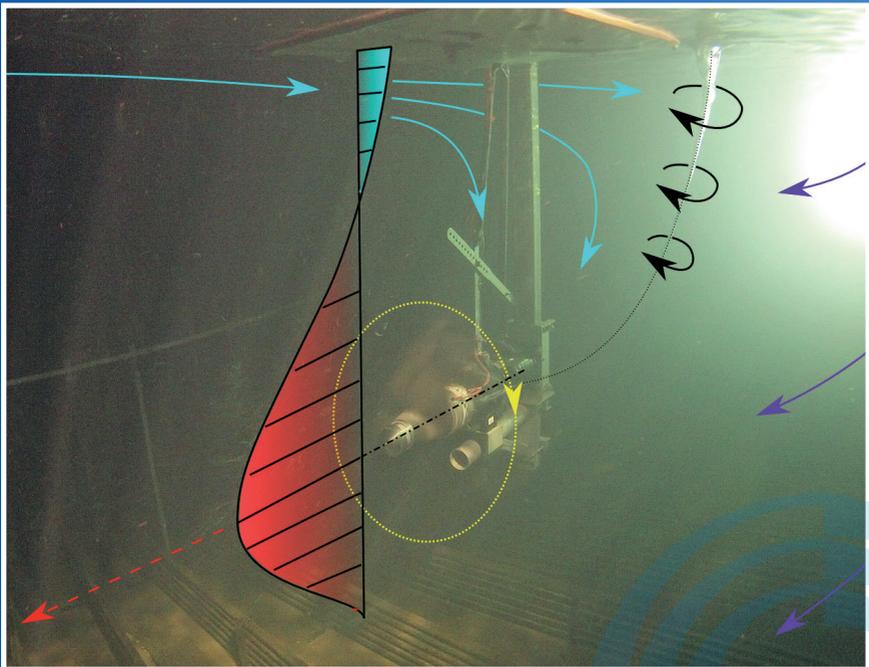


# Simulation der Rotordynamik gehäuse- loser Strömungsmaschinensysteme mit flexiblen Rotorblättern im Zeitbereich

Entwicklung eines Modellierungsansatzes und experimentelle  
Validierung anhand eines Tauchmotorrührwerkes

Dr.-Ing. Andre Laß

Universität  
Rostock  Traditio et Innovatio



Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio

SIMULATION DER ROTORDYNAMIK GEHÄUSELOSER  
STRÖMUNGSMASCHINENSYSTEME MIT FLEXIBLEN  
ROTORBLÄTTERN IM ZEITBEREICH

*Entwicklung eines Modellierungsansatzes und experimentelle Validierung anhand eines  
Tauchmotorrührwerkes*

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

an der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik  
der Universität Rostock

**vorgelegt von**

Andre Laß  
aus Rostock

Rostock, 2019

**Gutachter:**

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

Prof. Dr.-Ing. Moustafa Abdel-Maksoud, Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH),  
Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie

**Jahr der Einreichung:** 2019

**Jahr der Verteidigung:** 2019

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Strömungsmaschinen

**Andre Laß**

**Zur transienten Simulation des rotordynamischen  
Verhaltens gehäuseloser Strömungsmaschinen  
mit flexiblen Rotorblättern**

Entwicklung eines Modellierungsansatzes und experimentelle  
Validierung anhand eines Tauchmotorrührwerkes

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., 2019

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 978-3-8440-8725-3

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

# Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Strömungsmaschinen und verdankt Ihre Fertigstellung der Hilfe und dem Zuspruch eines großen Personenkreises.

In erster Linie danke ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank-Hendrik Wurm für das in mich gesetzte Vertrauen und die Möglichkeit zur Promotion. Für die Übernahme des Zweitgutachtens danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Moustafa Abdel-Maksoud. Ein besonderes Dank gilt Dr.-Ing. Jitendra Kumar. Seine Dissertation zur Fluid-Struktur-Interaktion und seine Ideen zur Simulation der Rotordynamik inspirierten das von der KSB-Stiftung geförderte und mit dieser Arbeit abgeschlossene Forschungsprojekt.

Für die Möglichkeit zur Nutzung des Rundlaufkanals am Lehrstuhl für Strömungsmechanik und die Unterstützung während der Durchführung der experimentellen Untersuchungen möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Sven Grundmann und Dr.-Ing. Andreas Wolter herzlich danken.

Des Weiteren bedanke ich mich bei all meinen Kolleg\*innen vom Lehrstuhl für Strömungsmaschinen, welche mir mit einer Vielzahl fachlicher Diskussionen und freundschaftlichen Gesprächen zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Allen Werkstattmitarbeitern, insbesondere Herrn Jörn Zimmermann und Herrn Michael Gabel, gilt mein Dank für die Fertigung und Montage des Prüfstandes zur experimentellen Untersuchung des Tauchmotorrührwerkes.

Zum Abschluss danke ich meiner Familie, besonders meiner Lebensgefährtin Julia und unseren gemeinsamen Kindern, für ihre moralische Unterstützung und Ihren Glauben an meine Fähigkeiten sowie die Geduld bis zur Fertigstellung dieser Arbeit.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergründe und Motivation	1
1.2 Stand der Forschung	4
1.2.1 Modellierung der Dynamik rotierender Maschinenteile und elektrischer Maschinen	4
1.2.2 Strömungsmechanische Berechnung von Propeller und Rotor	7
1.2.3 Kopplungsmethoden zur Simulation der Fluid-Struktur-Interaktion	11
1.3 Ziel und Lösungsansatz der Arbeit	13
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>15</b>
2.1 Bondgraphen	15
2.1.1 Konzept und multidisziplinärer Charakter	15
2.1.2 Elemente und Zwangsbindungen	17
2.1.3 Kausalität und Bewegungsgleichungen	21
2.2 Grundlagen der Tragflächentheorie	23
2.2.1 Potentialtheoretische Grundlagen	23
2.2.2 Integralgleichung der Tragflügelumströmung	24
2.3 Fluid-Struktur-Interaktion	26
2.3.1 Uni- und bidirektionale Kopplung	26
2.3.2 Lösungsverfahren der bidirektionalen FSI	27
<b>3 Numerische Modelle und Methoden</b>	<b>28</b>
3.1 Bondgraph-Modelle	28
3.1.1 Rotierende Welle	28
3.1.2 Wälzlager	33
3.1.3 Umlaufrädergetriebe	36
3.1.4 Rotornabe mit flexiblen Rotorblättern	38
3.1.5 Asynchronmaschine	41
3.2 Instationäres Wirbelgitterverfahren für Propeller und Rotoren	44
3.2.1 Definition der Tragfläche eines Rotorblattes	44
3.2.2 Diskretisierung der Trag- und Nachlauffläche	45
3.2.3 Numerische Lösung der Integralgleichungen	47
3.2.4 Instationäre Modellierung der Wirbelschlepe und Desingularisierung	50
3.2.5 Hydrodynamische Lasten und dimensionslose Kennwerte	52

3.3	Kopplungsansatz der Fluid-Struktur-Interaktion . . . . .	55
3.3.1	Bündelung der hydrodynamischen Lasten . . . . .	55
3.3.2	Übertragung der Rotorblattverformungen . . . . .	56
3.3.3	Zeitliche Diskretisierung und Kopplung . . . . .	57
3.3.4	Numerische Stabilität . . . . .	59
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchung eines Tauchmotorrührwerkes</b>	<b>61</b>
4.1	Prüfstandskomponenten und -aufbau . . . . .	61
4.1.1	Prüfung: Tauchmotorrührwerk . . . . .	61
4.1.2	Rundlaufkanal und Messaufbau . . . . .	64
4.2	Experimentelle Methoden . . . . .	65
4.2.1	Ermittlung der Schubkräfte . . . . .	66
4.2.2	Ermittlung der axialen Anströmgeschwindigkeiten . . . . .	66
4.2.3	Dehnungsmessung auf dem Rotorblatt . . . . .	67
4.2.4	Messungen der Rotorverschiebungen . . . . .	69
4.2.5	Messunsicherheiten und Fehlerfortpflanzung . . . . .	71
4.3	Messergebnisse . . . . .	73
4.3.1	Anfahrverhalten und instationärer Betrieb . . . . .	73
4.3.2	Axiale Anströmgeschwindigkeiten . . . . .	74
4.3.3	Schub und Drehmoment . . . . .	77
4.3.4	Dehnungen . . . . .	78
4.3.5	Rotorverschiebungen . . . . .	79
<b>5</b>	<b>Numerische Untersuchung des Tauchmotorrührwerkes</b>	<b>81</b>
5.1	Bondgraphmodell des Tauchmotorrührwerkes . . . . .	82
5.1.1	Modellierung des Antriebsstrangs . . . . .	82
5.1.2	Anfangs- und Randbedingungen . . . . .	83
5.2	Validierung der Fluid-Struktur-Interaktion . . . . .	86
5.2.1	Strukturdomäne: Rotorblatt-Bondgraph-Modell . . . . .	86
5.2.2	Fluiddomäne: I2VL . . . . .	90
5.2.3	Ergebnisse des FSI-Ansatzes . . . . .	94
5.3	Dynamik des Tauchmotorrührwerkes . . . . .	97
5.3.1	Anfahrvorgang . . . . .	97
5.3.2	Kontinuierlicher Betrieb . . . . .	102
5.3.3	Ausgewählte hydrodynamische Randbedingungen . . . . .	106
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>113</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>A</b>	<b>Eingabeparameter des modellierten Tauchmotorrührwerkes</b>	<b>x</b>