

KOOPERATIVE OPTIMIERUNG KOMPLEXER SYSTEME DURCH SEGMENTIERUNG DES INTERFACE-RAUMS

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

vorgelegt von

Dipl.-Ing. für Maschinenbau
Michael Lockan

geboren am 13.12.1982 in Magdeburg

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Christoph Egbers
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Hon. Prof. (NUST) Dieter Bestle
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Arnold Kühhorn

Tag der mündlichen Prüfung: 2. Mai 2017

Berichte aus der Luft- und Raumfahrttechnik

Michael Lockan

**Kooperative Optimierung komplexer Systeme
durch Segmentierung des Interface-Raums**

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 978-3-8440-5455-2

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

Bei jedem Ansatz, diesen so unverzichtbaren Teil der Arbeit zu formulieren, bin ich stets bei den Worten von Wilhelm von Humboldt hängen geblieben:

“Im Grunde sind es doch die Verbindungen mit Menschen, welche dem Leben seinen Wert geben“.

So habe ich viele Zeilen geschrieben und wieder gelöscht, weil es mir einfach nicht gelingen wollte, ja immer noch nicht gelungen ist, wohl nie gelingen wird, den mich umgebenden Menschen in angemessener Weise zu danken. Dieses so treffende Zitat scheint besonders in der heutigen, so schnelllebigen Zeit mehr und mehr an Bedeutung zu gewinnen und sollte uns stets in Gedanken begleiten. Ebenso lässt es sich aber auch auf die Anfertigung einer wissenschaftlichen Arbeit übertragen, welche besonders durch den Austausch und die Diskussion mit uns umgebenden Menschen bereichert wird. Der einzelne Einfluss ist dabei unglaublich schwer zu bestimmen, so dass es manchmal einzelne Wörter oder Gesprächsfetzen sind, welche sich festsetzen, ausbreiten und schließlich zu neuen Ideen und Ansätzen anwachsen. Aus diesem Grund sind die nachfolgend aufgeführten Gedanken auch nur ein, im Vorhinein zum Scheitern verurteilter Versuch, jedem Einzelnen gerecht zu werden und den entsprechenden Anteil zu würdigen.

Diese Arbeit ist während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Technische Mechanik und Fahrzeugdynamik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg entstanden. Besonderen Dank gilt daher Prof. Dr.-Ing. habil. Dieter Bestle und Peter Flassig, welche mich durch die vielen Diskussionen von Beginn meiner wissenschaftlichen Tätigkeit an geprägt haben. Des Weiteren möchte ich mich bei Lutz Anklam und Peggy Fobo für die unschätzbare Hilfe bei allerlei Problemen auch abseits von IT und Administration bedanken.

Das gesamte Team am Lehrstuhl hat stets meine wissenschaftliche Arbeit bereichert und den Nährboden der vorliegenden Arbeit geschaffen. Insbesondere bleibt mir jedoch die Zeit mit Kai Karger, Roman Schörner und Fiete Pöhlmann in Erinnerung. Neben allen fachlichen und weniger fachlichen Gesprächen habt ihr mir tolle Jahre beschert, welche ich nicht missen möchte. Ähnliches trifft auch auf Jochen Busch, Torsten Funke und Dieter Probst zu, welche weit mehr als nur Kollegen waren. Auch haben mich Philipp Kupijai und Christian Janke einen nicht unwesentlichen Weg begleitet, und somit ein Stück meiner Richtung mitbestimmt. Insgesamt verbleiben mir viele Begegnungen mit tollen Menschen, welche mir die Zeit am Lehrstuhl so unvergesslich gemacht haben.

Besonderer Dank gilt auch Roland Parchem, Marcus Meyer und Bernd Meissner von Rolls-Royce Deutschland. Die Unterstützung, welche ich besonders während der Endphase meiner Diplomarbeit erfahren habe, war einfach toll! Zudem waren die Begegnungen stets inspirierend und motivierend, so dass sich unsere Wege auch in Zukunft noch oft kreuzen mögen.

Nicht vergessen möchte ich den Zweitgutachter dieser Arbeit Prof. Dr.-Ing. Arnold Kühorn sowie den Vorsitzenden des Promotionsverfahrens Prof. Dr.-Ing. Christoph Egbers. Es war unglaublich, wie schnell und unkompliziert meiner Anfrage zugesagt wurde.

Alle bisherigen Versuche, die Anteile an meiner Arbeit zu würdigen, beziehen sich mehr oder weniger auf wissenschaftliche Einflüsse, wenn auch bereits Freunde erwähnt wurden. Aber was wäre die Arbeit, ja was wäre ich ohne meine Familie und ohne Freunde. Besonderer Dank gilt dabei meinen Eltern sowie meinen Großeltern, welche mir jedoch die Bürde auferlegt haben, Empfangenes nicht mehr zurückgeben zu können. Ebenso bin ich meiner Frau und meinen Kindern zu unendlichem Dank verpflichtet. Sie lehren mich jeden Tag wichtige Dinge von unwichtigen zu unterscheiden und Sachen zu hinterfragen, welche nie angezweifelt worden wären. Ich freue mich so sehr, noch so vieles von euch zu lernen. Nicht zuletzt sei auch meinen Schwiegereltern gedankt, welche der gesamten Familie mit großem Einsatz stets zur Seite stehen.

Sehr stolz und dankbar bin ich auch, einen so tollen Freundeskreis haben zu dürfen. Ich fühle mich so unglaublich wohl in eurer Mitte, auch wenn ich zuletzt wenig Zeit hatte. Das Verständnis, welches ihr mir entgegenbringt und die wenigen Worte, die es braucht wenn man sich wieder trifft, beeindrucken mich jedes Mal von neuem. Bleibt so wie ihr seid!

Cottbus, Sommer 2017

Kurzfassung

Kooperative Optimierung komplexer Systeme durch Segmentierung des Interface-Raums

Schlüsselwörter: Kooperative Optimierung, Multidisziplinäre Auslegung, Antwortflächen, Interface-Approximation

Die Auslegung von komplexen technischen Systemen ist ein Prozess, bei welchem Experten verschiedener Disziplinen, Abteilungen oder sogar Firmen sehr eng zusammenarbeiten müssen. Aufgrund der Komplexität oder auch aus politischen Gründen existiert im Allgemeinen eine einzelne System-Analyse nicht und unterschiedliche Subsystem-Analysen müssen in geeigneter Weise gekoppelt werden, um das Verhalten des Gesamtsystems zu bestimmen. Dabei stellt besonders in kooperativen Entwicklungsumgebungen, wenn möglicherweise konkurrierende Firmen zusammenarbeiten müssen, diese Kopplung eine große Herausforderung dar.

Die Optimierung von komplexen Systemen findet heutzutage hauptsächlich im Rahmen von automatisierten Subsystem-Optimierungen statt. Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Subsystemen werden dabei in frühen Entwurfsphasen auf Grundlage von Erfahrungswerten oder einfacher Abschätzungen festgelegt und nachfolgend nicht mehr wesentlich verändert. Diese Schnittstellen bestimmen jedoch maßgeblich die erreichbare Leistungsfähigkeit des Systems, und sollten daher während des gesamten Optimierungsprozesses unter Verwendung detaillierter Subsystem-Analysen hinterfragt und gezielt angepasst werden. Die dafür benötigten multidisziplinären Optimierungsverfahren müssen dabei alle beteiligten Analysemodelle in effizienter Weise koordinieren, damit eine Anwendung in praktischen Problemstellungen und hohen Entwurfsraumdimensionen erfolgen kann.

Der Fokus dieser Arbeit liegt daher auf der Entwicklung eines effizienten Verfahrens zur Optimierung komplexer Systeme unter besonderer Beachtung eines kooperativen Hintergrundes. Es wird gezeigt, wie Antwortflächen-Verfahren verwendet werden können, um die Subsystem-Optimierungen zu beschleunigen und somit auch zeitaufwändige Analysen im Rahmen einer System-Optimierung einzusetzen. Durch die Analyse bestehender Verfahren wird die generelle Struktur kooperativer Optimierungen verdeutlicht und eine Einordnung des entwickelten ISOC-Verfahrens ermöglicht. Dessen ausführliche Herleitung und Darstellung zeigt die einfache Anpassung der vorhandenen Subsystem-Prozesse und demonstriert die Einbindung in die System-Optimierung. Die Anwendungen auf repräsentative Probleme aus der Triebwerkstechnik zeigen zum Einen die Vorteile paralleler und entkoppelter Optimierungen, und zum Anderen, dass das entwickelte ISOC-Verfahren in der Lage ist, praktische Problemstellungen zu lösen.

Abstract

Collaborative Optimization of Complex Systems by Segmentation of the Interface-Space

Keywords: Collaborative Optimization, Multidisciplinary Design, Surrogate Modeling, Interface-Approximation

The design of complex technical systems is a process where discipline experts from different departments or even companies have to work together. Due to the complexity of the system or for political reasons a single system analysis usually does not exist, but several subsystem evaluation codes have to be coupled in order to determine the overall system performance. Due to responsibility restrictions even in a single company or intellectual property rights of competitive companies an integrated optimization process can hardly be realized, which becomes even more challenging in collaborative design environments.

Today, system optimizations are performed by fixing the interface parameters between subsystems based on experiences or low fidelity information. Subsequently, subsystem optimizations are carried out according to these fixed parameters. However, prescribing the interface quantities may prohibit an optimal system performance, even if sophisticated subsystem optimizations using high fidelity models are performed. Therefore, interface parameters should be varied during the entire optimization process and adopted to subsystem needs. This calls for efficient multidisciplinary optimization methods in order to enable the application to industrial problems with high dimensional design spaces.

The main aspect of this thesis is the development of an efficient collaborative optimization approach. It is shown how surrogate modeling techniques can improve the performance of subsystem optimizations, with the result that high fidelity analysis codes can be applied within the system optimization procedure. Due to the investigation of existing approaches the general collaborative optimization structure can be explained. Furthermore, a classification of the developed approach can be realized. Through a detailed description of the developed ISOC approach the straightforward implementation of the subsystem analysis models is demonstrated as well as the system optimization set-up. The application to typical jet engine design tasks shows the benefit of decoupled and parallel subsystem optimizations. Finally, it is demonstrated that the ISOC approach can deal with real industrial applications.

Inhaltsverzeichnis

Symbole und Abkürzungen	IX
1 Einleitung	1
1.1 Entwicklung multidisziplinärer Optimierungen für komplexe Systeme	3
1.2 Stand der Forschung zu kooperativen Optimierungsmethoden	5
1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit	7
2 Optimierungsaufgaben aus der Triebwerkstechnik	9
2.1 Aerodynamische Optimierung einer Verdichterstufen-Sektion	10
2.2 Multidisziplinäre Optimierung einer Verdichterschaufel	17
2.3 Aerodynamische Optimierung von Hoch- und Niederdruckturbine	25
3 Beschleunigung von Entwurfsaufgaben durch Antwortflächen	31
3.1 Lineare Regression	31
3.2 Trust-Region-Verfahren	36
3.3 Radiale Basis-Funktionen	40
3.4 Kriging	47
3.5 Anwendung der Antwortflächenverfahren auf den Turbinenentwurf	56
4 Standardverfahren für kooperative Optimierungsaufgaben	63
4.1 Formulierung einer kooperativen Optimierungsaufgabe	64
4.2 Concurrent Subspace Optimisation	68
4.3 Bi-Level Integrated System Synthesis	76
4.4 BLISS-2000	86
4.5 Collaborative Optimization	92
5 Kooperative Optimierung durch Segmentierung des Interface-Raums	99
5.1 Approximation der Subsystem-Eigenschaften im Interface-Raum	100
5.2 Iterativer Optimierungsprozess des gekoppelten Gesamtsystems	112
5.3 Implementierung von Antwortflächenverfahren	118
5.4 Vergleich mit den Standardverfahren	120

6 Kooperative Optimierung der Probleme aus der Triebwerkstechnik	127
6.1 Kooperative Optimierung einer Verdichterstufen-Sektion	127
6.2 Verteilte multidisziplinäre Optimierung einer Verdichterschaufel	137
6.3 Kooperative Optimierung von Hoch- und Niederdruckturbine	144
7 Zusammenfassung und Ausblick	153
Anhang A Testprobleme für skalare Optimierungsaufgaben	157
Anhang B Untersuchungen und Nebenrechnungen	161
Abbildungsverzeichnis	165
Literaturverzeichnis	171