

---

# Multidisciplinary gradient-based optimization of radial turbines

---

Nicolas Lachenmaier



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Band 20 / 2023

Forschungsberichte aus dem Institut für  
Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. H.-P. Schiffer

---

# Multidisciplinary gradient-based optimization of radial turbines

Am Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur  
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## Dissertation

von

**Nicolas Lachenmaier, M.Sc. (hons)**

Berichterstatter : Prof. Dr. Heinz-Peter Schiffer  
Mitberichterstatter : Prof. Dr. Tom Verstraete  
  
Tag der Einreichung : 26.04.2022  
Tag der mündlichen Prüfung : 13.07.2022

Darmstadt 2022  
D17

---



Forschungsberichte aus dem Institut für Gasturbinen,  
Luft- und Raumfahrtantriebe

Band 20

**Nicolas Lachenmaier**

**Multidisciplinary gradient-based optimization  
of radial turbines**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Düren 2023

**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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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 978-3-8440-8934-9

ISSN 2364-4761

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

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

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

---

# Acknowledgements

This thesis was devised and written during my employment at ROLLS-ROYCE SOLUTIONS GMBH as CFD engineer where I am, to this day, entrusted with the aerodynamic design of radial turbines for *mtu* turbochargers.

My gratitude goes to Prof. Dr. Heinz-Peter Schiffer for his academic supervision, support and him granting me the possibility to carry out this thesis.

I want to thank Prof. Dr. Tom Verstraete for co-supervising this thesis. Your time, guidance and counsel is highly appreciated.

For giving me the opportunity and time to do this research, creating suitable boundary conditions and having my back at all times, I am much obliged to Dr. Johannes Kech and Tobias Männle. I want to thank my dear colleagues Jörn Wildhagen, Dr. Stefan Höttges and Dr. Friedrich Fröhlig for our lively discussions and a fantastic office atmosphere. I owe Markus Bentele and Paul Seyfried for keeping my workstation and the HPC alive and running. I would like to express appreciation to Christian Frank and Christoph Schwertel for their counsel on solid mechanics. The exciting debates with Stefan Theis on thermodynamics and engine design have been a great enrichment. At last, I am deeply grateful to all the colleagues, in particular in the turbocharging department, whose positivity, knowledge and work ethic make me proud being a part of.

The financial support by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy of Germany (BMWi) in the project GAMMA (project number 03ET1469) contributed to this thesis and is highly appreciated. I would like to thank the team at FRIENDSHIP SYSTEMS in general and Carsten Fütterer in particular for the provided expertise in building parametrized CAD models.

I need to express my gratitude to Daniel, Markus and Jonathan for their guidance and friendship. I am deeply grateful to my mother, my sister and my brothers for their unconditional support. With sincere gratitude I thank Andrea for her patience and comfort during these arduous times.



---

# Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit dem Design und der Verbesserung einer Turbolader-Radialturbine. Zu diesem Zweck wird ein automatisierter Optimierungsworkflow entwickelt und auf eine Radialturbine angewandt.

Die Methode ist multidisziplinär, d.h. es werden eine Reihe von Kostenfunktionen betrachtet, die in der Optimierung entweder als Ziel oder als Nebenbedingung verwendet werden: Das polare Trägheitsmoment verschlechtert die Beschleunigung des Läufers und wird daher begrenzt. Die Masse und die Lage des Schwerpunktes des Rades werden beschränkt, um rotordynamische Komplikationen zu vermeiden. Die durch Zentrifugalkräfte verursachten mechanischen Spannungen werden limitiert, um eine ausreichende Lebensdauer des Turbinenrads zu gewährleisten. Durch die gezielte Beeinflussung der Eigenfrequenzen der Schaufel sowie ihrer Reaktion auf eine erzwungene Erregung wird eine Schwingungsermüdung im Betrieb verhindert. Schließlich wird die Aerodynamik der Turbine verbessert, indem der Wirkungsgrad der Turbine unter Beibehaltung des vorgesehenen Drehmoments maximiert wird. Alle diese Kostenfunktionen werden in den Prozess einbezogen, um zu vermeiden, dass der Optimierer zwar effizientere, aber anderweitig fehlerhafte oder aussichtslose Raddesigns vorschlägt.

Der angewandte Optimierungsworkflow verwendet Gradienten, um neue Designvorschläge zu erarbeiten. Einerseits verspricht die Verwendung von Gradienten zusätzlich zu bloßen Funktionsauswertungen eine drastische Beschleunigung des Optimierungsprozesses, insbesondere wenn hochdimensionale Designräume untersucht werden. Zum anderen werden bei der angewandten Gradientenberechnung Oberflächensensitivitäten ermittelt. Diese liefern Radialturbinenentwicklern wertvolle Erkenntnisse, da sie aufzeigen, wie sich geometrische Änderungen auf die relevanten Kostenfunktionen auswirken. Die adjungierte Methode spielt dabei eine zentrale Rolle, da die meisten der betrachteten Kostenfunktionen unter Einsatz dieser Methode differenziert werden. Bei den verwendeten Codes handelt es sich sowohl um kommerzielle Software als auch um eigene Implementierungen.

Unter den untersuchten Zielen und Nebenbedingungen sticht die erzwungene Schwingungsantwort hervor, da sie eine kleine Neuheit auf dem Gebiet der gradientenbasierten Radialturbinenoptimierung darstellt: Untersucht wird die Reaktion des Rades auf eine harmonische Zwanganregung unter Verwendung einer aeroakustisch motivierten Dämpfung. Die angewandte Methode ist mit geringem Rechenaufwand verbunden, da eine Kopplung zu Strömungssimulationen vermieden wird. Die

---

vorgeschlagene Kostenfunktion berücksichtigt, dass eine Änderung der Turbinengeometrie die Eigenfrequenzen und damit die Erregerlast bei Resonanz verändert.

Eine Reihe von Optimierungsstudien wurde erfolgreich durchgeführt, um das Potenzial des gradientenbasierten Optimierungsverfahrens zu veranschaulichen.

Drei dieser Studien arbeiten direkt auf der Diskretisierung des Modells und werden daher als CAD-frei bezeichnet. Die erste dieser drei Einzeldisziplin-Optimierungen zielt auf eine Spannungsreduzierung in den Schaufelfußverrundungen nahe der Austrittskante ab. Das zweite Beispiel zeigt, wie die erzwungene Schwingungsantwort des Rades optimiert werden kann. Im dritten Beispiel wird eine Wirkungsgradoptimierung diskutiert. Diese Studien helfen das Verbesserungspotenzial der Turbine zu ermitteln und sie inspirieren neuartige Parametrisierungen. Diesen Beispielen fehlt jedoch die Multidisziplinarität, weshalb sie nur von begrenztem industriellen Interesse sind.

Im Gegensatz dazu berücksichtigt die zweite Gruppe der diskutierten Optimierungsprobleme die CAD-Parametrisierung des Radialturbinenrades. Dies wird durch die Bestimmung der Ableitung jeder Kostenfunktion nach jedem Parameter der CAD-Modells erreicht. Dazu werden Oberflächensensitivitäten mittels Geometriesensitivitäten auf die CAD-Parametrisierung propagiert. Die Ausnutzung dieser Parametergradienten ermöglicht die Behandlung sehr komplexer Probleme, wie z.B. die Verbesserung der Effizienz bei gleichzeitiger Berücksichtigung von sieben physikalischen Nebenbedingungen. Die erste Studie zeigt, dass die maximale Betriebsdrehzahl der Turbine um 5% erhöht werden kann, was mit einer Effizienzreduzierung von lediglich 0.7% einhergeht. In der zweiten Untersuchung wird der Kompromiss zwischen Wirkungsgrad und Massenträgheitsmoment untersucht, mit dem interessanten Ergebnis, dass das Basisdesign noch nicht PARETO-optimal in diesen beiden Kostenfunktionen ist. Dennoch erweisen sich Spannung und Eigenfrequenz während der gesamten Optimierung als aktive Nebenbedingung. Die abschließende Untersuchung konzentriert sich auf die Frage, ob und wie die erzwungene Schwingung der Schaufel reduziert werden kann. Es zeigt sich, dass dies ohne aerodynamische Einbußen möglich ist. Die Ergebnisse sind insofern überraschend, als dass sie die Frage aufwerfen, wie robust die Berechnungsergebnisse zu den erzwungenen Schwingungen in Bezug auf Fertigungstoleranzen sind. Denn die vorgeschlagenen geometrischen Änderungen sind gering.

Insgesamt sind die angewandten Optimierungsverfahren in der Lage komplexe Entwurfsprobleme zu bewältigen. Sie erweisen sich als kostengünstig und liefern wertvolle Einblicke in das Design von Radialturbinen. Die Methodenkette ist überdies von industriellem Interesse, was durch die Einbeziehung kommerzieller Software unterstrichen wird.

---

# Abstract

This thesis deals with the design and improvement of a turbocharger's radial turbine. For this purpose, a custom automated optimization work flow is devised and applied to a radial turbine.

The method is *multidisciplinary*, i.e. a range of cost functions are implemented and used as either objectives or constraints: The polar moment of inertia deteriorates the rotor's acceleration and is thus constrained. The wheel's mass and center of gravity are studied to avoid rotordynamic issues. Mechanical stresses induced by centrifugal forces are measured and limited to ensure the pursued lifetime of the turbine wheel. High-cycle fatigue is prevented by studying and controlling the blade's eigenfrequencies as well as its response to a forced excitation. Finally, the aerodynamic performance of the turbine is improved by maximizing the turbine's efficiency while maintaining the delivered torque. All these cost functions are included into the work flow to prevent the optimizer from creating more efficient, yet elsewhere flawed or useless wheel designs.

The applied optimization work flow uses *gradient* information to propose new design iterations. On the one hand, using gradients in addition to plain function evaluations promises a drastic speed-up in the optimization process, in particular when high-dimensional design spaces are studied. On the other hand, the applied gradient calculation process involves determining surface sensitivities, which yield valuable insights for radial turbine designers as they display how geometrical changes affect the relevant cost functions. The adjoint method plays a central role in this regard as most of the considered cost functions are differentiated using it. The applied codes involve both commercial software and custom implementations.

Among the studied objectives and constraints, the forced response stands out as it marks a small novelty in the field of gradient-based radial turbine optimization: The wheel's response to a harmonic forced excitation utilizing an aeroacoustically motivated damping is studied. The applied method imposes little computational cost as a coupling to fluid simulations is avoided. The proposed cost function is defined to inherently respect that altering a turbine's shape will alter its eigenfrequencies and thus alters the exciting load at resonance conditions.

A number of optimization studies are conducted successfully to illustrate the potential of the gradient-based optimization work flow.

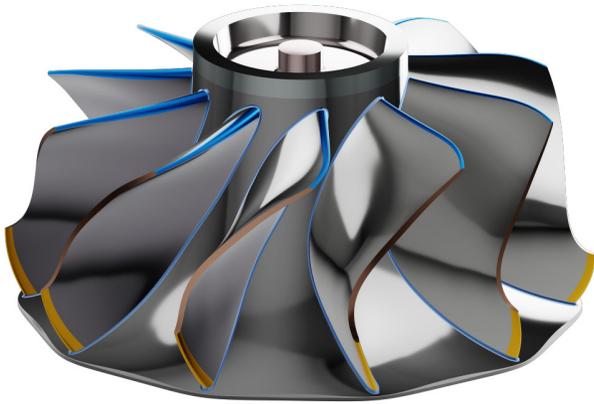
Three of these studies operate directly on the model discretization and are thus labelled CAD-free. The first of these three single-discipline optimizations deals with

---

a stress reduction in the fillets at the trailing edge. The second shows how the forced response of a wheel may be optimized. At last, the third example illustrates an efficiency optimization. These studies serve the purpose of identifying the potential for improvements and inspire new parametrizations. Yet, these examples lack a multidisciplinary approach and are thus of limited industrial interest.

In contrast, the second group of discussed optimization problems respects the CAD parametrization of the radial turbine wheel, which is facilitated by determining the derivative of every cost function w.r.t. to every parameter of the CAD model parametrization. This is achieved by propagating surface sensitivities via design velocities onto the CAD parametrization. Exploiting these parameter gradients enables the handling of very complex problems, such as improving efficiency while incorporating up to seven constraint functions. The first study of this kind shows that the maximal operational speed of the turbine may be extended by 5% which comes at an efficiency reduction of solely 0.7%. In the second investigation, the trade-off between efficiency and inertia is examined with the interesting finding that the baseline design is not yet PARETO-optimal in these two cost functions. Yet, stress and eigenfrequency prove to be active constraints throughout the optimization. The final study focuses on the question whether and how the forced response of the blade may be reduced. It turns out that this is possible without aerodynamic penalty. Yet, the results are surprising as they raise the question of how robust the forced response calculations are with regard to manufacturing tolerances as the proposed geometrical changes are rather small.

Overall, the applied optimization work flows are capable of handling complex design problems, prove cost effective and reveal interesting insights into radial turbine design. The method is of industrial interest, which is underscored by the inclusion of commercial software.





---

# Contents

<b>Contents</b>	<b>xi</b>
<b>List of Tables</b>	<b>xiii</b>
<b>List of Figures</b>	<b>xv</b>
<b>Nomenclature</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Challenges in radial turbine design . . . . .	5
1.3 Design methods for radial turbines . . . . .	12
1.4 Objective of this work . . . . .	14
1.5 Thesis structure . . . . .	16
<b>2 Modelling and simulation</b>	<b>19</b>
2.1 Geometry and Parametrization . . . . .	19
2.2 Numerical fluid mechanics . . . . .	22
2.3 Numerical solid mechanics . . . . .	27
<b>3 Optimization methods</b>	<b>31</b>
3.1 Derivatives . . . . .	31
3.2 CAD-free optimization . . . . .	37
3.2.1 Calculation of mesh sensitivities . . . . .	37
3.2.2 Accuracy of mesh sensitivities . . . . .	54
3.2.3 Surface sensitivities . . . . .	58
3.2.4 Shape update . . . . .	62
3.3 CAD-based optimization . . . . .	65
3.3.1 Design velocities and data interpolation . . . . .	67
3.3.2 Quality of parameter gradients . . . . .	71
3.3.3 The gradient projection algorithm . . . . .	75

---

<b>4 Radial turbine optimization</b>	<b>79</b>
4.1 Surface sensitivities of a radial turbine wheel . . . . .	79
4.2 Examples of single discipline CAD-free optimization . . . . .	91
4.2.1 Reducing centrifugal force induced stress . . . . .	92
4.2.2 Reducing the dynamic compliance . . . . .	95
4.2.3 Increasing efficiency . . . . .	100
4.3 Examples of multidisciplinary CAD-based optimization . . . . .	107
4.3.1 Extension of operational range . . . . .	107
4.3.2 Inertia vs. efficiency . . . . .	112
4.3.3 Increasing Efficiency . . . . .	118
4.3.4 Reducing the dynamic compliance . . . . .	121
<b>5 Conclusion</b>	<b>129</b>
<b>Bibliography</b>	<b>I</b>
<b>Appendix</b>	<b>XI</b>