

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto: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, Rotorschaufel, Hochdruckturbinen, Turbinenkühlung, Schaufel-Scheibe-Verbindung, Antwortflächen, Robustheit

Bei der Rotorschaufel 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 *aerothermal* zusammengefasst werden.

Innerhalb dieser Arbeit werden unterschiedliche Teilgebiete der Rotorschaufel ebenso wie methodische Aspekte bearbeitet. Dies umfasst Untersuchungen zur Verbindung zwischen der Rotorschaufel 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

<b>Nomenklatur</b>	<b>X</b>
Lateinische Symbole . . . . .	X
Griechische Symbole . . . . .	XI
Indizes . . . . .	XI
Abkürzungsverzeichnis . . . . .	XII
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Hochdruckturbinenschaufel . . . . .	3
1.2. Gegenwärtige Auslegungsstrategien . . . . .	6
1.3. Motivation dieser Arbeit . . . . .	7
<b>2. Theorie</b>	<b>11</b>
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
<b>3. Ein-Ziel-Optimierung einer Schaufel-Scheibe-Verbindung</b>	<b>35</b>
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

<b>4. Mehr-Ziel-Optimierung für die Turbinenkühlung</b>	<b>55</b>
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
<b>5. Multidisziplinäre Robustheits- und Mehr-Ziel-Optimierung</b>	<b>73</b>
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
<b>6. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>97</b>
6.1. Zusammenfassung . . . . .	97
6.2. Ausblick . . . . .	99
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>100</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>101</b>
<b>Literatur</b>	<b>102</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>107</b>
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

$\nabla$	Nabla-Operator (1.Ordnung)
$\Delta$	Laplace-Operator (2.Ordnung) $\Delta = \nabla \cdot \nabla$
$\epsilon(x)$	Fehler bei der Approximation
$\epsilon$	Dehnung
$\dot{\epsilon}$	Dehnrate
$\epsilon$	dimensionsloser Emissionsgrad
$\epsilon_c$	<i>cooling effectiveness</i>
$\epsilon_f$	<i>film cooling effectiveness</i>
$\eta$	Wirkungsgrad
$\eta_c$	<i>cooling efficiency</i>
$\lambda, \lambda_i$	Koeffizienten der radialen Basisfunktionen
$\lambda$	Eigenwert
$\mu$	Mittelwert
$\varphi$	Radiale Basisfunktion
$\Pi$	Druckverhältnis
$\rho$	Dichte
$\rho_{ij}$	Korrelationskoeffizient
$\sigma$	Standardabweichung
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante
$\theta_k$	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 <b>M</b> icro <b>G</b> enetic <b>A</b> lgorithm
B-Spline	<b>B</b> asis- <b>S</b> pline
CAD	Computer Aided Design
CCF	Combined Cycle Fatigue
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHT	Conjugate <b>H</b> eat <b>T</b> ransfer
CMA-ES	Covariance <b>M</b> atrix <b>A</b> daptation <b>E</b> volution <b>S</b> trategy
DNS	<b>D</b> irekte <b>N</b> umerische <b>S</b> imulation
DoE	<b>D</b> esign of <b>E</b> xperiments
FE/FEM	Finite Elemente / Finite Elemente <b>M</b> ethode
HCF	<b>H</b> igh <b>C</b> ycle <b>F</b> atigue
iLHS	improved Latin Hypercube Sampling
KRIG	<b>K</b> riging
LCF	Low Cycle Fatigue
LES	Large Eddy Simulation
LHS	Latin Hypercube Sampling
LOOCV	Leave-One-Out-Crossvalidation
LR	Lineare Regression
MCS	<b>M</b> onte <b>C</b> arlo <b>S</b> imulation
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II
NURBS	Non-uniform rational <b>B</b> -Splines
OGV	Outlet Guide Vane
oLHS	optimal Latin Hypercube Sampling
RANS	Reynold's Averaged Navier-Stokes
RBF	radiale <b>B</b> asisfunktionen
RMS	Root-Mean-Square
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
TBC	Thermal <b>B</b> arrier <b>C</b> oating