

Frank Freidank

Entwicklung von Prozessen und Optimierungsstrategien zur multidisziplinären Auslegung von Hochdruckturbinenschaufeln

Entwicklung von Prozessen und Optimierungsstrategien zur multidisziplinären Auslegung von Hochdruckturbinenschaufeln

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Master of Science (M.Sc.)

Frank Freidank (geb. Wagner)

geboren am 13. August 1984 in Berlin

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Christoph Egbers	BTU Cottbus-Senftenberg
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Arnold Kühhorn	BTU Cottbus-Senftenberg
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Marius Swoboda	TU Berlin

Tag der mündlichen Prüfung: 5. Dezember 2019

Berichte aus der Luft- und Raumfahrttechnik

Frank Freidank

**Entwicklung von Prozessen und
Optimierungsstrategien zur multidisziplinären
Auslegung von Hochdruckturbinenschaufeln**

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Cottbus-Senftenberg, BTU, Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7372-0

ISSN 0945-2214

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

Danksagung

Ich möchte Prof. Arnold Kühhorn für die umfassende Unterstützung danken. Er hatte jederzeit ein offenes Ohr für die Herausforderungen, die sich im Rahmen einer Dissertation jedem Promovenden stellen. Ebenfalls danke ich Prof. Marius Swoboda für das Entwickeln und Fortführen des Doktoranden-Programmes VIT und natürlich, dass er sich bereit erklärte diese Arbeit zu bewerten. Prof. Christoph Egbers sei an dieser Stelle für die Übernahme des Kommissionsvorsitzes gedankt.

Den Kollegen vom Industriepartner Rolls-Royce danke ich für die starke Unterstützung durch zahlreiche Personen in unterschiedlichsten Fachgebieten. Hervorzuheben sind sicherlich Dr. Roland Parchem, welcher mit Rat und Tat das Arbeitspaket im Rahmen des VITIV-Projektes vorantrieb, Bernd Meissner, welcher in unzähligen Unterhaltungen das umfassende Fachwissen am Lagerfeuer weitergab, und Dr. Timm Janetzke, welcher durch die fachliche Kompetenz in Sachen Turbinenkühlung ständiger Ansprechpartner war.

Allen Mitarbeitern am Lehrstuhl Strukturmechanik und Fahrzeugschwingungen (*SMF*) danke ich für die freundliche Aufnahme und die sachlichen Anregungen in mehr als vier Jahren, die ich am Lehrstuhl verbringen durfte. Allein aus diesem Grund, werde ich Cottbus immer in guter Erinnerung behalten.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Familie danken. Meiner Frau Anne, für die Liebe und Unterstützung in allen Lebenssituationen und dass Sie bei den sprachlichen Korrekturen nie aufgegeben hat, meinem Sohn Robin, dessen Lachen mich immer wieder aufbaut und meinen Eltern, die mich über den gesamten Werdegang unterstützt und ermutigt haben.

Kurzfassung

Entwicklung von Prozessen und Optimierungsstrategien zur multidisziplinären Auslegung von Hochdruckturbinenschaufeln

Frank Freidank

Schlüsselwörter: Mehr-Ziel-Optimierung, Rotorschaukel, Hochdruckturbinen, Turbinenkühlung, Schaufel-Scheibe-Verbindung, Antwortflächen, Robustheit

Bei der Rotorschaukel der Hochdruckturbinen handelt es sich um das erste rotierende Bauteil nach der Brennkammer. Dementsprechend sind sowohl die thermischen als auch strukturellen Lasten durch die vorherrschende Temperatur beziehungsweise Rotation enorm. Die beteiligten Disziplinen zur Auslegung einer solchen Komponente sind die Struktur- und Lebensdauerberechnung, die Aerodynamik und die Kühlung der Turbinenschaufel, wobei die letzteren beiden Disziplinen auch oft unter dem Begriff *aerothormal* zusammengefasst werden.

Innerhalb dieser Arbeit werden unterschiedliche Teilgebiete der Rotorschaukel ebenso wie methodische Aspekte bearbeitet. Dies umfasst Untersuchungen zur Verbindung zwischen der Rotorschaukel und der dazugehörigen Turbinenscheibe, welche als Tannenbaumfuß bezeichnet wird. Dabei steht der Einfluss der verwendeten Parametrisierung auf den gesamten Auslegungsprozess im Vordergrund. Darunter fallen alle notwendigen Arbeitsschritte von der theoretischen Überlegung, wie die Parametrisierung gestaltet werden kann, die entsprechende Integration in die CAD-Software bis zu den Eigenschaften des besten Entwurfes des Tannenbaumfußes. Ziel ist es, durch Variation der vereinfachten zweidimensionalen Geometrie, die Spannung in kritischen Regionen zu reduzieren.

Ein wesentlicher Teil der vorliegenden Arbeit befasst sich mit der Verbesserung eines Arbeitsprozesses für die Turbinenkühlung und der Durchführung von Optimierungen mit den verwendeten Parametrisierungen für die interne Schaufelgeometrie. Ziel ist ebenfalls die Entwicklung von Optimierungsstrategien für den betrachteten Fall. Im Detail handelt es sich um Variationen der Filmkühlbohrungen und Turbulatoren (in diesem Fall interne Rippen), wobei der Massenstrom für die Filmkühlung und die Oberflächentemperatur der externen Schaufelflächen minimiert werden sollen. Es handelt sich um eine Optimierung mit mehreren Zielen und ein sogenanntes *Mixed-Integer-Problem*, bei dem Eingaben sowohl diskret, als auch kontinuierlich vorliegen.

Als letzter Schwerpunkt wird untersucht, wie stark die Rechenzeit durch Verwendung von Antwortflächen reduziert werden kann, um vor allem Aspekte von Robustheit mit in die Optimierung zu integrieren. Insbesondere die Vertrauenswürdigkeit der dazu benötigten Methoden ist von herausragender Bedeutung. Dies umfasst nicht nur die Methoden zur Erstellung von Antwortflächen, sondern auch die Methoden zur Qualitätsbewertung von Antwortflächen und zur Erstellung der verwendeten Stützstellen. Als Untersuchungsobjekt dient ein Arbeitsablauf für die Spannungs- und Lebensdauerberechnung der Hochdruckturbinenschaufel. Hierbei werden Geometrieparameter ebenso wie Materialparameter und Parameter für die Randbedingungen verändert. Zielgröße ist primär die Lebensdauer auf der Schaufeloberfläche. Es werden aber auch andere Größen, wie Masse und aerodynamischer Wirkungsgrad, einbezogen.

Abstract

Development of Processes and Optimisation Strategies for multi-disciplinary Design of High Pressure Turbine Blades

Frank Freidank

keywords: Multi-Objective-Optimisation, Rotor Blade, High Pressure Turbine, Turbine Cooling, Firtree, Response Surface Methodology, Robust Design

The rotor blade of a high pressure turbine in an aero engine is the first rotating component behind the combustor. For this reason the thermal as well as the structural load are tremendous due to the existing temperature and rotation. The involved disciplines in the design process of such a component are stress and lifing prediction, aerodynamics and cooling of a turbine blade. The last two disciplines are often summarized as *aerothermal*.

In the current work different aspects of the rotor blade design as well as methodical aspects will be processed. This includes investigations into the connection between the rotor blade and the corresponding turbine disc, which is called firtree. Focus lies on the influence of the used parametrisation on the overall design process. Therefore all necessary steps in the design process will be considered. This starts with theoretical thoughts what the parametrisation could look like and how it can be integrated into a CAD system and ends with the attributes of the best firtree design. The overall aim is a stress reduction in critical regions of the two dimensional geometry.

An essential part of the current work is about the improvement of an existing workflow for turbine cooling and the execution of optimisations with available parametrisations for internal geometry features. The aim is to develop optimisation strategies for the present example. This means in detail a variation of film cooling holes and turbulators (in the current case ribs), whereby the coolant mass flow and the temperature of the external surface of the rotor blade should be minimised. A two objective optimisation with a so called *mixed-integer-problem* will be addressed, where the input parameters are discrete as well as continuous numbers.

The main objective of the last part is the influence of the reduction of the computational effort by using response surface methods, especially considering robust design in the optimisation process. Key point is the reliability of the corresponding methods. Here not only the creation but also the quality evaluation of the response surface as well as the creation of the sample points are highlighted. As an example the workflow for a stress and lifing analysis of a high pressure turbine blade is used. Thereby geometry parameter as well as parameter for the boundary conditions and material were varied. Primary objective is the external life of the rotor blade but other values like the mass and aerodynamic efficiency are included as well.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	X
Lateinische Symbole	X
Griechische Symbole	XI
Indizes	XI
Abkürzungsverzeichnis	XII
1. Einleitung	1
1.1. Hochdruckturbinenschaufel	3
1.2. Gegenwärtige Auslegungsstrategien	6
1.3. Motivation dieser Arbeit	7
2. Theorie	11
2.1. Mathematische Grundlagen	11
2.1.1. Geometrie und Parametrisierung	11
2.1.2. Optimierung	13
2.1.3. Robustheit	17
2.1.4. Stützstellengenerierung	18
2.1.5. Antwortflächen	19
2.2. Physikalische Grundlagen	22
2.2.1. Wärmeübertragung	22
2.2.2. Vorauslegung Kühlung	25
2.2.3. Aerodynamik	28
2.2.4. Spannung- und Lebensdauerberechnung	29
2.3. Numerische Grundlagen	32
2.3.1. FEM	32
2.3.2. CFD	32
2.3.3. Kopplungsstrategien	33
3. Ein-Ziel-Optimierung einer Schaufel-Scheibe-Verbindung	35
3.1. Einleitung und Stand der Technik	35
3.2. Parametrisierung	36
3.2.1. Globaler Parametersatz	36
3.2.2. Parametrisierung mit einem Kreisbogen	38
3.2.3. Parametrisierung mit zwei Kreisbögen	38
3.2.4. Parametrisierung mit Splines	39
3.3. Arbeitsablauf und Durchführung	41
3.3.1. Beschreibung des Firtree-Modells	41
3.3.2. Arbeitsablauf und Implementierung	43
3.3.3. Optimierungsformulierung	44
3.4. Ergebnisse und Diskussion	45
3.4.1. Optimierung	45
3.4.2. Vergleich der besten Ergebnisse	48
3.4.3. Vergleichsmatrix	50
3.5. Zusammenfassung und Ausblick	52

4. Mehr-Ziel-Optimierung für die Turbinenkühlung	55
4.1. Einleitung und Stand der Technik	55
4.2. Parametrisierung	57
4.3. Arbeitsablauf	59
4.4. Parameterreduzierung	60
4.5. Optimierungsformulierung	62
4.6. Ergebnisse und Diskussion	63
4.6.1. Optimierung mit dem AMGA-Algorithmus	64
4.6.2. Optimierung mit dem NSGA-II- und Vergleich mit dem AMGA-Algorithmus	66
4.6.3. Optimierung mit der alternativen Formulierung und AMGA-Algorithmus	67
4.7. Zusammenfassung und Ausblick	70
5. Multidisziplinäre Robustheits- und Mehr-Ziel-Optimierung	73
5.1. Einleitung und Stand der Technik	73
5.2. Validierung der Methoden	75
5.2.1. Matlab-Toolbox für Validierung und Optimierung	75
5.2.2. Vergleich der Methoden zur Stützstellengenerierung	77
5.2.3. Vergleich der Methoden zur Antwortflächengenerierung	79
5.3. Parametrisierung und Optimierung	80
5.3.1. Parametrisierung	80
5.3.2. Optimierungsformulierung	82
5.4. Arbeitsablauf und Durchführung	83
5.4.1. Arbeitsablauf	84
5.4.2. Voruntersuchungen	84
5.4.3. Durchführung	86
5.5. Ergebnisse und Diskussion	86
5.5.1. Bewertung der generierten Antwortflächen	86
5.5.2. Ein-Ziel-Optimierung der Lebensdauer	89
5.5.3. Robustheitsoptimierung der Lebensdauer	89
5.5.4. Robustheits- und Mehr-Ziel-Optimierung	91
5.6. Zusammenfassung und Ausblick	93
6. Zusammenfassung und Ausblick	97
6.1. Zusammenfassung	97
6.2. Ausblick	99
Abbildungsverzeichnis	100
Tabellenverzeichnis	101
Literatur	102
A. Anhang	107
A.1. Dimensionslose Kennzahlen	107
A.2. Software	108
A.3. MOViT	109
A.4. Strategisches Vorgehen zur Vorbereitung von Optimierungen	112
A.5. Parameterübersicht für den Firtree	115
A.6. Clustering in der Kühlungsoptimierung	115
A.7. Branin-Testfunktion	118

Lateinische Symbole

A	Matrix
A	Fläche
$A_{s,g}$	umströmte Schaufeloberfläche
a, a_i	Koeffizienten der linearen Regression
C	Dämpfungsmatrix
C	Kurve
c_p	spezifische Wärmekapazität
D_{LCF}, D_{Kr}	Lebensdauerkonto bzgl. LCF / Kriechen
d_n	<i>crowding distance</i>
f, r	Lastvektor
$f(x)$	Funktionsverlauf
$\tilde{f}(x)$	Approximation des Funktionsverlaufes
f_k	k -ter Funktionswert
$h(p)$	Ungleichheitsnebenbedingungen
h, h_{tc}	Wärmeübergangskoeffizient
$I_{n,i}$	Index des Pareto-Front designs
i, j, k	Laufindizes
K	Steifigkeitsmatrix
k	Wärmeleitfähigkeit
L	Lebensdauer
M	Massenmatrix
\dot{m}	Massenstrom
\tilde{m}	dimensionsloser Massenstrom
N	Anzahl erträglicher Lastspiele
$N_{i,k}$	i -te Ansatzfunktion vom Grad k
n	Anzahl aktueller Lastspiele
P	Parameterraum
p	aktueller Parametersatz
p^u, p^o	untere/obere Schranken für Parameter
P_i	i -ter Kontrollpunkt
p	Polynome für lineare Regression
\dot{Q}	Wärmestrom
Q_j	Interpolationspunkte
\dot{q}_i	Wärmestromdichte in i -Richtung
\dot{q}_V	volumenbezogene Wärmequelle
\dot{q}_W	Wärmestromdichte über Wand
R_k	Korrelationsansatz für Kriging-Methode
r	Radius/Abstand
T	Temperatur
t	Zeit
t	aktuelle Standzeit
t_m	erträgliche Standzeit

u, \dot{u}, \ddot{u}	Verschiebung/Geschwindigkeit/Beschleunigung der Knotenpunkte
u	Knotenvektor
\bar{U}_g	gemittelter effektiver Wärmeübergangskoeffizient
U_i	i -tes Element aus dem Knotenvektor
u, v	Variable
v	Eigenvektor
w	spezifische Arbeit
x, x_i	Ortsvektor
x, y, z	Koordinaten

Griechische Symbole

∇	Nabla-Operator (1.Ordnung)
Δ	Laplace-Operator (2.Ordnung) $\Delta = \nabla \cdot \nabla$
$\epsilon(x)$	Fehler bei der Approximation
ϵ	Dehnung
$\dot{\epsilon}$	Dehnrate
ϵ	dimensionsloser Emissionsgrad
ϵ_c	<i>cooling effectiveness</i>
ϵ_f	<i>film cooling effectiveness</i>
η	Wirkungsgrad
η_c	<i>cooling efficiency</i>
λ, λ_i	Koeffizienten der radialen Basisfunktionen
λ	Eigenwert
μ	Mittelwert
φ	Radiale Basisfunktion
Π	Druckverhältnis
ρ	Dichte
ρ_{ij}	Korrelationskoeffizient
σ	Standardabweichung
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante
θ_k	Koeffizienten der Kriging-Methode

Indizes

$\bar{(\)}$	Mittelwert
$(\)^*$	Anwesenheit von Filmkühlung
$(\)_b$	<i>blade</i> (Turbinenschaufel)
$(\)_c$	<i>coolant</i> (kühlendes Fluid)
$(\)_{Ext}$	Extern
$(\)_e$	<i>exit</i> (Auslass)
$(\)_F$	Fluid
$(\)_f$	<i>film</i> (Film)

$()_g$	Heißgas
$()_{\text{Int}}$	Intern
$()_i$	<i>inlet</i> (Einlass)
$()_T$	Turbine
$()_W$	Wand

Abkürzungsverzeichnis

AMGA	Archive-based M icro G enetic Algorithm
B-Spline	B asis- S pline
CAD	Computer Aided Design
CCF	Combined Cycle Fatigue
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHT	Conjugate H eat Transfer
CMA-ES	Covariance M atrix A daptation Evolution Strategy
DNS	D irekte N umerische S imulation
DoE	D esign of Experiments
FE/FEM	Finite Elemente / Finite Elemente Methode
HCF	H igh Cycle Fatigue
iLHS	improved Latin Hypercube Sampling
KRIG	K riging
LCF	Low Cycle Fatigue
LES	Large Eddy Simulation
LHS	Latin Hypercube Sampling
LOOCV	Leave-One-Out-Crossvalidation
LR	Lineare Regression
MCS	M onte C arlo Simulation
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II
NURBS	Non-uniform rational B -Splines
OGV	Outlet Guide Vane
oLHS	optimal Latin Hypercube Sampling
RANS	Reynold's Averaged Navier-Stokes
RBF	radiale B asisfunktionen
RMS	Root-Mean-Square
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
TBC	Thermal B arrier Coating