

Marius Mihailowitsch

**Numerische Untersuchungen
zur Wechselwirkung von
letzter Turbinenstufe und
axialem Abgasdiffusor**

Numerische Untersuchungen zur Wechselwirkung von letzter Turbinenstufe und axialem Abgasdiffusor

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Marius Mihailowitsch

aus Starnberg

Hauptberichter: Prof. Tekn. Dr. Damian Vogt

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Riedelbauch

Tag der mündlichen Prüfung: 09.12.2020

Institut für Thermische Strömungsmaschinen und
Maschinenlaboratorium der Universität Stuttgart

2021

Berichte aus der Strömungstechnik

Marius Mihailowitsch

**Numerische Untersuchungen zur Wechselwirkung
von letzter Turbinenstufe und axialem Abgasdiffusor**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7915-9

ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium (ITSM) der Universität Stuttgart. Dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Tekn. Dr. Damian Vogt, gilt mein besonderer Dank, da er mir diese Arbeit ermöglicht und mich während ihrer Entstehung fachlich begleitet hat. Das entgegengebrachte Vertrauen und Fachwissen waren maßgebende Bausteine für den Erfolg dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Riedelbauch danke ich vielmals für die Übernahme des Mitberichts. Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Weihe danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterhin möchte ich mich bei Markus Schatz bedanken, der mich während seiner Zeit am ITSM mitbetreut und wesentliche Anstöße für die durchgeführten Untersuchungen gegeben hat. Besonderer Dank gilt auch meinem ehemaligen Bürokollegen Christian Waldherr für das ausführliche Korrekturlesen des Manuskripts, den fachlichen Austausch und die Freundschaft. Maximilian Bauer danke ich für all seine Arbeit am Axialdiffusorprüfstand. Die durchgeführten Messungen sind ein wichtiger Bestandteil der Ausarbeitung.

Als ehemaliger Mitarbeiter der Numerik-Abteilung gebührt mein Dank auch deren Leiter, Herrn Dr.-Ing. Jürgen Mayer. Die gemeinsame Arbeit an der Vorlesung hat mir viel Freude bereitet. Ein großer Dank gilt auch Michael Rath, der als EDV- und Linux-Experte immer hilfsbereit war und außerdem Sorge dafür getragen hat, dass die nötige Infrastruktur für unsere numerischen Untersuchungen vorhanden ist.

Ein Dankeschön möchte ich auch an alle Kollegen richten, die während meiner Institutszeit Mitbegleiter waren. Der gute kollegiale Zusammenhalt ist nicht selbstverständlich und kann hoffentlich konserviert werden. Danke für die entstandenen Freundschaften.

Eine große Rolle haben in den in den vergangenen Jahren natürlich auch viele Personen außerhalb des Instituts gespielt. Danke an meine guten Freun-

de aus Geretsried, Karlsruhe und Stuttgart. Danke an meinen Opa für das „Ingenieurs-Gen“. Danke an meinen Bruder und meine Eltern, die mir diesen Weg ermöglicht haben. Und danke an meine Freundin Inessa und meinen Sohn Niklas. Ihr seid wundervoll.

Esslingen am Neckar, Januar 2021

Marius Mihailowitsch

Kurzfassung

In Gas-und-Dampf-Kombikraftwerken befindet sich zwischen Gasturbine und Wärmeübertrager üblicherweise ein Axialdiffusor. Die Strömung des Diffusors und dessen Druckrückgewinn wird wesentlich durch die Abströmung der letzten Turbinenstufe, der sogenannten Endstufe, beeinflusst. Das Enthalpiegefälle der Turbine im Allgemeinen und der Endstufe im Speziellen ist seinerseits abhängig vom Druckrückgewinn im Diffusor. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Beitrag zu dieser Wechselwirkung von Endstufe und axialem Abgasdiffusor geleistet. Großen Einfluss auf die Verluste beider Komponenten hat dabei die Rotorspaltströmung, deren Betrachtung im Fokus der Untersuchungen steht.

Einleitend werden die Grundlagen und der Stand der Technik für Turbine und Diffusor sowie die Interaktion zwischen den beiden Komponenten beschrieben. Mithilfe analytischer Modelle wird die Leistungsänderung der Turbine in Abhängigkeit der Spaltweite, der dimensionslosen Turbinenkenngößen und des Diffusordruckrückgewinns abgeschätzt. Die detaillierte Untersuchung der Komponentenwechselwirkung erfolgt für einen eigens abgeleiteten Testfall mithilfe numerischer Strömungssimulationen. Der Testfall beinhaltet eine Endstufe mit deckbandgekoppeltem Rotor und einen Axialdiffusor. Die Auslegungskriterien und die resultierenden Geometrien werden ausführlich dokumentiert.

Das verwendete Simulationsmodell des Diffusors wird für unterschiedliche Betriebspunkte mit Daten aus Messungen am ITSM-Axialdiffusorprüfstand validiert. Die Übereinstimmung von berechneter und experimentell ermittelter Strömung ist gut für Betriebspunkte, die lediglich kleine Ablösungen zeigen. Abweichungen ergeben sich, wenn großskalige Ablösungen an Gehäuse oder Strebe auftreten. Für die gekoppelten Berechnungen des Testfalls werden unterschiedliche Rotorspaltweiten betrachtet und so der Einfluss der Spaltströmung charakterisiert. Während bei Teillast eine Minimierung der Spaltweite anzustreben ist, können bei Auslegungs- und Überlast der Diffusordruckrückgewinn und der Systemwirkungsgrad mit Erhöhung der Spalt-

weite verbessert werden. Die optimale Spaltweite ist somit abhängig vom Betriebspunkt.

Anschließend wird die Diffusorströmung bezüglich einer Beeinflussung durch das zeitabhängige Strömungsfeld der inhärent instationären Turbinenabströmung untersucht. Hierzu werden die Ergebnisse von Simulationsmodellen verschiedenen Komplexitätsgrads verglichen. Für die betrachtete Konfiguration kann gezeigt werden, dass der gemittelte Diffusordruckrückgewinn durch die Instationarität der Turbinenabströmung nur in vernachlässigbarem Maße beeinflusst wird. Ein Grund hierfür ist, dass die charakteristischen Zeitskalen in Turbine und Diffusor verschiedene Größenordnungen aufweisen. Abschließend wird die Änderung der Strömung in Turbine und Diffusor betrachtet, wenn der vorangehend als rotationssymmetrisch betrachtete Rotorspalt asymmetrisch ausgeformt wird. Es werden hierbei stationäre und rotierende Asymmetrien berücksichtigt. In beiden Fällen können positive Effekte für den Turbinenwirkungsgrad beschrieben werden. Die Beeinflussung der Diffusorströmung ist bei stationärer Asymmetrie größer, wobei die Änderungen des Druckrückgewinns am Austritt des Diffusors im Allgemeinen vergleichsweise gering sind.

Abstract

In Combined Cycle Gas Turbine plants an axial exhaust diffuser is usually placed between gas turbine and heat recovery steam generator. The diffuser flow and pressure recovery are influenced strongly by the flow in the last turbine stage. The enthalpy drop of the turbine in general and the last stage in specific is on the other hand dependent on the recovered pressure in the diffuser. A contribution to this interdependency of last turbine stage and diffuser is made in the context of the present work. As the losses of both components are highly affected by the rotor tip leakage flow, its examination is in the focus of this thesis.

In an introductory section, the fundamentals and the state of the art of turbine and diffuser as well as the interaction between both components are described. The change of turbine power output is estimated by means of analytical models in dependence of the gap width, the dimensionless turbine coefficients and the diffuser pressure recovery. The component interactions are investigated with a newly developed generic test case by means of numerical flow simulations. The test case includes the last turbine stage with a shrouded rotor and an axial diffuser. The design criteria and the derived geometries are documented comprehensively.

The computational model of the diffuser is validated for different operating points with measurement data of the ITSM in-house diffuser test rig. Computational and experimental results are in good agreement for operating points where the flow is only mildly separated. The agreement worsens when large separations are present at the casing or the struts. The simulations for the test case are carried out for different rotor gap widths in order to characterize the influence of the tip leakage flow. Whereas a minimization of the gap width should be aimed for at part-load, both the diffuser pressure recovery and the system efficiency can be enhanced with increasing gap width at design-load and over-load. The optimum gap width is thus dependent on the operating point.

Afterwards the diffuser flow is investigated regarding the influence of the time-dependent flow field of the inherently unsteady turbine flow. For this purpose the results of different computational models with varying degrees of complexity are compared. It is shown that the averaged pressure recovery in the examined configuration is influenced only insignificantly by the unsteady turbine outlet flow. One of the reasons is that the characteristic time scales in turbine and diffuser are of different orders of magnitude. In closing, the flow in turbine and diffuser is examined for configurations where the axisymmetric rotor gap width is altered to be asymmetric. Stationary and rotating asymmetries are here considered. In both cases, positive effects can be described for the turbine efficiency. The impact on the diffuser flow is more pronounced for the stationary asymmetry. However, the differences in pressure recovery at the diffuser outlet are generally small.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	xiii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	5
2.1 Grundlagen der Turbine	5
2.1.1 Aspekte der Turbinenströmung	8
2.1.2 Spaltströmung	11
2.2 Grundlagen des Diffusors	14
2.2.1 Kenngrößen und Strömungszustände	15
2.2.2 Einfluss der Zuströmung	17
2.3 Wechselwirkung zwischen Turbine und Abgasdiffusor	24
2.3.1 Bedeutung des Abgasdiffusors	24
2.3.2 Systemverhalten	25
3 Grundlagen der numerischen Strömungsmechanik	29
3.1 Erhaltungsgleichungen und Fluideigenschaften	29
3.2 Turbulenz	30
3.2.1 Aspekte turbulenter Strömungen	31
3.2.2 Turbulenzmodellierung	33
3.3 Numerische Grundlagen	41
3.4 Mittelwertbildung	42

4 Analytische Modelle zur Beschreibung des Systemverhaltens	45
4.1 Einfluss des Druckrückgewinns	45
4.2 Einfluss der Spaltverluste	50
4.3 Systemverhalten	53
5 Testfall	57
5.1 Turbine	57
5.1.1 Strömungskanal und Auslegungskenngrößen	58
5.1.2 Schaufelwinkelverteilung	60
5.1.3 Schaufelprofilierung und Auffädung	60
5.1.4 Deckbandgestaltung	62
5.1.5 Vergleichbarkeit der Betriebspunkte	64
5.2 Abgasdiffusor	65
6 Lösungsmethodik	69
6.1 Umfang der Untersuchungen	69
6.2 Aufbau der Rechenmodelle	70
6.3 Vernetzung	74
6.4 Modellannahmen	76
6.4.1 Physikalische Modellbildung	77
6.4.2 Fluideigenschaften	77
6.4.3 Randbedingungen	77
6.4.4 Numerik	79
7 Validierung des Diffusormodells	81
7.1 Prüfstands Aufbau	81
7.2 Auswahl der Betriebspunkte	82
7.3 Vergleich der Ergebnisse	83

7.3.1	Auslegungslast	86
7.3.2	Überlast	90
7.3.3	Teillast	95
7.4	Zusammenfassung	102
8	Ergebnisse zur Wechselwirkung von Turbine und Abgasdiffusor	107
8.1	Turbine	107
8.1.1	Wirkungsgrad und Arbeitsumsetzung	108
8.1.2	Strömungsfeld	109
8.1.3	Plausibilisierung der Berechnungsergebnisse	111
8.2	Abgasdiffusor	116
8.2.1	Auslegungslast	116
8.2.2	Überlast	118
8.2.3	Teillast	120
8.3	Systemverhalten	121
8.4	Zusammenfassung	124
9	Einfluss der instationären Turbinenabströmung	127
9.1	Modellierungsansatz	127
9.2	Turbine	131
9.3	Abgasdiffusor	133
9.3.1	Zeitschrittabhängigkeit	133
9.3.2	Auslegungslast	135
9.3.3	Überlast	141
9.3.4	Teillast	143
9.4	Rechenzeitvergleich	145
9.5	Zusammenfassung	146

10 Einfluss nicht-rotationssymmetrischer Spaltweitenverteilungen	149
10.1 Motivation und Wahl der Verteilungen	149
10.2 Turbine	151
10.2.1 Wirkungsgrad und Arbeitsumsetzung	152
10.2.2 Strömungsfeld	155
10.3 Abgasdiffusor	158
10.3.1 Einfluss des Bezugssystems	158
10.3.2 Einfluss der Wellenzahl	161
10.4 Zusammenfassung	164
11 Zusammenfassung und Ausblick	167
Literaturverzeichnis	173
A Anhang zu Kapitel 7	191
A.1 Gitterunabhängigkeitsstudie	191
A.2 Zeitschrittunabhängigkeitsstudie	194
B Anhang zu Kapitel 8	195
B.1 Gitterunabhängigkeitsstudie	195
B.2 Einfluss der Interfaceposition	197
C Anhang zu Kapitel 9	199
C.1 Gitterunabhängigkeitsstudie	199
C.2 Zeitschrittunabhängigkeitsstudie	201
D Anhang zu Kapitel 10	203