

Experimentelle und numerische Untersuchung des Einflusses von rotationssymmetrischen Seitenwandkonturen auf die Strömung in Regelstufen von Dampfturbinen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION
vorgelegt von

Nils Moser

aus Hamburg

Hamburg 2015

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Franz Joos
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Seume

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Januar 2015

Berichte aus dem Maschinenbau

Nils Moser

**Experimentelle und numerische Untersuchung
des Einflusses von rotationssymmetrischen
Seitenwandkonturen auf die Strömung in
Regelstufen von Dampfturbinen**

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.: Hamburg, Helmut-Schmidt-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 978-3-8440-3869-9

ISSN 0945-0874

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 Laboratorium für Strömungsmaschinen der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg. Für die gewährte Unterstützung möchte ich mich sehr herzlich bei Prof. Dr.-Ing. Franz Joos bedanken. Die Gespräche und Diskussionen mit ihm haben stets positiv dazu beigetragen, kleine und große Hürden während meiner Forschungszeit zu überwinden. Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Jörg Seume für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferats bedanken.

Besonders bedanken möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Laboratoriums für die kollegiale Zusammenarbeit und die vielen themennahen und -fernen Diskussionen. Allen voran erwähnen möchte ich hierbei die Kollegen und Freunde Lars Große, Manuel Clari, Sebastian Ulmer, Birger Ober und Martina Gerds. Besonders danke ich Hans-Joachim Dehne, ohne dessen sehr guten Ideen und tatkräftige Unterstützung die experimentelle Arbeit nicht denkbar gewesen wäre.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Verbundvorhabens COORETEC-turbo der AG Turbo durchgeführt und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMW) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 0327716Q gefördert. Ich danke der AG Turbo und der MAN Diesel & Turbo SE für die Unterstützung und die Erlaubnis zur Veröffentlichung. Besonderer Dank gilt Dr.-Ing. René Volkert, der durch seine Unterstützung und sein offenes Ohr für Diskussionen maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Für die fachliche Durchsicht des Manuskriptes danke ich Sebastian Ulmer. Danken möchte ich meinen Eltern für die Unterstützung und die Ermöglichung meiner Ausbildung. Nicht zuletzt danke ich Laura Selkow, die mich während dieser Arbeit stets unterstützt und motiviert hat.

Hamburg, 2015

Nils Moser

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|-------------|
| Abbildungsverzeichnis | V |
| Tabellenverzeichnis | XI |
| Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen | XIII |
| Kurzfassung | XVII |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Grundlagen | 3 |
| 2.1 Strömungsmaschinen | 3 |
| 2.1.1 Absolut- und Relativgeschwindigkeit, Geschwindigkeitsdreiecke | 3 |
| 2.1.2 Thermodynamische Grundlagen | 6 |
| 2.1.3 Dimensionslose Kennzahlen | 8 |
| 2.1.4 Regelung von Dampfturbinen | 15 |
| 2.1.5 Grenzschichten | 19 |
| 2.1.6 Sekundärströmungen in Schaufelkanälen | 21 |
| 2.2 Strömungssimulation | 24 |
| 2.2.1 Navier-Stokes-Gleichung | 24 |
| 2.2.2 Turbulenz | 26 |
| 2.2.3 Simulation von kompressiblen Strömungen | 36 |
| 2.2.4 Berechnungsgitter | 36 |
| 2.2.5 Konvergenz | 40 |
| 2.2.6 Identifikation von Sekundärströmungen | 41 |
| 2.3 Evolutionäre Optimierung | 44 |
| 2.3.1 Fitnesszuweisung | 44 |
| 2.3.2 Selektion | 46 |
| 2.3.3 Rekombination | 47 |
| 2.3.4 Mutation | 47 |
| 2.3.5 Konvergenzverhalten, Abbruchkriterium | 48 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3 | Stand der Technik | 49 |
| 3.1 | Rotationssymmetrische Konturierung | 49 |
| 3.1.1 | Untersuchungen an Kaskaden | 50 |
| 3.1.2 | Untersuchungen an Turbinen | 53 |
| 3.2 | Nicht rotationssymmetrische Konturierung | 55 |
| 3.2.1 | Untersuchungen an Kaskaden | 55 |
| 3.2.2 | Untersuchungen an Turbinen | 56 |
| 3.3 | Forschungsbedarf und Ableitung eines Forschungszieles | 64 |
| 4 | Auslegung einer optimalen Seitenwandkontur | 67 |
| 4.1 | Auslegung nach Dejc und Tronjanovskij | 67 |
| 4.2 | Optimierung mit genetischen Algorithmen | 67 |
| 4.2.1 | Geometrische Beschreibung des Problems | 68 |
| 4.2.2 | Der Optimierungsprozess | 69 |
| 4.2.3 | Ergebniss der Optimierung | 71 |
| 4.3 | Numerische Untersuchung der Stufe | 73 |
| 5 | Experimenteller Aufbau | 81 |
| 5.1 | Messtechnik | 81 |
| 5.1.1 | Druckmessung | 81 |
| 5.1.2 | Strömungsgeschwindigkeitsmessung | 82 |
| 5.1.3 | Drehmomentmessung | 91 |
| 5.1.4 | Drehzahlmessung | 91 |
| 5.2 | Beschreibung der Versuchsanlage | 91 |
| 5.3 | Beschreibung der Luftturbine | 94 |
| 5.3.1 | Druck- und Temperaturmessstellen | 96 |
| 5.3.2 | Geschwindigkeitsmessung mit LDA | 99 |
| 5.4 | Untersuchte Geometrien | 101 |
| 6 | Messergebnisse | 105 |
| 6.1 | Leistungs-, Druck- und Temperaturmessung | 105 |
| 6.1.1 | Reaktionsgrad | 105 |
| 6.1.2 | Wirkungsgradmessung | 106 |
| 6.1.3 | Profildruckmessung | 116 |
| 6.2 | LDA - Messungen | 124 |
| 7 | Einfluss der rotationssymmetrischen Seitenwandkonturierung auf den Strömungskanal | 141 |
| 7.1 | Prinzip des Querdiffusors | 141 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7.2 | Auslegungsverfahren | 143 |
| 7.3 | Numerische Untersuchung des Querdiffusors | 147 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 155 |
| | Literaturverzeichnis | 156 |
| A | Anhang | 163 |
| A.1 | Zusätzliche Abbildungen | 163 |
| A.2 | Angaben zum verwendeten Lasermesssystem | 164 |
| A.3 | Fehlerbetrachtung der Messung | 165 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Definition der Ebenen in einer Strömungsmaschine [Traupel, 2001] | 4 |
| 2.2 | Definition der Strömungsgeschwindigkeiten und -winkel in einer Strömungsmaschine [Traupel, 2001] | 5 |
| 2.3 | Enthalpieabbau in einer Turbinenstufe [Joos, 2007] | 9 |
| 2.4 | Abhängigkeit des Schaufelwirkungsgrades und des Abströmwinkels α_0 von Ψ einer einstufigen Gleichdruckturbine nach [Pfleiderer und Petermann, 2004] . . | 10 |
| 2.5 | Wirkungsgradverlauf über Durchflusszahl bei verschiedenen Leitschaufelabströmwinkel [Stoff, 2006] | 11 |
| 2.6 | Beschaufelungen von Axialturbinen verschiedener Reaktionsgrade [Joos, 2007] . | 14 |
| 2.7 | Dampfkegel [Joos, 2007] | 16 |
| 2.8 | h,s-Diagramm verschiedener Dampfturbinenregelungen [Menny, 2006] | 17 |
| 2.9 | Schema einer Drosselregelung [Fiedler, 1999] | 17 |
| 2.10 | Schema einer Düsengruppenregelung [Joos, 2007] | 18 |
| 2.11 | Grenzschichtdicke δ und Verdrängungsdicke δ_1 [Sigloch, 2008] | 19 |
| 2.12 | Grenzschichtbildung entlang der ebenen Platte [Sigloch, 2008] | 20 |
| 2.13 | Schematischer Verlauf der Grenzschicht einer Profilmströmung [Bräunling, 2009] | 21 |
| 2.14 | Sekundärströmungen in einer axialen Turbine nach [Joos, 2010] | 22 |
| 2.15 | Kanalwirbel in einer axialen Turbomaschine [Joos, 2010] | 23 |
| 2.16 | Verluste im Profilmachlauf durch den Kanalwirbel [Joos, 2010] | 23 |
| 2.17 | Hufeisenwirbel an der Schaufelvorderkante [Joos, 2010] | 24 |
| 2.18 | Klassifikation der Turbulenzmodelle | 29 |
| 2.19 | Schematische Darstellung eines unstrukturierten Netzes [jr. Oertel und Laurien, 2003] | 38 |
| 2.20 | Schematische Darstellung eines strukturierten Netzes [jr. Oertel und Laurien, 2003] | 38 |
| 2.21 | H-, C- und O-Netze in strukturierten Netzen [jr. Oertel und Laurien, 2003] . . . | 39 |
| 2.22 | Darstellung eines Blocks der transfiniten Interpolation [jr. Oertel und Laurien, 2003] | 39 |
| 2.23 | Blockstrukturiertes Gitter um eine Turbinenschaufel [jr. Oertel und Laurien, 2003] . | 40 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.24 | Prinzipieller Ablauf eines genetischen Algorithmus | 45 |
| 2.25 | Single-point Crossover bei Turbinengeometrien [Moser und Joos, 2010] | 47 |
| 3.1 | Beispiel einer rotationssymmetrischen (links) und nicht-rotationssymmetrisch (rechts) profilierten Seitenwand nach [Vogt, 2000] | 50 |
| 3.2 | Kontur des Gehäuses von [Kopper und Milano, 1981] | 50 |
| 3.3 | Über der Kanalbreite gemittelte Werte der Totaldruckverluste (a) und der Ab- strömwindwinkels (b) aufgetragen über der Kanalhöhe [Kopper und Milano, 1981] | 51 |
| 3.4 | Kontur des Gehäuses von [Dossena et al., 1999] | 52 |
| 3.5 | Schaufelprofil und Wandkontur nach [Duden et al., 1999] | 53 |
| 3.6 | Schaufelprofil und Wandkontur nach [Eyman et al., 2002] | 54 |
| 3.7 | Gemessene Absolutgeschwindigkeit nach der ersten Laufschaufelreihe aus [Ey- man et al., 2002] | 54 |
| 3.8 | Ölfilm auf Nabe von Turbinenschaufeln aus [Gregory-Smith et al., 2001] | 56 |
| 3.9 | Definition der Konturierung (a), Optimierungsergebnis für die Nabe der Leit- schaufel (b) nach [Germain et al., 2008] | 57 |
| 3.10 | Vergleich des Totaldruckverlustkoeffizienten ohne (a) und mit (b) aus [Germain et al., 2008] | 57 |
| 3.11 | Vergleich des Totaldrucks hinter der ersten Leitschaufelreihe ohne (3.11(a)) und mit (3.11(b)) konturierter Nabe und konturierter Gehäuse [Schuebenbach et al., 2008] | 58 |
| 3.12 | Vergleich der zeitgemittelten Wirbelstärke hinter den Laufschaufeln ohne (a) und mit (b) konturierter Nabe [Schuebenbach et al., 2008] | 59 |
| 3.13 | Parameter der Optimierung (a) und Ergebnis der Konturierung (b) von [Poehler et al., 2010] | 61 |
| 3.14 | In Umfangsrichtung gemittelter Verlustkoeffizient des Totaldruckes nach dem Leitrad [Poehler et al., 2010] | 62 |
| 3.15 | Isentroper Wirkungsgrad der Turbinenstufe in Umfangsrichtung gemittelt [Poeh- ler et al., 2010] | 62 |
| 3.16 | Stromröhren zur Bestimmung der Diffusorgestalt [Schobeiri und Lu, 2012] | 63 |
| 3.17 | Stromröhren zur Bestimmung der Diffusorgestalt [Schobeiri und Lu, 2012] | 64 |
| 4.1 | Einfluss der unsymmetrischen Einziehung auf die Verluste im Überdruckgitter [Dejc und Trojanovskij, 1973] | 68 |
| 4.2 | Beschreibung der Kanalgeometrie zur Optimierung [Moser und Joos, 2010] | 68 |
| 4.3 | Abblauf des genetischen Algorithmus nach [Moser und Joos, 2010] | 69 |
| 4.4 | Fitness Auswertung [Moser und Joos, 2010] | 70 |
| 4.5 | Multidimensionale Skalierung des Lösungsraums [Moser und Joos, 2010] | 72 |
| 4.6 | Vergleich der optimalen Konturen Ind02 und Ind56 [Moser und Joos, 2010] | 73 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.7 | Isometrische Darstellung des numerischen Modells mit Randbedingungen | 74 |
| 4.8 | Meridianschnitt Darstellung des numerischen Modells | 74 |
| 4.9 | Berechneter Durchsatz der Konturen Ind02 und Ind56 mit (“adjusted“) und ohne (“design“) Anpassung des Staffelungswinkels [Moser et al., 2011] | 76 |
| 4.10 | Berechneter Reaktionsgrad der Konturen Ind02 und Ind56 mit (“adjusted“) und ohne (“design“) Anpassung des Staffelungswinkels [Moser et al., 2011] | 77 |
| 4.11 | Berechnete Wirkungsgradsteigerung des Leitrades (Guidevane, GV) mit Anpassung des Staffelungswinkels [Moser et al., 2011] | 77 |
| 4.12 | Radiale Verteilung des Austrittswinkel am Leitrade in Abhängigkeit des Betriebspunktes [Moser et al., 2011] | 79 |
| 4.13 | Entropieproduktion am Düsenaustritt im Auslegungspunkt [Moser et al., 2011] | 80 |
| 5.1 | Prinzip Druckaufnehmer mit DMS | 82 |
| 5.2 | Optische Vorgänge an einem Teilchen [Zeß, 2011] | 83 |
| 5.3 | Lichtbrechung und -reflexion am Übergang zweier Medien unterschiedlicher Brechungsindizes [Zeß, 2011] | 84 |
| 5.4 | Vertikale Verschiebung des Messvolumens durch den Einfluss verschiedener Brechungsindizes [Zeß, 2011] | 84 |
| 5.5 | Prinzipieller Aufbau eines Laser-Doppler-Anemometers [Nitsche und Brunn, 2006] | 86 |
| 5.6 | Interferenzmuster zweier sich kreuzende Partialstrahlen | 87 |
| 5.7 | Prinzip einer 2-Farben-LDA Sonde [Nitsche und Brunn, 2006] | 88 |
| 5.8 | Schema eines 2-Farben-LDA Back-Scatter Systems [Nitsche und Brunn, 2006] | 89 |
| 5.9 | Reflexionen auf Scheibe und Gehäuse der Lasersonde verursacht durch Turbinenläufer und Glasscheibe [Zeß, 2011] | 89 |
| 5.10 | Vergleich der gemessenen Frequenzen bei reiner Reflexion und bei korrekter Geschwindigkeitsmessung [Zeß, 2011] | 90 |
| 5.11 | Schema der zentralen Druckluftversorgung | 92 |
| 5.12 | Schema des Versuchstandes | 94 |
| 5.13 | Längsschnitt des Versuchsträgers | 94 |
| 5.14 | Längsschnitt des Versuchsträgers | 95 |
| 5.15 | Umfangsverteilung der Messpositionen | 96 |
| 5.16 | Druckmessschaufel | 97 |
| 5.17 | Vergleich linke/rechte Messschaufel, $\pi = 1,6$, $n=3000$ 1/min | 97 |
| 5.18 | Vergleich linke/rechte Messschaufel, $\pi = 2,4$, $n=3000$ 1/min | 98 |
| 5.19 | Druckbohrung an der Außenwand zwischen zwei Schaufeln | 98 |
| 5.20 | Gemessene Lagerverlustleistung über Drehzahl | 99 |
| 5.21 | Position der Lasermessung | 100 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.22 | Traversenkoordinatensystem [Zeß, 2011] | 100 |
| 5.23 | Verwendetes Messgitter für LDA-Messung | 101 |
| 5.24 | Untersuchte Geometrie Ring 1 | 102 |
| 5.25 | Untersuchte Geometrie Ring 2 | 102 |
| 5.26 | Strömungsquerschnittsverlauf der betrachteten Geometrien [Moser et al., 2013] | 103 |
| 5.27 | Angepasster Staffelungswinkel Ring 3 | 103 |
| 6.1 | Gemessener Reaktionsgrad über Drehzahl, unterkritisches Druckverhältnis | 107 |
| 6.2 | Gemessener Reaktionsgrad über Drehzahl, überkritisches Druckverhältnis | 108 |
| 6.3 | Gemessenes Betriebskennfeld Ring 1 [Moser et al., 2013] | 109 |
| 6.4 | Gemessenes Betriebskennfeld Ring 2 [Moser et al., 2013] | 110 |
| 6.5 | Gemessenes Betriebskennfeld Ring 3 [Moser et al., 2013] | 110 |
| 6.6 | Gemessene Wirkungsgradveränderung über Druckverhältnis und Drehzahl für Ring 2 [Moser et al., 2013] | 111 |
| 6.7 | Gemessene Wirkungsgradveränderung über Druckverhältnis und Drehzahl für Ring 3 [Moser et al., 2013] | 112 |
| 6.8 | Gemessener Umfangswirkungsgrad über Laufzahl, unterkritisches Druckverhältnis | 114 |
| 6.9 | Gemessener Umfangswirkungsgrad über Laufzahl, überkritisches Druckverhältnis | 115 |
| 6.10 | Gemessener Umfangswirkungsgrad über Druckzahl, unterkritisches Druckverhältnis | 117 |
| 6.11 | Gemessener Umfangswirkungsgrad über Druckzahl, überkritisches Druckverhältnis | 118 |
| 6.12 | Gemessener Umfangswirkungsgrad über Durchflusszahl, unterkritisches Druckverhältnis | 119 |
| 6.13 | Gemessener Umfangswirkungsgrad über Durchflusszahl, überkritisches Druckverhältnis | 120 |
| 6.14 | Profildruckmessung, $\pi = 1,7$, $n = 3000$ 1/min [Moser et al., 2013] | 121 |
| 6.15 | Profildruckmessung, $\pi = 2,5$, $n = 3000$ 1/min [Moser et al., 2013] | 123 |
| 6.16 | Simulierte Stromlinien im Querschnittsprung | 125 |
| 6.17 | Gemessenes Strömungsfeld Betriebspunkt BP1, $\pi = 1,6$, $n=3000$ 1/min | 127 |
| 6.18 | Gemessenes Strömungsfeld Betriebspunkt BP2, $\pi = 2,4$, $n=3000$ 1/min | 129 |
| 6.19 | Gemessenes Strömungsfeld Betriebspunkt BP3, $\pi = 2,4$, $n=5000$ 1/min | 132 |
| 6.20 | Simulierte Austrittsgeschwindigkeitsverteilung Ring 1 für verschiedene Betriebspunkte | 136 |
| 6.21 | Simulierte Austrittsgeschwindigkeitsverteilung Ring 3 für verschiedene Betriebspunkte | 138 |

| | | |
|------|--|-----|
| 7.1 | Prinzip des Querdiffusors [Moser et al., 2013] | 142 |
| 7.2 | Isometrische Ansicht des Querdiffusors [Moser et al., 2013] | 142 |
| 7.3 | Abblaufplan Bestimmung des Querdiffusorwinkelverlaufs | 145 |
| 7.4 | Räumliche Darstellung der S-Ebenen | 145 |
| 7.5 | Diffusorwinkelverlauf Auslegung | 146 |
| 7.6 | Geometrie Diffusorwinkelenauslegung | 147 |
| 7.7 | Simulierte Leitradaustrittsgeschwindigkeit bei Auslegung nach dem Querdiffusorverfahren | 148 |
| 7.8 | Wandschubspannung und Oberflächenstromlinien auf der Leitschaufelsaugseite | 150 |
| 7.9 | λ_2 -Kriterium im Schaufelkanal, Wandschubspannung auf der Schaufeloberfläche | 151 |
| 7.10 | Totaldruck im Schaufelkanal | 153 |
| A.1 | Vergleich der Totaldruckverluste auf der relativen Kanalhöhe ($%h$) über der relativen Kanalbreite ($%S$) hinter der Kaskade von [Kopper und Milano, 1981] | 163 |
| A.2 | Abströmwinkel (hier β statt α) gemessen bei $x/l = 1.5$ ohne Kontur (T106D), mit erweiterten Schaufelenden (T106Cp) und mit konturiertem Gehäuse (T106Cc) aus [Duden et al., 1999] | 163 |
| A.3 | Darstellung der numerischen Simulation des statischen Druckes über der Saugseite und des Totaldruckes im Kanal auf etwa 50% Kanaltiefe; Vergleich von gerader (Baseline) und konturierter (Contoured) Nabe nach [Germain et al., 2008] | 164 |
| A.4 | Konturen aus [Germain et al., 2008] (1st Gen.) und [Schuebenbach et al., 2009] (2nd Gen.) | 165 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | | |
|-----|--|-----|
| 2.1 | Modellkonstanten des k - ϵ -Modells | 32 |
| 2.2 | Modellkonstanten des k - ω -Modells | 33 |
| 2.3 | Modellkonstanten des SST-Modell | 35 |
| 5.1 | Geometrische Kennzahlen der Luftturbine | 95 |
| 5.2 | Betriebsbereich des Versuchsstandes | 95 |
| 6.1 | Betriebsbereich des Versuchsstandes | 105 |
| 6.2 | Betriebspunkte der LDA-Messung | 124 |
| 6.3 | Gemessene Stufenkennzahlen der Betriebspunkte BP1, BP2 und BP3 | 126 |
| 6.4 | Wirkungsgrad der Strömungssimulation | 139 |
| A.1 | Spezifikation Laser Coherent Innova 90-C | 164 |
| A.2 | Spezifikation der LDA-Messsonde TRx60 | 164 |
| A.3 | Spezifikation der FSA 4000 | 165 |
| A.4 | Abweichungen der direkt gemessenen Größen [Grüger, 2011] | 166 |
| A.5 | Abweichungen der indirekt gemessenen Größen [Grüger, 2011] | 166 |

FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN

Symbol - Griechisch

| | | |
|----------------|-----------------------------------|-------------------------|
| α | Strömungswinkel im absolut System | $^{\circ}$ |
| β | Strömungswinkel im relativ System | $^{\circ}$ |
| δ | Grenzschichtdicke | m |
| δ_1 | Verdrängungsdicke | m |
| ε | Dissipation | $\frac{J}{kg}$ |
| | Beaufschlagungsgrad | - |
| η | Viskosität | $\frac{m^2}{s}$ |
| | Wirkungsgrad | - |
| η_u | Umfangswirkungsgrad | - |
| η_t | Wirbelviskosität | $\frac{m^2}{s}$ |
| $\Delta\gamma$ | Querdifusorwinkel | $^{\circ}$ |
| κ | Isentropen Exponent | - |
| λ | Leistungszahl | - |
| | Wellenlänge | m |
| μ | dynamische Viskosität | $\frac{N \cdot s}{m^2}$ |
| | Schluckzahl | - |
| ν | kinematische Viskosität | $\frac{m^2}{s}$ |
| | Laufzahl | - |
| ν_t | kinematische Wirbelviskosität | $\frac{m^2}{s}$ |
| ω | Winkelgeschwindigkeit | $\frac{s}{s}$ |
| π | Druckverhältnis | - |
| | Kreiszahl | - |
| ρ | Dichte | $\frac{kg}{m^3}$ |
| σ | Spannung | $\frac{N}{m^2}$ |
| τ | Schubspannung | $\frac{N}{m^2}$ |
| Φ | Dissipationsfunktion | - |
| φ | Durchflusszahl | - |
| ξ_{P_t} | Verlustbeiwert | - |
| Ψ | Druckzahl | - |
| ζ | Kurvenparameter | - |

Symbol - Lateinisch

| | | |
|------------|----------------------------------|-----------------|
| A | Fläche | m^2 |
| C | Konstante | - |
| c | Absolutgeschwindigkeit | $\frac{m}{s}$ |
| c_{Lauf} | Sehnenlänge Lauftrad | m |
| c_{Leit} | Sehnenlänge Leitrad | m |
| c_p | Wärmekapazität | $\frac{J}{K}$ |
| D | Durchmesser | m |
| E | Energie | W |
| e | innere Energie | J |
| F | Kraft | N |
| f | Frequenz | $\frac{1}{s}$ |
| H | Enthalpie | J |
| | Hessematrix | - |
| h | spez. Enthalpie | $\frac{J}{kg}$ |
| | Schaufelhöhe | m |
| h' | spez. Enthalpie Leitrad | $\frac{J}{kg}$ |
| h'' | spez. Enthalpie Lauftrad | $\frac{J}{kg}$ |
| k | kinetische Energie der Turbulenz | J |
| L_u | Umfangsarbeit | J |
| l | Sehnenlänge | m |
| l_k | Kolmogorov Länge | m |
| M | Drehmoment | Nm |
| Ma | Machzahl | - |
| \dot{m} | Massenstrom | $\frac{kg}{s}$ |
| n | Drehzahl | $\frac{1}{min}$ |
| p | Druck | Pa |
| P | Leistung | W |
| Q | Wärmemenge | J |
| \dot{Q} | Wärmestrom | W |
| R | Residuum | - |
| $R_{s,i}$ | Radius Außengehäuse Position i | m |
| Re | Reynoldszahl | - |
| r | Reaktionsgrad | - |
| | Radius | m |
| r_k | kinematischer Reaktionsgrad | - |
| s | normierte Strompfadenposition | - |
| T | Temperatur | K |
| t | Zeit | s |
| U | Umfang | m |
| u | Strömungsgeschwindigkeit in x | $\frac{m}{s}$ |
| | Umfangsgeschwindigkeit | $\frac{m}{s}$ |

Symbol - Lateinisch

- Fortsetzung -

| | | |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|
| \dot{V} | Volumenstrom | $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ |
| v | Strömungsgeschwindigkeit in y | $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ |
| \vec{v} | Geschwindigkeitsvektor | $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ |
| W | Arbeit | J |
| w | Strömungsgeschwindigkeit in z | $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ |
| | Relativgeschwindigkeit | $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ |

Indizes

| | |
|------|-----------------------------------|
| 0 | Leitradeintritt |
| 1 | Leitradaustritt / Laufradeintritt |
| 2 | Laufradaustritt |
| ax | axial |
| GV | Leitrad (Guide Vane) |
| kin | kinetisch |
| krit | kritisch |
| m | Meridian |
| pot | potentielle |
| red | reduziert |
| ref | Referenz |
| s | isentrop |
| stat | statisch |
| tot | total |
| u | Umfang |
| Umg | Umgebung |

Abkürzungen

| | |
|--------|-------------------------------------|
| BP | Betriebspunkt |
| CAD | Computer aided Design |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| DMS | Dehnungsmessstreifen |
| DNS | Direkte Numerische Simulation |
| DS, PS | Druckseite |
| FRAP | Fast Response Aerodynamic Probe |
| LDA | Laser Doppler Anemometrie |
| LE | Schaufelvorderkante (Leading Edge) |
| RMS | Root-mean-squared |
| RSM | Reynolds-Spannungs-Modelle |
| SKE | Sekundäre kinetische Energie |
| SS | Saugseite |
| SST | Shear Stress Transport |
| TE | Schaufelhinterkante (Trailing Edge) |

KURZFASSUNG

Eine Methode zur Wirkungsgradsteigerung von Strömungsmaschinen ist die Seitenwandkonturierung des Strömungskanals der Leitradbeschaufelung. Durch die Konturierung werden die Sekundärströmungen im Leitrad beeinflusst und z.T. verringert, wodurch eine Wirkungsgraderhöhung der Beschaufelung erreicht werden kann. Die Seitenwandkonturierung kann grundsätzlich in rotationssymmetrische und nicht rotationssymmetrische Konturen eingeteilt werden. Beide Methoden der Konturierung werden zunehmend in Strömungsmaschinen eingesetzt. Besonders in Beschaufelungen mit geringen Schaufelhöhen, wie sie in Regelstufen von Dampfturbinen auftreten, ergeben sich große Potentiale zur Wirkungsgradsteigerung. Allerdings sind die Auswirkungen der Konturierung auf das Verhalten der Strömung nicht erschöpfend erforscht. Ein verbessertes Verständnis der Einflüsse der Konturierung auf die Strömung trägt dazu bei, die Betriebscharakteristik von Dampfturbinen an die gesteigerten Flexibilitätsanforderungen, welche aus der steigenden Erzeugungskapazität erneuerbarer Energiequellen und den politischen Rahmenbedingungen erwachsen, anzupassen.

Um das Verständnis der Einflüsse der Konturierung auf die Strömung in Regelstufen von Dampfturbinen zu erweitern, werden in dieser Arbeit sowohl numerische als auch experimentelle Untersuchungen an einem Versuchsträger durchgeführt. Bei dem verwendeten Versuchsträger handelt es sich um einen Luftturbine. Die Beschaufelung des Versuchsträgers ist von einer Dampfturbinenregelstufe abgeleitet. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss der Konturierung auf die Strömung bei unterschiedlichen Druckverhältnissen und Drehzahlen sowie bei unterschiedlichen Leitradkonturen experimentell untersucht. Die Konturen sind aus einer numerischen Optimierung mit Hilfe eines evolutionären Optimierers gewonnen. Der Versuchsaufbau besteht im wesentlichen aus der 1-stufigen Luftturbine, einer Wirbelstrombremse, einer Messwerterfassung zur Bestimmung der Leistung und des Wirkungsgrad der Turbine und einem Laser-Doppler-Anemometer, ein laserbasiertes Messsystem, zur Bestimmung des Strömungsfeldes zwischen Leit- und Laufrad der Versuchsturbine. Ferner ist das Leitrad mit einer Schaufel zur Bestimmung des Schaufeldruckprofils ausgestattet.

Diese Arbeit umfasst die Beschreibung der Versuchsanlage, die Darstellung der den Versuchen zugrundeliegenden, physikalischen Konzepte sowie die Auswertung und Interpretation der Messergebnisse. Die Auswertung der Ergebnisse basiert auf den Wirkungsgradmessungen der Luftturbine sowie der Geschwindigkeitsmessung zwischen Leit- und Laufrad. Mit Hilfe der Auswertung werden die Einflüsse der Konturierung auf die Strömung identifiziert. Hierzu wird

ein Vergleich zu einer Referenzströmung gezogen, die keine Seitenwandkonturierung aufweist. Die Ergebnisse zeigen, dass die Konturierung die Aerodynamik der Leitradsbeschaufelung teilweise erheblich beeinflusst. Hier sind zwei Haupteffekte zu nennen. Zum einen die Verringerung und Verschiebung des Doppelkanalwirbels, der den Wirkungsgrad der Beschaufelung bei unterkritischen Druckverhältnissen steigert und zu einem erweiterten Betriebsbereich führt. Zum anderen das Auftreten eines zusätzlichen Verlustwirbels bei hohen Druckverhältnissen, was auf einen Wirkungsgradverlust bei hohen Druckverhältnissen führt. Auf Basis der experimentellen Untersuchungen wird das Konzept des Querdiffusors entwickelt, welcher einen maßgeblichen Einfluss auf die Strömung durch die Konturierung darstellt. Mit Hilfe dieses Konzepts wird eine Gestaltungsrichtlinie für rotationssymmetrische Außenwandkonturen erarbeitet.