

**Untersuchung der Entstehung und Bewegung von  
Flüssigkeitsansammlungen auf Radialturbinenlaufradschaufeln mit einem  
erweiterten Navier-Stokes-Löser**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik

der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Sebastian Schuster

aus

Duisburg

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. F.-K. Benra

Prof. Dr.-Ing. H.-J. Bauer

Tag der mündlichen Prüfung: 29.10.2015



Berichte aus der Strömungstechnik

**Sebastian Schuster**

**Untersuchung der Entstehung und Bewegung von  
Flüssigkeitsansammlungen auf Radialturbinenlaufrad-  
schaufeln mit einem erweiterten Navier-Stokes-Löser**

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**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.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4133-0

ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Strömungsmaschinen der Universität Duisburg-Essen in einem von der Siemens AG geförderten Forschungsprojekt.

Dem Leiter des Lehrstuhls Herrn Prof. Dr.-Ing. Friedrich-Karl Benra danke ich für das in mich gesetzte Vertrauen. Viele hilfreiche Ratschläge von seiner Seite haben zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Durch die Möglichkeit an Fachtagungen teilzunehmen, sind mir in Verbindung mit der Arbeit stehende Sachverhalte klarer geworden.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Jörg Bauer für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie seine wertvollen Anregungen.

Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Brillert, der mir nach Ende des Forschungsprojektes weiterhin die Möglichkeit gab noch ausstehende Arbeiten an der Dissertation während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl zu beenden.

Herrn Dr.-Ing. Hans Josef Dohmen danke ich für zahlreiche fruchtbare Diskussionen während der Durchführung des Forschungsprojektes. Für das angenehme Arbeitsklima und die Diskussionsbereitschaft danke ich den Mitarbeitern des Lehrstuhls.

Meiner Familie danke ich für die Unterstützung und den Rückhalt während der gesamten Zeit und besonders in den letzten Monaten vor der Fertigstellung meiner Dissertation. Meiner langjährigen Lebensgefährtin Frau Dipl.-Ing. Kai Katarina Leicher danke ich für ihre Geduld und das entgegengebrachte Verständnis. Insbesondere danke ich meinen Eltern Klaus und Ulrike Schuster, die mir die akademische Ausbildung ermöglicht haben und mir stets mit Rat zur Seite standen.



## Kurzfassung

Zu den großen Herausforderungen der Menschheit gehört deren Versorgung mit bezahlbarer, die Umwelt und die Ressourcen schonender Energie. In diesem Zusammenhang kommt der stetigen Verbesserung der Energieeffizienz eine herausragende Bedeutung zu. Neben den vermeintlich großen Stellschrauben müssen auch viele einzelne Potenziale ausgeschöpft werden, um im Gesamten die Energieeffizienz zu steigern. Die vorliegende Arbeit leistet hierfür einen Beitrag, indem die Grundlagen für eine verbesserte energetische Verwertung von Restgasen aus der Prozessindustrie mittels Radialturbinen gelegt werden. Diese Restgase sind Gas-Dampfgemische, das heißt, im relevanten Temperatur- und Druckbereich liegen kondensierbare und nicht kondensierbare Stoffe vor. Um den exergetischen Energieanteil bestmöglich auszunutzen, muss das Gas-Dampfgemisch in Druckbereiche entspannt werden, in denen der Dampf kondensiert. Damit ein zuverlässiger Betrieb der Turbinen gewährleistet werden kann, werden in dieser Arbeit umfangreiche Untersuchungen unter Zuhilfenahme eines erweiterten Navier-Stokes-Lösers durchgeführt. Im ersten Teil der Arbeit wird ein vorhandenes CFD-Programm um Routinen erweitert, welche die Kondensation, die Flüssigkeitsfilmbildung und den Flüssigkeitsfilmtransport beschreiben. Der Kondensationsvorgang wird mit der klassischen Nukleationstheorie und Wärme- und Stoffübertragungsmodellen abgebildet. Bei der Berechnung der Tropfenbewegung werden die aerodynamische Widerstandskraft, die unter Berücksichtigung der turbulenten Schwankungsbewegung bestimmt wird, die Brown'sche Molekularkraft, die thermophoretische Kraft, die Auftriebskraft und die Druckkraft berücksichtigt. Durch die Tropfenablagerung entsteht ein Flüssigkeitsfilm, dessen Dicke und Geschwindigkeitsfeld mit einem auf den Filmgleichungen basierenden Rechenprogramm ermittelt wird.

Mit dem erweiterten CFD-Programm wird eine Turbinenbaureihe im Hinblick auf Kondensationseffekte im Laufrad sowie der Flüssigkeitsablagerung und Flüssigkeitsfilmbildung auf den Laufradschaufeln untersucht. In Radialturbinen ist eine Mindestunterkühlung des Dampfes von etwa 20 °C notwendig, damit merklich Kondensation einsetzt. Die direkt durch Kondensation entstehenden Tropfen haben kein unmittelbares Gefährdungspotenzial für die Turbine. Sie verlassen die Turbine entweder durch den Austrittsstutzen oder bilden auf den Oberflächen einen Flüssigkeitsfilm. Die Bewegungsrichtung des Flüssigkeitsfilmes auf der Laufradschaufeloberfläche ist vornehmlich zentrifugal gerichtet, wobei der Flüssigkeitsfilm in Abhängigkeit vom Betriebspunkt zur Laufradhinterkante, der Laufradkante entlang der Gehäusekontur oder der Laufradvorderkante fließt. Die aus dem Film an den beiden letztgenannten Kanten entstehenden Tropfen können sich in die Turbine bewegen, wodurch der zuverlässige Betrieb der Turbine gefährdet wird.

Für den Kondensationsprozess werden verschiedene Korrelationen angegeben, mit denen der Ort maximaler Unterkühlung respektive der Kondensationspunkt sowie die Lage der Kondensationsfront bestimmt werden können. In der Arbeit wird gezeigt, dass Tropfenablagerung am Ort der maximalen Unterkühlung einsetzt. Dadurch können die vorher genannten Korrelationen ebenfalls genutzt werden, um den Punkt, an dem Ablagerung einsetzt, zu bestimmen. Aus den auf dem Filmmodell basierenden Rechnungen und analytischen Betrachtungen kann die Filmbewegung auf der Laufradschaufeloberfläche als reine zentrifugale Bewegung angenommen werden, womit über den Ablagerungsbeginn direkt die Benetzung des Laufrades bestimmt werden kann. Schlussendlich wird ein vereinfachtes Rechenmodell gegeben, mit dem über wenige Turbinenparameter bestimmt werden kann, ob Tropfenbewegung entgegengesetzt der Strömung und somit in die Turbine hinein stattfindet. Bei Kenntnis des Eintritts- und Austrittszustandes einer Radialturbinen kann mit einer erarbeiteten Korrelation die Wirkungsgradänderung aufgrund der Kondensation berechnet werden.

## Abstract

Energy supply under environment-friendly, resource-friendly, and cost-effective conditions is one of the major challenges that humankind faces. In this context, the increase of energy efficiency plays a vital role. The smallest opportunities for development must be used in order to increase the overall energy efficiency. The present work contributes by presenting the fundamentals for improved heat recovery from residual gas by using radial turbines. Residual gases are water-vapour mixtures. This means that they contain condensable and non-condensable components in the considered range of pressure and temperature. To achieve optimum heat recovery, the outlet pressure must be reduced to a value at which steam condenses. Extensive investigations based on an extended Navier-Stokes solver are conducted to ensure the reliable operation of radial turbines. An existing computational fluid dynamics (CFD) code is enhanced with subroutines calculating condensation, liquid film formation, and liquid film transport. Classical nucleation theory and heat and mass transfer models are used to describe the condensation process. The calculation of the droplet trajectory incorporates the Brownian motion, thermophoretic force, lift force, pressure force, and the aerodynamic drag force – taking into account mean and turbulent fluctuation velocity. The thickness and velocity of the liquid films are calculated using a CFD program based on the film equations.

The extended CFD program is used to investigate a radial turbine series with regard to the condensation in the impeller's flow path, droplet deposition, and liquid film formation on the impeller's surface. Subcooling temperature of approximately 20 °C is necessary for realizing noticeable condensation. Droplets originating from condensation aren't immediately harmful to the turbine because they leave the turbine through the outlet or form a liquid film on the surfaces. The direction of motion of the film is mainly in the centrifugal direction. Depending on the operation point, the fluid film moves toward the impeller's trailing edge,

the edge along the casing, or the leading edge. Droplets originating from film separation at the edge along the casing and the leading edge might be deflected into the turbine, affecting reliable operation.

Different correlations are deduced, whereby the location of the maximum subcooling, the condensation location and the orientation of the condensation front, can be calculated. Droplet deposition commences at the location of the maximum subcooling. This knowledge allows using the previously mentioned correlations to determine the location of droplet deposition. Based on the results of the film model calculation and analytical considerations, the film motion can be described as centrifugal motion. Thus, the wetting of the blade can be determined directly from the location where deposition commences. Finally, a calculation model of reduced complexity using a limited number of turbine parameters is proposed. This model enables the calculation of whether the droplet movement is directed opposite to the flow direction, and hence, into the turbine. With the knowledge of turbine inlet and outlet conditions, the change in its efficiency can be calculated using a deduced correlation.

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                    |      |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| Inhaltsverzeichnis.....                                            | v    |
| Abbildungsverzeichnis.....                                         | viii |
| Tabellenverzeichnis .....                                          | xii  |
| Formelzeichen und Abkürzungen .....                                | xiii |
| 1. Einleitung, untersuchte Fragestellung und Methodik.....         | 1    |
| 1.1. Untersuchte Fragestellung.....                                | 2    |
| 1.2. Methodik.....                                                 | 3    |
| 2. Stand des Wissens .....                                         | 5    |
| 2.1. Nukleation und Kondensation .....                             | 5    |
| 2.2. Tropfenablagerung .....                                       | 10   |
| 2.3. Tropfenaufprall.....                                          | 10   |
| 2.4. Flüssigkeitsfilmbewegung.....                                 | 11   |
| 2.5. Filmablösung .....                                            | 13   |
| 2.6. Tropfenschlagerosion .....                                    | 13   |
| 3. Rechenmodell – Theorie und Validierung .....                    | 15   |
| 3.1. Gasphase – Flüssigkeitsphase .....                            | 17   |
| 3.2. Nukleation/Kondensation .....                                 | 20   |
| 3.2.1. Validierung des Kondensationsmodells .....                  | 25   |
| 3.3. Tropfentransport.....                                         | 30   |
| 3.3.1. Berücksichtigung der turbulenten Schwankungsbewegung.....   | 36   |
| 3.3.2. Kraft in Folge der Brown'schen Molekularbewegung.....       | 39   |
| 3.3.3. Druckkraft, Auftriebskraft und thermophoretische Kraft..... | 40   |

---

|        |                                                                   |     |
|--------|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.4. | Validierung der berechneten Tropfenablagerung.....                | 42  |
| 3.4.   | Tropfen-Wand-Interaktion .....                                    | 47  |
| 3.5.   | Flüssigkeitsfilme .....                                           | 50  |
| 3.5.1. | Ansätze zur Berechnung von Flüssigkeitsfilmen .....               | 51  |
| 3.5.2. | Filmmodell im Detail .....                                        | 52  |
| 3.5.3. | Lösung der Filmgleichungen .....                                  | 55  |
| 3.5.4. | Plausibilitätsüberprüfung an der ebenen Platte .....              | 64  |
| 3.5.5. | Berechnung der Schubspannungen.....                               | 69  |
| 3.5.6. | Validierung .....                                                 | 72  |
| 3.6.   | Filmablösung .....                                                | 73  |
| 4.     | Anwendung des Rechenmodells auf verschiedene Turbinen.....        | 75  |
| 4.1.   | Überprüfung des CFD-Modells der Radialturbine.....                | 79  |
| 4.2.   | Variation der Turbinengeometrie und der Randbedingungen.....      | 90  |
| 4.2.1. | Lage der maximalen Unterkühlung im Meridianschnitt .....          | 92  |
| 4.2.2. | Lage der maximalen Unterkühlung auf den $S_1$ -Flächen .....      | 94  |
| 4.2.3. | Analyse der Tropfenablagerung .....                               | 97  |
| 4.2.4. | Flüssigkeitsfilmbewegung zu Bauteilkanten.....                    | 99  |
| 4.3.   | Ort der maximalen Unterkühlung / Einsetzen der Tropfenablagerung. | 101 |
| 4.4.   | Berechnete Filmdicke entlang der Gehäusekontur .....              | 107 |
| 4.5.   | Zusammenfassung der Ergebnisse mit Schlussfolgerungen .....       | 108 |
| 4.5.1. | Globale maximale Unterkühlung .....                               | 108 |
| 4.5.2. | 1D-Verfahren zur Bestimmung des Kondensationspunktes .....        | 111 |
| 4.5.3. | Abschätzung der Kondensationsfront im Auslegungsprozess .....     | 117 |
| 4.5.4. | Bestimmung der Kondensationsfront aus 3D-Strömungsdaten .....     | 119 |
| 4.5.5. | Einsetzen der Ablagerung und Ablagerungsrate .....                | 125 |

---

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5.6. Filmbewegung im Auslegungspunkt .....                         | 127 |
| 4.5.7. Sekundärtropfen .....                                         | 130 |
| 4.6. Wirkungsgrad .....                                              | 139 |
| 5. Zusammenfassung und Ausblick .....                                | 145 |
| 5.1. Zusammenfassung .....                                           | 146 |
| 5.2. Ausblick .....                                                  | 149 |
| 6. Anhang .....                                                      | 152 |
| 6.1. A – Einfluss verschiedener Mechanismen auf die Ablagerung ..... | 152 |
| 6.2. B – Bestimmung des Korrelationskoeffizienten $r$ .....          | 154 |
| 7. Literaturverzeichnis .....                                        | 157 |
| 8. Curriculum Vitae .....                                            | 169 |