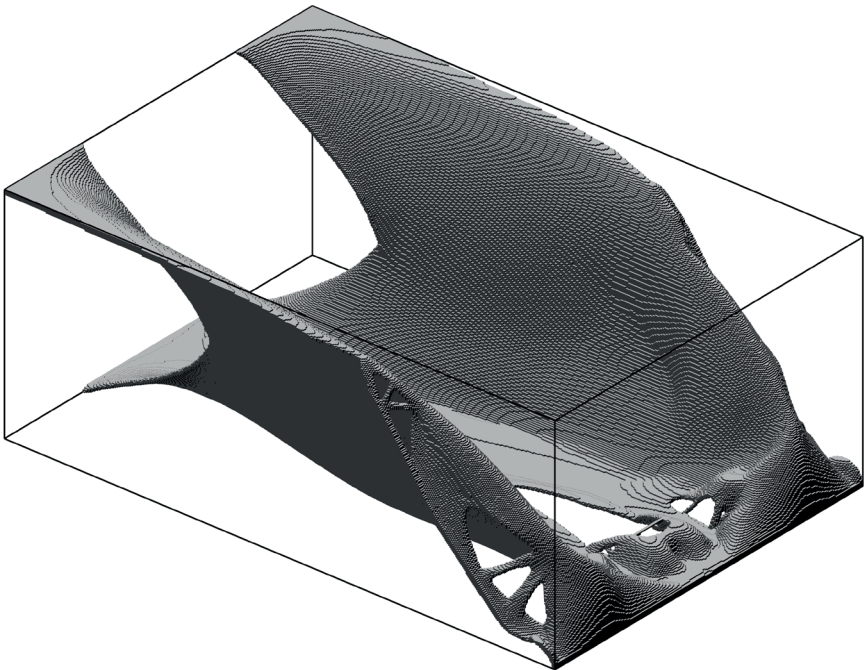


Entwicklung einer Optimierungsmethodik für die Form- und Topologieoptimierung von tiefziehbaren Blechstrukturen

Bergische Universität Wuppertal
Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen

Robert Dienemann



Entwicklung einer Optimierungsmethodik für die Form- und Topologieoptimierung von tiefziehbaren Blechstrukturen

Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
der
Bergischen Universität Wuppertal



vorgelegt von
Robert Dienemann
aus Weimar

Wuppertal 2018

Tag der mündlichen Prüfung: 27.08.2018

Berichte aus dem Maschinenbau

Robert Dienemann

**Entwicklung einer Optimierungsmethodik
für die Form- und Topologieoptimierung
von tiefziehbaren Blechstrukturen**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6196-3

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

Robert Dienemann

Entwicklung einer Optimierungsmethodik für die Form- und Topologieoptimierung von tiefziehbaren Blechstrukturen

Dissertation, Bergische Universität Wuppertal,

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik,

Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen, April 2018

Kurzfassung

Blechbauteile sind häufig genutzte Leichtbaustrukturen, die in der Großserienfertigung geringe Herstellungskosten verursachen. Die möglichst gute Auslegung von Blechstrukturen umfasst die mechanischen Anforderungen bei vorgegebenen Lastfällen als auch die Anforderungen des Fertigungsverfahrens.

Die Strukturoptimierung ist ein Werkzeug, um Bauteile iterativ zu verbessern. Dabei werden Strukturberechnungen durchgeführt und anhand des Bauteilverhaltens wird die Struktur geändert. Dies geschieht so lange bis keine signifikante Verbesserung mehr erwartet wird.

In dieser Dissertation werden Werkzeuge der Topologieoptimierung genutzt. Die Topologieoptimierung ist eine Art der Strukturoptimierung, die das Entstehen oder Verschwinden von Löchern in der Struktur zulässt. Damit werden gleichzeitig die Topologie und die Form von Bauteilen optimiert, sodass beliebig komplexe Strukturen entstehen. Um Blechbauteile zu erhalten, werden neue Fertigungsrestriktionen in die Topologieoptimierung integriert. Diese erlauben die Optimierung von Blechbauteilen, die durch einstufiges Tiefziehen bei Raumtemperatur hergestellt werden.

Als Ansatz für die Topologieoptimierung wird die Dichtemethode gewählt, die Bauteile anhand von Sensitivitäten verbessert. Diese Methode wird zunächst so erweitert, dass möglichst viele mechanische Anforderungen (Masse, Steifigkeit, Festigkeit, Eigenfrequenz, Beulen etc.) in der Optimierung berücksichtigt werden können. Anschließend wird eine Fertigungsrestriktion für Blechstrukturen ohne Hinterschnitte vorgestellt, die Sensitivitäten der Zielfunktion in Elementen manipuliert, wenn diese Elemente weit von der aktuellen Mittelfläche entfernt sind. Weiterhin werden Fertigungsrestriktionen für minimale Umformradien und für Vermeidung von Reißern während des Tiefziehens implementiert. Dazu wird zusätzlich zur Strukturberechnung mit den vorgegebenen Lastfällen eine Tiefziehsimulation durchgeführt. Deren Ergebnisse werden zur Glättung der Mittelfläche an kritischen Stellen genutzt. Diese Fertigungsrestriktionen werden als Heuristiken umgesetzt.

Stichworte: Topologieoptimierung, Fertigungsrestriktion, Dichtemethode, Bleche, Tiefziehen, Statik, Eigenwertprobleme

Robert Dienemann

Development of an optimization scheme for shape and topology optimization of deep drawable sheet metal constructions

PhD thesis, University of Wuppertal, School of Mechanical Engineering and Safety Engineering, Chair for Optimization of Mechanical Structures, April 2018

Abstract

Sheet metal parts are commonly applied lightweight structures incurring low manufacturing costs in mass production. A good design of sheet metal structures covers the mechanical requirements at prescribed load cases and the requirements of the manufacturing process.

Structural optimization is a tool for iterative improvement of components. Structural calculations are performed and the structure is adopted based on the component's performance. This loop is processed until no more significant improvement is expected.

In this thesis, tools for topology optimization are utilized. Topology optimization is a type of structural optimization allowing for holes to occur or vanish. Thereby the topology and the shape of components are optimized, so that any complex structure can emerge. To obtain sheet metal parts, new manufacturing constraints are implemented in the topology optimization. They allow for the optimization of sheet metal parts, which are manufactured by single-step deep drawing at room temperature.

The density method is chosen as approach for the topology optimization. It improves components according to their sensitivities. First this method is extended, so that numerous structural responses (mass, stiffness, strength, eigenfrequency, buckling etc.) can be addressed during the optimization. Afterwards a manufacturing constraint for sheet metal structures without undercuts is introduced. Thereby the sensitivities of the objective function are manipulated for elements that are far away from the current mid surface. Furthermore, manufacturing constraints for minimal draw radii and for the prevention of tearing during the deep drawing are implemented. In addition to the structural calculation with the prescribed load cases, a deep drawing simulation is performed. Its results are used to smooth the mid surface in critical areas. These manufacturing constraints are realized as heuristics.

Keywords: Topology Optimization, Manufacturing Constraint, Density Method, Sheet Metal, Deep Drawing, Statics, Eigenvalue Problems

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen an der Bergischen Universität Wuppertal.

Ich möchte allen Kollegen und Freunden danken, die mich während meiner Doktoranden-Zeit unterstützt und begleitet haben.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Axel Schumacher. Danke für deine Anregungen, kritischen Fragen und dass du mich stets mit Rat und Tat sowie Kontakten unterstützt hast und dabei den nötigen kreativen Freiraum gelassen hast.

Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor von der TU Braunschweig möchte ich herzlich für die Übernahme des Zweitgutachtens danken.

Dr.-Ing. Sierk Fiebig und Thilo Franke vom Kompetenz-Center Fahrwerk der Volkswagen Komponente Braunschweig danke ich für die gute Zusammenarbeit und für Anregungen aus der Entwicklung realer Blechbauteile. Für die Einblicke in die Tiefziehsimulation und deren Anforderungen danke ich Thomas Diederich vom Werkzeugbau der Volkswagen Komponente Braunschweig.

Für die Unterstützung bei der Einbeziehung von OptiStruct® in die Topologieoptimierung unter Berücksichtigung des Beulens möchte ich Kristian Holm von Altair Engineering meinen Dank aussprechen.

Die Kooperation mit Armin Geiser von der TU München ermöglichte den Vergleich der Methodiken zur Schalenoptimierung.

Meinen Kollegen am Lehrstuhl möchte ich für die freundschaftliche Arbeitsumgebung, die Hilfsbereitschaft sowie die vielen wissenschaftlichen Diskussionen danken. Insbesondere meine Bürokollegin Katrin Weider hat regelmäßig den Frust über Programmierfehler oder die Freude über Erfolgserlebnisse mit mir geteilt.

Den Kollegen aus der Doktorandenrunde möchte ich für die vielen fruchtbaren Diskussionen bedanken, insbesondere bei Niklas Klinke, der die Problematik des Tiefziehens thematisch mit mir teilt.

Auch den Studenten Fabian Plate und Steffen Figge, die meine Arbeit im Rahmen von Projekt- und Abschlussarbeiten voranbrachten, gebührt ein Dankeschön.

Für die umfassende Unterstützung während meiner Studienzeit danke ich besonders herzlich meinen Eltern. Auch während der Promotionszeit waren Sie und Nina eine unverzichtbare Stütze.

Wuppertal im April 2018

Robert Dienemann

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Motivation	1
1.2 Optimierungsansatz und Aufbau der Dissertation	3
2 Struktursimulation und -optimierung von Schalenbauteilen	5
2.1 Herausforderung bei der Optimierung von tiefziehbaren Schalenstrukturen	5
2.1.1 Auslegungskriterien	5
2.1.2 Fertigungsverfahren Tiefziehen	7
2.1.3 Berücksichtigung der Fertigung in der Optimierung	10
2.2 Grundlagen der Struktursimulation	11
2.2.1 Simulation des linearen Strukturverhaltens	11
2.2.2 Verwendung von Schalenelementen	15
2.2.3 Simulation des Tiefziehens	19
2.3 Grundlagen der Strukturoptimierung	23
2.3.1 Begriffsdefinitionen	23
2.3.2 Arten der Strukturoptimierung	26
2.3.3 Einordnung von Optimierungsalgorithmen	28
2.3.4 Topologieoptimierungsverfahren	31
2.4 Stand der Technik zur Optimierung von tiefziehbaren Schalenstrukturen	36
2.4.1 Formoptimierung	37
2.4.2 Topologie- und Formoptimierung mit Schalenansatz	39
2.4.3 Topologie- und Formoptimierung für Schalenstrukturen mit der Dichtemethode auf einem Volumennetz	40
3 Grundlagen der Dichtemethode zur Topologieoptimierung	41
3.1 Elementdichten	41
3.2 Optimierungsablauf	42
3.3 Materialinterpolationen	43
3.3.1 SIMP	44
3.3.2 RAMP	45

3.4	Entwurfsvariablen und Filtertechniken	46
3.4.1	Sensitivitätenfilter	46
3.4.2	Dichtefilter	47
3.4.3	Projektionsfilter	48
3.5	Optimierungsalgorithmus	49
3.5.1	Method of Moving Asymptotes	49
3.5.2	Duale Optimierung	50
3.6	Konvergenzkriterien	51
3.7	Grundlegende Struktureigenschaften und Sensitivitäten	52
3.7.1	Volumen	52
3.7.2	Volumenfüllung	52
3.7.3	Masse	53
3.7.4	Compliance	53
3.7.5	Knotenverschiebung	58
3.8	Continuation Method	59
4	Erweiterungen der Dichtemethode um zusätzliche Struktureigenschaften	61
4.1	Vergleichsspannung	61
4.2	Eigenfrequenz	65
4.3	Beulen	67
5	Dichtemethode für Schalenstrukturen ohne Hinterschnitte	71
5.1	Fertigungsrestriktion für Schalenstrukturen ohne Hinterschnitte	71
5.1.1	Ziele der Fertigungsrestriktion	71
5.1.2	Berechnung der Mittelfläche	72
5.1.3	Bestrafung der Sensitivitäten der Zielfunktion weit entfernt von der Mittelfläche	73
5.1.4	Maßnahmen zur verbesserten Konvergenz	75
5.1.5	Optimierungsablauf mit Fertigungsrestriktion für Schalenstrukturen ohne Hinterschnitte	76
5.2	Zweischalige Strukturen	80
5.2.1	Multimaterial-Ansatz	81
5.2.2	Anwendung des Multimaterial-Ansatzes auf zweischalige Strukturen	82

6	Berücksichtigung der Tiefziehbarkeit während der Optimierung	85
6.1	Reihenfolge der Fertigungsschritte	85
6.2	Berücksichtigung minimaler Umformradien	87
6.3	Berücksichtigung von Herstellungsfehlern mittels Umformsimulationen	93
6.3.1	Automatisierung der Umformsimulation	93
6.3.2	Mapping von Ergebnissen der Umformsimulation	93
6.3.3	Heuristik für die Sicherstellung der Herstellbarkeit	94
7	Erhöhung der Effizienz des Optimierungsalgorithmus	99
7.1	Elementdeaktivierung für Verkürzung der FE-Simulationszeit . . .	99
7.2	Aktive Steuerung der Schalenmittelfläche für schnellere Konvergenz	102
8	Praktische Anwendungen	103
8.1	Kragbalken	103
8.1.1	Netzkonvergenzstudie	104
8.1.2	Netz- und Strukturverfeinerung	105
8.1.3	Wandstärkenvariation	107
8.1.4	Variation der Stempelrichtung	110
8.1.5	Variation der Optimierungsaufgabe	113
8.2	Quadratische Platte	115
8.2.1	Ohne Fertigungsrestriktion	116
8.2.2	Mit Fertigungsrestriktion für Schalenstruktur	116
8.2.3	Mit Berücksichtigung minimaler Umformradien	117
8.2.4	Mit Berücksichtigung der Risskriterien	118
8.2.5	Vergleich mit Ergebnissen der Formoptimierung	118
8.3	Querlenker	121
8.3.1	Ohne Fertigungsrestriktion	124
8.3.2	Mit Fertigungsrestriktion für Schalenstruktur	126
9	Zusammenfassung und Ausblick	129
	Literaturverzeichnis	131

Anhang

A Herleitung der Sensitivitäten	138
A.1 Compliance	138
A.2 Knotenverschiebung	139
A.3 Vergleichsspannung	140
A.4 Eigenfrequenz	142
A.5 Beulen	143
B Sensitivitäten für Level-Set-Optimierung	145