

Entwicklung eines graphen- und heuristikbasierten Verfahrens zur Topologieoptimierung von Profilquerschnitten für Crashlastfälle

**Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades**

im
**Fachbereich D – Architektur, Bauingenieurwesen, Maschinenbau,
Sicherheitstechnik**
der
Bergischen Universität Wuppertal

– Abteilung Maschinenbau –

vorgelegt von
Christopher Ortmann
aus Wittenberg

Wuppertal 2015

Tag der mündlichen Prüfung: 20.05.2015

Berichte aus dem Maschinenbau

Christopher Ortmann

**Entwicklung eines graphen- und heuristikbasierten
Verfahrens zur Topologieoptimierung von
Profilquerschnitten für Crashlastfälle**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Wuppertal, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3746-3

ISSN 0945-0874

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

Christopher Ortmann

Entwicklung eines graphen- und heuristikbasierten Verfahrens zur Topologieoptimierung von Profilquerschnitten für Crashlastfälle

Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Fachbereich D – Abteilung Maschinenbau, Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen, Dezember 2014

Kurzfassung:

Die passive Sicherheit gehört zu den dominierenden Auslegungskriterien bei der Entwicklung eines Fahrzeugs. Sie umfasst Sicherheitsmaßnahmen, welche die Folgen eines Unfalls für Fahrzeuginsassen und andere Verkehrsteilnehmer mindern, nachdem ein Unfall unvermeidlich geworden ist. Ein Kernelement ist hierbei die Fahrzeugkarosserie.

Das Werkzeug der Topologieoptimierung könnte hier einen wertvollen Beitrag leisten. Für linear statisch belastete Strukturen existiert eine Reihe von effizienten Methoden für die Topologieoptimierung. Diese können allerdings aufgrund der auftretenden Nichtlinearitäten und der Dynamik nicht bei crashbelasteten Strukturen angewendet werden. Zu den Nichtlinearitäten zählen große Verschiebungen und Rotationen, Kontaktphänomene sowie plastisches und geschwindigkeitsabhängiges Materialverhalten. Weitere in einer Optimierung bei Berücksichtigung von Crashlastfällen auftretende Schwierigkeiten sind Verzweigungspunkte, eine hohe Anzahl von lokalen Optima und die fehlende Möglichkeit, die Sensitivitäten analytisch und damit ohne zusätzliche Funktionsaufrufe zu ermitteln.

In dieser Dissertation wird die *Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung (GHT)* vorgestellt, welche diese Schwierigkeiten adressiert und für die Topologieoptimierung von Profilquerschnitten von crashbelasteten Strukturen verwendet werden kann. In der *GHT* wird das eigentliche Optimierungsproblem in zwei ineinander geschachtelte Optimierungsschleifen aufgeteilt. In der äußeren Optimierungsschleife verändern aus Expertenwissen abgeleitete Heuristiken, basierend auf Simulationsdaten von Crashberechnungen, die Topologie der zu optimierenden Struktur. In der inneren Optimierungsschleife werden herkömmliche, universelle Optimierungsalgorithmen für die Formoptimierung und Dimensionierung der Struktur verwendet. Die Geometrie der zu optimierenden Struktur wird durch einen mathematischen Graphen beschrieben. Dieser ist nach einer speziell hierfür entwickelten Syntax aufgebaut und ermöglicht durch die flexible Geometriebeschreibung auch komplexe geometrische Modifikationen wie Topologieänderungen. Graphenbasierte Algorithmen werden für die Überprüfung von Fertigungsrestriktionen eingesetzt.

Stichworte:

Topologieoptimierung, Crashauslegung, nichtlinear dynamische Probleme, Heuristiken, Expertenwissen, Graphentheorie

Christopher Ortmann

Development of a graph and heuristic based method for the topology optimization of crashworthiness profile structures

PhD thesis, University of Wuppertal, Department D – Division of Mechanical Engineering, Chair for Optimization of Mechanical Structures, December 2014

Abstract:

Passive safety is one of the dominant design criteria in the development of a vehicle. It includes safety measures which mitigate the consequences of an accident for vehicle occupants and other road users after an accident has become inevitable. A core element of the passive safety is the vehicle body.

The tool of the topology optimization could make a valuable contribution here. For linear static loaded structures there exist a number of efficient methods for topology optimization. However, they cannot be used for crashworthiness structures due to the occurring nonlinearities and the dynamics. The nonlinearities are large displacements and rotations, contact phenomena, as well as plastic and rate-dependent material behavior. Further difficulties arising in an optimization with consideration of crash load cases are bifurcation points, a high number of local optima and the impossibility to determine the sensitivities analytically and therefore without additional function calls.

In this work the *Graph and Heuristic Based Topology Optimization (GHT)* is presented which addresses these difficulties and can be used for the topology optimization of profile cross sections of crashworthiness structures. In the *GHT* the actual optimization problem is divided into two optimization loops convoluted in each other. In the outer optimization loop heuristics derived from expert knowledge change the topology of the structure to be optimized, based on simulation data from crash simulations. In the inner optimization loop conventional universal optimization algorithms for the shape and sizing optimization of the structure are used. The geometry of the structure to be optimized is described by a mathematical graph. The graph is generated according to a specially for this purpose developed syntax and also allows complex geometric modifications such as topology changes by the flexible description of the geometry. Graph based algorithms are used for the check of manufacturing constraints.

Keywords:

Topology optimization, crashworthiness, nonlinear dynamic problems, heuristics, expert knowledge, graph theory

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter im *Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau* an der *Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg* und am *Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen* an der *Bergischen Universität Wuppertal*.

Zum Gelingen dieser Arbeit haben viele Menschen aus meinem Umfeld beigetragen und ich möchte an dieser Stelle die Gelegenheit zum Dank nutzen.

Meinem Doktorvater Prof. Dr. Axel Schumacher möchte ich ganz besonderen Dank aussprechen. Seine Unterstützung war für mich über den gesamten Zeitraum der Promotion sowohl fachlich als auch menschlich von unschätzbarem Wert.

Prof. Dr. Martin Meywerk von der *Helmut-Schmidt-Universität* in Hamburg möchte ich herzlich für die Übernahme des Zweitgutachtens danken. Seine Ideen und Anmerkungen waren für diese Arbeit sehr hilfreich.

Viele Entwicklungen in dieser Arbeit gehen auf die Vorarbeit von Christian Olschinka zurück, wofür ich mich bedanken möchte.

Im Rahmen des Forschungsprojekts *Methodische und softwaretechnische Umsetzung der Topologieoptimierung crash-beanspruchter Fahrzeugstrukturen* haben die zahlreichen Diskussionsrunden und Arbeitskreissitzungen zu der Entstehung dieser Arbeit beigetragen. Danken möchte ich allen Beteiligten. Prof. Dr. Lothar Harzheim, Mathias Brass, Norbert Schulte-Frankenfeld, Dr. Heiner Müllerschön, Alexander Frederic Walsler und Dr. Martin Bernreuther haben mich mit Anregungen und Fragen bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt.

Katrin Weider sowie meinen Kollegen Robert Dienemann und Dominik Schneider vom *Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen* danke ich für das Korrekturlesen und für die daraus entstandenen Anregungen.

Dank gilt meiner Mutter, die meine englischsprachigen Veröffentlichungen und Präsentationen korrigiert hat.

Besonders danken möchte ich meiner Ehefrau, Christine Ortman, die mich in jeder Phase der Promotion unterstützt hat und mich trotz Fachfremdheit bei strategischen Entscheidungen zur weiteren Ausrichtung meiner Forschungen beraten hat.

Wuppertal, im Dezember 2014

Christopher Ortman

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation	1
1.2	Konzept der Optimierungsmethode und Aufbau der Dissertation	2
2	Strukturoptimierung in der Auslegung von crashbelasteten Fahrzeugstrukturen	5
2.1	Auslegung von Crashstrukturen in Fahrzeugen	5
2.1.1	Aufgaben von Crashstrukturen.....	5
2.1.2	Typische Crashlastfälle und Auswertekriterien	8
2.1.3	Besonderheiten der Crashesimulation.....	10
2.2	Grundlagen der Strukturoptimierung	14
2.2.1	Begriffsdefinitionen.....	14
2.2.2	Arten der Strukturoptimierung	16
2.2.3	Mathematische Formulierung eines Optimierungsproblems	18
2.2.4	Einordnung von Optimierungsalgorithmen.....	18
2.3	Herausforderungen bei der Optimierung crashbelasteter Strukturen.....	23
2.4	Stand der Technik zur Topologieoptimierung von crashbelasteten Strukturen	25
2.4.1	Ground Structure Approach	28
2.4.2	Hybrid Cellular Automaton.....	30
2.4.3	Equivalent Static Loads.....	32
3	Geometriebeschreibung durch mathematische Graphen.....	35
3.1	Eigenschaften von Graphen.....	36
3.2	Verwendete Graphensyntax	39
3.3	Algorithmen zur Überprüfung von Fertigungsrestriktionen	44
3.4	Algorithmus zur Bestimmung der Bauraumgrenzen.....	47
3.5	Softwareumsetzung	48
4	Heuristiken für die Strukturoptimierung von crashbelasteten Strukturen	51
4.1	Heuristiken zur Topologieänderung	52
4.1.1	Heuristik „Entfernen unbelasteter Wände“	52
4.1.2	Heuristik „Abstützen sich schnell deformierender Wände“	57

4.1.3	Heuristik „Ausgleichen der Energiedichte“	64
4.1.4	Heuristiken „Ausnutzen des Deformationsraums Zug / Druck“	68
4.1.5	Heuristik „Entfernen kleiner Kammern“	73
4.2	Heuristiken zur Form- und Wanddickenänderung	77
4.2.1	Heuristik „Glätten der Struktur“	77
4.2.2	Heuristik „Skalieren der Wanddicken“	78
5	Methode der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung.....	81
5.1	Funktionsweise der Optimierungsmethode	81
5.2	Ablauf der äußeren Optimierungsschleife	84
5.3	Ablauf der inneren Optimierungsschleife	87
5.3.1	Generierung von Dimensionierungsvariablen basierend auf Wanddicken	89
5.3.2	Generierung von Formvariablen basierend auf Positionen von Wänden	90
5.3.3	Generierung von Formvariablen basierend auf Krümmungen von Wänden	94
5.3.4	Bestimmung der maximalen Anzahl von Funktionsaufrufen	94
5.4	Möglichkeiten und Grenzen der Optimierungsmethode	95
5.5	Softwareumsetzung	96
6	Darstellung der Effizienz der Methode anhand praktischer Anwendungen.....	98
6.1	Anwendungsbeispiel 1: Schwellerausschnitt	99
6.1.1	Anwendungsbeispiel 1a: Minimierung der Reaktionskraft	102
6.1.2	Anwendungsbeispiel 1b: Minimierung der Intrusion	109
6.1.3	Anwendungsbeispiel 1c: Minimierung der Masse	113
6.2	Anwendungsbeispiel 2: Rahmenstruktur	118
6.2.1	Anwendungsbeispiel 2a: Minimierung der Verschiebung	120
6.2.2	Anwendungsbeispiel 2b: Minimierung der Verschiebung mit fixer äußerer Kontur	124
6.2.3	Anwendungsbeispiel 2c: Minimierung der Beschleunigung	128
6.3	Anwendungsbeispiel 3: Schweller in einem Gesamtfahrzeug	134
7	Zusammenfassung und Ausblick	143
	Literaturverzeichnis	145

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

<i>ASCII</i>	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
<i>CAD</i>	<i>Computer Aided Design</i>
<i>CAE</i>	<i>Computer Aided Engineering</i>
<i>ESL</i>	<i>Equivalent Static Loads</i>
<i>FE</i>	<i>Finite Elemente</i>
<i>FEM</i>	<i>Finite Elemente Methode</i>
<i>GHT</i>	<i>Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung</i>
<i>GRAMB</i>	<i>Graph based Mechanics Builder</i>
<i>HCA</i>	<i>Hybrid Cellular Automaton</i>
<i>SIMP</i>	<i>Solid Isotropic Material with Penalization</i>
<i>TOC</i>	<i>Topology Optimizer for Crashworthiness structures</i>
<i>AbsWän</i>	<i>Heuristik Abstützen sich schnell deformierender Wände</i>
<i>AusEne</i>	<i>Heuristik Ausgleichen der Energiedichte</i>
<i>DefDru</i>	<i>Heuristik Ausnutzen des Deformationsraums Druck</i>
<i>DefZug</i>	<i>Heuristik Ausnutzen des Deformationsraums Zug</i>
<i>EntKam</i>	<i>Heuristik Entfernen kleiner Kammern</i>
<i>EntWän</i>	<i>Heuristik Entfernen unbelasteter Wände</i>

Lateinische Zeichen

\vec{a}	Beschleunigungsvektor
c	Schallgeschwindigkeit
d	Verschiebung oder Entfernung
\vec{d}	Verschiebungsvektor
\underline{D}	Dämpfungsmatrix
E	Elastizitätsmodul
\vec{f}	Kraftvektor
F	Kraft
\underline{K}	Steifigkeitsmatrix
l	Länge
m	Masse
\underline{M}	Massenmatrix
n_e	Index zur Nummerierung von Ecken des Profilquerschnitts der Struktur
N_e	Anzahl der Ecken des Profilquerschnitts der Struktur

n_f	Index zur Nummerierung von <i>FE-Knoten</i>
N_{f,n_w,n_l}	Anzahl der <i>FE-Knoten</i> von Wand n_w in Lastfall n_l
n_{fps}	Index zur Nummerierung einer nach bestimmten Kriterien sortierten Menge von <i>FE-Knotenpaaren</i>
N_{fps}	Anzahl der nach bestimmten Kriterien sortierten <i>FE-Knotenpaare</i>
n_h	Index zur Nummerierung von Heuristiken
N_h	Anzahl der Heuristiken
n_i	Index zur Nummerierung von Iterationen
n_{ke}	Index zur Nummerierung von konkurrierenden Entwürfen
N_{ke}	Anzahl der konkurrierenden Entwürfe
n_l	Index zur Nummerierung von Lastfällen
N_l	Anzahl der Lastfälle
n_{pe}	Index zur Nummerierung von potentiellen Endpunkten bei der Heuristik <i>Abstützen sich schnell deformierender Wände</i>
N_{pe}	Anzahl der potentiellen Endpunkte bei der Heuristik <i>Abstützen sich schnell deformierender Wände</i>
n_s	Index zur Nummerierung von Schnittpunkten bei der Heuristik <i>Abstützen sich schnell deformierender Wände</i>
N_s	Anzahl der Schnittpunkte bei der Heuristik <i>Abstützen sich schnell deformierender Wände</i>
n_t	Index zur Nummerierung von Zeitschritten
N_{t,n_l}	Anzahl der Zeitschritte mit relevanten Ergebnisdaten in Lastfall n_l
n_w	Index zur Nummerierung von Wänden des Profilquerschnitts der Struktur
N_w	Anzahl der Wände des Profilquerschnitts der Struktur
n_{wps}	Index zur Nummerierung einer nach bestimmten Kriterien sortierten Menge von Wandpaaren des Profilquerschnitts der Struktur
N_{wps}	Anzahl der nach bestimmten Kriterien sortierten Wandpaare des Profilquerschnitts der Struktur
n_{ws}	Index zur Nummerierung einer nach bestimmten Kriterien sortierten Menge von Wänden des Profilquerschnitts der Struktur
N_{ws}	Anzahl der nach bestimmten Kriterien sortierten Wände des Profilquerschnitts der Struktur
\vec{p}	Positionsvektor
t	Wanddicke
u	Innere Energiedichte
U	Innere Energie
v	Geschwindigkeit

\vec{v}	Geschwindigkeitsvektor
V	Volumen

Griechische Zeichen

α	Deformationsindex
ν	Querkontraktionszahl
ρ	Dichte
ρ_k	Künstliche Dichte
σ	Spannung
σ_f	Fließspannung

Vektoren werden durch einen Pfeil über einem kleinen lateinischen Buchstaben und Matrizen durch eine Unterstreichung bei einem großen lateinischen Buchstaben kenntlich gemacht.