

AutoUni – Schriftenreihe

AutoUni 

Philipp Wellkamp

Prognosegüte von Crashberechnungen

Experimentelle und
numerische Untersuchungen
an Karosseriestrukturen

AutoUni – Schriftenreihe

Band 133

Reihe herausgegeben von/Edited by
Volkswagen Aktiengesellschaft
AutoUni

Die Volkswagen AutoUni bietet Wissenschaftlern und Promovierenden des Volkswagen Konzerns die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form von Monographien und Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die AutoUni ist eine international tätige wissenschaftliche Einrichtung des Konzerns, die durch Forschung und Lehre aktuelles mobilitätsbezogenes Wissen auf Hochschulniveau erzeugt und vermittelt.

Die neun Institute der AutoUni decken das Fachwissen der unterschiedlichen Geschäftsbereiche ab, welches für den Erfolg des Volkswagen Konzerns unabdingbar ist. Im Fokus steht dabei die Schaffung und Verankerung von neuem Wissen und die Förderung des Wissensaustausches. Zusätzlich zu der fachlichen Weiterbildung und Vertiefung von Kompetenzen der Konzernangehörigen fördert und unterstützt die AutoUni als Partner die Doktorandinnen und Doktoranden von Volkswagen auf ihrem Weg zu einer erfolgreichen Promotion durch vielfältige Angebote – die Veröffentlichung der Dissertationen ist eines davon. Über die Veröffentlichung in der AutoUni Schriftenreihe werden die Resultate nicht nur für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

The Volkswagen AutoUni offers scientists and PhD students of the Volkswagen Group the opportunity to publish their scientific results as monographs or doctor's theses within the "AutoUni Schriftenreihe" free of cost. The AutoUni is an international scientific educational institution of the Volkswagen Group Academy, which produces and disseminates current mobility-related knowledge through its research and tailor-made further education courses. The AutoUni's nine institutes cover the expertise of the different business units, which is indispensable for the success of the Volkswagen Group. The focus lies on the creation, anchorage and transfer of new knowledge.

In addition to the professional expert training and the development of specialized skills and knowledge of the Volkswagen Group members, the AutoUni supports and accompanies the PhD students on their way to successful graduation through a variety of offerings. The publication of the doctor's theses is one of such offers. The publication within the AutoUni Schriftenreihe makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

Reihe herausgegeben von/Edited by

Volkswagen Aktiengesellschaft

AutoUni

Brieffach 1231

D-38436 Wolfsburg

<http://www.autouni.de>

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15136>

Philipp Wellkamp

Prognosegüte von Crashberechnungen

Experimentelle und
numerische Untersuchungen
an Karosseriestrukturen

 Springer

Philipp Wellkamp
AutoUni
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr
Hamburg, 2018

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe
veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

AutoUni – Schriftenreihe
ISBN 978-3-658-24150-6 ISBN 978-3-658-24151-3 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-24151-3>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen National-
bibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Abteilung Berechnung Methoden der Volkswagen AG in Wolfsburg. An dieser Stelle möchte ich meinen besonderen Dank nachstehenden Personen entgegenbringen, ohne deren Mithilfe die Anfertigung dieser Arbeit niemals zustande gekommen wäre.

Mein ganz besonderer Dank gebührt meinem Doktorvater Prof. Dr. Martin Meywerk von der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg für die wissenschaftliche Betreuung, die eingeräumten Freiräume und die konstruktive Kritik. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Matthias Kröger von der Technischen Universität Bergakademie Freiberg für die Übernahme des Koreferates.

Ganz außerordentlicher Dank gilt den betreuenden Personen der Fachabteilung Berechnung Methoden für ihre kritischen Betrachtungen, hilfreichen Anregungen und Durchsicht meiner Arbeit. Ferner danke ich meinen Vorgesetzten für die Bereitstellung der notwendigen Ressourcen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Des Weiteren möchte ich mich bei allen weiteren Mitarbeitern der Fachabteilung bedanken, die mir stets mit ihrem Wissen aus dem jeweiligen Fachgebiet zur Hilfe standen.

Philipp Wellkamp

Inhaltsverzeichnis

- Danksagung V
- Abbildungsverzeichnis IX
- Tabellenverzeichnis XIII
- Formel- und Abkürzungsverzeichnis XV
- Abstrakt XIX

- 1 Einleitung 1**
 - 1.1 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit 2
 - 1.2 Zur passiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen 4

- 2 Stand der Technik und theoretische Grundlagen 7**
 - 2.1 Simulationsabgleich von Stahlstrukturen 7
 - 2.2 Verifikation, Validierung und Ungewissheitsbetrachtungen 10
 - 2.3 Kontinuumsmechanische Grundlagen 14
 - 2.3.1 Kinematische Größen 14
 - 2.3.2 Kinetische Größen 17
 - 2.3.3 Bilanzgleichungen 18
 - 2.4 Grundlagen der nichtlinearen Finite-Elemente-Berechnung 20
 - 2.4.1 Elasto-Plastizität 21
 - 2.4.2 Kontaktalgorithmen 23
 - 2.4.3 Explizite Zeitintegration 25
 - 2.4.4 Elementtypen 27
 - 2.5 Die untersuchten Werkstoffe 28
 - 2.5.1 Werkstoffverhalten 28
 - 2.5.2 Deformationsprinzipien 29
 - 2.5.3 Effekte aus dem Umformverfahren 31
 - 2.6 Grundlagen zu den Abgleichmethoden 32
 - 2.6.1 Auswertung von synchronen Bildsequenzen 32
 - 2.6.2 Abgleichkriterien und Abstandsmaße 33

- 3 Quasi-statische Untersuchungen an Crashboxen 37**
 - 3.1 Untersuchungsgegenstand Crashbox 37
 - 3.2 Quasi-statische Druckversuche an Crashboxen 41
 - 3.2.1 Methodik 41
 - 3.2.2 Versuchsaufbau 42
 - 3.2.3 Versuchsergebnisse 42
 - 3.3 Simulationsabgleich der Crashbox für quasi-statische Lastfälle 45
 - 3.3.1 Simulationsergebnisse mit nominalen Eingangsgrößen 45
 - 3.3.2 Reduzierung epistemischer Ungewissheit 46

| | | |
|----------|---|-----|
| 4 | Dynamische Untersuchungen an Crashboxen | 59 |
| 4.1 | Dynamische Impaktversuche an Crashboxen | 59 |
| 4.1.1 | Versuchsaufbau | 59 |
| 4.1.2 | Versuchsergebnisse | 59 |
| 4.2 | Transfer auf dynamische Lastfälle | 61 |
| 4.2.1 | Lasteinfallswinkel 0 Grad | 62 |
| 4.2.2 | Lasteinleitungswinkel 10 Grad | 63 |
| 4.3 | Analyse des Deformationsvorgangs | 64 |
| 4.4 | Ergebniszusammenfassung der Crashbox-Untersuchungen | 65 |
| 5 | Untersuchungen an Längsträgersystemen | 69 |
| 5.1 | Untersuchungsgegenstand Längsträgersystem | 69 |
| 5.2 | Versuche | 72 |
| 5.2.1 | Versuchsaufbau und -varianten | 72 |
| 5.2.2 | Versuchsergebnisse | 73 |
| 5.2.3 | Analyse des Deformationsvorgangs | 77 |
| 5.2.4 | Messung der Trajektorien und Rollwagenkinematik | 79 |
| 5.3 | Ableichuntersuchungen | 81 |
| 5.3.1 | Voruntersuchungen | 81 |
| 5.3.2 | Berücksichtigung von Wissen aus Vermessungen | 91 |
| 5.3.3 | Variation von Modellparametern | 95 |
| 5.4 | Berechnung der Rückfederung | 99 |
| 5.5 | Transfer des Simulationsmodells auf die Versuchsvarianten | 101 |
| 5.5.1 | Versuchsvariante 2 | 101 |
| 5.5.2 | Versuchsvariante 3 | 103 |
| 5.6 | Ergebniszusammenfassung des Kapitels | 105 |
| 6 | Untersuchungen an Karosserien | 107 |
| 6.1 | Beschreibung des Struktursystems | 107 |
| 6.2 | Dynamische Versuche an Karosserien | 108 |
| 6.2.1 | Versuchsaufbau und Simulationsmodell | 109 |
| 6.2.2 | Versuchsergebnisse | 109 |
| 6.2.3 | Messung der Trajektorien und Rollwagenkinematik | 111 |
| 6.3 | Ableichuntersuchungen | 114 |
| 6.3.1 | Transfer des validierten Submodells | 115 |
| 6.3.2 | Parametrische Studien | 115 |
| 6.4 | Prognosegüte von Karosserieberechnungen bei Crashlastfällen | 119 |
| 6.4.1 | Vergleich von nominalem und modifiziertem Simulationsmodell | 119 |
| 6.4.2 | Transfer des Karosseriemodells auf den schnelleren Lastfall | 120 |
| 6.4.3 | Prognosegüte von Karosserieberechnungen | 121 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 125 |
| | Literatur | 127 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | FE-Modell eines Gesamtfahrzeugs (rot: Karosseriestruktur) | 1 |
| 1.2 | Simulationsmodell: Beispiel aus dem Jahr 1986 (links; aus: Haug et al. [1986]) und aus dem Jahr 2014 (rechts; PAMCRASH-Beispielmodell) | 2 |
| 1.3 | Methodik zum systematischen Versuchsabgleich von Crashberechnungen | 3 |
| 1.4 | Frontal- und Seitencrashtests (aus: Hübler [2001]) | 5 |
| 1.5 | Anteil Energieaufnahme des Vorderwagens | 6 |
| 2.1 | Vergleich der Kraftverläufe und Deformationsmodi zwischen Simulation und Versuch (aus: Eichmueller und Meywerk [2012b]) | 7 |
| 2.2 | Vereinfachte Form des Validierungsprozesses (aus: Sargent [2009], ins Deutsche übersetzt) | 11 |
| 2.3 | Ausgangs- und Momentankonfiguration eines materiellen Körpers mit kinematischen Zusammenhängen | 15 |
| 2.4 | Von-Mises-Fließfläche im Hauptspannungsraum | 21 |
| 2.5 | Von-Mises-Fließfläche und Verschiebung der Fließflächen bei kinematischer und isotroper Verfestigung | 22 |
| 2.6 | Spannungs-Dehnungs-Diagramme für elasto-plastisches Materialverhalten | 22 |
| 2.7 | Kontakte in der FEM | 24 |
| 2.8 | Penalty-Steifigkeit | 24 |
| 2.9 | Schematische Darstellung von typischen Deformationsmodi am Beispiel eines Vierkantrohrs. (a) Faltmodus, (b) Übergangsmodus, (c) Biegemodus | 29 |
| 2.10 | Schematische Darstellung von dynamischen, stabilen Deformationsmodi für dünnwandige Vierkantrohre. (a) Symmetrischer Deformationsmodus, (b) extensionaler Deformationsmodus und (c) gemischter Deformationsmodus | 30 |
| 2.11 | Zusammenhang zwischen Kraftverlauf und Deformationsverhalten | 31 |
| 2.12 | Unterschiede in den Umformeffekten durch Berechnung mit der Umformsimulation und mit dem Einschnittverfahren am Beispiel einer B-Säule | 32 |
| 2.13 | CORA-Bewertungsstruktur (aus Thunert [2012], nachbearbeitet) | 34 |
| 2.14 | Korridorermethode (aus Thunert [2012], nachbearbeitet) | 34 |
| 3.1 | Oben: Einzelteile der Crashbox; unten: Verschiedene Ansichten der Crashbox | 38 |
| 3.2 | Effekte aus dem Umformverfahren bei der Crashbox | 39 |
| 3.3 | Simulationsmodell | 41 |
| 3.4 | Ablaufplan zum systematischen Abgleich von Experiment und Simulation | 43 |
| 3.5 | Links: Schematischer Aufbau der Universalprüfmaschine; rechts: Versuchsstand der Universalprüfmaschine | 44 |
| 3.6 | Kraft-Weg-Verläufe der quasi-statischen Versuche. Links: <i>0-Grad-Versuche</i> ; rechts: <i>10-Grad-Versuche</i> | 44 |
| 3.7 | Übereinstimmung des nominalen Ausgangsmodells mit dem Versuch. Links: Kraftverläufe und rechts: Schnittdarstellungen der Enddeformationen | 46 |
| 3.8 | Gemessene Trajektorien | 47 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.9 | Spannungs-Dehnungs-Diagramme: Zugversuche (links); Wahre Spannungs-Dehnungskurve aus Versuch und Materialkarte (rechts) | 49 |
| 3.10 | Stempeltrajektorie | 50 |
| 3.11 | Materialeigenschaften | 50 |
| 3.12 | Geometrievermessung | 50 |
| 3.13 | Blechdickenvermessung | 50 |
| 3.14 | mit allen Vermessungsdaten | 50 |
| 3.15 | 10 Grad Lasteinleitung | 50 |
| 3.16 | Geometrieabweichung von Zeichnung zu Messung als Schnittdarstellungen | 51 |
| 3.17 | Geometrieabweichung von Zeichnung zu Messung als Konturdarstellung | 51 |
| 3.18 | Position des Querträgerstücks | 52 |
| 3.19 | Unterschiede in den Spannungsverläufen aufgrund geometrischer Abweichungen. Links: Modell mit Geometriedaten aus Vermessung (Modell Geo), rechts: Ausgangsmodell (Modell CAD) | 53 |
| 3.20 | Exemplarische Darstellung der Blechdickenvermessung des Außenblechs | 54 |
| 3.21 | Vergleich der Enddeformationen für den 0-Grad-Lastfall. Links: Bestes Modell mit Informationen aus Bauteilvermessungen, mitte: photogrammetrische Vermessung des Versuchskörpers und rechts: Nominales Modell | 57 |
| 3.22 | Vergleich der Enddeformationen für den 10-Grad-Lastfall; Links: Bestes Modell mit Informationen aus Bauteilvermessungen, mitte: photogrammetrische Vermessung des Versuchskörpers und rechts: Nominales Modell | 57 |
| 4.1 | Links: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus; rechts: Bild des Versuchsaufbaus | 59 |
| 4.2 | Kraft-Zeit-Verläufe der dynamischen Versuche. Links: <i>0-Grad-Versuche</i> ; rechts: <i>10-Grad-Versuche</i> | 60 |
| 4.3 | Kraftverläufe des dynamischen Lastfalls bei 0 Grad Lasteinleitung | 62 |
| 4.4 | Schnittdarstellungen der Crashboxen in der Enddeformation bei dem <i>0-Grad-Versuch</i> . Links: Ausgangsmodell und Versuch; rechts: Modell mit Vermessungsdaten und Versuch | 62 |
| 4.5 | Kraftverläufe des dynamischen Lastfalls bei 10 Grad Lasteinleitung | 64 |
| 4.6 | Schnittdarstellungen der Crashboxen in der Enddeformation bei dem <i>10-Grad-Versuch</i> . Links: Ausgangsmodell und Versuch; rechts: Modell mit Vermessungsdaten und Versuch | 64 |
| 4.7 | Analyse des dynamischen Deformationsvorgangs | 66 |
| 4.8 | Deformationsvorgang gemäß Simulation und Versuch | 67 |
| 5.1 | Verschiedene Ansichten des Längsträgersystems | 70 |
| 5.2 | Effekte aus dem Umformverfahren des Längsträgerprofils und des Deckblechs | 71 |
| 5.3 | FE-Modell des Rollwagens | 72 |
| 5.4 | Links: Simulationsmodell; rechts: Versuchsaufbau | 73 |
| 5.5 | Schematische Darstellung der Schottplattenpositionen. Links: Variante 1 Schottplattenpositionen ausgerichtet; Mitte: Variante 2 Schottplattenverschiebung der Crashboxen in YZ-Richtung +8 mm; rechts: Variante 3 Schottplattenverschiebung der Crashboxen in YZ-Richtung -8 mm | 75 |
| 5.6 | Versuchsvariante 1: Kraftverläufe des linken und rechten Längsträgers | 76 |
| 5.7 | Versuchsvariante 2: Kraftverläufe des linken und rechten Längsträgers | 76 |
| 5.8 | Versuchsvariante 3: Kraftverläufe des linken und rechten Längsträgers | 76 |
| 5.9 | Mittlere Kraftverläufe der drei Versuchsvarianten | 77 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.10 | Abweichungen zwischen den gemittelten Versuchskurven | 77 |
| 5.11 | Korrespondenz zwischen Deformation und Kraftverlauf | 78 |
| 5.12 | Gemessene translatorische Trajektorien der Versuchsvariante 1 | 80 |
| 5.13 | Gemessene rotatorische Trajektorien der Versuchsvariante 1 | 80 |
| 5.14 | Abgleich der Rollwagenkinematik zwischen Versuch und Simulation | 80 |
| 5.15 | Fahrzeugkoordinatensystem | 81 |
| 5.16 | Materialversagen im Längsträger | 82 |
| 5.17 | Kraft-Weg-Diagramm uniaxialer Zugversuch (links) und Kraft-Weg-Diagramm biaxialer Druckversuch (rechts) | 84 |
| 5.18 | Lokalisierung von Materialversagen mit <i>Thinning</i> -Versagen (links) und <i>HSR</i> -Versagen (rechts) | 84 |
| 5.19 | Kraftverläufe von Simulationen mit <i>HSR</i> - und <i>Thinning</i> -Versagen | 85 |
| 5.20 | Materialversagen mit adaptiver Neuvernetzung | 86 |
| 5.21 | Vergleich der Rissabbildung. Links: Vermessene Geometrie nach Versuch; rechts: Enddeformation der Simulation | 86 |
| 5.22 | Unterschied in der Faltenbildung aufgrund verschiedener Vernetzungen. Links: 2-mm-Schalenmodell; rechts: 6-mm-Schalenmodell | 88 |
| 5.25 | Korrelationsgrad in Abhängigkeit der Diskretisierung | 88 |
| 5.23 | Kraftverläufe mit unterschiedlichen Diskretisierungen der Geometrie | 89 |
| 5.24 | Enddeformationen der Längsträger mit unterschiedlichen Diskretisierungen der Geometrie | 89 |
| 5.26 | Kontaktdicke und Kontaktkraft | 90 |
| 5.27 | Selbstkontaktkräfte bei der 1-mm- und 2-mm-Schalen-Vernetzung | 90 |
| 5.28 | Elementeliminierung in Abhängigkeit der Diskretisierung | 91 |
| 5.29 | Berücksichtigung der gemessenen Rollwagen-Trajektorie | 92 |
| 5.30 | Geometrieabweichung zwischen Zeichnung und Messung der Längsträger als Schnittdarstellung | 93 |
| 5.31 | Geometrieabweichung zwischen Zeichnung und Messung der Längsträger als Konturdarstellung | 93 |
| 5.32 | 2 D-Konturdarstellung Übereinstimmungsgüte mit Versuch LT02 in Abhängigkeit der Blechdickenskalierungen. Links: Crashboxbleche und rechts: Längsträgerbleche | 96 |
| 5.33 | Faltenbildung der Crashbox rechts und Kraftverläufe mit unterschiedlichen Skalierungsfaktoren für das Außenblech | 97 |
| 5.34 | Punktewolke: Restlänge in Abhängigkeit der Außenblechdicke | 97 |
| 5.35 | Rückfederung des Längsträgersystems nach der Demontage. Links: Simulationsmodell; rechts: Geometrievermessung | 100 |
| 5.36 | Geometrieabweichung zwischen Simulation und Versuch im deformierten Zustand. Links: Beide Modelle positioniert; rechts: Konturdarstellung der Knotenabstände | 100 |
| 5.37 | Geometrieabweichungen zwischen Simulation und Versuch im deformierten Zustand aus der ersten Versuchsreihe. Links: Ausgangsmodell; rechts: Simulationsmodell mit Modifikationen | 102 |
| 5.38 | Geometrieabweichungen zwischen Simulation und Versuch im deformierten Zustand aus der zweiten Versuchsreihe. Links: Ausgangsmodell; rechts: Simulationsmodell mit Modifikationen | 102 |
| 5.39 | Geometrieabweichungen zwischen Simulation und Versuch im deformierten Zustand aus der dritten Versuchsreihe. Links: Ausgangsmodell; rechts: Simulationsmodell mit Modifikationen | 102 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.40 | Kraftverläufe des besten Simulationsmodells, des Ausgangsmodells und des Versuchs aus Versuchsvariante 1 | 104 |
| 5.41 | Kraftverläufe des besten Simulationsmodells, des Ausgangsmodells und des Versuchs aus Versuchsvariante 2 | 104 |
| 5.42 | Kraftverläufe des besten Simulationsmodells, des Ausgangsmodells und des Versuchs aus Versuchsvariante 3 | 104 |
| 5.43 | Ansicht Crashbox rechts unten. Unterschiedliche Faltenbildung in Versuch und Simulation | 105 |
| 6.1 | Verschiedene Ansichten der Karosserie | 108 |
| 6.2 | Ansicht Unterseite der Karosserie. Links: Lastpfad; rechts: Bereich der plastischen Verformung während des Versuchs | 108 |
| 6.3 | Versuchsaufbau der Karosserieversuche | 110 |
| 6.4 | Kraftverläufe der Versuchsvariante 1 mit $v = 7 \text{ m/s}$ | 112 |
| 6.5 | Kraftverläufe der Versuchsvariante 2 mit $v = 8,6 \text{ m/s}$ | 112 |
| 6.6 | Vermessene Geometrien der Frontstruktur im Zustand der Enddeformation. Links: Versuch RK05 (schnellerer Versuch); rechts: Versuch RK02 (langsamerer Versuch) | 112 |
| 6.7 | Gemessene translatorische Trajektorien der Versuchsvariante 1 | 113 |
| 6.8 | Gemessene rotatorische Trajektorien der Versuchsvariante 1 | 113 |
| 6.9 | Abgleich der Rollwagenbewegungen zwischen Versuch und Simulation | 114 |
| 6.10 | Kraftverläufe der Simulationen mit den validierten Submodellen für den Lastfall $v = 7 \text{ m/s}$ und Deformationsmodi der rechten Längsträger (Links: Modell nominal Geo, mitte: Vermessung des Versuchskörpers und rechts: Modell nominal CAD) | 116 |
| 6.11 | Kraftverläufe der Simulationen mit den validierten Submodellen für den Lastfall $v = 8,6 \text{ m/s}$ und Deformationsmodi der rechten Längsträger (Links: Modell nominal Geo, mitte: Vermessung des Versuchskörpers und rechts: Modell nominal CAD) | 116 |
| 6.12 | Kraftverläufe von zwei Berechnungen mit unterschiedlichen Parameterkonfigurationen der Längsträgerbleche im Vergleich zur Versuchskurve | 117 |
| 6.13 | Übereinstimmungsgüte als Funktion der Blechdickenskalierung des Längsträgers | 118 |
| 6.14 | Übereinstimmungsgüte als Funktion der Blechdickenskalierung der Crashbox | 118 |
| 6.15 | Übereinstimmungsgüte als Funktion der Blechdickenskalierung der Crashbox mit unterschiedlichen Skalierungsfaktoren für die Längsträgerbleche | 118 |
| 6.16 | Langsamerer Lastfall $v = 7 \text{ m/s}$. Oben: Vergleich der Kraftverläufe, mitte: Deformationsmodi und unten: Geometrieabweichungen nach dem Versuch | 122 |
| 6.17 | Schnellerer Lastfall $v = 8,6 \text{ m/s}$. Oben: Vergleich der Kraftverläufe, mitte: Deformationsmodi und unten: Geometrieabweichungen nach dem Versuch | 123 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| 3.1 Werkstoffe der Crashbox | 39 |
| 3.2 Ergebnisse der quasi-statischen <i>0-Grad-Versuche</i> | 45 |
| 3.3 Ergebnisse der quasi-statischen <i>10-Grad-Versuche</i> | 45 |
| 3.4 Charakteristische Größen der Kraftverläufe bis zum ersten Kraftabfall | 48 |
| 3.5 Ergebnistabelle Zugversuche | 49 |
| 3.6 Blechdickenmessungen | 55 |
| 4.1 Ergebnisse der dynamischen <i>0-Grad-Versuche</i> | 61 |
| 4.2 Ergebnisse der dynamischen <i>10-Grad-Versuche</i> | 61 |
| 4.3 Kurvenübereinstimmung und Differenzen der Restlängen im Vergleich zu dem Versuch | 63 |
| 5.1 Werkstoffe des Längsträgersystems | 70 |
| 5.2 Versuchsergebnisse Längsträgersystem | 74 |
| 5.3 Einfluss verschiedener Vernetzungen auf die Rechenzeit, die Restlänge und Übereinstimmung der Kraftverläufe mit den Versuchen | 88 |
| 5.4 Kombinationen der Geometrieberücksichtigung mit entsprechenden Übereinstimmungsgraden | 94 |
| 5.5 Optimierungsparameter | 98 |
| 5.6 Parameterkonfiguration der besten Simulation aus der Optimierung | 99 |
| 5.7 Übereinstimmungsgüte der Kraftverläufe sowie der geometrischen Abstandsmaße des modifizierten Modells und des nominalen Modells mit den Versuchen | 103 |
| 6.1 Ergebnisse aus den Karosserieversuchen | 110 |
| 6.2 Geometrische Abstandsmaße und Übereinstimmungsgüte der Kraftverläufe des nominalen und modifizierten Simulationsmodells für die untersuchten Lastfälle | 120 |

Häufige verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

Abkürzungen

| | |
|------|----------------------------|
| CAD | Computer-Aided-Design |
| CAE | Computer-Aided-Engineering |
| CB | Crashbox |
| CFC | Channel Frequency Class |
| DOE | Design of Experiments |
| FE | Finite Elemente |
| FEM | Finite-Elemente-Methode |
| HSR | Hill-Stören-Rice |
| LT | Längsträger |
| RK | Rohkarosserie |
| Sim. | Simulation |
| V&V | Validierung & Verifikation |
| UQ | Uncertainty Quantification |

Lateinische Notation

| | |
|--------------|--|
| A | Oberfläche eines Körpers in der Ausgangskonfiguration |
| A' | Oberfläche eines Körpers in der Momentankonfiguration |
| \mathbf{A} | Verzerrungstensor |
| A_g | Gleichmaßdehnung |
| A_{30} | Bruchdehnung |
| a_0 | Probendicke |
| a_1 | Berechnungsparameter innerer Korridor |
| a | Beschleunigung |
| \vec{a} | Beschleunigungsvektor |
| a_k | Komponente des Beschleunigungsvektors |
| b_0 | Probenbreite |
| b_1 | Berechnungsparameter äußerer Korridor |
| B | Breite |
| B_{Form} | Bewertung der Kurvenform |
| B_{Niveau} | Bewertung des Kurvenniveaus |
| B_{Phase} | Bewertung der Phasenverschiebung |
| c_{Schall} | Wellenausbreitungsgeschwindigkeit |
| C_1 | Bewertung aus dem Korridorverfahren |
| C_2 | Bewertung aus dem Kreuzkorrelationsverfahren |
| c_i | Korridorbewertung je Zeitschritt |
| D | Grenzwert <i>HSR</i> -Versagen |
| dA | Fläche eines Elements des Körpers in der Ausgangskonfiguration |

| | |
|--|--|
| \vec{dA} | Flächenvektor in der Ausgangskonfiguration |
| da | Fläche eines Elements des Körpers in der Momentankonfiguration |
| $d\vec{a}$ | Flächenvektor in der Momentankonfiguration |
| dS | äußere Oberflächenkräfte in der Ausgangskonfiguration |
| ds | äußere Oberflächenkräfte in der Momentankonfiguration |
| dF | äußere Körperkräfte |
| $d\vec{X}$ | materieller Tangentenvektor |
| $d\vec{x}$ | räumlicher Tangentenvektor |
| $\vec{e}_k, \{\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3\}$ | Basisvektoren im kartesischen Koordinatensystem |
| E | Elastizitätsmodul |
| E_{kin} | kinetische Energie |
| f | physikalische Größe in der Kontinuumsmechanik |
| F | Kraft |
| \mathbf{F} | Deformationsgradient |
| F_a | äußere Kraft |
| \vec{F}_a | resultierende äußere Kraft |
| F_B | Biegekraft |
| F_c | Federkraft |
| F_i | innere Kraft |
| F_{max} | maximale Kraft |
| F_{mittel} | mittlere Kraft |
| F_N | Normalkraft |
| F_S | Scherkraft |
| F_x | Kraft in X-Richtung |
| g | Penetration |
| g_G | Gewichtungsfaktor Kurvenniveau |
| g_V | Gewichtungsfaktor Kurvenform |
| g_P | Gewichtungsfaktor Phasenverschiebung |
| I_n | innere Kräfte |
| k | Federsteifigkeit |
| k_n | Kontaktsteifigkeit |
| k_G | Berechnungsparameter Kurvenniveau |
| k_V | Berechnungsparameter Kurvenform |
| K_{xy} | Kreukorrelationsfaktor |
| \vec{L} | Drehimpuls |
| l_e | charakteristische Elementkantenlänge |
| l_{Restl} | Restlänge |
| M | Masse eines materiellen Volumens |
| \vec{M}_a | Drehmoment |
| m | Masse |
| m_c | Verschiebungsfaktor |
| \vec{N} | Normalenvektor in der Ausgangskonfiguration |
| \vec{n} | Normalenvektor in der Momentankonfiguration |
| P | materielles Teilchen in der Ausgangskonfiguration |
| P' | materielles Teilchen in der Momentankonfiguration |
| \vec{p} | Impuls |
| Q | Wärmemenge |
| R | Streuband |