

Christian Rakut

Analyse der Wärmetransportmechanismen in thermischen Radialturbinen

**Analyse der Wärmetransportmechanismen
in thermischen Radialturbinen**

**Analysis of Heat Transport Mechanisms
in Thermal Radial Turbines**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Christian Rakut

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. habil. Manfred Wirsum
 Universitätsprofessor Dr.-Ing. Herbert Pfeifer

Tag der mündlichen Prüfung: 03. September 2018

Berichte aus der Strömungstechnik

Christian Rakut

**Analyse der Wärmetransportmechanismen
in thermischen Radialturbinen**

Shaker Verlag
Düren 2019

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6850-4

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 Kraftwerkstechnik, Dampf- und Gasturbinen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen University im Rahmen des FVV-Forschungsprojektes Radialturbinentemperaturfeld.

Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle dem Leiter des Instituts Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Manfred Wirsum, der es mir ermöglichte diese Arbeit am IKDG durchzuführen. Darüber hinaus danke ich ihm für die Übernahme des Hauptreferats. Ferner gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Herbert Pfeifer für die Übernahme des Koreferats und Herrn Prof. Dr.-Ing. Lorenz Singheiser für die Durchführung des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Mein Dank gilt allen am Projekt beteiligten Mitarbeitern des Institutes. Zu nennen sind hier in erster Linie Dr.-Ing. Hailu Tadesse, der den experimentellen Teil des Projektes inklusive eines vollständigen Neuaufbaus des Prüfstands verantwortete und Dr.-Ing. Matthias Diefenthal, der den numerischen Teil bearbeitete. Ohne seine numerischen Simulationsergebnisse wäre die hier vorliegende Arbeit nicht möglich gewesen. In unserer Gruppe führten wir viele fachliche Diskussionen, um das Projekt voranzutreiben. Darüber hinaus ist ein solches Forschungsvorhaben mit aufwendigen experimentellen Untersuchungen als Grundlage nicht ohne die tatkräftige Unterstützung durch die Mitarbeiter der Institutswerkstatt unter Leitung von Hans-Peter Nießen und unseres E-Technikers Dipl.-Ing. (FH) Germar Heibges möglich.

Weiterhin danke ich allen meinen Kollegen am Institut für Kraftwerkstechnik, Dampf- und Gasturbinen für die stets kollegiale Zusammenarbeit und den studentischen Hilfskräften, den Studien-, Diplom-, Projekt-, Bachelor- sowie Masterarbeitern ohne deren Engagement diese Arbeit ebenso nicht möglich gewesen wäre.

Das für diese Arbeit wichtige Abgasturbolader-Projekt Radialturbinentemperaturfeld wurde ermöglicht durch die freundliche Unterstützung der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV). Unter ihren Mitgliedfirmen lieferte die BorgWarner Turbosystems GmbH einen maßgeblichen Beitrag, indem sie den Turbolader und die zugehörigen CAD-Daten zur Verfügung stellte.

Zusammenfassung

Radialturbinen in Abgasturboladern unterliegen in den letzten Jahren steigenden Anforderungen. So kommen auf der Verdichterseite Titanwerkstoffe zum Einsatz, die höhere Radumfangsgeschwindigkeiten zulassen. Gleichzeitig steigen unter anderem durch den vermehrten Einsatz von Abgasturboladern in Ottomotoren die Abgastemperaturen, mit denen die Radialturbinen beaufschlagt werden. Durch die höheren thermischen und mechanischen Belastungen ergibt sich die Notwendigkeit das Temperaturprofil im Radialturbinenrad möglichst früh im Designprozess zuverlässig vorherzusagen, um in diesem frühen Stadium Lebensdauerberechnungen durchführen zu können.

In diesem Zusammenhang werden in der vorliegenden Arbeit die Wärmetransportmechanismen im Radialturbinenrad analysiert und diskutiert. Die Grundlage bilden hierfür die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens „Radialturbinentemperaturfeld“. Anhand der numerischen Ergebnisse wird aufgezeigt, wie die Sekundärströmungen im Schaufelkanal des Radialturbinenrades die Entwicklung der Grenzschicht und damit die lokale Verteilung der Wärmestromcharakteristik beeinflussen. Hierzu wird ausgehend von der Turbinenvolute der Strömungszustand im Eintrittsbereich des Radialturbinenrades diskutiert und der weitere Strömungsverlauf mit den sich ausbildenden Sekundärströmungen im Strömungskanal der Radialturbine analysiert. Um den Zusammenhang zwischen dem aero-thermodynamischen Zustand auf dem Grenzschichttrand und dem Wandwärmestrom ohne störende Einflüsse aus der Rotation des Turbinenrades besser aufzeigen und analysieren zu können, wird an einer ein- und beidseitig umströmten ebenen Platte eine Variation der Einflussparameter Totaltemperatur, Machzahl und Wärmestrom über den Schaufelfuß durchgeführt.

Für die Bestimmung der Temperaturfelder in einem Radialturbinenrad wird im Weiteren ein Korrelationsansatz erarbeitet. Hierzu wird zunächst ein 1D-Expansionsmodell erstellt und validiert, mit dessen Hilfe der mittlere aero-thermodynamische Zustand im Schaufelkanal des Radialturbinenrades in jeder beliebigen Position entlang des Strömungsweges hinreichend genau beschrieben werden kann. Als Eingangsdaten für das 1D-Expansionsmodell fungieren hierbei die Turboladereintrittsbedingungen. Im zweiten Schritt wird ein Korrelationsansatz für die Beschreibung des Wärmeübergangskoeffizienten erarbeitet. Dieser Ansatz basiert auf der Segmentierung der Turbinenradoberfläche entlang des Strömungsweges. In der Validierung des Korrelationsansatzes wird die Sensitivität des erarbeiteten Systems bzgl. der Segmentierung aufgezeigt. Abschließend werden verschiedene Segmentierungsvarianten der Oberfläche des Turbinenrades im Hinblick auf die erreichbare Genauigkeit in der Berechnung des Festkörpertemperaturfeldes gegenüber gestellt.

Abstract

In the last recent years the requirements of radial turbines in turbochargers are rising. For example, titanium materials are used on the compressor side, which allow higher rotational speeds. On the other hand through the increased use of turbochargers in gasoline engines with higher exhaust gas temperatures the turbine is charged with increased turbine inlet temperatures. As a result of the higher thermal and mechanical loads, it is necessary to be able to reliably predict the temperature profile in the radial turbine wheel as early as possible in the design process in order to be able to carry out life-time calculations at this early stage.

In this context, the heat transfer mechanisms in the radial turbine wheel are analyzed and discussed in the present work. Therefor experimental and numerical investigations were carried out as part of the research project "Radial Turbine Temperature Field". The results of these investigations form the basis for the following analyzes. The numerical results show how the secondary flows in the blade channel of the radial turbine wheel influence the development of the boundary layer and thus the local distribution of the heat flow characteristic. For this purpose, starting from the turbine volute, the flow state in the inlet region of the radial turbine wheel is discussed and the further flow path with the secondary flows developing in the flow channel of the radial turbine is analyzed. In order to show and analyze the relationship between the aero-thermodynamic state at the boundary layer edge and the wall heat flux, a variation of the influence parameters total temperature, Mach number and heat flux over the blade root is carried out. To avoid any disturbing influences from the rotation of the turbine wheel for this variation a simple flat plate with flow on one and both sides is chosen.

For the determination of the temperature fields in a radial turbine wheel, a correlation approach was developed. For this purpose, a 1D-expansion model is created and validated. With this model the averaged aero-thermodynamic state in the blade channel of a radial turbine wheel can be described sufficiently accurately at any position along the flow path. The turbocharger inlet conditions are used as input data for the 1D-expansion model. In the second step a correlation approach for the description of the heat transfer coefficient is worked out. This approach is based on the segmentation of the turbine wheel surface along the flow path. In the validation of the correlation approach, the sensitivity of the developed system with respect to the segmentation of the surface is shown. Finally, different segmentation variants of the surface of the turbine wheel are compared with respect to the achievable accuracy in the calculation of the solid-state temperature field.

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	i
II	Formelzeichen und Abkürzungen.....	v
1	Einleitung.....	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Untersuchung der Festkörpertemperaturen in Turboladerkomponenten	3
2.2	Untersuchung der Strömungen in Radialturbinen.....	5
2.3	Zielsetzung und methodische Vorgehensweise	8
3	Theoretische Grundlagen	11
3.1	Strömungsgrenzschichten	11
3.1.1	Aufbau und Dicke der Strömungsgrenzschicht	11
3.1.2	Geschwindigkeitsprofil in der Grenzschicht	14
3.1.3	Temperaturprofil in der Grenzschicht.....	17
3.2	Wärmeübertragung	19
3.2.1	Wärmeleitung.....	19
3.2.2	Konvektion	20
3.2.3	Strahlung	21
3.2.4	Klassische Wärmeübertragungsmodelle.....	22
3.3	Konvention der Geschwindigkeitsdreiecke am Radialturbinenrad	24
4	Experimentelle und numerische Untersuchungen	25
4.1	Experiment	25
4.1.1	Prüfkörper und Aufbau Prüfstand	25
4.1.2	Messtechnik	27
4.1.3	Ergebnisse stationäre Betriebspunkte	32
4.2	Numerische Untersuchungen.....	35
4.2.1	Numerisches Modell	35
4.2.2	Validierung der stationären Ergebnisse.....	40
5	Spezielle Strömungs- und Wärmeübergangphänomene an Radialturbinen	45
5.1	Strömungszustand am Turbinenradeintritt.....	45
5.2	Wärmestromcharakteristik auf der Turbinenradoberfläche.....	51
5.2.1	Saugseite.....	51

5.2.2	Druckseite	54
5.2.3	Wandwärmestrom und Temperaturgradienten in der laminaren Unterschicht	58
5.2.4	Zusammenfassung Kapitel 5.1 und 5.2	62
5.3	Grenzschichtdicke und Sekundärströmungen am Turbinenrad	63
5.3.1	Grenzschichtdicke	63
5.3.2	Sekundärströmungen	76
5.3.3	Zusammenfassung Kapitel 5.3	90
5.4	Wärmetransport an der ebenen Platte mit ein- und beidseitiger Umströmung	91
5.4.1	Einseitig umströmte ebene Platte	91
5.4.2	Beidseitig umströmte ebene Platte	100
5.4.3	Zusammenfassung Kapitel 5.4	115
6	Entwicklung einer Wärmeübergangskorrelation	117
6.1	1D-Expansionsmodell für Radialturbinen	117
6.1.1	Herleitung der Grundgleichung	117
6.1.2	Einbindung von Verlustmodellen in 1D-Expansionsmodell für Radialturbinen	123
6.1.3	Optimierung des 1D-Expansionsmodells	130
6.1.4	Validierung und Ergebnisse	135
6.1.5	Zusammenfassung Kapitel 6.1	139
6.2	Grundlagen für den Korrelationsansatz	140
6.2.1	Segmentierung der Schaufeloberfläche entlang des Strömungspfad	140
6.2.2	Flächenspezifischer Wärmestrom auf den Segmentflächen	141
6.2.3	Machzahlabhängigkeit in der wandnahen Strömung im Schaufelkanal	145
6.3	Korrelationsansatz	150
6.4	Validierung	162
6.4.1	Validierung der WTZ-Korrelation der Saugseite der Schaufel anhand der numerischen Berechnungen	162
6.4.2	Validierung des Wärmeübergangs und der Temperaturfelder	167
6.4.3	Zusammenfassung der Kapitel 6.2 bis 6.4	174
6.5	Variation der Segmentierung	175
7	Zusammenfassung und Ausblick	179
7.1	Zusammenfassung	179
7.2	Ausblick	181

I Inhaltsverzeichnis	iii
<hr/>	
III Literaturverzeichnis.....	183
IV Abbildungsverzeichnis	191
V Anhang.....	203

II Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	[-]	Konstante
a_i	[-]	Polynomkoeffizienten
a	[m/s]	Schallgeschwindigkeit
a	[m ² /s]	Temperaturleitfähigkeit
A	[m ²]	Querschnittsfläche, Oberfläche
A	[-]	Amplitude
$b_{j,i}$	[-]	Polynomkoeffizienten
b	[m]	Breite
c	[m/s]	Absolutgeschwindigkeit
c_m	[m/s]	Meridionalkomponente der Absolutgeschwindigkeit
c_p	[J/(kg·K)]	spezifische Wärmekapazität
C	[-]	Integrationskonstante
C	[°/m]	Geometriekonstante
D1, D2	[m]	Dämpfung
D	[m]	Durchmesser
Exp	[-]	Exponent
f	1/s	Frequenz
$f(\dots)$	[-]	Funktion von ...
F	[m ²]	Fläche

Symbol	Einheit	Beschreibung
h	[J/kg]	Spezifische Enthalpie
l, L	[m]	Länge, charakteristische Länge
\ln	[-]	Natürlicher Logarithmus
\dot{m}	[kg/s]	Massenstrom
Ma	[-]	Machzahl
n	[-]	Exponent, Polytropenexponent, Anzahl
n	[1/min]	Drehzahl
Nu	[-]	Nußelt-Zahl
p	[Pa]	Druck
Pr	[-]	Prandtl-Zahl
r, r^*, R	[m]	Radius
R	[J/(kg·K)]	Spezifische Gaskonstante
Re	[-]	Reynolds-Zahl
rec	[-]	Recovery Faktor
\dot{q}	[W/m ²]	Wärmestromdichte, spezifischer Wärmestrom
\dot{Q}	[W]	Wärmestrom
s	[J/(kg·K)]	Entropie
T	[K]	Temperatur
u	[m/s]	Geschwindigkeit, Umfangsgeschwindigkeit
u_t	[m/s]	Schubspannungsgeschwindigkeit
v	[-]	Phasenverschiebung
V	[m ³]	Volumen

Symbol	Einheit	Beschreibung
\dot{V}	[m ³ /s]	Volumenstrom
w	[m/s]	Relativgeschwindigkeit
WTK	[W/(m ² ·K)]	Wärmetransportkoeffizient
WTZ	[-]	Wärmetransportkennzahl
x	[-]	Exponent
x	[m]	Koordinate, Weg, Länge, Lauflänge
y	[m]	Koordinate, Abstand zur Wand
y ⁺	[-]	Dimensionsloser Wandabstand
z	[m]	Koordinate

Griechische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
α	[-]	Absorptionsanteil der Strahlung
α	[°]	absoluter Anströmwinkel
α	[W/(m ² ·K)]	Wärmeübergangskoeffizient
β	[°]	relativer Anströmwinkel
δ	[m]	Grenzschichtdicke
ε	[-]	Emissionsgrad
ζ	[-]	Druckverlust
η	[-]	Wirkungsgrad
η	[kg/(m·s)]	Dynamische Viskosität
φ	[°]	Umfangswinkel

Symbol	Einheit	Beschreibung
κ	[-]	Isentropenexponent
λ	[W/(m·K)]	Wärmeleitfähigkeit
ν	[m ² /s]	Kinematische Viskosität
π	[-]	Druckverhältnis
ρ	[-]	Reflexionsanteil der Strahlung
ρ	[kg/m ³]	Dichte
σ	[W/(m ² ·K ⁴)]	Stefan-Boltzmann-Konstante
τ	[-]	Transmissionsanteil der Strahlung
τ_w	[kg/(m·s ²)]	Wandschubspannung
ω	[1/s]	Winkelgeschwindigkeit

Indizes

Indizes	Beschreibung
abs	absolut
ad	adiabat
aus	Austritt
av	Mittelwert, average
A	Austritt, Oberfläche
A	adiabat
ATL	Abgasturbolader
B	Bulk, Mischtemperatur
ch	charakteristische Länge

Indizes	Beschreibung
cos	Cosinus
Dia	diabat
ein	Eintritt
Exp	Experiment
E	Eintritt
FK	Festkörper
Fl	Fluid (Strömung)
Flgm	flächengemittelt
ges	gesamt
G	Gas
Gr	Grenzschichtrand
Grenz	Grenze, Grenzwert
G1...6	Temperaturmessstellen am Turbinengehäuse
i	Zähler
inf	infinitesimal
is	isentrop
j	Zähler
konv	konvektiv
kor	korrigiert
krit	kritisch
l	Weglängenposition
lam	laminar

Indizes	Beschreibung
L	Länge, Plattenlänge
m	meridional, mittel, mechanisch
max, Max	Maximalwert
MP1...MP4	Temperaturmessstellen am Turbinenrad und an der Welle
MS1...MS4	
n	normal
näq	nicht äquidistant
num	Numerik
N	Zähler
Öl	Öl
Poly	polytrop
red	reduziert
ref	Referenz
rel	relativ, Relativ-System
rot	Rothalpie
sin	Sinus
st	statisch
Seg	Segment
Sensor	Sensorwert
SF	Schaufelfuß
SG	Strahlung Gehäuse
SK	Schaufelkanal

Indizes	Beschreibung
SKA	Schaufelkanalaustritt
Start	Start
t	total, turbulent, Temperatur
tot	total
turb	turbulent
T	Turbine
TA	Turbinenaustritt
TE	Turbineneintritt
TR	Turbinenrad
TRA	Turbinenradaustritt
TRE	Turbinenradeintritt
u	Umfangsrichtung
USP	Umschlagpunkt
V	Verdichter, Volumen
Vo	Volute
w	Wand
wk	Wand gekühlt
wh	Wand geheizt
W	Wand, Welle
Z	Zellen
φ	Umfangswinkel
0	An der Wand, Bezug, Start

Indizes	Beschreibung
1, 2, 3	Zähler, Ebenen, Eintritt / Austritt
99	99 Prozent
∞	Unendlich, im Unendlichen, steht auch für Hauptströmung

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
1D	Eindimensional
ATL	Abgasturbolder
A/D	Analog/Digital
CFD	Computational Fluid Dynamic
CHT	Conjugate Heat Transfer
CTA	Computational Thermal Analysis
FEM	Finite Element Methode
FL	Fluid
FVV	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen
G1...G6	Temperaturmessstellen am Turbinengehäuse
IKDG	Institut für Kraftwerkstechnik, Dampf- und Gasturbinen
MP1...MP4	Temperaturmessstellen am Turbinenrad und an der Welle
PIV	Particle Image Velocimetry
RTTF	Forschungsprojekt Radialturbinentemperaturfeld
T	Turbine
V	Verdichter