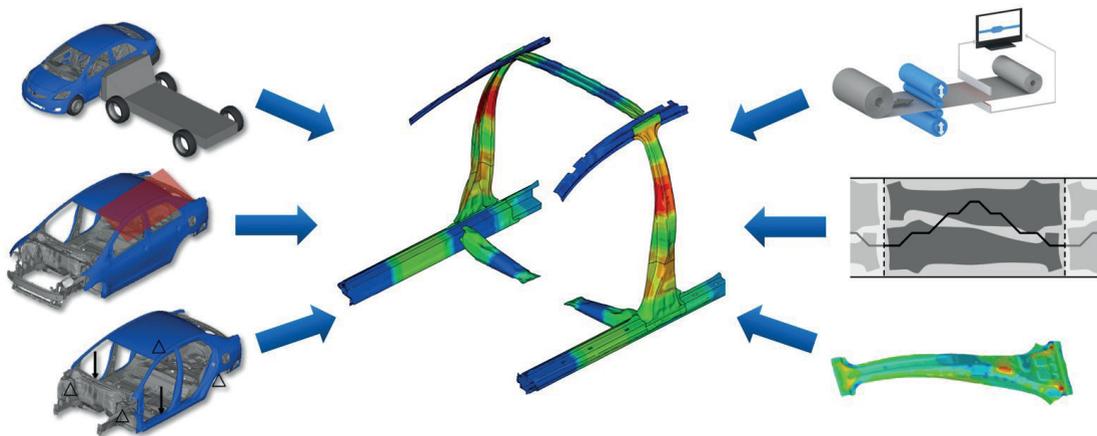


Strategien zur Optimierung von flexibel gewalzten Bauteilen in Karosseriestrukturen

Niklas Klinke





Strategien zur Optimierung von flexibel gewalzten Bauteilen in Karosseriestrukturen

Dissertation zur Erlangung eines Doktorgrades

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
der
Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von
Niklas Klinke
aus Freudenberg

Wuppertal 2020

Tag der mündlichen Prüfung: 17.12.2020

Berichte aus dem Maschinenbau

Niklas Klinke

**Strategien zur Optimierung von flexibel gewalzten
Bauteilen in Karosseriestrukturen**

Shaker Verlag
Düren 2021

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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7936-4

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

Niklas Klink

Strategien zur Optimierung von flexibel gewalzten Bauteilen in Karosseriestrukturen

Dissertation, Bergische Universität Wuppertal,

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik,

Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen, Juni 2020

Kurzfassung

Blechbauteile moderner Fahrzeugkarosserien sind aufgrund von komplexen Anforderungen und beschränkten Bauräumen selten vollständig beansprucht. Durch das flexible Walzen ist es möglich das Blechband, vor der Herstellung des Bauteils, an die Belastung anzupassen und so in Bereichen niedriger Beanspruchung das Gewicht zu reduzieren. Die Herstellung flexibel gewalzter Bauteile unterliegt jedoch technologischen Randbedingungen und ökonomischen Besonderheiten. Durch die gesteigerte Anzahl an Freiheitsgraden und die Zusammenhänge zwischen Funktion, Kosten und Herstellbarkeit ist die Entwicklung flexibel gewalzter Bauteile zeit- und damit kostenintensiv.

In dieser Dissertation werden Strategien zur Optimierung von flexibel gewalzten Bauteilen in Karosseriestrukturen vorgestellt, die es ermöglichen Funktion, Kosten und Herstellbarkeit in einen multidisziplinären Optimierungsprozess zu integrieren. Der zugrundeliegende Berechnungsablauf erlaubt die Bewertung der Herstellbarkeit, sowie die Berücksichtigung der Einflüsse aus der Herstellung in der Funktionsbewertung. Die ökonomischen Besonderheiten werden durch Kostenmodelle abgebildet.

Die Integrität der Fahrgastzelle ist auch bei einem Unfall aufrecht zu erhalten. Daher müssen Crashlastfälle bei der Auslegung von Karosseriebauteilen bewertet werden, deren Berechnung jedoch zeitaufwändig und somit bestimmend für die Dauer der Optimierung ist. Die Formulierung der Blechdickenfreiheitsgrade bzw. die Parametrisierung des Blechdickenverlaufs hat dabei einen großen Einfluss auf die benötigte Anzahl an Berechnungen. Durch eine geschickte Parametrisierung ist die effiziente Bearbeitung der Optimierungsaufgabe möglich. Es wird gezeigt, dass durch die Berücksichtigung von Kostenmodellen in der Optimierung kostengünstige und leichte flexibel gewalzte Bauteile entworfen werden können.

Basierend auf dem Optimierungsablauf wird abschließend eine Strategie erarbeitet, die aus einer großen Anzahl an Bauteilen diejenigen herausfiltert, deren Ausführung aus flexibel gewalztem Material wirtschaftlichen Leichtbau garantiert.

Stichworte: Flexibel gewalzte Bauteile, Parametrisierung des Blechdickenverlaufs, Multidisziplinäre Optimierung, Wirtschaftliche Bauteilauswahl

Niklas Klinke

Optimization strategies for Tailor Rolled Parts in car bodies

PhD thesis, University of Wuppertal, School of Mechanical Engineering and Safety Engineering, Chair for Optimization of Mechanical Structures, Juni 2020

Abstract

Design space restrictions and complex requirements of modern car body structures lead to sheet metal parts, which are rarely fully stressed. The use of flexible rolled material enables light weighting by decreasing the sheet thickness in areas, which are less loaded. The production of such material is characterized by technological constraints and economical specifics. Because of the increased design freedom as well as the complex relationship between function, cost and manufacturability the design of tailor rolled parts is time demanding and thus cost intensive.

This thesis presents strategies for the design and optimization of flexible rolled parts that make it possible to incorporate function, cost and manufacturability assessment into a multidisciplinary optimization process. The underlying calculation procedure allows the formability evaluation based on a technology specific finite-element-modelling and enables to carry over the influences of the forming process to the functional evaluation. A cost model is presented, which respects the economic specifics of the tailored rolling process chain.

The integrity of the passenger cabin must be guaranteed in the case of an accident, which is why crash load cases have to be taken into account in the design phase. Since their calculation is time consuming, they determine the turnaround time of the optimization. The formulation of the degrees of freedom or rather the parametrization of the thickness run has significant influence on the number of calculations needed. A clever parametrization enables an efficient optimization, respecting the technological constraints as well.

Based on the optimization scheme a strategy is developed, which enables the selection of those parts, whose production from tailor rolled material guarantees cost-efficient light weighting.

Keywords: Tailor Rolled Products, thickness run parametrization, multidisciplinary optimization, economic part selection

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Berechnungsingenieur bei der Mubea Tailor Rolled Blanks GmbH in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen der Bergischen Universität Wuppertal. An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen Freunden und Kollegen bedanken, die mich in dieser Zeit unterstützt und diese Arbeit ermöglicht haben.

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Axel Schumacher danke ich für die hervorragende Betreuung; Danke für deine fachliche Unterstützung, dein Vertrauen, und nicht zuletzt deine Geduld. Prof. Dr. rer. nat. habil. Kobelev danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und seine wertvollen stilistischen und inhaltlichen Verbesserungsvorschläge.

Danken möchte ich zudem der Mubea Tailor Rolled Blanks GmbH für die großzügige Bereitstellung der benötigten Ressourcen. Insbesondere möchte ich mich bei Björn Scholemann für die fachliche Betreuung bedanken: Ohne unsere zahlreichen Diskussionen und deine stetige Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Danke.

Überdies möchte ich allen Mubea Kollegen danken, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben. Besonderer Dank gebührt Frederik Schewe, der mit seinen inhaltlichen Anmerkungen zur Reifung der Dissertation beigetragen hat. Des Weiteren danke ich Kevin Koch, Florian Theile, Alexander Maiwald, Marc Rubarth, Marius Wigger, Robin Klement und Michael Gawlik für Ihre Unterstützung in Form von Projekt-, Bachelor- und Masterarbeiten.

Bei allen Kollegen aus der Doktorandenrunde möchte ich mich für die fruchtbaren Diskussionen und Anmerkungen, sowie die schönen gemeinsamen Stunden bedanken. Insbesondere danke ich Constantin Diez, Robert Dienemann, Manuel Ramsaier und Sebastian Werner für ihre fachlichen Anregungen.

Besonderer Dank gebührt meinem langjährigen Freund Christian Merten für die Korrektur meiner sprachlichen Ungenauigkeiten: Danke für deine humorvollen Notizen.

Für die vielseitige Unterstützung während meiner Schul- und Studienzeit danke ich meinen Eltern und meiner Familie herzlichst. Ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Jessica: Ohne deine Geduld, dein Verständnis und deine Unterstützung hätte ich diese Arbeit nicht schreiben können.

Wuppertal im Juni 2020

Niklas Klinke

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	2
2 Zusammenstellung von Grundlagen	7
2.1 Leichtbau im Karosseriebau	9
2.1.1 Maßgeschneiderte Bleche - Tailored Blanks	9
2.2 Flexibel gewalzte Bleche - Tailor Rolled Blanks	11
2.2.1 Die Technologie des flexiblen Walzens	11
2.2.2 Gestaltungsrandbedingungen des Blechdickenverlaufs	13
2.2.3 Aktuell großserienfähige flexibel gewalzte Stahlgüten	14
2.2.4 Herstellung flexibel gewalzter kaltumgeformter Produkte	15
2.2.5 Herstellung flexibel gewalzter warmumgeformter Produkte	17
2.3 Finite-Elemente-Analyse	18
2.3.1 Linear-statische Analyse	19
2.3.2 Nichtlinear-statische Analyse	19
2.3.3 Nichtlinear-dynamische Analyse	19
2.4 Auslegung von Blechbauteilen in Karosseriestrukturen	23
2.4.1 Modellierung von Karosseriestrukturen zur rechnerischen Bewertung	23
2.4.2 Bewertung des Strukturverhaltens der Karosserie	25
2.4.3 Bewertung der Herstellbarkeit einzelner Bauteile	27
2.4.4 Kostenkalkulation von Blechbauteilen	30
2.5 Grundlagen der Strukturoptimierung	32
2.5.1 Problemstellung und Begriffsdefinition	32
2.5.2 Klassifikation von Strukturoptimierungsproblemen	34
2.5.3 Mathematische Optimierungsalgorithmen	35
2.5.4 Verfahren zur Strukturoptimierung von Blechbauteilen	43
2.6 Begründung des Forschungsbedarfs	47
3 Besonderheiten bei der Auslegung flexibel gewalzter Strukturen	51
3.1 Konkretisierung der Modellierungen von flexibel gewalzten Bauteilen	51
3.1.1 Modellierung des Blechdickenverlaufs	52
3.1.2 Modellierung des Materialverhaltens	55

3.2	Herstellbarkeitsbewertung flexibel gewalzter Blechbauteile	58
3.2.1	Inverse Umformsimulation von Kaltformbauteilen	58
3.2.2	Inverse Umformsimulation von Warmformbauteilen	59
3.2.3	Bewertung der Herstellbarkeit	60
3.3	Bewertung der Wirtschaftlichkeit flexibel gewalzter Blechbauteile	62
3.3.1	Verschachtelungsanalyse	63
3.3.2	Zuschlagskalkulation für Blechteile konstanter Wandstärke	66
3.3.3	Kostenstruktur flexibel gewalzter Bauteile	72
4	Strukturoptimierung von flexibel gewalzten Bauteilen	79
4.1	Möglichkeiten zur Parametrisierung der Blechdickenverlaufsfunktion	81
4.1.1	Parametrisierung auf Basis von Bauteilsegmenten	81
4.1.2	Parametrisierung auf Basis der Blechdickenverlaufsfunktion	83
4.2	Vergleich von Parametrisierungen am Beispiel eines Aufprallträgers	87
4.2.1	Anwendungsbeispiel Aufprallträger - Analysemodell und Optimierungsaufgabenstellung	87
4.2.2	Größe des gültigen Entwurfsraums	89
4.2.3	Prognosegüte von Metamodellen	91
4.2.4	Direkte genetische Optimierung	92
4.2.5	Sequentielle metamodellbasierte Optimierung	94
4.2.6	Einfluss der Anzahl von Entwurfsvariablen	97
4.3	Sequentielle Auslegung von TRB-Anwendungen	101
4.3.1	Algorithmus zur Interpretation von walzbaren Blechdicken- verläufen	101
4.3.2	Sequentielle Auslegungsstrategie bei der Optimierung unter Berücksichtigung linear-statischer Lastfälle	103
4.3.3	Sequentielle Auslegungsstrategie bei der Optimierung unter Berücksichtigung von Crashlastfällen	103
4.3.4	Sequentielle Auslegung am Beispiel des Aufprallträgers	106
4.3.5	Anwendungsbeispiel Toyota Yaris Längsträger - Analyse- modell und Optimierungsaufgabenstellung	110
4.3.6	Sequentielle Auslegung am Beispiel des Toyota Yaris Längsträgers	113
4.3.7	Sinnhaftigkeit der sequentiellen Auslegung unter Berück- sichtigung von Crashlastfällen	116
5	Multidisziplinäre Optimierung flexibel gewalzter Bauteile	117
5.1	Methodik zur multidisziplinären Optimierung	118
5.1.1	Optimierungsablauf	118

5.1.2	Berechnungsablauf	120
5.2	Multidisziplinäre Optimierung des Aufprallträgers	123
5.2.1	Entwurfsvariablen	123
5.2.2	Sampling und Modelltraining	125
5.2.3	Mehrzieloptimierung	126
5.3	Multidisziplinäre Optimierung des Toyota Yaris Längsträgers	132
5.3.1	Analysemodell: Strukturbewertung und Modellanpassung	132
5.3.2	Entwurfsvariablen, Sampling und Modelltraining	134
5.3.3	Mehrzieloptimierung	136
5.4	Multidisziplinäre Optimierung der Toyota Yaris B-Säule	140
5.4.1	Analysemodell und Modellanpassung	140
5.4.2	Strukturoptimierung des angepassten Modells	147
5.4.3	Optimierung einer flexibel gewalzten B-Säule	148
6	Systematische Auswahl flexibel gewalzter Bauteile	155
6.1	A Priori Auswahl auf Basis von Bauteileigenschaften	157
6.2	A Priori Auswahl auf Basis der Beanspruchungsinhomogenität	159
6.3	Auswahl auf Basis des Funktions-Optimierungsergebnisses	162
6.3.1	Parametrisierung und Modelltraining	163
6.3.2	Strukturoptimierung	165
6.4	Auswahl auf Basis kombinatorischer multidisziplinärer Optimierung	167
7	Zusammenfassung und Ausblick	175
	Literaturverzeichnis	181

Anhang

A Entwurfsräume unterschiedlicher Parametrisierungen 190