

# TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fachgebiet für Computational Mechanics

## **Physikalisch begründete Ersatzmodelle für die Crashoptimierung von Karosseriestrukturen in frühen Projektphasen**

Karlheinz Holger Volz

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-U. Bletzinger

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. F. Duddeck

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Baier

Die Dissertation wurde am 10.03.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 12.07.2011 angenommen.



Schriftenreihe des Fachgebiets für Computational Mechanics

Band 1

**Karlheinz Holger Volz**

**Physikalisch begründete Ersatzmodelle für die  
Crashoptimierung von Karosseriestrukturen  
in frühen Projektphasen**

Shaker Verlag  
Aachen 2011

**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.: München, Techn. Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0445-8

ISSN 2193-2700

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Berechnungsingenieur am Forschungs- und Innovationszentrum der BMW AG.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Fabian Duddeck, dem Fachgebietsinhaber für Computational Mechanics der Technischen Universität München. Seine wertvollen Anregungen und seine wohlwollende Unterstützung haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Professor Dr.-Ing. Horst Baier, dem Leiter des Institutes für Leichtbau der Technischen Universität München, danke ich für die eingehende Durchsicht dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferates.

Weiterhin gilt mein besonderer Dank Herrn Dr.-Ing. Ferdinand Dirschmid und der BMW AG für die hervorragenden Rahmenbedingungen zur Durchführung dieser Arbeit. Ohne die Bereitstellung der erforderlichen Rechenkapazitäten und dem stetigen Interesse an der Implementierung einer Optimierungsmethodik für die frühe Phase der Produktentwicklung wäre diese Arbeit nicht durchzuführen gewesen. Dieses positive Arbeitsumfeld und die Unterstützung meiner Kollegen waren zu jedem Zeitpunkt der Arbeit sehr hilfreich. In diesem Zusammenhang danke ich insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Gerhard Bretz. Durch unzählige fachliche Diskussionen auf dem Gebiet der Frontcrashauslegung hat er dazu beigetragen, dass alle wesentlichen Facetten dieses Themenkomplexes beleuchtet wurden. Herrn Dipl.-Ing. Ingo Lauer danke ich für meine umfangreiche Einarbeitung in SFE CONCEPT. Seine Modellierungshinweise haben entscheidend dazu beigetragen, ein robustes Karosseriemodell für die Vorderwagenoptimierung zu generieren.

Meiner Familie danke ich für ihr Verständnis und ihre Geduld während der Entstehung dieser Arbeit. Insbesondere gilt mein Dank meiner Ehefrau Tanja, die mich auch in anstrengenden Zeiten stets unterstützt und mich auf andere Gedanken gebracht hat.

Inning am Ammersee, im Juli 2011

Karlheinz Volz



## **Kurzfassung**

Vor dem Hintergrund kontinuierlich schneller ablaufender Entwicklungszyklen steigt die Bedeutung von virtuellen Methoden in der Produktentwicklung stetig an. In der Karosserieentwicklung haben in diesem Zusammenhang parameterbasierte Optimierungsverfahren in den vergangenen Jahren einen immer größeren Beitrag geleistet, die funktionalen Anforderungen zu erfüllen. Fokus dieser Methoden war die Serienentwicklung. In der frühen Phase der Karosserieentwicklung kommen bislang dagegen kaum Optimierungsverfahren zum Einsatz. In dieser Dissertation wird deshalb eine zweistufige Optimierungsmethode vorgestellt, welche zum einen eine Topologieoptimierung und zum anderen eine parameterbasierte Formoptimierung von Karosserien unter Crashbelastungen für die frühe Phase ermöglicht.

## **Abstract**

The product developing process in the automotive industry is determined by a permanent shortening of the innovation cycles. To cope with this, automatic optimization methods are more and more integrated in this process. State-of-the-art in the field of car body development is the optimization of sheet metal gauges to reduce the mass of the body-in-white. This method is mainly used at the end of the developing process. In the early stage, efficient methods adapted to the particular characteristics of the early phases are still missing. To close this gap, two methods are presented in this thesis for the optimization of the crashworthiness. The first, a linear topology method, is used to detect the principle structure of car bodies. The second, a non-linear, parameter-based shape optimization, enables an optimization of a complete body-in-white and refines the first approach.





# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                           |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                                                         | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivation . . . . .                                                                      | 1         |
| 1.2      | Zielsetzung . . . . .                                                                     | 3         |
| 1.3      | Aufbau der Arbeit . . . . .                                                               | 5         |
| <b>2</b> | <b>Passive Sicherheit</b>                                                                 | <b>9</b>  |
| 2.1      | Klassifizierung der Fahrzeugsicherheit . . . . .                                          | 10        |
| 2.2      | Statistische Betrachtung von Unfällen . . . . .                                           | 12        |
| 2.3      | Kollisionsmechanik von Personenkraftwagen . . . . .                                       | 14        |
| 2.4      | Struktureller Aufbau von Karosserien . . . . .                                            | 18        |
| 2.4.1    | Nichttragende Karosserie . . . . .                                                        | 18        |
| 2.4.2    | Selbsttragende Karosserien . . . . .                                                      | 19        |
| 2.4.2.1  | Blech-Schalen-Bauweise . . . . .                                                          | 19        |
| 2.4.2.2  | Space-Frame-Bauweise . . . . .                                                            | 21        |
| 2.4.3    | Sonderbauformen . . . . .                                                                 | 23        |
| 2.4.3.1  | Monocoque . . . . .                                                                       | 23        |
| 2.4.3.2  | Holz-Skelett-Bauweise . . . . .                                                           | 23        |
| 2.5      | Strukturen für die Energieabsorption . . . . .                                            | 24        |
| 2.5.1    | Kennwerte zur Beurteilung des Energieabsorptionsvermögens . . . . .                       | 25        |
| 2.5.1.1  | Traglast . . . . .                                                                        | 25        |
| 2.5.1.2  | Absorbierte Energie und mittlere Deformationskraft . . . . .                              | 27        |
| 2.5.1.3  | Schwankungsbreite und Beullast . . . . .                                                  | 27        |
| 2.5.1.4  | Energieausbeute und geometrischer Wirkungsgrad . . . . .                                  | 29        |
| 2.5.2    | Verformungsmechanismen von Längsträgern . . . . .                                         | 30        |
| 2.5.2.1  | Faltenbeulen . . . . .                                                                    | 32        |
| 2.5.2.2  | Biegekollaps . . . . .                                                                    | 36        |
| 2.6      | Gesamtheitliche Betrachtung der Deformationseigenschaften von Längs-<br>trägern . . . . . | 37        |
| <b>3</b> | <b>Optimierung mechanischer Strukturen</b>                                                | <b>39</b> |
| 3.1      | Mathematische Grundlagen der Optimierung . . . . .                                        | 39        |
| 3.1.1    | Formulierung der Optimierungsaufgabe . . . . .                                            | 39        |
| 3.1.2    | Optimalitätsbegriffe: Globales und lokales Minimum - Konvexität . . . . .                 | 40        |
| 3.1.3    | Lagrangefunktion und Kuhn-Tucker-Bedingung . . . . .                                      | 41        |
| 3.2      | Optimierungsverfahren . . . . .                                                           | 42        |
| 3.2.1    | Gradientenverfahren - Methode des steilsten Abstiegs . . . . .                            | 42        |

|          |                                                                                                |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.2    | Approximationsverfahren - Response-Surface-Methode . . . . .                                   | 43        |
| 3.2.2.1  | Wahl des Approximationsansatzes . . . . .                                                      | 43        |
| 3.2.2.2  | Definition der Stützstellen . . . . .                                                          | 44        |
| 3.2.2.3  | Anpassung der Approximationsfunktion . . . . .                                                 | 45        |
| 3.2.2.4  | Anwendungsgebiete der Response-Surface-Methode im<br>Bereich der Karosserieauslegung . . . . . | 46        |
| 3.2.3    | Stochastische Suchverfahren . . . . .                                                          | 46        |
| 3.2.3.1  | Genetische Algorithmen (GA) . . . . .                                                          | 48        |
| 3.2.3.2  | Evolutionsstrategie (ES) . . . . .                                                             | 53        |
| 3.3      | Klassifizierung von Strukturoptimierungsaufgaben . . . . .                                     | 57        |
| 3.4      | Topologieoptimierung . . . . .                                                                 | 59        |
| 3.4.1    | Definition der Optimierungsaufgabe . . . . .                                                   | 59        |
| 3.4.1.1  | Zielfunktion . . . . .                                                                         | 59        |
| 3.4.1.2  | Designvariablen . . . . .                                                                      | 59        |
| 3.4.1.3  | Gewichtsrestriktion . . . . .                                                                  | 61        |
| 3.4.1.4  | Optimierungsaufgabe . . . . .                                                                  | 61        |
| 3.4.1.5  | Lagrangefunktion . . . . .                                                                     | 61        |
| 3.4.1.6  | Gradient der Zielfunktion . . . . .                                                            | 62        |
| 3.4.1.7  | Gradienten der Restriktionsfunktionen . . . . .                                                | 63        |
| 3.4.1.8  | Lagrangemultiplikatoren und Suchrichtungen . . . . .                                           | 63        |
| 3.5      | Parameteroptimierung . . . . .                                                                 | 64        |
| <b>4</b> | <b>Optimierungsverfahren in der frühen Phase der Karosserieentwicklung</b>                     | <b>67</b> |
| 4.1      | Produktentstehungsprozess im Kraftfahrzeugbau . . . . .                                        | 67        |
| 4.1.1    | Initialphase . . . . .                                                                         | 68        |
| 4.1.2    | Konzeptphase . . . . .                                                                         | 70        |
| 4.2      | Parameterfreie Topologieoptimierung . . . . .                                                  | 73        |
| 4.2.1    | Modellbildung . . . . .                                                                        | 73        |
| 4.2.1.1  | Stand der Forschung und Technik . . . . .                                                      | 73        |
| 4.2.1.2  | Definition des Designraumes und der Optimierungskriterien                                      | 74        |
| 4.2.1.3  | Lagerung des Fahrzeuges und Definition von Crasher-<br>satzlastfällen . . . . .                | 77        |
| 4.2.2    | Topologieoptimierung einer Heckstruktur . . . . .                                              | 80        |
| 4.2.2.1  | Heckcrash nach FMVSS 301 . . . . .                                                             | 80        |
| 4.2.2.2  | Identifikation der Kontaktpaarungen . . . . .                                                  | 80        |
| 4.2.2.3  | Energiebilanzabschätzung . . . . .                                                             | 82        |
| 4.2.2.4  | Modellierung der Lasteinleitung . . . . .                                                      | 94        |
| 4.2.2.5  | Definition des Designraumes und der Optimierungskriterien                                      | 95        |
| 4.2.2.6  | Ergebnis der Topologieoptimierung und Ableitung eines<br>Karosseriekonzeptes . . . . .         | 96        |
| 4.2.2.7  | Beurteilung des neuen Karosseriekonzeptes . . . . .                                            | 98        |
| 4.3      | Validierung der Topologieoptimierung mit linearem FE-Solver . . . . .                          | 100       |
| 4.3.1    | Topologieoptimierung . . . . .                                                                 | 100       |
| 4.3.2    | Parameteroptimierung . . . . .                                                                 | 102       |
| 4.3.2.1  | Optimierungsschleife . . . . .                                                                 | 102       |

|          |                                                                                                         |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.2.2  | Simulationsmodell und Optimierungsgrößen . . . . .                                                      | 105        |
| 4.3.3    | Ergebnisdiskussion . . . . .                                                                            | 108        |
| 4.4      | Formoptimierung eines Motorträgers . . . . .                                                            | 109        |
| 4.4.1    | Definition der Optimierungsziele und -randbedingungen . . . . .                                         | 110        |
| 4.4.2    | Definition des Profilquerschnitts und der Designvariablen . . . . .                                     | 111        |
| 4.4.3    | Ergebnisdiskussion . . . . .                                                                            | 115        |
| <b>5</b> | <b>Umsetzung der Optimierungsmethode im Fahrzeugprojekt</b>                                             | <b>119</b> |
| 5.1      | Definition der Optimierungsaufgabe . . . . .                                                            | 119        |
| 5.1.1    | Auslegungslastfall . . . . .                                                                            | 120        |
| 5.1.2    | Randbedingungen . . . . .                                                                               | 121        |
| 5.2      | Parameterfreie Topologieoptimierung . . . . .                                                           | 122        |
| 5.2.1    | Definition und Diskretisierung des Optimierungsgebietes . . . . .                                       | 123        |
| 5.2.2    | Definition der linearen Ersatzlastfälle . . . . .                                                       | 124        |
| 5.2.2.1  | Einfluss des Antriebsstranges bei einem Frontalunfall . . . . .                                         | 124        |
| 5.2.2.2  | Phasen eines frontalen EuroNCAP Versuchs . . . . .                                                      | 127        |
| 5.2.2.3  | Kraftangriffszonen . . . . .                                                                            | 131        |
| 5.2.2.4  | Energiebilanz . . . . .                                                                                 | 135        |
| 5.2.3    | Definition der Optimierungskriterien . . . . .                                                          | 143        |
| 5.2.4    | Ergebnis der Topologieoptimierung . . . . .                                                             | 143        |
| 5.3      | Parameterbasierte Formoptimierung . . . . .                                                             | 148        |
| 5.3.1    | Deformationseigenschaften der Konzeptvariante . . . . .                                                 | 149        |
| 5.3.2    | Definition der Optimierungskriterien . . . . .                                                          | 151        |
| 5.3.3    | Definition der Designvariablen . . . . .                                                                | 151        |
| 5.3.4    | Ergebnis der Optimierung . . . . .                                                                      | 154        |
| 5.3.4.1  | Funktionale Eigenschaften . . . . .                                                                     | 154        |
| 5.3.4.2  | Trägerverläufe . . . . .                                                                                | 157        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                                                     | <b>161</b> |
| 6.1      | Zusammenfassung . . . . .                                                                               | 161        |
| 6.2      | Ausblick . . . . .                                                                                      | 162        |
| <b>A</b> | <b>Anhang</b>                                                                                           | <b>165</b> |
| A.1      | Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen . . . . .                                                     | 165        |
| A.2      | Abkürzungsverzeichnis und Begriffsdefinition . . . . .                                                  | 170        |
| A.3      | Strukturelemente der Karosserie . . . . .                                                               | 173        |
| A.4      | Begriffsdefinition - Evolutionäre Algorithmen . . . . .                                                 | 175        |
| A.5      | Energiebilanzabschätzung für Kapitel 4.2.2.3 . . . . .                                                  | 176        |
| A.6      | Vergleich der Deformationskräfte . . . . .                                                              | 177        |
| A.7      | Kriterien zur Beurteilung der Qualität von FE-Netzen . . . . .                                          | 179        |
| A.8      | Herleitung der reduzierten Barrierengeschwindigkeit . . . . .                                           | 180        |
| A.9      | Einfluss der räumlichen Lage der Lastangriffspunkte auf das Ergebnis der Topologieoptimierung . . . . . | 182        |
| A.10     | Designvariablen der Formoptimierung aus Kapitel 5 . . . . .                                             | 183        |
| A.10.1   | Formvariablen der Klasse I . . . . .                                                                    | 183        |

|                                              |            |
|----------------------------------------------|------------|
| A.10.2 Formvariablen der Klasse II . . . . . | 183        |
| <b>Literaturverzeichnis</b>                  | <b>193</b> |