

Marco Hender

**Triebwerkskomponentenprozesse
und Entwurfsstrategien für die
holistische aerodynamische
Auslegung eines Kerntriebwerks**

TRIEBWERKSKOMPONENTENPROZESSE UND ENTWURFSSTRATEGIEN FÜR DIE HOLISTISCHE AERODYNAMISCHE AUSLEGUNG EINES KERNTRIEBWERKS

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

Dissertation

vorgelegt von

M. Sc. Marco Steffen Hendl

geboren am 4. Oktober 1986 in Lauchhammer

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Klaus Höschler
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hon. Prof. (NUST) Dieter Bestle
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Flassig

Tag der mündlichen Prüfung: 31. März 2022

Berichte aus der Luft- und Raumfahrttechnik

Marco Hendler

**Triebwerkskomponentenprozesse und
Entwurfsstrategien für die holistische
aerodynamische Auslegung eines Kerntriebwerks**

Shaker Verlag
Düren 2023

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8971-4

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

Die Entstehung einer Dissertation geht stets mit der Beihilfe weiterer, außenstehender Personen einher, die den Charakter der Arbeit und den des Promovenden prägen. Die vorliegende Arbeit geht aus meiner vierjährigen Tätigkeit im Forschungsprojekt *VITIV* am Lehrstuhl für Technische Mechanik und Fahrzeugdynamik an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg hervor und entstand in Kooperation mit dem Industriepartner *Rolls-Royce Deutschland*. Von Beginn bis zum Ende meiner Zeit am Lehrstuhl konnte ich auf die Expertise und die Unterstützung der Lehrstuhlmitarbeiter zurückgreifen.

Mein besonderer Dank gilt dabei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Hon. Prof. (NUST) Dieter Bestle. Seine vielen Hinweise und Kritiken sowie die anregenden Diskussionen mit ihm haben maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Dein Engagement, Dieter, hat mir vieles ermöglicht und mich weit gebracht. Danke! Für seine Bereitschaft zur Übernahme der Gutachtertätigkeit im Rahmen des Promotionsverfahrens danke ich Prof. Dr.-Ing. Peter M. Flassig. Er stand mir auch schon während der Bearbeitung des Forschungsprojektes als Ansprechpartner seitens des Industriepartners *Rolls-Royce Deutschland* mit gutem Rat zur Seite. Zudem danke ich Prof. Dr.-Ing. Klaus Höschler für die Übernahme des Vorsitzes meines Promotionsverfahrens.

Dank gebührt ferner allen Mitarbeitenden des Lehrstuhls, insbesondere Lutz Anklam für die stets funktionierende IT-Infrastruktur und sein Organisationstalent, Dr.-Ing. Michael Lockan für sein offenes Ohr bei optimierungsspezifischen Problemstellungen und Peggy Fobo für ihre Unterstützung bei administrativen Lehrstuhlbelangen. Außerdem bedanke ich mich bei meinen Mitstreitern und Leidensgenossen Dr.-Ing. Dmitrij Ivanov, Simon Extra, Christian Boblenz, Dr.-Ing. Chen-Xiang Chao, David Göbel, Malte Niehoff und Jose Urbano für die anregenden wissenschaftlichen Diskussionen und die entspannte Zusammenarbeit. Das freundschaftliche und offene Verhältnis zu ihnen machte die Arbeit leichter und hat mich motiviert, die nächsten Meilensteine zu erreichen.

Natürlich darf das große Team des Industriepartners *Rolls-Royce Deutschland* nicht vergessen werden, das sich der Fortführung der *VIT*-Projektserie verschrieben und dafür gekämpft hat. Stellvertretend möchte ich mich hier bei Prof. Dr.-Ing. Marius Swoboda, Dr.-Ing. Akin Keskin, Dr.-Ing. Roland Parchem und Dr.-Ing. André Huppertz bedanken, die stets eine gute Anlaufstelle sowohl bei organisatorischen als auch fachlichen Fragestellungen waren.

Ein besonderer Dank geht an meine Familie. Erst durch ihren Rückhalt und ihren Beistand konnte diese Arbeit zu einem erfolgreichen Ende gebracht werden. Für eure jahrelange Unterstützung auf meinem Bildungsweg und euer Verständnis für meine andauernde Abwesenheit während dieser Promotion möchte ich euch von Herzen danken, meine lieben Eltern. Meiner Schwester und Motivationskönigin Sarah danke ich für die vielen aufbauenden Gespräche. Ich bin froh, dass es dich gibt und ich hoffe, dass wir in Zukunft wieder mehr Zeit füreinander haben. Auch bei meinen Schwiegereltern bedanke ich mich für ihre Geduld und ihre Hilfe auf diesem arbeitsreichen Weg.

Vor allem aber möchte ich mich bei meiner Frau Anne vielfach für ihre liebevollen, motivierenden Worte sowie ihre bedingungslose Akzeptanz gegenüber diesem langjährigen Projekt bedanken. Es tut mir so unendlich leid, dass uns dieses Thema so lange begleitet und uns dabei so viel Kraft gekostet hat. Immer wieder hast du in den vergangenen Jahren deine Interessen den meinigen untergeordnet und dich dabei hingebungsvoll um unsere Kinder gekümmert. Danke, dass du das für mich gemacht hast. Ich bin mir dessen bewusst, dass dies keine Selbstverständlichkeit ist und nur besondere Menschen dazu in der Lage sind. Die vielen Male, die ich euch alleine habe ziehen lassen müssen, um diese Arbeit fertig zu stellen und die vielen Momente, die ich dadurch mit meinen Kindern verpasst habe, sind auf alle Ewigkeit verloren. Meinen kleinen Sohn Karlsson kann ich daher nur um Entschuldigung bitten. Verzeih mir all die Zeit, die ich dir nicht zur Verfügung stand. Dir und meinem kleinen Lottchen verspreche ich, dass wir in Zukunft so viel Zeit wie möglich miteinander verbringen werden.

All unsere vergangenen Entscheidungen haben uns hierher geführt und zu dem gemacht, was wir sind – ich bin einfach nur dankbar, dass ihr drei an meiner Seite seid.

Kurzfassung

Triebwerkskomponentenprozesse und Entwurfsstrategien für die holistische aerodynamische Auslegung eines Kerntriebwerks

Schlüsselwörter: holistische Kerntriebwerksauslegung, Multikriterielle Optimierung, Multidisziplinäre Design-Optimierung, Prozessintegration, Prozessautomatisierung, Parametrisierung, Kopplungsstrategien, Beschleunigungsstrategien, Aerodynamik

Die hohe Komplexität im Aufbau und Entwurf eines Flugtriebwerks erfordert in der industriellen Praxis eine modulare Entwurfsstrategie, bei der jede Triebwerkskomponente individuell ausgelegt wird. Um dabei die finale Funktionstüchtigkeit des Triebwerks zu gewährleisten, werden vorab aerodynamische und thermodynamische Schnittstellen im Rahmen einer vereinfachten Leistungsrechnung definiert. Die Detailauslegung der einzelnen Komponenten erfolgt anschließend auf Basis eines kaskadierten Entwurfsansatzes, in dem mehrere Entwurfsschritte mit steigendem Detaillierungsgrad sequenziell ausgeführt werden. Währenddessen bleiben die zuvor definierten Schnittstellen unverändert und dürfen nicht adaptiert werden. Die individuelle, optimale Auslegung der einzelnen Triebwerksmodule garantiert am Ende noch keinen effizienten Betrieb des Gesamtsystems. Damit eine gute Balance zwischen allen Komponenten gefunden und somit das beste Triebwerk für ein gegebenes Einsatzszenarium entwickelt werden kann, müssen holistische Entwurfsansätze mit höherwertigen Designtools zur Anwendung kommen.

Die vorliegende Arbeit widmet sich der Entwicklung und Erprobung eines ganzheitlichen aerodynamischen Auslegungsansatzes für Kerntriebwerke auf höherer Detaillierungsebene. Zu diesem Zweck werden zunächst die automatisierten Entwurfsprozesse für die jeweiligen Kerntriebwerksmodule Verdichter, Brennkammer und Turbine aufgebaut, wobei sowohl auf deren eigenständige Nutzbarkeit als auch auf eine Anwendung im Verbund geachtet wird. Die erstellten Prozesse werden in unterschiedlichen multidisziplinären Kopplungsansätzen miteinander verknüpft und die Resultate sowie die Einsatzcharakteristiken einander gegenübergestellt. Ermöglicht wird der Aufbau einer holistischen Prozessstruktur erst durch die Freigabe der bis dato fixen Schnittstellenparameter zur Anpassung durch höherwertige Designwerkzeuge und dem damit einhergehenden komponentenübergreifenden Informationsaustausch. Um dem Potenzial variabler Schnittstellen und eines erweiterten Entwurfsraums gerecht zu werden, werden moderne Parametrisierungs- und Optimierungsstrategien in die Entwurfsprozesse eingebunden. Als wesentliches Auslegungsziel verfolgen die Prozesse eine Verbesserung des Wirkungsgrads sowie eine Emissionsreduktion. Um die umfangreichen Designprozesse für eine industrielle Anwendung attraktiv zu gestalten, werden zusätzlich zwei Beschleunigungsansätze vorgestellt. Diese ermöglichen die Identifikation vergleichbarer Triebwerkskonfigurationen mit stark reduziertem Rechen- und Zeitaufwand.

Abstract

Aero Engine Component Processes and Design Strategies for the Holistic Aerodynamic Design of a Core Engine

Keywords: holistic core engine design, multi-criteria optimization, multi-disciplinary design optimization, process integration, process automation, parameterization, coupling strategies, acceleration strategies, aerodynamics

In industrial practice, the high level of complexity in the structure and design of aircraft engines calls for a modular design strategy where each engine component is designed individually. In order to ensure the final functionality of the engine, aerodynamic and thermodynamic interfaces are defined in advance as part of a simplified performance calculation. The detailed design of the individual components is then carried out on the basis of a cascaded design approach where several design steps are performed sequentially with increasing levels of detail. During this process, the previously defined interfaces remain constant and must not be adapted. However, in the end the individual, optimum design of the individual engine modules does not guarantee efficient operation of the overall system. In order to obtain a good balance between all components, and thus the best engine for a given operational scenario, holistic design approaches with higher-fidelity design tools must be applied.

This work is dedicated to the development and testing of a holistic aerodynamic design approach for core engines at a higher level of detail. To this end, automated design processes for the core engine modules compressor, combustor, and turbine are built respectively, where attention is paid to both stand-alone usability and their joint application. The created processes will be linked in different multi-disciplinary coupling approaches and the results as well as the application characteristics will be compared. The creation of a holistic process structure is enabled by releasing the previously fixed interface parameters for adaptation by higher-quality design tools and cross-component information exchange. In order to exploit the potential of variable interfaces and an expanded design space, modern parameterization and optimization strategies are integrated into the design processes. As a key design goal, the processes pursue an improvement of efficiency as well as a reduction of emissions. In order to make the extensive design processes attractive for industrial application, two acceleration approaches are additionally presented. They enable the identification of comparable engine configurations with greatly reduced computational and time requirements.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Symbole	IX
1 Einleitung	1
1.1 Industrielles Vorgehen bei der Triebwerksentwicklung	4
1.2 Automatisierung und Prozessintegration zur Unterstützung der Triebwerksauslegung	8
1.3 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	12
2 Isolierte Komponentenauslegung des Verdichters	17
2.1 Initialer Verdichtenterwurf auf Basis der Mittelschnittrechnung	18
2.1.1 Skalare Optimierung	19
2.1.2 Mehrzieloptimierung	21
2.1.3 Automatisierte Verdichtervorauslegung	23
2.1.4 Festlegung von Nebenbedingungen	26
2.1.5 Parametrisierte Variablenadaptation	29
2.1.6 Parametrisierte Ringraumattribute	36
2.1.7 Parametrisierung der axialen Sehnenlänge	40
2.1.8 Parametrisierung des Stufendruckverhältnisses	44
2.1.9 Parametrisierung der Abströmwinkel der Statoren	45
2.1.10 Parametrisierung des Teilungsverhältnisses	46
2.2 Erweiterte Verdichterauslegung mittels Stromlinienkrümmungsverfahren	49
2.2.1 Strömung im Meridianschnitt	50
2.2.2 Entwurfsvariablen des 2D Verdichtenterwurfsprozesses	52
2.2.3 Anpassung der Statorabströmwinkel	54
2.2.4 Anpassung der Stufendruckverhältnisse	60
2.3 Gekoppelter 1D/2D Verdichtenterwurfsprozess	63
2.3.1 Sequenzielle Mittelschnitt- und Meridianschnittauslegung	63
2.3.2 Gekoppelte Mittelschnitt- und Meridianschnittauslegung	64
2.3.3 Mittelschnittauslegung mit Überprüfung von Meridianschnittkriterien	66
2.4 Evolutionäre Optimierungsalgorithmen	67
2.5 Verbesserung der Ergebnisvorhersage des Stromlinienkrümmungsverfahrens	73

3	Praxisorientierte Verdichterauslegung mit erweitertem Ringraum	83
3.1	Erweiterte Verdichterparametrisierung	84
3.2	Verdichteroptimierung inklusive Schwanenhals und Diffusor	95
3.3	Aerodynamisches Klonen eines Referenzentwurfs für veränderte Verdichterkonturen	106
4	Verdichterauslegung unter Berücksichtigung der Brennkammerrückwirkung	117
4.1	Schnittstellendefinition zur Komponentenkopplung	118
4.2	Prozess für die parametrische Brennkammeroptimierung	123
4.3	Antwortflächenverfahren zur Prozessbeschleunigung	130
4.4	Gekoppelter Verdichter-Brennkammer-Entwurfsprozess	135
5	Holistische Kerntriebwerksauslegung	149
5.1	Turbinenoptimierung auf Basis eines Stromlinienkrümmungsverfahrens	149
5.2	Lösungsmöglichkeiten für gekoppelte Komponenteoptimierungen	160
5.3	Ganzheitliche Optimierung aller Triebwerkskomponenten mit Interaktion	172
5.3.1	All-at-Once-Ansatz	173
5.3.2	Individual-Discipline-Feasible-Ansatz	180
5.3.3	Multidisciplinary-Feasible-Ansatz	188
5.3.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse	195
6	Wissensbasierte Initialisierung von Entwurfsprozessen	197
6.1	Eigenschaften des <i>CMA-ES</i> -Algorithmus	197
6.2	Interpolationsstrategien zur Initialisierung einer Startlösung	203
6.2.1	Inverse Distanzwichtung	205
6.2.2	Antwortflächenverfahren	207
6.3	Validierung der wissensbasierten Initialisierung anhand einer Testfunktion	209
6.4	Anwendung auf den Verdichtenterwurfsprozess	220
7	Zusammenfassung und Ausblick	227
	Abbildungsverzeichnis	231
	Tabellenverzeichnis	237
	Literaturverzeichnis	239

Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

<i>AAO</i>	<u>A</u> ll <u>a</u> t <u>O</u> nce
<i>AMGA</i>	<u>A</u> rchive-based <u>M</u> icro <u>G</u> enetic <u>A</u> lgorithm
<i>AZ</i>	<u>A</u> usmischzone
<i>BLISS</i>	<u>B</u> i- <u>L</u> evel <u>I</u> ntegrated <u>S</u> ystem <u>S</u> ynthesis
<i>CAD</i>	<u>C</u> omputer- <u>A</u> ided <u>D</u> esign
<i>CFD</i>	<u>C</u> omputational <u>F</u> luid <u>D</u> ynamics
<i>CMA-ES</i>	<u>C</u> ovariance <u>M</u> atrix <u>A</u> daptation- <u>E</u> volution <u>S</u> trategy
<i>CO</i>	<u>C</u> arbon <u>M</u> onoxide (Kohlenstoffmonoxid), <u>C</u> ollaborative <u>O</u> ptimization
<i>CO₂</i>	<u>C</u> arbon <u>D</u> ioxide (Kohlenstoffdioxid)
<i>CPD</i>	<u>C</u> omputerized <u>P</u> reliminary <u>D</u> esign <u>C</u> ode
<i>CPU</i>	<u>C</u> entral <u>P</u> rocessing <u>U</u> nit
<i>CROR</i>	<u>C</u> ounter <u>R</u> otating <u>O</u> pen <u>R</u> otor
<i>CSSO</i>	<u>C</u> oncurrent <u>S</u> ubspace <u>O</u> ptimization
<i>DLR</i>	<u>D</u> eutsches Zentrum für <u>L</u> uft- und <u>R</u> aumfahrt
<i>DoE</i>	<u>D</u> esign of <u>E</u> xperiments (statistische Versuchsplanung)
<i>DP</i>	<u>D</u> esign <u>P</u> oint (Auslegungspunkt)
<i>EA</i>	<u>E</u> volutionärer <u>A</u> lgorithmus
<i>EP</i>	<u>E</u> volutionäre <u>P</u> rogrammierung
<i>ES</i>	<u>E</u> volutionsstrategie
<i>ESS</i>	<u>E</u> ngine <u>S</u> ection <u>S</u> tator (Kernstromleitrad)
<i>FastPGA</i>	<u>F</u> ast <u>P</u> areto <u>G</u> enetic <u>A</u> lgorithm
<i>GA</i>	<u>G</u> enetischer <u>A</u> lgorithmus

<i>GP</i>	<u>G</u> enetische <u>P</u> rogrammierung
<i>GSP</i>	<u>G</u> as <u>T</u> urbine <u>S</u> imulation <u>P</u> rogram
<i>GTlab</i>	<u>G</u> as <u>T</u> urbine <u>L</u> aboratory
<i>GTSDP</i>	<u>G</u> as <u>T</u> urbine <u>S</u> imulation and <u>D</u> esign <u>P</u> rogram
<i>H, HP</i>	<u>H</u> igh- <u>P</u> ressure System (Hochdrucksystem)
<i>HPC</i>	<u>H</u> igh- <u>P</u> ressure <u>C</u> ompressor (Hochdruckverdichter)
<i>HPT</i>	<u>H</u> igh- <u>P</u> ressure <u>T</u> urbine (Hochdruckturbine)
<i>ICAO</i>	<u>I</u> nternational <u>C</u> ivil <u>A</u> viation <u>O</u> rganization
<i>IDF</i>	<u>I</u> ndividual <u>D</u> iscipline <u>F</u> easible
<i>IDW</i>	<u>I</u> nverse <u>D</u> istance <u>W</u> eighting (inverse Distanzwichtung)
<i>IGV</i>	<u>I</u> nlet <u>G</u> uide <u>V</u> ane (Eintrittsleitrad)
<i>IPR</i>	<u>I</u> ntellectual <u>P</u> roperty <u>R</u> ights
<i>L, LP</i>	<u>L</u> ow- <u>P</u> ressure System (Niederdrucksystem)
<i>LPT</i>	<u>L</u> ow- <u>P</u> ressure <u>T</u> urbine (Niederdruckturbine)
<i>MDA</i>	<u>M</u> ultidisziplinäre <u>D</u> esignanalyse
<i>MDF</i>	<u>M</u> ultidisciplinary <u>F</u> easible
<i>MDO</i>	<u>M</u> ultidisciplinary <u>D</u> esign <u>O</u> ptimization
<i>MIGA</i>	<u>M</u> ulti- <u>I</u> sland <u>G</u> enetic <u>A</u> lgorithm
<i>ML</i>	<u>M</u> eanline (1D Mittelschnittanalyse)
<i>MOPEDS</i>	<u>M</u> odular <u>P</u> erformance and <u>E</u> ngine <u>D</u> esign <u>S</u> ystem
<i>MOPS</i>	<u>M</u> odular <u>P</u> erformance <u>S</u> ynthesis Program
<i>NASA</i>	<u>N</u> ational <u>A</u> eronautics and <u>S</u> pace <u>A</u> dmistration
<i>NGV</i>	<u>N</u> ozzle <u>G</u> uide <u>V</u> ane (Turbineneintrittsleitrad)
<i>NLPQLP</i>	<u>N</u> on- <u>L</u> inear <u>P</u> rogramming by <u>Q</u> uadratic <u>L</u> agrangian for <u>P</u> arallel Computing
<i>NLR</i>	<u>N</u> ationales <u>L</u> uft- und <u>R</u> aumfahrtlabor der Niederlande
<i>NO_x</i>	<u>N</u> itrogen <u>O</u> xides (Stickoxide)
<i>NPSS</i>	<u>N</u> umerical <u>P</u> ropulsion <u>S</u> ystem <u>S</u> imulation
<i>NSGA-II</i>	<u>N</u> on-dominated <u>S</u> orting <u>G</u> enetic <u>A</u> lgorithm II
<i>NURBS</i>	<u>N</u> on- <u>U</u> niform <u>R</u> ational <u>B</u> - <u>S</u> plines
<i>OGV</i>	<u>O</u> utlet <u>G</u> uide <u>V</u> ane (Austrittsleitrad)
<i>PMDO</i>	<u>P</u> reliminary <u>M</u> ultidisciplinary <u>D</u> esign <u>O</u> ptimization

<i>PZ</i>	<u>P</u> rimär <u>z</u> one
<i>R</i>	<u>R</u> otor (Lauf <u>r</u> ad)
<i>RBF</i>	<u>R</u> adiale <u>B</u> asis <u>f</u> unktion
<i>S</i>	<u>S</u> tator (Leit <u>r</u> ad)
<i>SFC</i>	<u>S</u> pecific <u>F</u> uel <u>C</u> onsumption (spezifischer Brennstoffverbrauch)
<i>SN</i>	<u>S</u> moke <u>N</u> umber (Rußzahl)
<i>SPEA2</i>	<u>S</u> trength <u>P</u> areto <u>E</u> volutionary <u>A</u> lgorithm 2
<i>SQP</i>	<u>S</u> equential <u>Q</u> uadratic <u>P</u> rogramming
<i>SZ</i>	<u>S</u> ekundär <u>z</u> one
<i>TDS</i>	<u>T</u> urbine <u>D</u> esign <u>S</u> ystem
<i>TDSYS</i>	Gas <u>T</u> urbine Interactive <u>D</u> esign <u>S</u> ystem
<i>TERA</i>	<u>T</u> echno-economic and <u>E</u> nvironmental <u>R</u> isk <u>A</u> ssessment
<i>TF</i>	<u>T</u> hrough <u>f</u> low (2D Meridianschnittanalyse)
<i>UDF</i>	<u>U</u> ser <u>D</u> efined <u>F</u> eature
<i>UHBR</i>	<u>U</u> ltra- <u>H</u> igh <u>B</u> ypass <u>R</u> atio
<i>UHC</i>	<u>U</u> nburnt <u>H</u> ydrocarbons (Unverbrannte Kohlenwasserstoffe)
<i>VIT</i>	<u>V</u> irtuelles <u>I</u> nterdisziplinäres <u>T</u> riebwerk

Lateinische Symbole

<i>a</i>	Matrix- bzw. Rasterzelle
<i>a, b, c</i>	Formparameter der Ackley-Funktion
<i>af</i>	Luft-Kraftstoffverhältnis
<i>c_a</i>	Auftriebskoeffizient
<i>c_c, c_{cov}</i>	Lernraten
<i>c_p</i>	spezifische Wärmekapazität
<i>c_σ</i>	Schrittweitenkontrolle
<i>d</i>	D-Form-Verteilungs-Funktion, Distanzwert, konstanter Verschiebungswert
<i>d_σ</i>	Dämpfungsparameter
<i>f</i>	skalares Gütekriterium, Funktionswert, nichtlineare Verteilungsfunktion
<i>g</i>	Spaltbreite
<i>h</i>	Kanalhöhe, Enthalpie, skalare Ungleichungsnebenbedingung

h, k, l	Dimension eines Knotenvektors
\tilde{i}_{N_S}	dimensionsloser Stufenindex
k	Ordnung der B-Spline-Kurve
l	Länge, Anzahl der Gleichungsnebenbedingungen
m	Anzahl der Ungleichungsnebenbedingungen, Masse
m, n	Matrixdimension
\dot{m}	Massenstrom
n	Dimension des Entwurfsraums, Anzahl der Kontrollpunkte, Wellendrehzahl, Polytropenexponent
o	skalärer Verschiebungswert
p	skalärer Entwurfsparameter, Druck, Polynomgrad
p_c, p_σ	Evolutionspfade
q	Polynomgrad, Wärmeenergie
r	Radius, skalärer positiver Wert, Rang
s	Schaufelsehnenlänge, Formfaktor für Mischluftzugang, Streuung
t	Teilung, Kurvenparameter, Zeit
u, v	Flächenparameter
w	Wichtungsfaktor
x	skalare Entscheidungsvariable, Entwurfsparameter
x, y	kartesische Koordinate
A	Ringraumquerschnittsfläche
AR	Schaufelseitenverhältnis (Aspect Ratio)
B	Bernsteinpolynom
C_h	Koch-Parameter
DF	Diffusionszahl
DH	De-Haller-Zahl
E	Fehlerwert
E_I	Emissionsindex
F	Kraft
H	Häufigkeit
M	Anzahl der Gütekriterien
Ma	Machzahl

N	B-Spline-Basisfunktion, Anzahl der Stützstellen
N_B	Anzahl der Schaufeln in einer Stufe
N_E	Anzahl der Entwürfe
N_I	Anzahl der Iterationen
N_N	Anzahl der Nebenbedingungen
N_S	Anzahl der Verdichterstufen
N_{SL}	Anzahl der Stromlinien
P	Wellenleistung
QF	Gütefaktor (Quality Factor)
R	Stufenreaktionsgrad, Gaskonstante
R^2	Bestimmtheitsmaß
SM	Pumpgrenzabstand (Surge Margin)
T	Temperatur
V	Volumen
Y	Extremwert einer Matrixzeile

Griechische Symbole

α	Abströmwinkel
β	Winkelabweichung
γ	Längenverhältnis einer Brennzona
δ	positive Konstante
ε	Toleranz, Approximationsfehler
η	Wirkungsgrad
θ	Formparameter
κ	Isentropenexponent
λ	dimensionsloser Anteilfaktor, Populationsgröße der Nachkommen, unbekannter Modellparameter
μ	Menge an Elternindividuen
μ_{cov}	Wichtungsfaktor
μ_{eff}	gewichtete Selektionskonstante
μ_W	gewichtete Elternindividuen
π	Verdichterstufendruckverhältnis

ρ	Dichte
ρ_{PE}	Pearson-Korrelationskoeffizient
ρ_{SP}	Spearman-Korrelationskoeffizient
σ	Standardabweichung, Schrittweite
τ	Knotenpunkt
ϕ	Fitnesswert, Ansatzfunktion
Δ	Differenz, Verschiebung durch Perturbations-Spline
Π	Gesamtdruckverhältnis
Ψ	Belastungskoeffizient

Vektoren und Matrizen

f	Vektorkriterium, Funktionswert der Trainingspunkte
g	Gleichungsnebenbedingungen
h	Ungleichungsnebenbedingungen
k	Kontrollpunktvektor
m	Mittelwert der Suchverteilung
o	Verschiebungsvektor
p	Entwurfsvektor, Eingangsvektor, spezifischer Kurvenpunkt
x	Entscheidungsvektor, Datensatz, Entwurfsvariablenvektor
y	Kopplungsparameter, Datensatz
A	Parametermatrix, quadratische Koeffizientenmatrix
B	orthogonale Matrix
C	Kovarianzmatrix
D	Diagonalmatrix
I	Einheitsmatrix
K	Kontrollpunktmatrix
L	Spline-Kurvengleichung
S	Spline-Flächengleichung
Y	zusammengefasste Matrix aus Entwurfsraumvektoren
λ	Modellparametervektor
τ	Knotenvektor

Indizes unten

<i>a, b, c</i>	Positionsindex, Vektoranteil
<i>ax</i>	axial
<i>diff</i>	Differenz
<i>i, j, k, l, m, n</i>	Zählindex
<i>max</i>	maximal
<i>mech</i>	mechanisch
<i>min</i>	minimal
<i>neu</i>	neu
<i>poly</i>	polytrop
<i>red</i>	reduziert
<i>ref</i>	Referenz
<i>t</i>	totale Größe
<i>zu</i>	zugeführt
<i>AZ</i>	Ausmischzone
<i>B</i>	Brennkammer
<i>CO</i>	Kohlenstoffmonoxid
<i>D</i>	Diffusor
<i>DG</i>	Abstand zwischen Vordiffusoraustritt und Flammrohr (Dump Gap)
<i>F</i>	Kraftstoff (Fuel)
<i>FR</i>	Flammrohr
<i>HP</i>	Hochdrucksystem
<i>HPC</i>	beschauelter Hochdruckverdichter
<i>HPT</i>	Hochdruckturbine
<i>IN</i>	Injektor
<i>LPT</i>	Niederdruckturbine
<i>ML</i>	1D Mittelschnittanalyse
<i>NO_X</i>	Stickoxide
<i>PP</i>	Primärzugang (Primary Port)
<i>PZ</i>	Primärzone

<i>S</i>	Schwanenhals
<i>SP</i>	Sekundärzugang (Secondary Port)
<i>SZ</i>	Sekundärzone
<i>T</i>	Turbine
<i>TF</i>	2D Meridianschnittanalyse
<i>UHC</i>	unverbrannte Kohlenwasserstoffe
<i>V</i>	Verdichter

Indizes oben

<i>g</i>	Generation
<i>o</i>	obere Grenze
<i>u</i>	untere Grenze
<i>D</i>	Diffusor
<i>DP</i>	Auslegungspunkt
<i>E</i>	Schaufelaustritt (Exit)
<i>G</i>	Gehäuse
<i>I</i>	Schaufeleintritt (Inlet)
<i>IGV</i>	Verdichtereintrittsleitrad
<i>L</i>	lokaler Parameter
<i>M</i>	Mittellinie, mittlere Stromlinie
<i>N</i>	Nabe
<i>NGV</i>	Turbineneintrittsleitrad
<i>OGV</i>	Verdichteraustrittsleitrad
<i>P</i>	Pareto-optimaler Entwurf, Strafterm
<i>R</i>	Rotor
<i>S</i>	Stator, Systemparameter

Mathematische Ausdrücke

arg min	Argument des Minimums
max	Maximum
min	Minimum

\mathcal{A}, \mathcal{D}	optimierter Designvorschlag
\mathcal{N}	normalverteilte Zufallsgröße, Normalverteilung
\mathbb{N}	Menge der natürlichen Zahlen
\mathcal{P}	zulässiger Entwurfsraum, Population
\mathcal{P}_Z	Zwischenpopulation
\mathcal{R}	Referenzdesign
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen
\mathbb{Z}	Menge der ganzen Zahlen
$ a $	Betrag von a
$\lfloor \cdot \rfloor$	Abrunden einer reellen Zahl
$\ \mathbf{a}\ $	Betrag eines Vektors \mathbf{a} (Euklidische Norm)
$\ \cdot\ _F$	Frobenius-Norm

Sonstige Zeichen

\bullet'	relative Größe
$\bar{\bullet}$	Mittelwert, Größen der Mittelschnittrechnung
$\ddot{\bullet}$	perturbiert
$\hat{\bullet}$	Referenzwert, Ersatzmodell
\bullet^*	optimierte Größe, kontinuierliche Variable
$\tilde{\bullet}$	normierte Größe
\bullet^T	transponiert