

Numerische Analyse des Einflusses von geöffneten und geschlossenen
Deckband-Kavitäten auf die Strömung in Hochdruckdampfturbinen

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

vorgelegt von

Christian Tümmers

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Christian Wirsum
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Bohn
Tag der mündlichen Prüfung: 31.10.2012

Berichte aus der Energietechnik

Christian Tümmers

**Numerische Analyse des Einflusses von
geöffneten und geschlossenen Deckband-Kavitäten
auf die Strömung in Hochdruckdampfturbinen**

Shaker Verlag
Aachen 2013

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, 2012)

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2157-8

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 Angestellter am Institut für Dampf- und Gasturbinen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Besonders danke ich Herrn Universitätsprofessor Dr.-Ing. Dieter Bohn für die Unterstützung bei dieser Arbeit, die fachlich interessanten Anregungen sowie die vielseitigen Erfahrungen, die ich im Laufe meiner Tätigkeit am Institut für Dampf- und Gasturbinen sammeln durfte.

Für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferates bedanke ich mich herzlich bei Herrn Universitätsprofessor Dr.-Ing. habil. Manfred Wirsum vom Institut für Kraftwerkstechnik, Dampf- und Gasturbinen der RWTH Aachen. Bei Herrn Universitätsprofessor Dr.-Ing. Dirk Müller bedanke ich mich für die Übernahme des Beisitzes der Prüfungskommission und bei Herrn Universitätsprofessor Dr.-Ing. Achim Kampker für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Weiterhin gilt mein Dank allen Kollegen und Mitarbeitern des Instituts für Dampf- und Gasturbinen für ihre stets kollegiale Zusammenarbeit. Insbesondere danke ich den Oberingenieuren Herrn Dr.-Ing. Manfred Ziemann, Herrn Jochen Funke, Frau Dr.-Ing. Sabine Ausmeier und Herrn Dr.-Ing. Ingo Balkowski sowie meinen Kollegen in der Numerikgruppe Herrn Norbert Moritz, Herrn Dr.-Ing. Norbert Sürken, Herrn Dr.-Ing. Robert Krewinkel und Frau Dr. Jing Ren für die fruchtbaren Diskussionen während der gemeinsamen Zeit am Institut. Des weiteren gilt mein Dank allen weiteren wissenschaftlichen Mitarbeitern, dem Sekretariat, den Mitarbeitern der Werkstatt und des Elektroniklabors sowie allen studentischen Hilfskräften, Studien- und Diplomarbeitern des Instituts für Dampf- und Gasturbinen.

Besonders bedanken möchte ich mich bei den Industriepartnern Herrn Franz Kreitmeier und Herrn Dr. Michal Sell von Alstom Power für ihren fachlichen Austausch im Rahmen meiner Projektbearbeitung der AG-Turbo-Projekte 2.1.7-A (Förderkennzeichen 0327061E) und 2.3.10-B (Förderkennzeichen 0327091L). Mein Dank gilt natürlich auch der gesamten AG Turbo, insbesondere ihrer "guten Seele", Frau Roswitha Tesch.

Schließlich bedanke ich mich ganz besonders bei meiner gesamten Familie für die stete moralische Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit. Insbesondere danke ich meiner Frau Susanne. Durch ihre Geduld, ihr Verständnis, den gebotenen Rückhalt sowie ihre fortwährende Unterstützung hat sie ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.



Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	9
1. Einleitung	11
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	11
1.2 Technisch - physikalischer Hintergrund der Arbeit	12
1.3 Vorgehensweise	17
1.4 Stand der Forschung	18
1.5 Zusammenfassung	21
2. Darstellung der untersuchten Konfigurationen	23
2.1 Darstellung der Versuchsturbine "Olli" des Instituts für Dampf- und Gasturbinen und des daraus abgeleiteten Berechnungsgebiets	23
2.2 Untersuchte Beschaukelungen	24
2.2.1 Basisbeschaukelung	25
2.2.2 Erste optimierte Beschaukelung	25
2.2.1 Zweite optimierte Beschaukelung	26
2.3 Untersuchte Deckband-Konfigurationen	27
2.3.1 Basiskonfiguration A: ohne Berücksichtigung der Kavitäten	27
2.3.2 Konfiguration B: geöffnete axiale Spalte	28
2.3.3 Konfiguration C: geöffnete radiale Spalte	29
2.4 Untersuchte Schaufelbelastung	29
2.5 Zusammenfassung	30
3. Numerisches Rechenverfahren	33
3.1 Grundgleichungen	33
3.1.1 Integrale Form der Erhaltungsgleichungen	34
3.1.2 Konservative Form der Erhaltungsgleichungen in kartesischen Koordinaten	35
3.1.3 Transformation in beliebige Koordinaten	38
3.1.4 Transportkoeffizienten	40
3.2 Turbulenzmodellierung	41
3.2.1 Effektive Transportkoeffizienten	44
3.2.2 Baldwin-Lomax Turbulenzmodell	44
3.3 Anfangs- und Randbedingungen	46
3.4 Numerischer Lösungsalgorithmus	49
3.4.1 Zeitdiskretisierung	49
3.4.2 Jacobische Matrizen	51
3.4.3 Relaxation	52
3.4.4 Bestimmung der reibungsfreien Flüsse	54
3.4.5 Bestimmung der reibungsbehafteten Flüsse	56
3.4.6 Kopplung stehender und rotierender Systeme	57
3.5 Gittergenerierung	59

3.5.1	Grundstrukturen von Rechengittern	59
3.5.2	Behandlung der Geometrie und Gittergenerierung	61
3.6	Konvergenzbetrachtung	63
3.7	Zusammenfassung	64
4.	Validierung des numerischen Verfahrens	67
4.1	Konfiguration, Rechengitter und Randbedingungen	67
4.2	Aerodynamische Validierung	69
4.2.1	Radialverteilung des Totaldrucks	69
4.2.2	Radialverteilungen der Strömungswinkel	70
4.3	Zusammenfassung	72
5.	Einfluß dreidimensionaler Schaufelgestaltung	73
5.1	Charakteristische Strömungsverhältnisse im Schaufelkanal	73
5.2	Vergleich der Sekundärströmungsphänomene im Schaufelkanal	76
5.3	Radialverteilungen ausgewählter Strömungsgrößen am Austritt der Beschau felung und Vergleich mit experimentellen Ergebnissen	80
5.4	Einfluss der Schaufelgestaltung auf den Wirkungsgrad	82
5.5	Zusammenfassung	85
6.	Einfluss geöffneter axialer Spalte der Deckbandkavitäten	87
6.1	Einfluss der Kavitäten auf die charakteristischen Strömungsverhältnisse im Schaufelkanal	87
6.2	Strömungsphänomene in den Kavitäten	90
6.3	Einfluss geöffneter axialer Spalte auf das Strömungsbild am Austritt der Beschau felung	93
6.4	Einfluss geöffneter axialer Spalte auf den Wirkungsgrad	96
6.5	Zusammenfassung	98
7.	Einfluss geöffneter radialer Spalte der Deckbandkavitäten	101
7.1	Einfluss geöffneter radialer Spalte auf die charakteristischen Strömungsverhältnisse im Schaufelkanal	102
7.2	Strömungsphänomene in den Kavitäten sowie bei der Interaktion zwischen Kavitäten- und Hauptströmung	103
7.3	Einfluss geöffneter radialer Spalte auf das Strömungsbild am Austritt der Beschau felung	109
7.4	Einfluss geöffneter radialer Spalte auf den Wirkungsgrad	111
7.5	Zusammenfassung	112
8.	Zusammenfassung	115
9.	Literaturverzeichnis	121
Anhang A:	Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	127
A.1	Abbildungen	127
A.2	Tabellen	129