

Multikriterielle Optimierung am Beispiel einer Turbinenbaugruppe

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Stefan Finger

geboren am 24.09.1980 in Forst/Lausitz

Vorsitzender: Dr.-Ing. habil. Bernd Beirow

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hon. Prof. (NUST) Dieter Bestle

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Höschler

Tag der mündlichen Prüfung: 27. April 2017

Berichte aus der Luft- und Raumfahrttechnik

Stefan Finger

**Multikriterielle Optimierung
am Beispiel einer Turbinenbaugruppe**

Shaker Verlag
Aachen 2017

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5540-5

ISSN 0945-2214

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die Brandenburgische Technische Universität Cottbus und ich sind über mehrere Jahre hinweg einen gemeinsamen Weg gegangen. Der erste Teil des Weges bestand aus meinem Studium des Maschinenbaus, das ich dort erfolgreich absolvieren konnte. Der weitere und vielleicht auch schönere Teil bestand aus der wissenschaftlichen Arbeit am Lehrstuhl für Technische Mechanik und Fahrzeugdynamik. Im Rahmen dieser Tätigkeit entstand auch diese Dissertation. Aber die Universität ist ja nichts ohne all die Menschen, die sie gestalten. An erster Stelle möchte ich hier Prof. Dr.-Ing. habil. Dieter Bestle nennen, an dessen Lehrstuhl ich arbeiten durfte. Ich will ihm dafür danken, dass er mir jederzeit mit Rat und Anregungen zur Seite stand und dadurch viel für das Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat, und dass er am Ende noch einiges an Geduld aufgebracht hat. Ich bedanke mich aber auch bei Dr.-Ing. habil. Bernd Beirow für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission und Prof. Dr.-Ing. Klaus Höschler für das Anfertigen des Zweitgutachtens.

Meine Zeit am Lehrstuhl wurde auch durch dessen Mitarbeiter geprägt. Besonders will ich mich bei Lutz Anklam bedanken, der für jedes IT-Problem eine Lösung fand. Meine Kollegen im VIT2-Team und den anderen Projekten bleiben mir ebenfalls in bester Erinnerung. Es war eine schöne und interessante Zeit.

Ich danke auch Dr.-Ing. Roland Parchem und Bernd Meissner von Rolls-Royce Deutschland. Sie haben mir den Weg zu dieser Arbeit geebnet und mich fachlich sehr unterstützt.

Mein bester Dank geht nicht zuletzt an meine Eltern. Sie haben meine Arbeit immer mit hohem Interesse und tatkräftiger Unterstützung verfolgt. Auch bei meiner Schwester Susanne und meinem Schwager Jan will ich mich bedanken. Ihr seid mir etwas zuvor gekommen und genetische Algorithmen sind für Euch beide auch etwas anderes, dennoch habt ihr mich sehr motiviert.

Ich bedanke mich natürlich auch bei meiner Freundin Irina. Das Schreiben dieser Arbeit neben dem Job war zeitintensiv und fordernd. Trotzdem hat sie viel Verständnis dafür aufgebracht und mir immer den Rücken freigehalten.

Danke!

Stefan Finger

Kurzfassung

Multikriterielle Optimierung am Beispiel einer Turbinenbaugruppe

Stichwörter: Optimierung, Strukturmechanik, integrierter Entwurfsprozess, adaptive Antwortflächen, genetische Algorithmen, *Isight*, Hochdruckturbine

Die Leistungsfähigkeit eines Flugtriebwerks wird vom Spaltverhalten des Verdichters und der Turbine nachhaltig beeinflusst. Die Spaltgrösse ist abhängig von auftretenden Belastungen und der konstruktiven Gestaltung der beteiligten Baugruppen. Letzteres ist die Grundlage der vorliegenden Arbeit, in der das Verhalten einer Baugruppe einer Hochdruckturbine durch eine optimierte Gestaltung der Bauteile verbessert werden soll. Es sind dabei einander widersprechende Anforderungen umzusetzen, weshalb eine hohe Entwurfsvielfalt evaluiert werden muss. Ein integrierter, automatisierter Entwurfsprozess, der den CAD-Modellaufbau und die strukturmechanische Berechnung umfasst, bietet hier vielfältige Vorteile und wird im Rahmen der Arbeit erstellt. Der Entwurfsprozess ist dann die Basis für einen Optimierungsprozess, der die Vorteile genetischer Algorithmen trotz zeitintensiver FE Analysen nutzt. Die Lösung liegt in der Verwendung adaptiver Antwortflächen, die zunächst aufgestellt und dann im Prozessverlauf gezielt angepasst werden.

Eine hohe Variantenvielfalt in den umsetzbaren Entwürfen in Verbindung mit einer hohen Prozessstabilität im CAD- und FE-System sowie eine optimierungsrechte Gestaltung der Parametrisierung mit frei wählbaren Parameter und nur wenigen Nebenbedingungen bilden den Kern einer erfolgreichen Optimierung in der Strukturmechanik. Mit der Parametrisierung, die statt auf viele CAD-Variablen auf nur wenige, dafür aber dimensionslose Parameter zur Entwurfsgestaltung setzt, wurde eine effektive Strategie zum Erreichen der Ziele entwickelt und umgesetzt. Die gewonnene hohe Variantenvielfalt ist ein Vorteil für die Suche nach dem Optimum. Um diese auch bei stark restringierten Problemen in Verbindung mit Antwortflächen nutzen können, wurde ein Algorithmus entwickelt, der in der Definition der initialen Stützstellen bereits einzelne Nebenbedingungen des Optimierungsproblems aufnimmt. Die Suche kann so auf die interessierenden Bereiche fokussiert und beschleunigt werden.

Abstract

Multi-Objective Optimisation of a Turbine Component

Keywords: Optimisation, structural mechanics, integrated design process, adaptive response surface, genetic algorithm, *Isight*, high pressure turbine

The performance of an aero engine is significantly affected by the tip clearance behavior of the compressor and turbine. It's impact depends on the loads and the design of the involved components. The design is the basis for the present thesis where the behavior of a high pressure turbine shall be improved by an optimised design. Due to contradicting requirements, a high quantity of designs needs be to evaluated. In this case, an integrated and automated design process including the CAD modeling and the structural mechanics analysis provides many advantages. The thesis presents such a design process which is then the basis for the subsequent optimisation process using the advantages of genetic algorithms even in the presence of time-consuming FE calculations. The solution is an adaptive response surface algorithm.

A high variant diversity in the design together with a high process stability in the CAD- and FE-system and a suitable structure of the parametrisation with optimisation-oriented design parameters and less constraints is the key for an successful optimisation in structural mechanics. To reach the targents, an effective parametrisation strategy was developed which contains a small quantity of dimensionless parameters instead of many CAD variables. This leads to the high variant diversity and is an advantage for the optimisation. To use this strategy also for highly constraint problems in combination with response surfaces, an algorithm was developed to consider the constraints of the optimisation problem in the definition of the initial sample points already. The optimisation is less time-consuming due to it's focus on the interesting areas.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
1.1 Strukturmechanische Optimierung	3
1.2 Stand der Technik	5
1.3 Gliederung der Arbeit	8
2 Prozessintegration und Optimierung	11
2.1 Prozessintegration	13
2.2 Versuchsplanung	15
2.3 Optimierung	22
2.3.1 Grundlagen der Optimierung	23
2.3.2 Evolutionäre Algorithmen	31
2.3.3 Ausgewählte Optimierungsalgorithmen im Überblick	37
3 CAD-basierte Gestaltvariation einer Turbinenbaugruppe	41
3.1 Grundlagen der Gestaltvariation	42
3.2 Grundlagen einer Entwurfsparametrisierung	45
3.3 Optimierungsgerechte Parametrisierung der betrachteten Baugruppe	49
3.4 Parametrisierungsgerechter Aufbau des Baugruppenmodells	56
3.5 Berechnung der Baugruppenmasse	60
3.6 Robustheitsanalyse der Parametrisierung	64
4 Thermomechanische Analyse einer Turbinenbaugruppe	73
4.1 Theorie der Finiten Elemente	73
4.2 Prozessgerechte Vernetzung der Turbinenbaugruppe	76
4.3 Baugruppenspezifische Randbedingungen im Flugzyklus	79
4.4 Lebensdauer der Turbinenbaugruppe als Optimierungsnebenbedingung	83
4.5 Prozessgerechte Struktur der FE-Analyse der Turbinenbaugruppe	88
4.6 Robustheitsanalyse des integrierten Berechnungsprozesses	91
5 Antwortflächen als Basis einer effizienten Optimierung	95
5.1 Grundlagen der Approximationsverfahren	96
5.2 Diskussion von Antwortflächen für die Turbinenstrukturauslegung	98
5.2.1 Lineare Regressionsverfahren	99

5.2.2	Kriging-Modell	107
5.2.3	Radiale Basis Funktionen	114
5.2.4	Bewertung der Antwortflächenverfahren	118
5.3	Versuchsplanung unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen	126
5.3.1	Ausgewählte Verfahren im Überblick	128
5.3.2	Lösungsansatz zum Aufbau der Versuchsmatrix	131
5.3.3	Bewertung des Lösungsansatzes	136
5.4	Modelladaption auf Basis von Optimierungsergebnissen	139
6	Optimierung der Turbinenbaugruppe	145
6.1	Formulierung des Optimierungsproblems	145
6.2	Automatisierter Optimierungsprozess	151
6.3	Ergebnisse der Optimierung	154
6.4	Beurteilung des Optimierungsprozesses	163
7	Zusammenfassung und Ausblick	169
	Literaturverzeichnis	173

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A	Fläche
C	mittlere Nachgiebigkeit, Materialkennwert
E	Elastizitätsmodul, Erwartungswert
F	Verteilungsfunktion
ΔK	Spannungsintensität
L	Polynomgrad
N	Stichprobenumfang, Schwingenspielzahl, Populationsgröße
R	<i>Pearson'scher</i> Korrelationskoeffizient, Spannungsverhältnis, Richtung im Koordinatensystem
R^2, R_{kor}^2	Bestimmtheitsmaß, korrigiertes Bestimmtheitsmaß
V	Volumen
X	Richtung im Koordinatensystem
Y	Geometriefunktion, Zufallszahl, Richtung im Koordinatensystem
Z	Zufallsvariable, Richtung im Koordinatensystem
a, a_c	Risslänge, kritische Risslänge
b, h, l, t	CAD Variablen - Längen, Exponent
b, c	Materialkennwerte
c	Koeffizient
d	Abstand, Durchmesser
f	Kriterium, Funktionswert, Anzahl von Intervallen, Anzahl von Faktorstufen
g	Gleichungsnebenbedingung
h	Ungleichungsnebenbedingung
m	Masse, Materialkennwert
n	Lebensdauerverhältnis
p	Parameter, Druck
p_0	Parameterbezeichnung im CAD System
r	Radius, Korrelationskoeffizient
s, s^2	Standardabweichung, Varianz geschätzt
t	Zeit, Fertigungsparameter
u	Verschiebung
w	Gewichtungskoeffizient, Walker Koeffizient
z	Exponent, Koeffizient

Griechische Buchstaben

Θ	Gewichtung
Φ	Verteilungsfunktion
α	Fehlerniveau, CAD Variable - Winkel, Koeffizient
β	CAD Variable - Winkel
γ	Gleitung
ε	Fehler, Verzerrung, Koeffizient
κ	Formparameter
μ	Erwartungswert
ξ	Funktionswert
π_n	Permutation
ρ	Dichte
σ	Spannung, Standardabweichung
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite
τ	Schubspannung
ϕ	Ansatzfunktion, Basisfunktion, Standardnormalverteilung, Funktion der Kriteriengüte, Richtung im Koordinatensystem

Vektoren und Matrizen

f	Vektor der Zielfunktionen, Kraftvektor
g	Vektor der Gleichungsnebenbedingungen
h	Vektor der Ungleichungsnebenbedingungen
n	Richtungsvektor
p	Entwurfsvektor, Parametervektor
r	Korrelationsvektor, Ortsvektor
s	Suchrichtung
u	Verschiebungsvektor
w	Gewichtungsvektor
σ	Spannungsvektor
ε	Verzerrungsvektor
B	Verzerrungs-Verschiebungsmatrix
C	Spannungs-Verzerrungs-Materialmatrix
H	Interpolationsmatrix
I	Einheitsmatrix
K	Gesamtsteifigkeitsmatrix
P	Versuchsmatrix
R	Korrelationsmatrix
S	Permutationsmatrix
U	Verschiebungsmatrix

Mengen

\mathcal{F}	erreichbarer Kriterienraum
\mathcal{F}^{EP}	Menge der Pareto-optimalen Lösungen im Kriterienraum
\mathcal{K}	Kegelmenge
\mathcal{M}	Menge der ausgewählten Lösungen
\mathbb{N}	Menge der natürlichen Zahlen
\mathcal{P}	zulässiger Entwurfsraum (auch Parameterraum), Menge einer Population
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen
\mathcal{U}	Zahlenmenge in lokaler Umgebung
\mathcal{Z}	Menge der Zeitpunkte

Indizes

EP	(Edgeworth-) Pareto-optimal
nEP	nicht Pareto-optimal
R	Radial
cov	Kovarianz
ges	gesamt
a, b, i, j, k, q	Laufvariablen
$korr$	korrigiert
h	Dimension des Kriterienvektors
l	Dimension des Vektors der Gleichheitsnebenbedingungen
m	Dimension des Vektors der Ungleichheitsnebenbedingungen
max, min	Maximum, Minimum
n	Anzahl der Entwurfsvariablen, Dimension des Parametervektors
nom	nominal
o	obere Grenze
u	untere Grenze
zul	zulässig

Symbole und sonstige Zeichen

\forall	für alle
\in	Element von
\subset	Teilmenge von
\nexists	existiert nicht
$:=$	definiert als
\rightarrow	wird abgebildet auf
Δ	Differenz
opt, \min, \max	Optimum, Minimum, Maximum
$\arg \min, \arg \max$	Argument des Minimums, Argument des Maximums

\exp	Exponentialfunktion
\lim	Limes
\ln	Logarithmus naturalis
cov	Kovarianz
$\hat{\cdot}$	approximierte Größen
$\tilde{\cdot}$	normierte Größen
\bullet^*	ausgewählte Größen
$\bar{\cdot}$	virtuelle Größen

Abkürzungsverzeichnis

AMGA	<u>A</u> rchive-based <u>M</u> icro <u>G</u> enetic <u>A</u> lgorithm
APDL	<u>A</u> nsys <u>P</u> arametric <u>D</u> esign <u>L</u> anguage
ASCII	<u>A</u> merican <u>S</u> tandard <u>C</u> ode for <u>I</u> nformation <u>I</u> nterchange
BR	<u>B</u> rücke
CAD	<u>C</u> omputer <u>A</u> ided <u>D</u> esign
CAO	<u>C</u> omputed <u>A</u> ided <u>O</u> ptimisation
CD	<u>C</u> rowding <u>D</u> istance
CFD	<u>C</u> omputer <u>F</u> luid <u>D</u> esign
CSG	<u>C</u> onstructive <u>S</u> olid <u>G</u> eometry
DACE	<u>D</u> esign and <u>A</u> nalysis of <u>C</u> omputer <u>E</u> xperiments
DoE	<u>D</u> esign of <u>E</u> xperiments (Versuchsplanung)
EGO	<u>E</u> fficient <u>G</u> lobal <u>O</u> ptimization
EI	<u>E</u> xpected <u>I</u> mprovement (Erwartete Verbesserung)
E – Modul	<u>E</u> lastizitäts <u>m</u> odul
EP	<u>E</u> dgewort- <u>P</u> areto
ES	<u>E</u> volutionsstrategie
FE	<u>F</u> inite <u>E</u> lemente
FEM	<u>F</u> inite <u>E</u> lemente <u>M</u> ethode
FR	<u>F</u> rontring
GA	<u>G</u> enetischer <u>A</u> lgorithmus
GRIP	<u>G</u> Raphics <u>I</u> nterface <u>P</u> rogramming
HCF	<u>H</u> igh <u>C</u> ycle <u>F</u> atigue (hochzyklische Ermüdung)
HPT	<u>H</u> igh <u>P</u> ressure <u>T</u> urbine (Hochdruckturbine, HDT)
KS	<u>K</u> reiselmeier <u>S</u> teinhauser
KV	<u>K</u> reuzvalidierung
LCB	<u>L</u> ower <u>C</u> onfidence <u>B</u> ound
LCF	<u>L</u> ow <u>C</u> ycle <u>F</u> atigue (niederzyklische Ermüdung)
LHC	<u>L</u> atin <u>H</u> ypercube
LHD	<u>L</u> atin <u>H</u> ypercube <u>D</u> esign
LHS	<u>L</u> atin <u>H</u> ypercube <u>S</u> ampling
LPT	<u>L</u> ow <u>P</u> ressure <u>T</u> urbine (Niederdruckturbine, NDT)
MDO	<u>M</u> ultidisziplinäre <u>D</u> esign <u>O</u> ptimierung
MIGA	<u>M</u> ulti- <u>I</u> sland <u>G</u> enetic <u>A</u> lgorithm
MLHC	<u>M</u> idpoint <u>L</u> atin <u>H</u> ypercube
MTO	<u>M</u> ax. <u>T</u> ake <u>O</u> ff

NB	<u>N</u> eben <u>b</u> edingungen
NGV2	<u>N</u> ozzle <u>G</u> uide <u>V</u> ane <u>2</u>
NSGAI	<u>N</u> on-dominated <u>S</u> orting <u>G</u> enetic <u>A</u> lgorithm <u>2</u>
oLHC	<u>o</u> ptimal <u>L</u> atin <u>H</u> yper <u>c</u> ube
RBF	<u>R</u> adiale <u>B</u> asis <u>F</u> unktionen
RMS	<u>R</u> oot <u>M</u> ean <u>S</u> quare Error
RSM	<u>R</u> esponse <u>S</u> urface <u>M</u> ethod (Antwortflächenmethode)
SCV	<u>S</u> tandardized <u>C</u> ross-validated residual
SFC	<u>S</u> pecific <u>F</u> uel <u>C</u> onsumption (spezifischer Treibstoffverbrauch)
SIMP	<u>S</u> olid <u>I</u> sotropic <u>M</u> aterial with <u>P</u> enalization
SLP	<u>S</u> equential <u>L</u> inear <u>P</u> rogramming (Sequenzielle Lineare Programmierung)
SPEA2	<u>S</u> trength <u>P</u> areto <u>E</u> volutionary <u>A</u> lgorithm <u>2</u>
SQ	<u>S</u> umme der <u>Q</u> uadrate
SQP	<u>S</u> equential <u>Q</u> uadratic <u>P</u> rogramming (Sequenzielle Quadratische Programmierung)
SRSM	<u>S</u> uccessive <u>R</u> esponse <u>S</u> urface <u>M</u> ethod (Antwortflächenmethode)
TF	<u>T</u> hermal <u>F</u> atigue (thermische Ermüdung)
TMF	<u>T</u> hermal <u>m</u> echanical <u>F</u> atigue (thermomechanische Ermüdung)
TSF	<u>T</u> hermal <u>S</u> tress <u>F</u> atigue (Wärmespannungsermüdung)
UG	<u>U</u> nigraphics
VIT	<u>V</u> irtuelles <u>T</u> riebwerk
XML	<u>E</u> xtensible <u>M</u> arkup <u>L</u> anguage