

Universität
Rostock



Traditio

ENTWICKLUNG EINES VERSUCHSSTANDES ZUR
VALIDIERUNG NUMERISCHER MODELLE FÜR DIE
VORHERSAGE VON RAUMLUFTSTRÖMUNGEN

DISSERTATION
ZUR
ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES

DOKTOR-INGENIEUR (DR.-ING.)

DER FAKULTÄT FÜR MASCHINENBAU UND SCHIFFSTECHNIK
DER UNIVERSITÄT ROSTOCK

vorgelegt von

Dipl.Technomathematiker Henning Wranik geb. Timm

geboren am 03.03.1977 in Rostock, Deutschland
aus Rostock

Tag der Verteidigung: 15.7.2015

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Paschen
Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Meerestechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. Nikolai Kornev
Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Modellierung und Simulation

Rostocker Meerestechnische Reihe
herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Paschen

Band 9/2015

Henning Wranik

**Entwicklung eines Versuchsstandes
zur Validierung numerischer Modelle für
die Vorhersage von Raumluftrömungen**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4011-1

ISSN 1868-7636

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Meerestechnik der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock entstanden. Die dazu notwendige Finanzierung erfolgte zum großen Teil über Drittmittel die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der *Unternehmen Region*-Initiativen *MAPRO* und *POLAR* sowie vom Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) dankenswert bereit gestellt wurden.

Mein besonderer Dank richtet sich an den Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. Mathias Paschen für die wissenschaftlichen Freiheiten bei der Erörterung meines Dissertationsthemas, das dabei entgegengebrachte Vertrauen sowie die Unterstützung bei der abschließenden schriftlichen Umsetzung.

Ich danke den Mitarbeitern und Ehemaligen am Lehrstuhl für ein tolle Zeit, sowie insbesondere Sindy Laurat und Karsten Breddermann für das Korrekturlesen und hilfreiche Bemerkungen und Anregungen zu meiner Arbeit.

Ebenfalls bedanken möchte ich bei der Dr. Diestel GmbH sowie Dr. Siegfried Langhein für die Zusammenarbeit in mehreren geförderten Kooperationsprojekten, sowie den dazu notwendigen Umbaumaßnahmen im neu entstandenen Raumluftrömungslabor.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung - Motivation für die Arbeit	1
2. Numerische Untersuchungsmethoden anhand eines Beispiels	5
2.1. Geometrische Modellierung - Meshing	6
2.2. Beispiel für Lüftungskonzept eines Passagierraumes	8
2.2.1. Allgemeine Aufgabenstellung	8
2.2.2. Details zur Modellierung der Raumgeometrie	10
2.2.3. Simulation der Fensterdüse mit deren Verstellmöglichkeiten	13
2.3. Gesamtsimulation des Passagierraumes	16
2.3.1. Geometrieerstellung	18
2.3.2. Anmerkungen zur Durchführung der Simulationen	18
2.3.3. Strömungstechnische Ergebnisse	23
2.4. Zusammenfassung	26
3. Entwicklung eines Vergleichsexperimentes	27
3.1. Konstruktion des Raumluftrömungslabors	28
3.1.1. Flächenelemente	28
3.1.2. Raumkonzept	28
3.2. Lüftungskonzept	31
3.2.1. Umluft-Belüftung	31
3.2.2. Volumenstromregelung	31
3.2.3. Luftkanäle	33
3.2.4. Regulierungsklappe	33
3.2.5. Anschlusskasten	33
3.2.6. Ablufteinheiten	34
3.3. Messtechnikkonzept	35
3.3.1. Strömungserfassung im Raumluftrömungslabor	35
Particle Image Velocimetry - PIV-Lasermesssystem	36
Traversierung	38
3.3.2. Volumenstrommessungen	38
Messdüse bzw. Volumenstromblende	40
Volumenstromhaube	41
4. Messkonzeptumsetzung	45
4.1. Das PIV-System	45
4.1.1. Seeding	45
4.1.2. Laser	47
4.1.3. Kamera	50
Kalibration	52

4.1.4.	Fehlerbetrachtung für das PIV-System	54
	Traversierung x -Richtung	56
	Traversierung y -Richtung	57
	Traversierung z -Richtung	57
	Fehler durch Traversierung	57
	Anfangsausrichtung des PIV-Systems	58
	Vertikale Ausrichtung des Laserlichtschnittes (Rotation)	58
	Horizontale Ausrichtung des Lasers	59
	Laser-Target Ausrichtung	59
	Kameraausrichtung	60
	Fehlerzusammenfassung	62
4.2.	Messung der Volumenströme	63
4.2.1.	Zuluftvolumenstrommessung	63
4.2.2.	Ablufteinstellung und -volumenstrommessung	66
4.3.	Zusammenfassung	68
5.	Vergleichende Strömungsuntersuchungen	71
5.1.	Numerische Modellierung des Raumluftrömungslabors	72
5.2.	Lüftungsblenden als Untersuchungsobjekt	73
5.2.1.	Drallblende	73
5.2.2.	Lochgitterblende	74
5.3.	Experimente im RSL (Erste PIV-Versuchsreihe)	75
5.3.1.	Drallblende - Stellung gerade	78
5.3.2.	Lochgitterblende	81
5.3.3.	Schlussfolgerung aus den ersten Messungen	81
5.4.	Zweite PIV-Versuchsreihe	84
5.4.1.	Drallblende - Stellung gerade	85
5.4.2.	Lochgitterblende	85
5.5.	Untersuchungen am Anschlusskasten	87
5.5.1.	Simulationsmodell des Anschlusskastens	87
5.5.2.	CFD und PIV-Ergebnisse des Anschlusskastens im Vergleich	88
	Vergleich ohne montierte Lüftungsblende	89
	Vergleich mit Drallblende bei Stellung gerade	89
5.5.3.	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	89
5.6.	Dritte PIV-Versuchsreihe - Neuer Anschlusskasten	93
5.6.1.	Offener Anschlusskasten ohne Zuluftblende	94
5.6.2.	Drallblende mit Stellung gerade	96
5.6.3.	Vergleich der Ergebnisse mit und ohne Drallblende	99
5.6.4.	Vergleich des vereinfachten mit dem neuen Anschlusskas-	
	tenmodell	102
5.7.	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	104

6. Zusammenfassung und Ausblick	107
A. Anhang	109
A.1. Auswertung und Export/Import der Messdaten	109
Das PIV zu <i>CFX-Post</i> Konvertierungsprogramm	110
A.2. Anzahl der PIV-Bilder für die Mittelung	112
A.3. Tabellen	115
A.4. Ergebnisse der vergleichenden Untersuchungen	118
Literaturverzeichnis	130

Abbildungsverzeichnis

2.1. Strukturierte Block-Vernetzung mit <i>Ansys ICEM</i>	9
2.2. Automatische Vernetzung mit <i>Ansys ICEM</i>	9
2.3. CAD-Zeichnung des Aufenthaltsraumes	11
2.4. Lüftungsplan des Aufenthaltsraumes	11
2.5. Fenstersektion mit vergrößertem Ausschnitt der Fensterdüse. . .	12
2.6. Bemaßung des Fensterkastenbereichs	12
2.7. Zeichnung der Fensterdüse mit Zuluftanschlüssen	14
2.8. Foto eines Musters der Fensterdüse	14
2.9. Foto der verstellbaren Leitbleche im Auslassbereich der Fensterdüse	14
2.10. 2D-Berechnungen des Austrittsstrahls bei 0°, 45° und 90° Stellung	14
2.11. 2D-Rechnung des Luftvorhanges im Fensterkasten	17
2.12. Gittervergleich für die Ergebnisse bei 45° Stellung	17
2.13. Vergleich der Fensterkastengeometrie und des Rechengitters . .	19
2.14. Umgesetzte Geometrie des Passagierraumes	19
2.15. Monitorpunkte im Vergleich	21
2.16. Position der Monitorpunkte	21
2.17. Passagierraum mit Strömungslinien	25
2.18. Geschwindigkeiten in einer Höhe von 1,3m	25
2.19. Vergleich der Geschwindigkeiten innerhalb der Fensterkästen . .	25
3.1. Filter-Fan-Unit (FFU) der Firma Weiss GWE [Wei]	30
3.2. Aluminiumprofil	30
3.3. Innenraum vor und nach der Schwärzung	30
3.4. 3D-Ansicht des Raumluftströmungslabors	30
3.5. Lüftungskonzept des Raumluftströmungslabors	32
3.6. Anschlusskasten von innen	34
3.7. Ablufteinheit mit justierbarer Drosselklappe	35
3.8. Strömungsvergleich bei unterschiedlicher Abluftanordnung . . .	36
3.9. PIV-Grundprinzip	39
3.10. Traversierungen und Führungsschienen für Kameras und Laser .	39
3.11. Venturi-Rohr (Düse) [Tru94]	40
3.12. Messdüse [Tru94]	40
3.13. TSI AccuBalance Volumenstromhaube [tes12]	42
3.14. Volumenstromhauben mit Flügelradanemometer [Air11]	42
4.1. Seeding-Generator (<i>Flow Tracker 700 PR</i>) [Flo]	46
4.2. Doppelpuls laser	48
4.3. PIV-Partikelbilder	51
4.4. Target zur Maßstabsübertragung	53
4.5. Skizze zur Fehlerberechnung	53
4.6. Detail zum Ausrichtungsfehler	55
4.7. Ausrichtung der PIV-Kamera	62

4.8. Abluftmessung mit Volumenstromhaube im RSL	67
4.9. Vergleich der Abluftvolumenströme der Ablufteinheiten	69
5.1. Drallblende, <i>links</i> : Vorderansicht; <i>rechts</i> : Rückansicht	74
5.2. Lochgitterblende, <i>links</i> : Vorderansicht; <i>rechts</i> : Rückansicht	75
5.3. CFD-Geometriemodell des Raumluftrömungslabors	76
5.4. Drallblende Geometriemodell	76
5.5. Lochgitterblende Geometriemodell	76
5.6. PIV-Messfelder	77
5.7. Eingebaute Zuluftblenden	78
5.8. Vergleich der Simulationen mit grobem und feinem Rechengitter	82
5.9. Drallblende: Vergleich CFD und PIV für $y = 0mm$	82
5.10. Drallblende: Vergleich CFD und PIV für $y = 100mm$ und $400mm$	82
5.11. CFD-Ergebnisse mit und ohne poröses Medium	83
5.12. PIV-Ergebnis der Lochgitterblende bei $y = 0mm$	83
5.13. Messflächen in den verschiedenen Ebenen	85
5.14. Vergleich der CFD und PIV-Ergebnisse für die Drallblende	86
5.15. PIV-Messergebnisse unterhalb der Lochgitterblende	86
5.16. Eingebauter Anschlusskasten und die umgesetzte Geometrie	86
5.17. CFD-Simulation zur Bestimmung des Druckverlusts der Lochgitter	90
5.18. Geschwindigkeiten beim eingebauten Anschlusskasten ohne Zuluftblende (CFD, PIV)	90
5.19. Geschwindigkeiten beim eingebauten Anschlusskasten ohne Zuluftblende (CFD, Isofläche, PIV)	91
5.20. Geschwindigkeiten mit Drallblende	91
5.21. Messflächen in den verschiedenen Ebenen	93
5.22. Neuer Anschlusskasten ohne Lüftungsblende	95
5.23. Vergleich der Ergebnisse bei offenem Anschlusskasten für $y = 0mm$	95
5.24. Vergleich von Geschwindigkeitsprofilen beim offenen Anschlusskasten	95
5.25. Ergebnis der nicht-isothermen CFD-Simulation	97
5.26. Differenzprofile zwischen CFD und PIV-Ergebnis	97
5.27. Veranschaulichung der Unsymmetrie in der y -Koordinate	97
5.28. Vergleich der Ergebnisse für Drallblende mit Stellung gerade	98
5.29. Vergleich von Geschwindigkeitsprofilen für Drallblende	98
5.30. Differenz zwischen CFD und PIV-Ergebnis für die Drallblende	98
5.31. Veranschaulichung der leichten Unsymmetrie in der y -Koordinate	101
5.32. Differenz zwischen Maxima von CFD und PIV-Ergebnissen	101
5.33. Differenz zwischen gemittelten CFD und PIV-Ergebnissen	101
5.34. Vergleich des einfachen zum neuen Anschlusskasten ($y = 0mm$)	103
5.35. Geschwindigkeitsprofile des einfachen offenen Anschlusskastens	103
5.36. Vergleich des einfachen zum neuen Anschlusskasten ($x = 0mm$)	103

5.37. Einfacher Anschlusskasten mit Drallblende im Vergleich zum neuen Anschlusskasten bei $y = 0mm$	105
5.38. Geschwindigkeitsprofile des einfachen Anschlusskastens mit Drallblende	105
5.39. Einfacher Anschlusskasten mit Drallblende im Vergleich zum neuen Anschlusskasten bei $x = 0mm$	105
A.1. PIV-Daten zu <i>CFX-Post</i> Konvertierungsprogramm	112
A.2. PIV-Ergebnisse für verschiedene Mittelungen bei offenem Anschlusskasten	113
A.3. PIV-Ergebnisse für verschiedene Mittelungen bei der Drallblende	113
A.4. Ergebnisse bei offenem Anschlusskasten für $y = \pm 200mm$	118
A.5. Ergebnisse bei offenem Anschlusskasten für $y = \pm 300mm$	119
A.6. Geschwindigkeitsprofile für den offenen Anschlusskasten	120
A.7. Geschwindigkeitsprofile (nicht isotherm) für den offenen Anschlusskasten	121
A.8. Vergleich der Differenzen zwischen CFD und PIV-Ergebnis	122
A.9. Vergleich der Ergebnisse für die Drallblende bei $y = \pm 100mm$. .	123
A.10. Vergleich der Ergebnisse für die Drallblende bei $y = \pm 200mm$. .	124
A.11. Vergleich von Geschwindigkeitsprofilen für die Drallblende . . .	125
A.12. Vergleich der Differenzen zwischen CFD und PIV-Ergebnissen . .	126

Tabellenverzeichnis

2.1. Randbedingungen für Gesamtrechnung	16
3.1. Kalibrationsfaktoren k_i für Fächerdüse PRA-200	42
3.2. Kenndaten LCA 501	43
4.1. Druckmessdosen Kennwerte [MKSB], [MKSA]	64
4.2. Überblick Abluftvolumenströme	67
5.1. Messbereich der PIV-Aufnahmen	77
5.2. Messbereich der zweiten PIV-Versuchsreihe	85
5.3. Messbereich der 3. PIV-Versuchsreihe	93
5.4. Absolute und relative Differenzen der Geschwindigkeiten	104
A.1. Stoffwerte für Seedingflüssigkeit DEHS [Top]	115
A.2. Leistungsdaten des Solo 120 PIV-Lasers [New03]	115
A.3. Sichtbereiche der PIV-Kameraobjektive	115
A.4. PIV-Fehler Verteilung für Nikon 35mm Objektiv	116
A.5. Abluft-Volumenströme $[\frac{m^3}{h}]$ im Detail	117

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Einheit	Bezeichnung
α	[°]	Kamera-Sichtwinkel
α		Durchströmoeffizient
Δ		Differenzoperator
η	$[Pa \cdot s]; [\frac{kg}{m \cdot s}]$	Dynamische Viskosität
ρ	$[\frac{kg}{m^3}]$	Dichte
σ	[°]	Ausrichtungsfehlwinkel
A	$[m^2]$	Fläche
B	$[m]; [mm]$	Breite
E	$[J]$	Energie
E	$[m]; [mm]$	Entfernung
F		Fehler
g	$[9,81 \frac{m}{s^2}]$	Erdbeschleunigung
k		Kalibrationsfaktor
p	$[Pa]$	Druck
P	$[W]$	Leistung
s	$[m]; [mm]$	Weg, Verschiebung
t	$[s]; [h]$	Zeit
T	$[°C]; [K]$	Temperatur
v	$[\frac{m}{s}]$	Betrag der Geschwindigkeit
v^*		Geschwindigkeitsbeiwert
\check{v}	$[\frac{m}{s}]$	Bezugsgeschwindigkeit für v^*
\vec{v}	$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}$	Geschwindigkeitsvektor
V	$[m]; [mm]$	Versatz durch Fehlausrichtung
\dot{V}	$[\frac{m^3}{h}]$	Volumenstrom, VS
x, y, z	$[m]; [mm]$	kartesische Koordinaten
CFD		Computational Fluid Dynamics
FVM		Finite Volumen Methode
LDA		Laser-Doppler-Anemometrie
LW		Luftwechsel
PIV		Particle Image Velocimetry
RSL		Raumluftströmungslabor