

**Experimentelle Untersuchung von umfangunsymmetrischen
Dampfturbinenbeschaufelungen und von Temperatur-
ausgleichsphänomenen an einer 2-stufigen Versuchsturbine**

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

vorgelegt von

Stephan Andreas Schwab

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Christian Wirsum
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Jeschke

Tag der mündlichen Prüfung: 7. Juli 2014

Berichte aus der Energietechnik

Stephan Andreas Schwab

**Experimentelle Untersuchung von umfangs-
unsymmetrischen Dampfturbinenbeschaufelungen
und von Temperatenausgleichsphänomenen
an einer 2-stufigen Versuchsturbine**

Shaker Verlag
Aachen 2014

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, 2014)

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3011-2

ISSN 0945-0726

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kraftwerkstechnik, Dampf- und Gasturbinen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Mein Dank gilt dem Institutsleiter Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Wirsum für die Unterstützung bei dieser Arbeit. Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Jeschke für die Übernahme des Korreferats. Für die freundliche Durchführung des Prüfungsvorsitzes danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhold Kneer.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Bohn möchte ich ebenfalls meinen Dank aussprechen. Er initiierte das Forschungsprojekt, welches die Grundlage der vorliegenden Arbeit gewesen ist. Er trug mit der mir gewährten wissenschaftlichen Freiheit zum Gelingen der Arbeit bei. Ferner danke ich Herrn Oberingenieur Joachim Funcke, Dr.-Ing. Michael Sell, Dr.-Ing. Jochen Gier und Dr.-Ing. Inga Mahle für die fachlichen Diskussionen während meiner Arbeit.

Mein Dank gilt weiterhin allen studentischen Hilfskräften, Studien-, Diplom-, Projekt-, Bachelor- und Masterarbeitern/-innen ohne deren Einsatz und zum Teil unkonventionellen Ideen der Erfolg der Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Besonders hervorheben möchte ich die Studenten Dipl.-Ing. Michael Mörsch und Dipl.-Ing. Marc Esser. Gleichermassen möchte ich an dieser Stelle die gute Zusammenarbeit mit der Werkstatt betonen. Hans-Peter Nießen hatte als Werkstattleiter stets den Erfolg des Projektes im Sinn. Markus Riemschoß als Monteur der Versuchsturbine und Muzaffer Karayazi waren ein wesentlicher Bestandteil zur erfolgreichen Durchführung der Versuche.

Abschließend bedanke ich mich bei meinen Eltern und bei meiner ganzen Familie für die Unterstützung. Vor allem aber gilt mein Dank meiner Frau Özlem, nur durch ihre Geduld, ihr Einfühlungsvermögen in stressigen Phasen und ihre fortwährende Unterstützung war der Erfolg der vorliegenden Arbeit möglich.

Moers, im August 2014

Stephan Schwab

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Formel- und Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
1.1 Vorgehensweise	3
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Forschung	5
2.1 Sekundärströmungsphänomene und -modelle	5
2.2 Passive Methoden zur Reduzierung der Sekundärströmung.....	10
2.2.1 Grenzschnittzäune	10
2.2.2 Dreidimensionale Schaufelgestaltung.....	13
2.2.3 Seitenwandkonturierung	17
2.2.3.1 Nicht-achssymmetrische Seitenwandkonturierung	20
2.2.3.2 Untersuchte Konturierung in dieser Arbeit	29
2.2.4 Leckageströmung und Leckage-/Hauptströmungsinteraktion	32
2.3 Zusammenfassung und Fazit.....	35
3 Versuchseinrichtung und -turbine.....	37
4 Messtechnik und Auswerteverfahren	49
4.1 Druckmesstechnik	49
4.2 Pneumatische Druckmesssonden	52
4.2.1 Funktionsprinzip und Sondenbau	52
4.2.2 5-Loch-Sonden.....	53
4.2.3 Entwicklung und Kalibrierung einer Quasi-3-Loch-Sonde	54
4.2.4 Entwicklung und Winkeltoleranzbereich der Totaldruck-Sonde.....	56
4.3 Temperatur-Sonden.....	59
4.4 Behandlung der Sondendaten.....	61

4.4.1	1D-Mittelung	61
4.4.2	Verwendung einer Stoffwertdatenbank	63
4.5	Profildruckmessungen - Installation und Anordnung der Messtellen.....	64
4.6	Bestimmung des Leckagemassenstroms	67
4.6.1	Labyrinthdruckmessung.....	69
4.6.2	Radialspaltnessung	70
4.7	Ermittlung der Leistung	71
4.8	Messdatenerfassung	74
5	Vergleich der Basis- und der seitenwandkonturierten Beschau felung	79
5.1	Definition der Betriebspunkte	79
5.2	Stabilität des Betriebspunktes, Reynoldszahl-, Machzahl-Niveau und EnthalpiekenngröÙe.....	82
5.3	Leckagemassenstrom	88
5.4	Wirkungsgrade	93
5.5	Detailbetrachtungen	100
5.5.1	Umfangswinkel und sekundäre kinetische Energie	100
5.5.2	Profildruckverteilungen	108
5.6	Interpretation und Fazit	112
6	Untersuchung zum Ausmischungsverhalten einer Heißgassträhne.....	115
6.1	Einleitung.....	115
6.1.1	Bisherige Arbeiten zur Ausmischung von Heißgassträhnen	117
6.1.2	Zusammenfassung und Fazit	121
6.2	Umbaumaßnahmen am Prüfstand	121
6.2.1	Konzepte zur Realisierung der Heißgassträhnenzufuhr.....	121
6.2.2	Umsetzung des Zuführungssystems für das Heißgas	123
6.2.3	Eingesetzte Messtechnik und Positionierung	129
6.2.4	Auswirkungen der Umbaumaßnahmen auf das Maschinenverhalten.....	135
6.2.5	Versuchsdurchführung und Vorgehen bei Auswertung.....	138

6.2.5.1	Bezugstemperatur	138
6.2.5.2	Interpolation, Spline und Korrekturfunktion	138
6.2.5.3	Ausmischungskriterium	139
6.3	Darstellung und Analyse der Messergebnisse	141
6.3.1	Temperaturfeld vor Leitrad LE1	141
6.3.2	Tangentialer Temperaturverlauf in den Messebenen	142
6.4	Weitere Aspekte des Ausmischungsverhaltens	151
6.4.1	Auswirkung des Betriebspunktes	151
6.4.2	Einfluss des Heißgasmassenstroms	154
6.5	Fazit	156
7	Zusammenfassung und Ausblick	159
A	Messunsicherheit	162
A.1	Unsicherheit der Temperaturmessung	163
A.2	Unsicherheit der Druckmessung	168
A.3	Unsicherheit in der Messung des Wirkungsgrades	175
A.4	Unsicherheit in der Messung des Radialspaltes	177
B	Verfahren zur Messung der Strömung mit Drucksonden	180
B.1	Kalibrierung - Eichräume	180
B.1.1	Mathematisches Vorgehen	186
B.1.2	Ablauf der Iteration	187
B.1.3	Konvergenz der Iteration	189
C	Messstellenpläne	191
D	Reynoldszahlberechnung zwischen Leit- und Laufrad	195
E	Korrekturfunktion für die Temperaturmaxima der Heißgassträhne	198
F	Literaturverzeichnis	201