

Forschungsreihe der FH Münster

RESEARCH

Jonas Rejek

Verlustbestimmung im Abströmfeld einer Schaufelkaskade mit passiver Einblasung



FH MÜNSTER



Springer Spektrum

Forschungsreihe der FH Münster

Die Fachhochschule Münster zeichnet jährlich hervorragende Abschlussarbeiten aus allen Fachbereichen der Hochschule aus. Unter dem Dach der vier Säulen Ingenieurwesen, Soziales, Gestaltung und Wirtschaft bietet die Fachhochschule Münster eine enorme Breite an fachspezifischen Arbeitsgebieten. Die in der Reihe publizierten Masterarbeiten bilden dabei die umfassende, thematische Vielfalt sowie die Expertise der Nachwuchswissenschaftler dieses Hochschulstandortes ab.

Weitere Bände in dieser Reihe <http://www.springer.com/series/13854>

Jonas Rejek

Verlustbestimmung im Abströmfeld einer Schaufelkaskade mit passiver Einblasung

 Springer Spektrum

Jonas Rejek
FH Münster, Deutschland

Forschungsreihe der FH Münster
ISBN 978-3-658-18620-3 ISBN 978-3-658-18621-0 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-18621-0

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Danksagung

Mein Dank gilt Prof. Dr.-Ing. aus der Wiesche, der es mir ermöglicht hat, dieses Projekt zu verwirklichen und mich bei Fragen nie hat im Regen stehen lassen. Weiterhin gilt mein Dank Felix Reinker, Marek Kapitz, Maximilian Passmann und Rainer Schönfeld, die immer ein offenes Ohr für mich hatten und mir mit ihren Anregungen in scheinbar ausweglosen Situationen stets weitergeholfen haben. Danke an Karsten Hasselmann und Christian Helcig für gnuplottex und Octave. Zudem bin ich meinen Kommilitonen Zeppelin und Merlin für ihre entspannte Art zu arbeiten dankbar; mit ihnen kam niemals Stress auf. Den „Strömis“ gilt mein Dank für die gemeinsamen unterhaltsamen Mittagessen. Mit euch hat das Arbeiten im Labor immer Spaß gemacht.

Abschließend möchte ich meiner Familie, insbesondere meiner Freundin Joana, meiner Tochter Merle, meinen Geschwistern, meinen Eltern Anne und Reinhard sowie Walter, Annegret und Bernd für ihre vielfältige Unterstützung danken. Ohne euch hätte ich das niemals geschafft.

Executive Summary

In order to improve the efficiency of axial-flow turbines, systematic flow measurements on a planar turbine cascade are carried out to examine the effect of passive tip-injection on downstream losses. Based on a common loss definition an automated test rig is designed to allow a time efficient experimental procedure by means of traverse five-hole probe measurements. The planar cascade includes six high-pressure turbine blades with a deflection angle of 68° that are examined regarding total pressure losses - under the condition of an upstream reynoldsnumber of $Re_1 = 5,8 \times 10^4$ based on the chord length of the blade. Two different tip-gap widths of one and 1.9 percent of the blade height are tested with and without passive tip-injection and are compared with the results of related projects. A closer look is taken at the flow condition upstream of the cascade under varied gap width by use of a miniature pitot-probe. The results show a linear rise in total pressure loss with increasing gap width from 4,7 to 12,8 percent. The total pressure loss decreases by 0,9 percent from 12,8 to 11,9 percent, as the passive tip-injection is applied at maximum tip gap width.

Kurzfassung

Vor dem Hintergrund der Effizienzsteigerung von Axialturbinen wird in der vorliegenden Arbeit die Methode der passiven Einblasung anhand von systematischen Strömungsmessungen im Abströmfeld einer 2D-Schaufelkaskade mit Blick auf ihre Wirksamkeit untersucht. Ausgehend von einer allgemeinen Verlustdefinition wird ein automatisierter Prüfstand entworfen, der eine zeitlich optimierte Versuchsdurchführung mittels Traversierung und Fünfflochsonde ermöglicht. Die verwendete Schaufelkaskade besteht aus Hochdruckturbinenprofilen mit einer Umlenkung von 68° , die bei einer auf die Schaufelsehnenlänge bezogenen Anströmreynoldszahl von $Re_1 = 5,8 \times 10^4$ hinsichtlich des Totaldruckverlustes untersucht werden. Im Zuge der Untersuchung werden zwei Spaltweiten von ein Prozent und 1,9 Prozent der Schaufelhöhe mit und ohne Einblasung betrachtet und mit den Ergebnissen vorhergehender Arbeiten mit ähnlicher Fragestellung verglichen. Weiterhin werden die Anströmbedingungen bei variierender Spaltweite mit einer miniaturisierten Pitot-Sonde vermessen.

Das Ergebnis zeigt einen linearen Anstieg des Totaldruckverlustes mit wachsender Spaltweite von 4,7 auf 12,8 Prozent. Durch die passive Einblasung kann eine Reduktion der Verluste um 0,9 Prozent von 12,8 auf 11,9 Prozent im Fall der größten Spaltweite erreicht werden.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------|
| Inhaltsverzeichnis | XI |
| Abbildungsverzeichnis | XIII |
| Tabellenverzeichnis | XV |
| Abkürzungsverzeichnis | XVII |
| Nomenklatur | XIX |
| 1. Einleitung | 1 |
| 2. Verlustdefinition | 5 |
| 3. Versuchsstand | 13 |
| 3.1. Windkanal | 14 |
| 3.2. Testsektion und Schaufelkaskade | 16 |
| 3.3. Messeinrichtung | 23 |
| 3.4. Fünflochsonde | 31 |
| 4. Kaskadenströmung: Vermessung und Auswertung | 41 |
| 4.1. Kaskadenanströmung: Vermessung und Auswertung | 43 |
| 4.2. Kaskadenabströmung: Vermessung | 54 |
| 4.3. Kaskadenabströmung: Messwertauswertung | 60 |
| 4.3.1. Lokale Größen der Kaskadenabströmung | 61 |
| 4.3.2. Teilungsgemittelte Größen der Kaskadenabströmung . | 87 |

| | |
|--|-----|
| 4.3.3. Flächengemittelte Größen der Kaskadenabströmung . | 92 |
| 5. Gesamtverlust der Kaskadenströmung | 95 |
| 6. Zusammenfassung und Fazit | 101 |
| 7. Ausblick | 107 |
| Literatur | 111 |
| | |
| Anhang | 115 |
| A. Octave Quellcode | 117 |
| B. Technische Zeichnungen | 137 |
| C. Ergänzende Abbildungen | 143 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1.1. | Schematische Darstellung der passiven Einblasung | 2 |
| 2.1. | Kontrollvolumen | 6 |
| 2.2. | Enthalpie-Entropie-Diagramm einer Turbinenschaufelkaskade | 7 |
| 2.3. | Wirbelmodell einer Schaufelkaskade | 10 |
| 3.1. | Aufbau des Versuchsstandes | 13 |
| 3.2. | Aufbau des Windkanals | 15 |
| 3.3. | Testsektion mit Schaufelprofilen | 17 |
| 3.4. | Kenngößen der Schaufelkaskade | 19 |
| 3.5. | Schaufelprofil der Kaskade mit passiver Einblasung | 22 |
| 3.6. | Aufbau der Messeinrichtung | 24 |
| 3.7. | Foto der Drehvorrichtung mit Fünflochsonde und Ventilinsel . | 29 |
| 3.8. | Winkel- und Bohrungsdefinition der Fünflochsonde | 32 |
| 3.9. | $K_{\Delta\beta}$ über $K_{\Delta\alpha}$ für $M_K = 0,088$ | 35 |
| 3.10. | .Delaunay-Triangulation des Kalibrierfeldes der Fünflochsonde | 37 |
| 3.11. | .Bestimmung von Δp_t und Δp_s | 38 |
| 4.1. | Grundlegender Ablauf zur Vermessung der Kaskadenströmung | 42 |
| 4.2. | Sondenposition in der Kaskadenanströmung | 44 |
| 4.3. | Ablauf Messprogramm Kaskadenanströmung | 45 |
| 4.4. | Ablauf zur Vermessung der Kaskadenanströmung | 47 |
| 4.5. | Geschwindigkeitsprofile der Kaskadenanströmung | 48 |
| 4.6. | Sondenposition und Messebene in der Kaskadenabströmung . | 56 |

| | | |
|-------|---|------|
| 4.7. | Ablauf der Messung in der Kaskadenabströmung | 58 |
| 4.8. | Ablauf des Messprogramms für die Kaskadenabströmung . . . | 59 |
| 4.9. | Totaldruckkoeffizient der Abströmung C_{pt2} | 64 |
| 4.10. | Statischer Druckkoeffizient der Abströmung C_{ps2} | 68 |
| 4.11. | Abströmwinkel α | 70 |
| 4.12. | Abströmwinkel β | 75 |
| 4.13. | Sekundärgeschwindigkeitsfelder der Abströmung | 78 |
| 4.14. | Dimensionslose Vortizität ω_P | 83 |
| 4.15. | Teilungsgemittelter Totaldruckkoeffizient $\overline{C_{pt2}}$ | 89 |
| 4.16. | Teilungsgemittelte, bezogene Abströmgeschwindigkeit $\overline{c_{2,b}}$. . | 90 |
| 4.17. | Flächengemittelter Totaldruckkoeffizient der Abströmung $\overline{\overline{C_{pt2}}}$ | 94 |
| 5.1. | Totaldruckverluste Y im Vergleich | 97 |
| B.1. | Technische Zeichnung der Ventilinsel | 1 38 |
| B.2. | Technische Zeichnung der Fünflochsonde | 1 39 |
| B.3. | Technische Zeichnung der Drehvorrichtung | 1 40 |
| C.1. | Teilungsgemittelter Abströmwinkel $\overline{\alpha}$ | 1 43 |
| C.2. | Foto des Versuchsaufbaus | 1 44 |
| C.3. | Foto der Fünflochsonde | 1 45 |
| C.4. | Foto der miniaturisierten Pitotsonde | 1 45 |
| C.5. | Foto der Prandtlsonde | 1 45 |
| C.6. | Foto der Testsektion | 1 46 |
| C.7. | Foto des Arbeitsplatzes zur Schaufelbearbeitung | 1 47 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------|---|-----|
| 3.1. | Spaltweiten τ | 18 |
| 3.2. | Messabweichungen und geometrische Abweichungen | 30 |
| 4.1. | Grenzschichtparameter der Anströmung | 51 |
| 4.2. | Totaldruckkoeffizient $\overline{C_{pt1}}$ der Anströmung | 53 |
| 4.3. | Flächengemittelte Größen der Kaskadenabströmung | 93 |
| B.1. | Stückliste der Drehvorrichtung | 141 |

Abkürzungsverzeichnis

2D zweidimensional

3D dreidimensional

CD Compact Disk

DMG Differenzdruckmessgerät

PMMA Polymethylmethacrylat

PTFE Polytetrafluoroethylene

PI Proportional-Integral

FH Fachhochschule

CFD *computational fluid dynamics*

Nomenklatur

Griechische Formelzeichen

| | | |
|----------------|-------------------------|----------------------|
| $\Delta\alpha$ | Gierwinkel | [°] |
| $\Delta\beta$ | Nickwinkel | [°] |
| δ | Grenzschichtdicke | [mm] |
| κ | Isentropenexponent | [-] |
| ν | Kinematische Viskosität | [m ² /s] |
| ω | Vortizität | [s ⁻¹] |
| ρ | Dichte | [kg/m ³] |
| τ | Spaltweite | [mm] |
| θ | Staffelungswinkel | [°] |

Lateinische Formelzeichen

| | | |
|------------|-----------------------|----------|
| Δp | Differenzdruck | [Pa] |
| h | Spezifische Enthalpie | [J/kg] |
| s | Spezifische Entropie | [J/K kg] |

| | | |
|------|------------------------------|--------------------|
| A | Fläche | [mm ²] |
| a | Schaufeldicke | [mm] |
| b | Schaufelbreite | [mm] |
| C | Druckkoeffizient | [-] |
| c | Strömungsgeschwindigkeit | [m/s] |
| D | Durchmesser | [mm] |
| e | Einheitsvektor | [-] |
| H | Grenzschichtformfaktor | [-] |
| h | Schaufelhöhe | [mm] |
| I | Isotrope Turbulenzintensität | [-] |
| K | Kalibrierkoeffizient | [-] |
| m | Masse | [kg] |
| Ma | Machzahl | [-] |
| p | Absolutdruck | [Pa] |
| q | Spezifische Wärme | [J/kg] |
| R | Spezifische Gaskonstante | [J/kg K] |
| r | Radius | [mm] |
| Re | Reynoldszahl | [-] |
| S | Standardabweichung | [-] |