

Marius Grübel

Numerical Investigation of Losses in Condensing Low- Pressure Steam Turbine Flows Based on a Second Law Analysis

Numerical Investigation of Losses in Condensing Low-Pressure Steam Turbine Flows Based on a Second Law Analysis

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 Grübel

aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Tekn. Dr. Damian Vogt

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Weigand

Tag der mündlichen Prüfung: 18.03.2021

Institut für Thermische Strömungsmaschinen und
Maschinenlaboratorium der Universität Stuttgart

2021

Berichte aus der Strömungstechnik

Marius Grübel

**Numerical Investigation of Losses in
Condensing Low-Pressure Steam Turbine Flows
Based on a Second Law Analysis**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2021

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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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 978-3-8440-8096-4

ISSN 0945-2230

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

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Preface

This thesis was written while I was working as a research assistant at the Institute of Thermal Turbomachinery and Machinery Laboratory (ITSM) at the University of Stuttgart.

I would like to thank my doctoral supervisor, Prof. Tekn. Dr. Damian Vogt, director of the ITSM, for making it possible for me to carry out this work as well as for the trust he has placed in me. Thanks is also due to Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Weigand, director of the Institute of Aerospace Thermodynamics (ITLR) at the University of Stuttgart, for taking over the co-report.

Thanks is given to all ITSM employees for the pleasant working atmosphere, the good cooperation and the great helpfulness. I like to think back on the conferences we attended together, the coffee and after-work get-togethers, and my visits to the testing hall. I am glad that I am still in close contact with many colleagues after my time at the ITSM. Special thanks go to my colleagues Dr.-Ing. Jörg Starzmann and Dr.-Ing. Christopher Fuhrer, member of the IIBS committee, for the numerous technical and, of course, also private conversations in the office. I would not like to miss this very instructive and interesting, but sometimes also incredibly entertaining time. Furthermore, I would like to express my gratitude to Prof. Dr.-Ing. Markus Schatz for the many helpful discussions and his support. I am grateful to our IT expert, Mr. Michael Rath, for maintaining the computing cluster and for his tireless support in solving disk space issues and locating backups. I am also thankful to all the students who supported me in the course of their student theses.

I would like to thank Dr.-Ing. Jörg Starzmann and Prof. Dr.-Ing. Markus Schatz for thoroughly proofreading the manuscript and their helpful comments.

I am deeply grateful to my parents and my sister for always supporting me and thus enabling my personal and professional development. Finally, I would like to say a very special thank you to my wife Simone, who has shown me a lot of patience and understanding and without whose encouragement and support this work would not have been possible.

Laupheim, June 2021

Marius Grübel

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium (ITSM) der Universität Stuttgart.

Bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Tekn. Dr. Damian Vogt, Direktor des ITSM, möchte ich mich für die Ermöglichung der Durchführung dieser Arbeit sowie das in mich gesetzte Vertrauen bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Weigand, Direktor des Instituts für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt (ITLR) der Universität Stuttgart, danke ich herzlich für die Übernahme des Mitberichtes.

Für die angenehme Arbeitsatmosphäre, die gute Zusammenarbeit und die große Hilfsbereitschaft möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des ITSM bedanken. Ich denke gerne an die gemeinsam besuchten Konferenzen, die Kaffee- und Feierabendrunden sowie meine Besuche in der Versuchshalle zurück und bin froh darüber, dass zu vielen Kollegen auch nach der Zeit am ITSM ein enger Kontakt besteht. Besonderer Dank gilt meinen Kollegen Dr.-Ing. Jörg Starzmann und Dr.-Ing. Christopher Fuhrer, Mitglied des IIBS-Komitees, für die zahlreichen fachlichen und natürlich auch privaten Gespräche im gemeinsamen Büro. Diese sehr lehrreiche und interessante, aber manchmal auch unglaublich unterhaltsame Zeit möchte ich keinesfalls missen. Darüber hinaus möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Schatz für die vielen hilfreichen Diskussionen und die fachliche Unterstützung meinen Dank aussprechen. Unserem IT-Experten Herrn Michael Rath bin ich für die Wartung des Rechenclusters und die unermüdliche Unterstützung beim Lösen von Speicherplatzproblemen und Auffinden von Backups dankbar. Außerdem bedanke ich mich bei allen Studenten, die mich im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten unterstützt haben.

Für die sorgfältige Durchsicht des Manuskriptes und die hilfreichen Anmerkungen danke ich Herrn Dr.-Ing. Jörg Starzmann und Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Schatz.

Ich bin meinen Eltern und meiner Schwester zutiefst dankbar dafür, dass sie mich auf meinem bisherigen Lebensweg stets unterstützt haben und mir dadurch meine persönliche und berufliche Entwicklung ermöglicht haben. Schließlich gilt der größte Dank meiner Frau Simone, welche mir viel Geduld und Verständnis entgegengebracht hat und ohne deren Rückhalt und Unterstützung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Laupheim, Juni 2021

Marius Grübel

Abstract

In steam turbines, wetness formation usually occurs in the last stages of the low-pressure (LP) part by means of spontaneous condensation. The phase transition is a thermodynamic non-equilibrium process and is associated with additional losses compared to an equilibrium expansion. The aim of the current work is to quantify and classify the various loss mechanisms present in LP steam turbines based on computational fluid dynamics (CFD) simulations. Moreover, a detailed comparison of the losses predicted with non-equilibrium steam (NES) and equilibrium steam (EQS) modeling is carried out. For this purpose, a numerical model based on classical homogeneous nucleation theory implemented in the flow solver ANSYS CFX 18.2 is used. An implementation error in the numerical model is identified and corrected and it is shown that the correction leads to very good agreement between CFD predictions and experimental investigations of condensing Laval nozzle flows.

A second law analysis (SLA) is carried out in order to determine entropy production within the flow field. The classical SLA approach accounts for entropy production due to velocity and temperature gradients as well as turbulent fluctuations. In the current work, the classical approach is extended to two-phase flows and combined with entropy production rates resulting from the interactions between the gaseous and the liquid phase. This allows for a quantification of aerodynamic losses as well as thermodynamic and kinematic relaxation losses. In addition, a postprocessing methodology is introduced that is used to further classify the aerodynamic losses into profile, wake mixing and shock losses.

The suitability of the approach for a comprehensive loss analysis in condensing steam flows is demonstrated by means of two cascade test cases. For most of the operating conditions, thermodynamic relaxation due to inter-phase heat and mass transfer is the most dominant loss mechanism. Kine-

matic relaxation losses caused by a slip velocity between the droplets and the vapor are of minor importance. In addition, the predicted aerodynamic losses increase with increasing pressure ratio as expected.

A new generic two-stage steam turbine test case is introduced subsequently. Differences in the flow field predicted with NES and EQS modeling are illustrated by means of three-dimensional CFD simulations. A detailed loss analysis of the flow through the two-stage turbine is carried out applying a quasi three-dimensional approach on stream tubes at different span positions. A comparison of the loss breakdown between NES modeling and conventional EQS modeling reveals that the discrepancies are not only caused by the additional wetness losses accounted for in the NES simulations. In addition, the influence of the condensation process on the flow field leads to a different composition of the aerodynamic losses. Most affected by this is the shock loss, which is strongly dependent on the amount of latent heat released to the flow. It is demonstrated by means of the flow at 10 % of the channel height in the last stage of the turbine that an efficiency increase is possible by considering non-equilibrium steam effects within the design process of the flow path. A reduction of losses and an improvement of the inflow angle to the rotor blade could be achieved by means of geometrical modifications of the stator vane profile leading to an increase of the efficiency by 0.3 %.

Kurzfassung

In Dampfturbinen erfolgt die Nässebildung in der Regel in den letzten Stufen des Niederdruckteils durch spontane Kondensation. Der Phasenwechsel findet unter thermodynamischen Ungleichgewichtsbedingungen statt und ist mit zusätzlichen Verlusten im Vergleich zu einer Entspannung im thermodynamischen Gleichgewicht verbunden. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die verschiedenen Verlustmechanismen in Niederdruckdampfturbinen mittels numerischen Strömungssimulationen (CFD) zu quantifizieren und zu klassifizieren. Darüber hinaus wird ein detaillierter Vergleich der unter Berücksichtigung des thermodynamischen Ungleichgewichts (NES) vorhergesagten Verluste und den mit Gleichgewichtsdampf (EQS) bestimmten Verlusten durchgeführt. Hierfür wird ein im Strömungslöser ANSYS CFX 18.2 implementiertes Modell auf Grundlage der klassischen homogenen Nukleationstheorie verwendet. Ein Implementierungsfehler im numerischen Modell wird identifiziert und korrigiert und es wird gezeigt, dass die Korrektur zu einer sehr guten Übereinstimmung zwischen CFD-Vorhersagen und experimentellen Untersuchungen kondensierender Lavalströmungen führt.

Eine Analyse auf der Grundlage des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik wird durchgeführt, um die Entropieproduktion innerhalb des Strömungsfeldes zu bestimmen. Der klassische Ansatz berücksichtigt Entropieproduktion aufgrund von Geschwindigkeits- und Temperaturgradienten sowie turbulenten Schwankungen. In der vorliegenden Arbeit wird der klassische Ansatz auf Zweiphasenströmungen erweitert und mit Entropieproduktionsraten kombiniert, die aus den Wechselwirkungen zwischen der gasförmigen und der flüssigen Phase resultieren. Dies ermöglicht eine Bestimmung der aerodynamischen Verluste sowie der thermodynamischen und kinematischen Relaxationsverluste. Darüber hinaus wird eine

Auswertemethode vorgestellt, mit welcher die aerodynamischen Verluste weiter in Profil-, Mischungs- und Stoßverluste unterteilt werden können.

Die Eignung der Methode für eine umfassende Verlustanalyse in kondensierenden Dampfströmungen wird anhand von zwei Kaskadentestfällen nachgewiesen. Für die meisten Betriebsbedingungen ist die thermodynamische Relaxation infolge von Wärme- und Stoffaustausch zwischen den Phasen der dominierende Verlustmechanismus. Kinematische Relaxationsverluste durch eine Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Dampf sind von untergeordneter Bedeutung. Darüber hinaus steigen die vorhergesagten aerodynamischen Verluste mit zunehmendem Druckverhältnis erwartungsgemäß an.

Anschließend wird ein neuer generischer zweistufiger Dampfturbinentestfall vorgestellt. Unterschiede im mittels NES- und EQS-Modellierung berechneten Strömungsfeld werden durch dreidimensionale CFD-Simulationen veranschaulicht. Eine detaillierte Verlustanalyse der Strömung durch die zweistufige Turbine wird mit einem quasi-dreidimensionalen Ansatz auf Stromröhren auf verschiedenen Kanalhöhen durchgeführt. Ein Vergleich der Verlustaufteilung zwischen NES-Modellierung und konventioneller EQS-Modellierung zeigt, dass die Unterschiede nicht nur aus den zusätzlichen Nässeverlusten in den NES-Simulationen resultieren. Darüber hinaus führt der Einfluss des Kondensationsprozesses auf das Strömungsfeld zu einer unterschiedlichen Zusammensetzung der aerodynamischen Verluste. Am stärksten betroffen ist der Stoßverlust, welcher stark von der freigesetzten latenten Wärme abhängig ist. Anhand der Strömung auf 10 % der Kanalhöhe in der letzten Stufe der Turbine wird gezeigt, dass eine Wirkungsgradsteigerung durch die Berücksichtigung von Ungleichgewichtseffekten im Auslegungsprozess möglich ist. Eine Reduzierung der Verluste und eine Verbesserung des Anströmwinkels zur Laufschaufel konnte durch geometrische Änderungen des Leitschaufelprofils erreicht werden, die zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades um 0,3 % führen.

Contents

Title	i
Preface	iii
Vorwort	v
Abstract	vii
Kurzfassung	ix
Nomenclature	xv
1 Introduction	1
2 Condensation in Low-Pressure Steam Turbines	5
2.1 Introduction	5
2.2 Condensation Theory	7
2.2.1 Metastable Steam	7
2.2.2 Homogeneous Nucleation Theory	9
2.2.3 Droplet Growth	14
2.3 Literature Review	20
2.3.1 Experimental and Numerical Investigations	20
2.3.2 Losses in Wet Steam Flows	24

3	Wet Steam Modeling	31
3.1	General Modeling Aspects	31
3.2	Wet Steam Modeling with ANSYS CFX	32
3.2.1	Non-Equilibrium Steam Modeling	33
3.2.2	Simplified Modeling Approaches	39
3.2.3	Calculation of Mixture Quantities	40
3.3	Validation of the NES Model	41
3.3.1	Nozzle of Moses and Stein	41
3.3.2	Nozzles of Moore et al.	46
3.3.3	Conclusion	49
4	Loss Determination in Condensing Steam Flows	51
4.1	Entropy Creation as a Measure for Loss	51
4.2	Second Law Analysis	53
4.2.1	The General Approach	54
4.2.2	Extension to Condensing Steam Flows	58
4.2.3	Verification	60
4.3	Categorization of Losses	65
5	Loss Analysis of Condensing Cascade Flows	71
5.1	Stator Cascade of White	71
5.1.1	Validation and Discussion of the Flow Field	73
5.1.2	Loss Composition for NES Modeling	83
5.1.3	Loss Composition for Different Modeling Approaches . . .	87
5.2	Rotor Cascade of Bakhtar et al.	90
5.2.1	Validation and Discussion of the Flow Field	93
5.2.2	Loss Composition for Different Modeling Approaches . . .	97
5.3	Summary	100

6 Numerical Investigation of a Generic Two-Stage Low-Pressure Steam Turbine	103
6.1 Turbine Design	103
6.2 Numerical Model and Grid Sensitivity Study	108
6.3 Performance and Flow Field Analysis	112
6.3.1 Efficiency and Power Output	112
6.3.2 Influence of Condensation on the Flow Field	118
6.3.3 Wetness Loss Assessment Applying the Baumann Rule . .	126
6.4 Summary	131
7 Loss Analysis of Condensing Turbine Flows	133
7.1 Categorization of Losses	134
7.1.1 Procedure	135
7.1.2 Demonstration of the Methodology	139
7.2 Loss Composition for Different Modeling Approaches	143
7.2.1 Comparison between EQS and NES Modeling	143
7.2.2 Remarks on Kinematic Relaxation	152
7.3 Loss Composition for Varying Load Conditions	153
7.4 Demonstration of an Optimization Potential	160
7.5 Summary	165
8 Conclusion and Outlook	167
Bibliography	171
A Gibbs Free Energy Change During Droplet Formation	187
B Additional Results for STAC	189