz spezieller Dank gilt zudem Herrn Dr.-Ing. Axel Seeger, dessen vielseitige Hilfe sehr zum Gelingen dieser Arbeit beitrug.

Allen, die mir auf beiden Seiten der deutsch-französischen Grenze während meines Aufenthalts in Berlin halfen, ein herzliches Dankeschön, speziell an Herrn Dipl.-Ing. Jens Vierke für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Meinen Eltern sowie meinen Geschwistern schulde ich für ihre bedingungslose Unterstützung über all diese Jahre einen liebevollen Dank.

Mein besonderer Dank gilt meinem Partner Alexandre Etasse, der trotz Entfernung und anderer logistischer Probleme stets an meiner Seite war, und mich mit vollem Verständnis und endloser Geduld auf diesem langen Weg begleitete.

*Meinen Eltern gewidmet / A mes parents*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>Englische Zusammenfassung</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Einleitung: Motivation der vorliegenden Arbeit</b> .....	<b>9</b>
<b>2 Hintergrund</b> .....	<b>13</b>
2.1 Anatomische und physiologische Grundlagen.....	13
2.1.1 Das Blut als strömendes Medium .....	13
2.1.2 Der menschliche Blutkreislauf.....	16
2.1.3 Aufbau der Blutgefäße.....	17
2.2 Zusammenhang zwischen pathologischen Veränderungen und Strömungsbedingungen.....	18
2.2.1 Strömungsablösungen und Rezirkulationen.....	18
2.2.2 Transportphänomene.....	20
2.2.3 Zelldeformation durch Scherströmung .....	21
2.2.4 Einfluss der Strömung auf die Endothel- und die Glattmuskelzellen.....	22
2.2.5 Einfluss der Schubspannung auf die Thrombozyten.....	24
2.2.6 Zusammenfassung.....	27
<b>3 Stand der Technik bei der Erfassung der wandnahen Strömung</b> .....	<b>29</b>
3.1 Verfügbare Methoden .....	29
3.1.1 Punktmethoden .....	30
3.1.2 Flächenmethoden .....	32
3.1.3 Sonstige Methoden.....	37
3.2 Erfassung der wandnahen Strömung in der Biofluidmechanik.....	37
<b>4 Methode</b> .....	<b>39</b>
4.1 Messprinzip des neuen Verfahrens .....	39
4.2 Partikel .....	41
4.2.1 Lichtreflexionseigenschaften .....	41
4.2.2 Form- und Größeneigenschaften, Monodispersität.....	42
4.2.3 Partikelfolgevermögen.....	44
4.2.4 Verwendete Partikel.....	51
4.3 Aufnahmetechnik und Beleuchtung.....	52
4.3.1 Kamera .....	52
4.3.2 Lichtquelle .....	53
4.3.3 Einstellparameter der Geräte.....	54
4.4 Modellfluid .....	55
4.4.1 Färbung des Modellfluids .....	55
4.4.2 Farbkonzentrationen und Lichteindringtiefe.....	58
4.4.3 Verwendetes Modellfluid.....	59

4.5	Abhängigkeit des Grauwerts vom Wandabstand .....	59
4.5.1	Theoretische Überlegungen .....	60
4.5.2	Versuchsaufbau .....	60
4.6	Bildverarbeitung zur Auflösung der beleuchteten Strömungsschicht.....	62
4.6.1	Beleuchtungskorrektur / Bildvorverarbeitung.....	63
4.6.2	Trennung der Partikelschichten .....	65
4.7	Bestimmung der Wandscherrate .....	68
4.7.1	Geschwindigkeitsbestimmung mittels PIV .....	68
4.7.2	Geschwindigkeitskorrektur zur Berücksichtigung der Wölbung der Oberfläche.....	76
4.7.3	Berechnung der Wandscherrate aus der Geschwindigkeitsmessung .....	79
<b>5</b>	<b>Validierung des Verfahrens .....</b>	<b>81</b>
5.1	Vorgehensweise .....	81
5.2	Einfache, stationäre Strömung an ebenen Wänden.....	84
5.2.1	Modellströmung .....	84
5.2.2	Durchgeführte Experimente.....	88
5.2.3	Auswertung .....	90
5.2.4	Ergebnisse .....	92
5.3	Pulsatile Strömung an ebenen Wänden.....	93
5.3.1	Modellströmung .....	93
5.3.2	Durchgeführte Experimente.....	96
5.3.3	Auswertung .....	98
5.3.4	Ergebnisse .....	100
5.4	Komplexe, stationäre Strömung an ebenen Wänden .....	103
5.4.1	Modellströmung .....	103
5.4.2	Durchgeführte Experimente.....	110
5.4.3	Auswertung .....	111
5.4.4	Ergebnisse .....	113
5.5	Komplexe, stationäre Strömung an gewölbten Wänden.....	123
5.5.1	Modellströmung .....	123
5.5.2	Durchgeführte Experimente.....	128
5.5.3	Auswertung .....	129
5.5.4	Ergebnisse .....	132
5.6	Zusammenfassung.....	141
<b>6</b>	<b>Diskussion und Ausblick.....</b>	<b>143</b>
6.1	Grenzen des Verfahrens .....	143
6.1.1	Partikelgröße .....	143
6.1.2	Partikelmigration.....	144
6.1.3	Partikelvolumenanteil, räumliche Auflösung .....	145
6.1.4	Maximal erfassbare Geschwindigkeit .....	146
6.1.5	Bildverarbeitung .....	147

6.2 Mögliche Erweiterungen des Messverfahrens .....	148
6.2.1 Erweiterung des Messverfahrens zur Strömungsuntersuchung an festen, beliebig gewölbten Wänden.....	148
6.2.2 Erweiterung des Verfahrens zur Erfassung der dreidimensionalen Geschwindigkeit .....	151
6.3 Ausblick .....	153
6.3.1 Anwendung des neuartigen Verfahrens zur Strömungsuntersuchung an bewegten Wänden.....	153
6.3.2 Anwendung des neuartigen Verfahrens zur Strömungsuntersuchung bei turbulenten Bedingungen.....	154
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>155</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>163</b>