

Silke Brouwer

## **Research on the Accuracy of Flow Simulation in Gas Turbine Exhaust Diffusers**

# **Research on the Accuracy of Flow Simulation in Gas Turbine Exhaust Diffusers**

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

vorgelegt von

**Silke Brouwer geb. Volkmer**

aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Tekn. Dr. D. M. Vogt

Mitberichter: Prof. M. V. Casey, D. Phil.

Tag der mündlichen Prüfung: 29. September 2017

Institut für Thermische Strömungsmaschinen  
und Maschinenlaboratorium der Universität Stuttgart

2018



Berichte aus der Strömungstechnik

**Silke Brouwer**

**Research on the Accuracy of Flow Simulation  
in Gas Turbine Exhaust Diffusers**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag  
Aachen 2018

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6104-8

ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium der Universität Stuttgart. Ein großer Teil der Arbeit geht aus Projekten hervor, die durch finanzielle Mittel der Forschungsinitiative “Kraftwerke des 21. Jahrhunderts” der Länder Bayern und Baden-Württemberg und der Siemens AG gefördert wurden. Darüberhinaus wurden die sehr rechenaufwendigen Simulationen am Höchstleistungsrechenzentrum der Universität Stuttgart im Rahmen eines Bundesprojektes berechnet.

Ich möchte mich ganz besonders bei Herrn Prof. M. V. Casey, D. Phil. für das entgegengebrachte Vertrauen, seine langjährige großzügige Unterstützung meiner Arbeit und auch bei der Ermöglichung der Teilnahme an zahlreichen Konferenzen zum internationalen wissenschaftlichen Austausch bedanken. Herrn Prof. Tekn. Dr. D. M. Vogt danke ich herzlichst für die Übernahme der Betreuung der Doktorarbeit und des Hauptberichts.

Von Seiten der Siemens AG danke ich M. Montgomery für die gute Zusammenarbeit bei den langjährigen Projekten und besonders A. Akturk und H. Flitan für die fachliche Unterstützung in Themen der numerischen Strömungssimulation von Diffusorströmungen.

Ich danke allen ITSM-Mitarbeitern für die große Hilfsbereitschaft auch in über das fachliche hinausgehenden Belangen und das sehr freundliche Arbeitsklima. Ich habe mich immer sehr wohl gefühlt und erinnere mich sehr gerne an die vielen Dienstreisen. Besonders danken möchte ich Herrn Dr. A. Hirschmann für die Einsicht in den experimentellen Teil unserer gemeinsamen Projekte und die gute Zusammenarbeit bei den vielen Projektberichten und Veröffentlichungen. Herrn U. Seybold und Herrn Dr. J. Starzmann danke ich insbesondere für die immer bestehende Hilfe in Fragen der numerischen Strömungssimulation.

Mein allergrößter Dank gilt jedoch meinem Mann Mark, der immer an mich glaubt, mich bei allem unterstützt und sehr viel Geduld in den durchaus stressigen Phasen dieser Arbeit hatte. Meiner Familie, meinen Eltern und meiner Schwester, aber auch meinen Schwiegereltern danke ich ganz besonders für die immer bestehende großartige Unterstützung v. a. bei der Betreuung meines Sohnes Erik in der Schlussphase.

Meinem Sohn Erik und meinem bald geborenen nächsten Wunder danke ich besonders für das „Wiedereintauchen“ in eine Welt, die nicht nur von Plänen und Deadlines bestimmt wird, sondern die jetzt gerade hier in diesem Moment besteht, ohne Gestern und Morgen.



## Abstract

Large industrial gas turbines for combined cycle power generation are typically connected to the heat recovery steam generator of the steam turbine plant by axial exhaust diffusers. The target of diffuser design is a high pressure recovery with low losses in the diffuser. Nowadays for the optimization process of realistic exhaust diffusers computational fluid dynamics (CFD) simulations are applied, as these are less time and cost extensive than experimental studies. The prediction of the flow in an exhaust diffuser is particularly difficult as a high pressure recovery is obtained with a flow close to boundary layer separation. Moreover, at the abrupt hub end of the gas turbine a bluff body separation with high losses in the wake downstream occurs. CFD simulations then need to cope with complex phenomena such as smooth wall separation, recirculation, reattachment and free shear layer mixing.

In this research guidelines for high quality diffuser simulations are assembled to enhance the optimization process of realistic exhaust diffusers in gas turbine applications. The different sources of errors and uncertainties are analyzed and then separately examined in the CFD analysis of the diffuser flow field for two different test cases with strongly separated flow and with mostly attached flow. Extensive numerical studies of the impact of these errors and uncertainties were carried out with the flow solver ANSYS CFX 14.5. For validation of the simulation results, experimental data is obtained from a test rig at the Institute of Thermal Turbomachinery and Machinery Laboratory of the University of Stuttgart (ITSM).

The first test case exhibits a complex flow field with largely separated flow at the casing and a bluff body separation downstream of the abrupt hub end. The state-of-the-art CFD modeling with Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS) turbulence models underpredicts the pressure recovery due to overestimation of the size of the computed separation zones. With the present research, it is illustrated that the prediction of such a highly separated flow field is largely impacted by the turbulence modeling. Beside the applied turbulence model the turbulence inlet boundary conditions have a large impact and the prediction of the flow field is drastically improved by applying adequate turbulence parameters. A method to estimate the usually unknown turbulence eddy dissipation, when only measured data of the turbulence kinetic energy is available, is demonstrated. Reasonable results were obtained with the in this research assembled guidelines for the CFD modeling and the for adverse pressure gradient recommended Shear Stress Transport (SST) turbulence model. With the more complex Scale Adaptive Simulation (SAS) turbulence model the prediction of the velocity profiles downstream of the abrupt hub end is improved, but the separation in the up-

stream annular section is over-predicted, so that in sum there is no improvement in the prediction of the pressure recovery.

The second test case with mostly attached flow and a tailcone downstream of the hub (no abrupt hub end) is less sensitive to the turbulence modeling than the highly separated test case. In this case also a reasonable prediction of the flow field is achieved by applying the improved methods for CFD modeling. The application of the SAS turbulence model in this case leads to an unrealistic prediction of the flow field as it is primarily intended for large scale unsteady structures related to bluff body separations.

Moreover, the above mentioned improvements of the modeling methods have been successfully applied to other test cases with differences between the CFD results and the experimental data that are similar between test cases exhibiting the same type of flow field. In conclusion, it was shown that the flow field and the pressure recovery of exhaust diffusers can be reasonably predicted with the in this research assembled guidelines for the CFD modeling.

## Kurzfassung

In kombinierten Gas- und Dampf-Kraftwerken werden Gasturbinen über den axialen Abgasdiffusor mit dem Abhitzeessel der Dampfturbinenanlage verbunden. Dabei ist das Ziel bei der Diffusorauslegung ein möglichst hoher Druckrückgewinn bei gleichzeitig geringen Verlusten. Heutzutage werden für den Optimierungsprozess bei der Auslegung numerische Strömungssimulationen (Computational Fluid Dynamics, CFD) verwendet, da diese weniger zeit- und kostenintensiv sind als experimentelle Untersuchungen. Die Strömungsvorhersage in einem Diffusor ist kompliziert, da ein hoher Druckrückgewinn mit einer Strömung nahe der Grenzschichtablösung erreicht wird und am stumpfen Nabennende der Gasturbine eine Strömungsablösung mit großen Verlusten im Nabennachlauf existiert. Bei der Strömungssimulation müssen somit komplexe Phänomene wie Grenzschichtablösung, Rezirkulation, Wiederanlegen der Grenzschicht und Mischungsvorgänge freier Scherschichten berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden für die Verbesserung des Optimierungsprozesses Richtlinien für genaue und zuverlässige Simulationen von Diffusorströmungen für Gasturbinenanwendungen aufgestellt. Hierzu werden die möglichen Ursachen von Fehlern und Unsicherheiten bei Strömungssimulationen analysiert und anhand von zwei ausgewählten Testfällen mit stark abgelöster und größtenteils anliegender Strömung untersucht. Umfangreiche numerische Simulationen wurden mit dem Strömungslöser ANSYS CFX 14.5 durchgeführt und mit experimentellen Daten, die an einem Versuchsstand am Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium (ITSM) der Universität Stuttgart ermittelt wurden, validiert.

Der erste Testfall ist durch ein komplexes Strömungsfeld mit großer Strömungsablösung am Gehäuse und im Nachlauf des stumpfen Nabennendes charakterisiert. Bei der CFD-Modellierung nach aktuellem Stand der Technik mit Reynolds-gemittelten-Navier-Stokes (RANS) Turbulenzmodellen wird der Druckrückgewinn aufgrund der zu groß berechneten Ablösungsgebiete unterschätzt. In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass die Vorhersage eines stark abgelösten Strömungsfeldes maßgeblich von der Turbulenzmodellierung beeinflusst wird, wobei neben dem angewendeten Turbulenzmodell auch die Eintrittsrandbedingungen insbesondere in Bezug auf die Turbulenzparameter einen großen Einfluss haben und die CFD-Vorhersage mit adäquaten Werten drastisch verbessert werden kann. Des Weiteren wird eine Methode zur Abschätzung der üblicherweise nicht vorhandenen turbulenten Dissipation gezeigt, wenn nur experimentelle Daten von der turbulenten kinetischen Energie vorhanden sind. Mit den in der vorliegenden Arbeit erstellten CFD-Richtlinien und dem für

Strömungen mit positivem Druckgradienten empfohlenen Schubspannungs-Transport (SST) Turbulenzmodell können zuverlässige Simulationsergebnisse berechnet werden. Darüber hinaus wird mit dem komplexeren und ressourcenaufwendigeren Scale Adaptive Simulation (SAS) Turbulenzmodell zwar die Berechnung der Geschwindigkeitsprofile stromab der Nahe verbessert, jedoch wird die Strömungsablösung am Diffusorgehäuse größer berechnet, so dass sich in Summe keine Verbesserung in der Vorhersage des Druckrückgewinns ergibt.

Der zweite Testfall mit größtenteils anliegender Strömung und ohne stumpfes Nabenende ist weniger sensitiv in Bezug auf die Turbulenzmodellierung als der erste Testfall mit stark abgelöster Strömung. Hier werden ebenfalls zuverlässige Ergebnisse mit den verbesserten Richtlinien zur CFD-Modellierung erreicht. In diesem Fall führt die Verwendung des SAS Turbulenzmodells zu unrealistischen Strömungsergebnissen, da es für die Anwendung mit großskaligen turbulenten Strukturen stromab von stumpfen Körpern entwickelt wurde.

Darüber hinaus wurden die oben beschriebenen verbesserten Modellierungs-Methoden erfolgreich auf weitere Testfälle angewendet, wobei die Unterschiede zwischen den berechneten und den experimentell ermittelten Ergebnissen für die gleiche Art von Strömungen ähnlich sind. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit den in der vorliegenden Arbeit aufgestellten Richtlinien zur CFD-Modellierung von Abgasdiffusoren das Strömungsfeld und der Druckrückgewinn zuverlässig vorhergesagt werden können.

# Content

<b>Vorwort</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>v</b>
<b>Content</b>	<b>vii</b>
<b>Nomenclature</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Scope of the work	4
1.3 Procedure	4
<b>2 Basics of diffuser flow</b>	<b>7</b>
2.1 Functionality and applications	8
2.2 Performance coefficients	9
2.3 Flow characteristics	11
2.4 Impact of inlet flow conditions	14
<b>3 Computational Fluid Dynamics</b>	<b>17</b>
3.1 Governing equations of fluid dynamics	17
3.2 Simulation of turbulent flow	18
3.2.1 Energy spectrum or cascade	19
3.2.2 Direct Numerical Simulation (DNS)	21
3.2.3 Large scale simulations	21
3.3 Statistical approach by Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations	22
3.3.1 Boussinesq' eddy viscosity approximation	24
3.3.2 k- $\epsilon$ models	25
3.3.3 k- $\omega$ model	29
3.3.4 BSL/SST model	31
3.3.5 URANS	33
3.3.6 SAS-SST model	34
3.3.7 Summary of applicability for diffuser flow	36
3.4 Discretization schemes and solution strategy	36
3.5 CFD process and quality assurance	37
3.6 State-of-the-art in diffuser CFD	40

---

<b>4 Test cases and CFD modeling</b>	<b>43</b>
4.1 Experimental investigations for validation data	43
4.1.1 Measurement technique and post-processing	44
4.1.2 Pinched configuration	46
4.2 State-of-the-art CFD modeling and simulation	46
4.2.1 Domain and boundary conditions	47
4.2.2 Grid generation	50
4.2.3 Solver settings	52
<b>5 Base configuration without tip jet flow</b>	<b>53</b>
5.1 Simulation of basis CFD model	53
5.1.1 Convergence	53
5.1.2 CFD results and validation with experimental data	54
5.1.3 Base configuration	58
5.1.4 Summary	58
5.2 Studies of errors	59
5.2.1 Iteration or convergence error	59
5.2.2 Discretization or numerical error	62
5.3 Application uncertainties	72
5.3.1 Boundary conditions at the inlet of the computational domain	73
5.3.2 Mass flow rate at the outlet of the computational domain	98
5.3.3 Computational Domain	100
5.4 Model uncertainties	104
5.4.1 Steady-state simulations (RANS)	104
5.4.2 Transient simulations (URANS)	111
5.4.3 Conclusions	122
<b>6 Pinched configuration with tip jet flow</b>	<b>125</b>
6.1 Simulation of base CFD model	125
6.2 Application uncertainties	127
6.2.1 Boundary conditions at the inlet of the computational domain	127
6.2.2 Tip jet inlet	129
6.2.3 Computational Domain	130
6.3 Model uncertainties	131
6.3.1 Steady-state simulations (RANS)	131
6.3.2 Transient simulations (URANS)	134

---

6.3.3 Conclusions	143
<b>7 Conclusions for diffuser CFD</b>	<b>145</b>
7.1 Convergence	145
7.2 Discretization: scheme and grid generation	145
7.3 Boundary conditions and computational domain	146
7.4 Turbulence modeling	147
7.5 Application to other configurations	149
<b>8 Summary and outlook</b>	<b>151</b>
<b>Literature</b>	<b>155</b>
<b>A Appendix</b>	<b>163</b>
A.1 Inlet Section model	163
A.1.1 CFD model	163
A.1.2 Validation with test data in S0	164
A.2 Measured inlet profile of turbulence intensity and constant eddy viscosity ratio	167