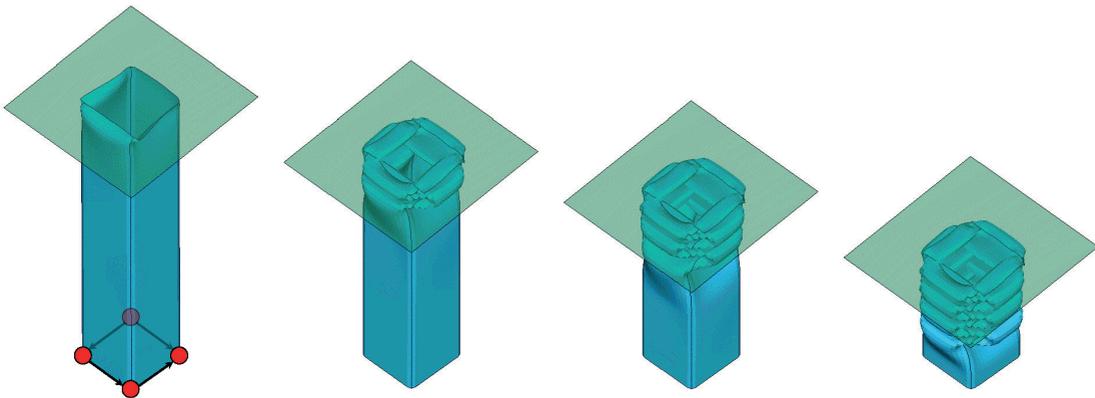


Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung axial belasteter Crashstrukturen

Bergische Universität Wuppertal
Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen

Johannes Sperber





Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung axial belasteter Crashstrukturen

Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
der
Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von
Johannes Sperber
aus Pforzheim

Wuppertal 2022

Tag der mündlichen Prüfung: 03.03.2022

Berichte aus dem Maschinenbau

Johannes Sperber

**Graphen- und Heuristikbasierte Topologie-
optimierung axial belasteter Crashstrukturen**

Shaker Verlag
Düren 2022

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., 2022

Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8634-8

ISSN 0945-0874

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

Johannes Sperber

Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung axial belasteter Crashstrukturen

Dissertation, Bergische Universität Wuppertal,

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik,

Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen, März 2022

Kurzfassung

Stranggepresste Profilstrukturen finden, unter anderem aufgrund ihrer Energieabsorptionseigenschaften, eine weite Verbreitung als Crashstrukturen im Vorderwagen und Heck von Kraftfahrzeugen. Zur effizienten Auslegung dieser Strukturen hinsichtlich ihres Crashverhaltens können Methoden zur Topologieoptimierung eine Schlüsselrolle spielen. Etablierte Methoden zur Topologieoptimierung sind aufgrund der in der Crashsimulation auftretenden Nichtlinearitäten in der Regel ungeeignet. Aus diesem Grund wurden neue Methoden wie die Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung (GHT) entwickelt. Die GHT nutzt mathematische Graphen für eine vereinfachte Beschreibung der Querschnittsgeometrie und konkurrierende Heuristiken zur Topologiemodifikation. Die aus Expertenwissen abgeleiteten Heuristiken wurden dabei mit dem Fokus auf lateral belastete Crashstrukturen (z.B. Fahrzeugschweller im Seitencrash), welche vorwiegend mittels lateraler Kompression und Biegung deformieren, entwickelt.

Bei axial belasteten Crashstrukturen kann die Crashenergie effizient mittels Faltenbeulen absorbiert werden. Im Gegensatz zu lateral belasteten Crashstrukturen müssen hierbei jedoch andere Anforderungen berücksichtigt werden, um eine hohe Energieabsorption bei gleichzeitiger robuster Initiierung und Aufrechterhaltung des Faltenbeulens zu erreichen. Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Arbeit neue Heuristiken für die GHT entwickelt, welche die genannten Anforderungen adressieren. Da die Struktureigenschaften axial belasteter Profile zudem sensitiv hinsichtlich kleiner Konstruktionsunterschiede sein können, wird die automatisierte Generierung von FE-Modellen in der Methode erweitert, um geometrische Details berücksichtigen zu können. Zudem sind Triggermechanismen zur Beeinflussung der Struktureigenschaften etabliert und werden daher ebenfalls integriert.

Die Eignung der Methode zur Topologieoptimierung von axial belasteten Crashstrukturen wird in verschiedenen Anwendungsbeispielen aufgezeigt. Aufgrund der implementierten Überprüfung von Fertigungsrestriktionen, der Berücksichtigung von geometrischen Details in der Modellerzeugung sowie der Effizienz hinsichtlich der benötigten Funktionsaufrufe ist die Methode zur Topologieoptimierung von Crashstrukturen in einem industriellen Entwicklungsumfeld geeignet.

Stichworte: Topologieoptimierung, Crashauslegung, Heuristiken, Expertenwissen, mathematische Graphen, axiale Crashlastfälle

Johannes Sperber

Graph and Heuristic based Topology Optimization of crash structures under axial compression loads

Dissertation, University of Wuppertal
School of Mechanical Engineering and Safety Engineering,
Chair for Optimization of Mechanical Structures, March 2022

Abstract

Due to their superior energy absorption capabilities, extruded profile structures are broadly used as crash structures in the front and rear ends of vehicles. For their efficient crash design, topology optimization methods can play a key role. Due to the occurring nonlinearities in vehicle crash simulations, established topology optimization methods are usually inapplicable. Therefore, new methods such as the Graph and Heuristic based Topology Optimization (GHT) were developed. This method uses mathematical graphs for a simplified description of the profile cross-section. Furthermore, competing heuristics based on expert knowledge are used to modify the topology. These heuristics were developed for the optimization of profile structures exposed to lateral compression and/or bending loads (e.g., vehicle rocker under pole impact).

However, for profile structures under axial compression loads (e.g., crash box in front crash), progressive buckling is usually the desired mode of deformation. Compared to laterally loaded profile structures, different considerations must be made to provide high specific energy absorption capabilities while initiating and maintaining a robust crash behavior. To address these challenges, a new set of heuristics is developed in this work. Since the structural responses of profile structures under axial loads can also be sensitive to small variations in the finite element model, the automated model creation process is enhanced to consider geometrical details. Furthermore, trigger mechanisms are established to control the structural behavior. Hence, the method allows for a parameter-based application of trigger mechanisms.

The effectiveness of the topology optimization method is demonstrated in various application examples. The method proves to be suitable for an industrial development environment due to the implemented manufacturability checks, the consideration of geometrical details as well as its effectiveness regarding the required amount of function calls.

Keywords: Topology optimization, crashworthiness design, heuristics, expert knowledge, mathematical graphs, axial impact

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Notwendigkeit leichter Crashstrukturen	1
1.2 Ausgangssituation und Motivation	2
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2 Technische Grundlagen und Stand der Forschung	7
2.1 Auslegung von crashbelasteten Fahrzeugstrukturen	7
2.1.1 Anforderungen und ausgewählte Crashlastfälle	10
2.1.2 Auslegungsstrategien für Fahrzeugfrontstrukturen	13
2.1.3 Grundlagen und Besonderheiten der Crashsimulation	15
2.2 Profilstrukturen unter axialer Crashbelastung	22
2.2.1 Grundbegriffe und Definition der Deformationsformen	23
2.2.2 Forschungsarbeiten zu Ein- und Mehrkammer-Profilen	27
2.2.3 Triggermechanismen	31
2.3 Grundlagen der Strukturoptimierung	33
2.3.1 Wesentliche Arten und Begriffe der Strukturoptimierung	34
2.3.2 Mathematische Formulierung eines Optimierungsproblems	37
2.3.3 Klassifizierung von Optimierungsalgorithmen	38
2.3.4 Herausforderungen bei der Optimierung von Crashstrukturen	40
2.4 Forschungsarbeiten zur Topologieoptimierung von Crashstrukturen	41
2.4.1 Ground Structure Approach	41
2.4.2 Equivalent Static Loads Method	42
2.4.3 Hybrid Cellular Automata	44
2.4.4 Evolutionary Level Set Method	46
2.4.5 Graphen- und Heuristikbasierte Topologieoptimierung	47
3 Methode der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung	49
3.1 Graphenbasierte Geometriebeschreibung und FE-Modellerzeugung	49
3.2 Heuristiken zur Optimierung von Crashstrukturen	53
3.2.1 Heuristiken zur Topologieänderung	54
3.2.2 Heuristiken zur Formänderung und Dimensionierung	56
3.3 Optimierungsablauf	57
3.3.1 Äußere Optimierungsschleife	57
3.3.2 Innere Optimierungsschleife	60

3.4	Softwarelösung zur Umsetzung des Optimierungsablaufs	62
4	Automatische FE-Modellerzeugung von Profilstrukturen	65
4.1	Applikation geometrischer Imperfektionen	66
4.1.1	Simulation stochastischer Felder	67
4.1.2	Aufbringen auf FE-Netze von Profilstrukturen	70
4.1.3	Einfluss geometrischer Imperfektionen	71
4.2	Berücksichtigung geometrischer Details	75
4.2.1	Verrundungen an Profilkanten	77
4.2.2	Materialansammlungen an Wandknoten im Profilquerschnitt	80
4.3	Parameterbasierte Modellierung von Triggermechanismen	83
4.3.1	Verprägungen/Sicken	84
4.3.2	Ausschnitte	87
4.3.3	Anfasungen	88
4.3.4	Erweiterung der Graphensyntax	89
5	Heuristiken zur Optimierung axial belasteter Crashstrukturen	91
5.1	Anwendung von Heuristiken für lateral belastete Crashstrukturen	93
5.1.1	Diskussion der Anwendbarkeit	93
5.1.2	Weiterentwicklung der Heuristik Use Deformation Space .	95
5.2	Heuristiken zur Verbesserung der Energieabsorptionseigenschaften	100
5.2.1	Modifikation der Außengeometrie	100
5.2.2	Connect Low Energy Walls	101
5.2.3	Split Long Walls	104
5.2.4	Create Different Wall Lengths	106
5.2.5	Insert Small Chambers	108
5.2.6	Create Bitubular Structures	113
5.2.7	Create Cross Structures	116
5.3	Heuristiken zur Initiierung und Aufrechterhaltung von Faltenbeulen	118
5.3.1	Unterstützen des „natürlichen“ Faltenbeulmusters	119
5.3.2	Enforce Deformation Start Position	120
5.3.3	Counter Global Bending	127
5.4	Integration der neuen Heuristiken in den Optimierungsablauf . . .	145
6	Anwendung der entwickelten Methodik	147
6.1	Anwendungsbeispiel 1: Fallturm-Lastfall	148
6.1.1	Initiale Profilgeometrien (Startentwürfe)	148
6.1.2	FE-Modellbildung und Lastfall	150
6.1.3	Optimierungsaufgabe	151

6.1.4	Diskussion exemplarischer Optimierungsergebnisse	153
6.1.5	Identifikation allgemeiner Zusammenhänge	157
6.1.6	Exemplarische Variation weiterer Modellparameter	165
6.1.7	Diskussion der Ergebnisse	168
6.2	Anwendungsbeispiel 2: Optimierung einer Fahrzeugcrashbox	169
6.2.1	FE-Modellbildung und Lastfall	169
6.2.2	Optimierungsaufgabe	171
6.2.3	Optimierungsergebnisse	173
6.2.4	Diskussion der Ergebnisse	182
7	Zusammenfassung und Ausblick	185
	Literaturverzeichnis	188
	Anhang	
A	Studentische Arbeiten	199
B	Weitere Gleichungen zur Heuristik CGB	200
C	Weitere Ergebnisse zu Kapitel 6	202