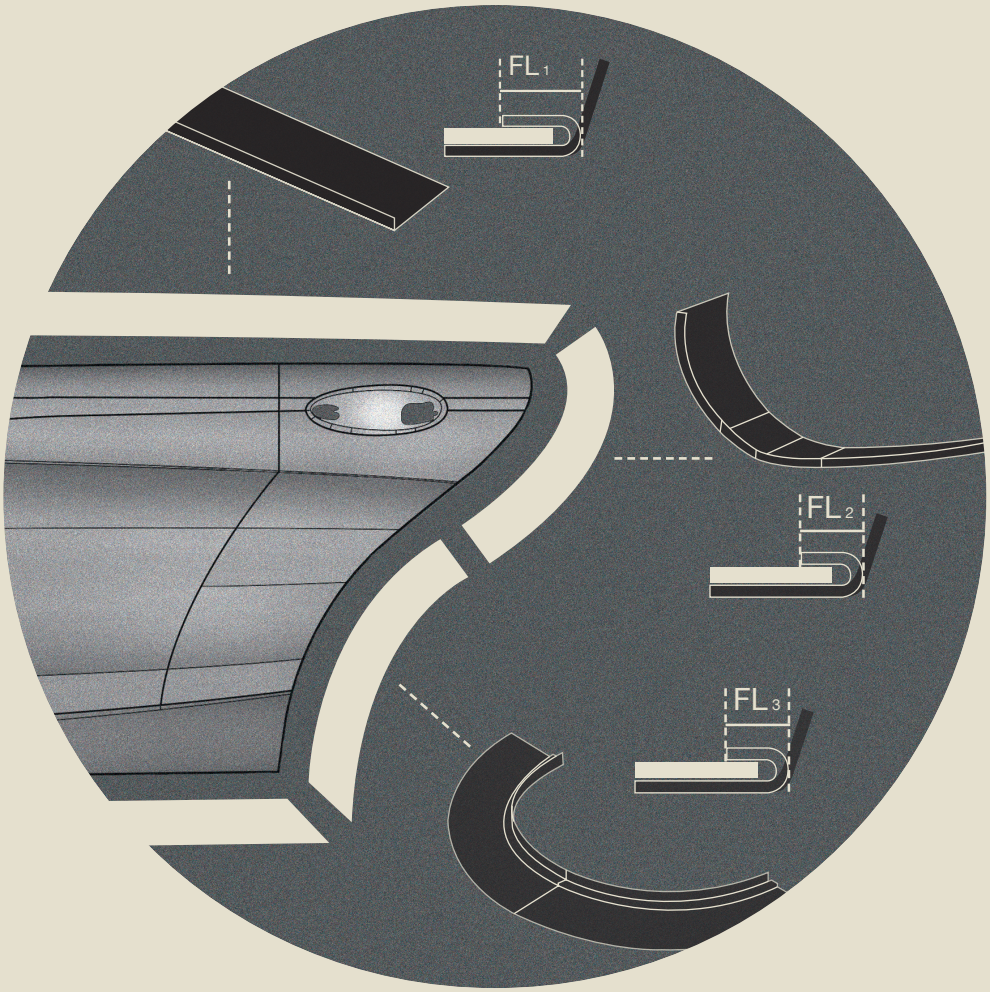
THESES



10

Maschinenbau
Lehrstuhl für
Umformtechnik
und Gießereiwesen

Christoph Kaiser

Effiziente Produkt- und Prozessabsicherung für gefalzte Karosseriebauteile durch ein metamodellbasiertes Assistenzsystem

TUM.University Press

Schriftenreihe Umformtechnik und Gießereiwesen

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen
Fakultät für Maschinenwesen
Technische Universität München

Christoph Kaiser

Effiziente Produkt- und Prozessabsicherung für gefalzte Karosseriebauteile durch ein metamodellbasiertes Assistenzsystem

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. dr.ir. Daniel J. Rixen

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

2. Hon.-Prof. Dr.-Ing. Karl Roll

Die Dissertation wurde am 16.11.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 28.06.2018 angenommen.

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über https://portal.dnb.de abrufbar.

Impressum

1. Auflage

Copyright © 2018 der vorliegenden Ausgabe: TUM.University Press
Copyright © 2018 Christoph Kaiser
Alle Rechte vorbehalten

Herausgeber: Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg),
Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München

Reihe: Schriftenreihe Umformtechnik und Gießereiwesen

Layout und Gestaltung: utg/TUM.University Press
Layoutrichtlinien der Umschlaggestaltung: Designbuero Josef Grillmeier Munich
Umschlaggestaltung: Caroline Ennemoser
Umschlagabbildung: Caroline Ennemoser

TUM.University Press
Verlag der Technischen Universität München
Arcisstraße 21
80333 München

ISSN: 364-6942
ISBN: 978-3-95884-018-8
ISSN der digitalen Ausgabe: 2569-4928
DOI der digitalen Ausgabe: 10.14459/2018md1377804

www.tum.de

„Es ist nicht genug zu wissen, man muss auch anwenden;

es ist nicht genug zu wollen, man muss auch tun.“

aus Wilhelm Meisters Wanderjahre von Johann Wolfgang von Goethe

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei der Daimler AG am Standort Sindelfingen in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiweisen der Technischen Universität München.

Mein ganz besonderer Dank gilt hierbei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, dem Ordinarius des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, der durch das mir entgegengebrachte Vertrauen die Durchführung dieser Arbeit ermöglicht hat und stets mit freundlichen sowie fachlichen Anregungen zur Seite stand.

Ebenso bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Roll für die hilfreiche Unterstützung, für das großzügige Engagement und für die Übernahme des Koreferats. Bei Herrn Prof. dr.ir. Daniel Rixen möchte ich mich ganz herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken.

Ein großer Dank gilt darüber hinaus Herrn Dr.-Ing. Martin Zubeil, der mit wertvollen Ratschlägen zu sowohl fachlichen als auch organisatorischen Themen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Herrn Hubert Reinkunz danke ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen und für die Unterstützung bei der Umsetzung dieser Arbeit. Gleichzeitig möchte ich mich bei allen meinen Kollegen für die stets freundliche Zusammenarbeit, für den regen Austausch und für die interessanten Diskussionen bedanken.

Zu guter Letzt danke ich ganz besonders meiner Familie, die während der gesamten Zeit eine motivierende Unterstützung war und mir fortwährend den notwendigen Rückhalt gegeben hat.

Sindelfingen, im Oktober 2018 Christoph Kaiser

Kurzzusammenfassung

Im Umfeld der Automobilindustrie werden für die Planung und die Absicherung von Produktionsprozessen verstärkt digitale Methoden eingesetzt. Bei der Fertigung von Karosseriebauteilen kommen unter anderem Falzprozesse zum Einsatz, die während des Fahrzeugentwicklungsprozesses simulationsgestützt ausgelegt werden. Aufgrund der immer kürzer werdenden Entwicklungszeiten und der stetig wachsenden Anzahl an Fahrzeugderivaten ist in diesem Zusammenhang eine möglichst effiziente digitale Produkt- und Prozessabsicherung wünschenswert. Die konventionellen Simulationen, die meist auf der Methode der finiten Elemente beruhen, sind hierbei teilweise mit einem erheblichen Modellierungs- und Rechenaufwand verbunden, was sich insbesondere in den frühen Phasen eines Produktentstehungsprozesses nachteilig auswirkt.

In dieser Arbeit wird nun die Entwicklung eines Assistenzsystems für eine metamodellbasierte Auslegung von Falzprozessen vorgestellt, mit dem bereits in den frühen Fahrzeugentwicklungsphasen verschiedene Produkt- und Prozessvarianten in Bezug auf die falztechnische Herstellbarkeit effizient untersucht werden können. Hierzu umfasst das Assistenzsystem eine Bauteilanalysemethodik, bei der die zu falzende Umrisskontur eines Karosseriebauteils zunächst in einzelne, individuelle Segmente unterteilt wird, um eine bereichsspezifische Bauteilbewertung zu ermöglichen. Anschließend wird mit dem Ansatz jedem Segment eine spezifische, parametrisch gestaltete geometrische Grundform zugeordnet, welche die Kontur des Karosseriebauteils näherungsweise beschreibt. Die relevanten Auswertegrößen werden dabei für die vorliegenden geometrischen Grundformen durch ein spezifisches Metamodell berechnet. Hierbei beruht der Metamodellansatz auf einer elementbasierten Formulierung, dem eine hinreichende Referenzdatenbasis zugrunde gelegt ist. Für die Bereitstellung der entsprechenden Referenzdaten werden FE-Falzsimulationen mit spezifischen Produkt- und Prozessvarianten herangezogen. Mit der Implementierung der Bauteilanalysemethodik in ein rechnergestütztes Assistenzsystem können daraufhin im Rahmen der digitalen Herstellbarkeitsabsicherung in einem Fahrzeugprojekt sowohl wertvolle Zeit- als auch Kostenvorteile erzielt werden.

Executive Summary

In the automotive industry there is an increased use of digital methods for the planning and validation of production processes. The manufacturing of automotive outer body panels requires hemming processes designed by means of computer-aided simulations during the vehicle's development. Because of the decreasing development times and the steadily growing number of vehicle derivatives, an efficient digital product and process validation is desirable. Commonly used simulations based exclusively on the Finite Element Method, demand significant modelling and computational effort, which results in disadvantages especially in the early product development phase.

This work presents the development of a metamodel-based planning system for designing hemming processes that allows for a more efficient analysis of various product and process alternatives regarding their feasibility in hemming processes. The system includes a part analysis technique in which the outline of the automotive outer panel is initially split into individual segments to enable a segmental product validation. Furthermore, a parameterized geometric basic shape is assigned to each of the segments, which approximates the outline of the automotive outer panel. All relevant evaluation parameters for the corresponding geometric basic shapes are calculated subsequently by a hemming-specific metamodel. The metamodel is based on an element-similar formulation that requires a sufficient reference dataset. This reference dataset is populated using finite element hemming simulations of various product and process variants. By implementing the part analysis technique into a computerized planning system, valuable time and cost benefits can be realized during digital feasibility checks in a vehicle's development process.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Kurzzeichen ..... **XVII**

Verzeichnis der Abkürzungen ..... **XIX**

1 Einleitung **1**

2 Grundlagen und Stand der Technik **3**

2.1 Falzprozesse in der Automobilindustrie 3

2.1.1 Grundlegendes zum Falzen von Karosseriebauteilen 4

2.1.2 Anforderungen an die Bauteilmaßhaltigkeit 7

2.1.3 Einsatz von Roll- und Backenfalzprozessen 9

2.2 Digitale Auslegung des Falzprozesses 12

2.2.1 Einsatz von FE-Simulationen 12

2.2.2 Assistenzsysteme und metamodellbasierte Ansätze 15

2.2.3 Simulationsgestützte Planung der Falzmethode 18

2.2.4 Falzsimulationen in der virtuellen Fertigungsprozesskette 20

3 Zielsetzung und Vorgehensweise **25**

3.1 Ausgangssituation und Zielsetzung 25

3.2 Darlegung der Vorgehensweise 27

4 Simulationsprogramme und Versuchseinrichtungen **31**

4.1 Programme für die simulationsgestützten Versuche 31

4.2 Versuchseinrichtungen für die experimentellen Versuche 35

5 Entwicklung eines Assistenzsystems **39**

5.1 Allgemeine Anforderungen und systemrelevante Parameter 39

5.1.1 Anforderungen an das Assistenzsystem 40

5.1.2 Einflussgrößen beim Falzen von Karosseriebauteilen 40

5.1.3 Systemrelevante Produkt- und Prozessparameter 42

5.2 Definition einer geometriebezogenen Bauteilanalysemethodik 45

5.2.1 Charakteristische Konturen von Karosseriebauteilen 46

5.2.2 Geometrische Grundformen als Ersatzkontur ... 48
5.2.3 Auswertefunktionalität bei der Bauteilanalyse ... 53
5.3 Definition des metamodellbasierten Auswerteverfahrens ... 56
5.3.1 Vorauswahl der Metamodellformulierung ... 56
5.3.2 Grundlegender Metamodellaufbau ... 58
5.3.3 Modellebene der geometrischen Grundformen ... 59
5.3.4 Modellebene des Falzflansches ... 66
5.3.5 Modellebene der Referenzdatenbasis ... 69
5.4 Vorstellung des Assistenzsystems ... 70
5.4.1 Programmaufbau und Funktionsweise ... 71
5.4.2 Grafische Benutzeroberfläche ... 75
6 Methodik zur Bereitstellung der Referenzdaten ... 77
6.1 Definition und Aufbau von FE-Modellvorlagen ... 77
6.1.1 Anforderungsprofil an die FE-Modelle ... 77
6.1.2 Grundlegender FE-Modellaufbau ... 78
6.1.3 Validierung und Anwendbarkeit der FE-Modelle ... 81
6.2 Simulationsgestützte Erstellung der Referenzdaten ... 88
6.2.1 Vorgehensweise für eine effiziente Simulationsdurchführung ... 88
6.2.2 Definition einer falzspezifischen Simulationsauswertung ... 91
6.2.3 Darlegung der Ergebnisse aus der FE-Simulation ... 93
7 Demonstration der Gültigkeit des Assistenzsystems ... 105
7.1 Vorgehensweise zur Gültigkeitsprüfung der Bauteilanalysemethodik ... 105
7.2 Ergebnisse der Verifizierungs- und Validierungsmaßnahmen ... 108
7.3 Übertragbarkeit der Bauteilanalysemethodik ... 113
8 Integration in die virtuelle Fertigungsprozesskette ... 115
8.1 Optimierung der Produkt- und Prozessabsicherung ... 115
8.2 Erweiterte Anwendungsfälle für die Anlageninbetriebnahme ... 118
9 Zusammenfassung und Ausblick ... 121

A. Abbildungsverzeichnis 125

B. Tabellenverzeichnis 129

C. Literaturverzeichnis 131

Verzeichnis der Kurzzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a	mm	Spaltmaß
a*	mm	Wahrgenommenes Spaltmaß
A_g	-	Gleichmaßdehnung
E	N/mm^2	Elastizitätsmodul
f	-	Interpolierter Funktionswert
f_k	-	Funktionswert an Knoten
FL	mm	Flanschlänge
FL_{init}	mm	Initiale Flanschlänge
FV	mm	Falzverlust
FZ	mm	Falzzugabe
k_f	N/mm^2	Fließspannung
LB	mm	Bombierungsdistanz
M	-	M-Wert für die Modellierung von Fließortkurven
n	-	Verfestigungsexponent
N	-	Elementknoten
OW	°	Öffnungswinkel
PM	mm	Packmaß
r_0, r_{45}, r_{90}	-	Senkrechte Anisotropie (0°, 45°, 90° zur Walzrichtung)
RB	mm	Bombierungsradius
RB_{max}	mm	Maximaler Bombierungsradius
RK	mm	Krümmungsradius
RK_{max}	mm	Maximaler Krümmungsradius
R_m	N/mm^2	Zugfestigkeit
T_{BPL}	mm	Blechdicke Beplankung
T_{IT}	mm	Blechdicke Innenteil
U	mm	Umrissmaßabweichung
WZ	mm	Werkzeugzustellung
x	-	Globale Koordinate x
y	-	Globale Koordinate y
z	-	Globale Koordinate z

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
ζ	-	Lokale Koordinate ζ
η	-	Lokale Koordinate η
ν	-	Querkontraktionszahl
ξ	-	Lokale Koordinate ξ
ρ	g/cm^3	Dichte
σ	N/mm^2	Hauptspannung
σ_{druck}	N/mm^2	Druckspannung
σ_{zug}	N/mm^2	Zugspannung
φ	-	Umformgrad
φ_1	-	Hauptformänderung
φ_2	-	Nebenformänderung
ω	-	Formfunktion/-Interpolationsfunktion

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
BPL	Beplankung
CAD	Computer Aided Design
CPU	Central Processing Unit
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
GB	Gigabyte
Geo	Geometrische Grundform
GHz	Gigahertz
IT	Innenteil
RAM	Random-Access Memory

1 Einleitung

Die Automobilhersteller und deren Zulieferer sind heutzutage einem großen Wettbewerb ausgesetzt. Durch die Bestrebungen neue Nischen abzudecken, wächst dabei bei vielen Herstellern das angebotene Produktportfolio stetig an. Gleichzeitig wird die Fahrzeugproduktion immer globaler. Verschiedene Produktionsstandorte dienen hierbei zur zielgerechten Belieferung wachsender und etablierter Märkte. Die Anforderungen an einen modernen Karosseriebau sind in diesem Umfeld besonders durch Kosteneffizienz, durch geringen Flächenbedarf und durch schnelle Stückzahlhochläufe der Produktionsanlagen geprägt. Dabei müssen die einzelnen Prozessschritte in der Fertigungskette von Karosseriebauteilen möglichst effizient ausgelegt werden. Insbesondere das Falzen stellt im Karosseriebau einen zentralen Prozess dar, bei dem unter anderem Innenteile mit der zugehörigen Fahrzeugaußenhaut gefügt werden. Durch diesen Vorgang wird die Bauteilmaßhaltigkeit im Bereich der sichtbaren Fugen einer Fahrzeugkarosse bestimmt. Für ein konstant verlaufendes Fugenbild und zur Darstellung kleiner Spaltmaße ist eine möglichst gute Auslegung des Falzprozesses entscheidend.

Für eine frühzeitige Produkt- und Prozessabsicherung werden in der Automobilindustrie daher digitale Methoden eingesetzt. Hierbei kommen unter anderem Simulationen auf Basis der Finiten-Elemente-Methode zum Einsatz, bei denen der Fertigungsprozess anhand eines Modells virtuell untersucht wird, um daraufhin Prognosen für das tatsächliche Bauteilverhalten abzuleiten. Bei der Auslegung von Falzprozessen stellt die Absicherung der Herstellbarkeit eine zentrale Aufgabe dar. In diesem Zusammenhang ist es unter anderem anhand von Simulationen möglich, Flanschwelligkeiten oder risskritische Bauteilbereiche zu detektieren. Hierdurch können daraufhin geeignete Produktoptimierungsmaßnahmen definiert werden, um somit die fertigungsprozessrelevanten Einflüsse konstruktiv durch eine produktionsgerechte Produktgestaltung berücksichtigen zu können. Darüber hinaus ist es erforderlich, dass bei der Auslegung von Falzprozessen spezifische Maßnahmen zur Zielerreichung einer geforderten Bauteilmaßhaltigkeit definiert werden. Hierbei tragen die aus der Simulation gewonnen Erkenntnisse ebenfalls dazu bei, den Fertigungsprozess zu optimieren, indem die relevanten Prozesseinflüsse im Vorfeld identifiziert werden.

Die simulationsgestützte Absicherung auf Basis der Finiten-Elemente-Methode ist dabei allerdings mit einem hohen Modellierungs- und Rechenaufwand verbunden. Aufgrund der gestiegenen Anforderungen bei der Karosseriefertigung wird nun eine Möglichkeit angestrebt, die digitale Produkt- und Prozessabsicherung für gefalzte Karosseriebauteile durch den Einsatz eines metamodellbasierten Assistenzsystems effizienter zu gestalten. Insbesondere in den frühen Entwicklungsphasen, in denen die Bauteilgestaltung beeinflusst werden kann, ist eine schnelle

und aussagekräftige Herstellbarkeitsbewertung entscheidend. Ziel ist es, dass bereits in diesen frühen Phasen der Einfluss von verschiedenen Produkt- und Prozessvarianten sowohl bei der Umsetzung einer produktionsgerechten Produktgestaltung als auch bei der methodischen Auslegung des Falzprozesses effizient berücksichtigt werden kann. Dadurch soll unter anderem der Bauteilreifegrad frühzeitig erhöht und die Anzahl an aufwendigen Simulationsschleifen in einem Fahrzeugprojekt reduziert werden. Neben Zeit- und Kostenvorteilen soll dadurch insbesondere eine Qualitätssteigerung des digitalen Absicherungsprozesses erreicht werden.

2 Grundlagen und Stand der Technik

In der Geschichte des Automobilbaus spielte das Fahrzeugdesign seitjeher eine überaus bedeutsame Rolle. Damit die Formensprache des Designers möglichst gut realisiert werden kann, werden insbesondere an die Produktionsprozesse der Karosserieaußenhautteile hohe Anforderungen gestellt. Für ein ästhetisches Gesamterscheinungsbild eines Fahrzeugs ist dabei sowohl die Qualität der Bauteiloberflächen als auch die des Karosseriefugenbildes ein entscheidendes Kriterium. Kleine Spaltmaße sowie konstant verlaufende Fugen erhöhen die Wertanmutung signifikant und sind bei den automobilen Premiummodellen zu einem Symbol für qualitativ hochwertige und präzise Fertigung geworden. In diesem Zusammenhang nimmt der Fertigungsprozessschritt Falzen eine maßgebende Funktion ein, da hierdurch insbesondere die Umrisskontur von Karosseriebauteilen stark qualitativ beeinflusst wird.

Im Folgenden wird nun zunächst ein allgemeiner Überblick über das Fertigungsverfahren Falzen gegeben und die hierzu bestehenden Maßnahmen zur Produkt- und Prozessabsicherung vorgestellt. Dabei werden neben den grundlegenden Begrifflichkeiten auch die spezifischen Anforderungen, die insbesondere bei der Fertigung von Karosseriebauteilen auftreten, erläutert. Anschließend wird verstärkt auf die digitalen Absicherungsmaßnahmen des Fertigungsverfahrens eingegangen, welche in der modernen Automobilproduktion zunehmend an Bedeutung gewinnen.

2.1 Falzprozesse in der Automobilindustrie

Bei der Fertigung von Karosseriebauteilen ist das Falzen ein bedeutender, zentraler Prozessbestandteil. Im Anschluss an die umformtechnische Einzelteilherstellung im Presswerk erfolgt der Zusammenbau der Karosseriebaugruppen im Rohbau. Dabei kommen verschiedene Fügeverfahren, wie unter anderem das Durchsetzfügen, das Stanznieten, das Punktschweißen und das Laserschweißen, zum Einsatz. Für die Fertigung von Anbauteilen, wie etwa Kotflügel, Motorhauben, Türen, Heckdeckel und Rückwandtüren, werden vorwiegend Falzverfahren eingesetzt, um das Innenteil mit der Beplankung zu fügen.

Im Folgenden werden hierzu nun grundlegende Begrifflichkeiten und Merkmale für dieses Fertigungsverfahren vorgestellt. Darüber hinaus wird ebenso auf die spezifischen Anforderungen, die insbesondere für die automobile Großserienproduktion von Bedeutung sind, eingegangen.

2.1.1 Grundlegendes zum Falzen von Karosseriebauteilen

Falzen wird nach DIN 8593-5 als ein Fügen durch Umformen definiert, bei dem an ihren Rändern vorbereitete Bleche ineinandergelegt oder geschoben werden und durch Umlegen der Ränder einen Formschluss erhalten (DIN 2003). Prinzipiell können auf diese Weise verschiedenste Falzverbindungen realisiert werden. Zu den gängigsten Falztypen an Karosseriebauteilen zählen die hierzu in Abbildung 2.1 dargestellten Varianten Flachfalz, Keilfalz und Tropfenfalz.

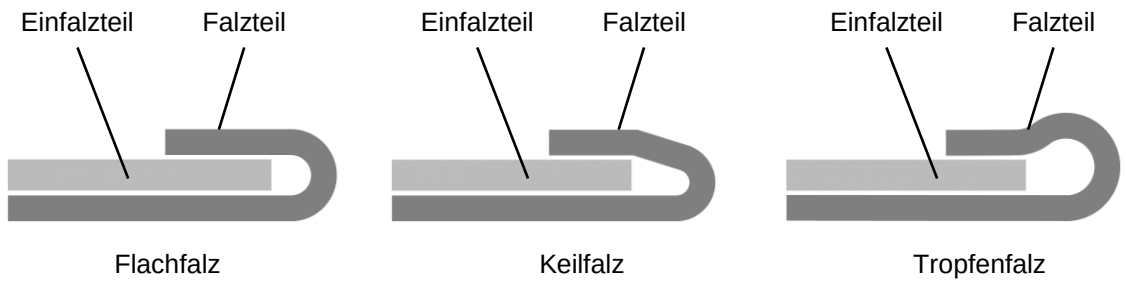


Abbildung 2.1: Falztypen an Karosseriebauteilen nach Eisele (2012, S. 39)

Der Flachfalz stellt hierbei die Standardvariante einer Falzverbindung dar und ist bei einer Mehrzahl an Karosseriebauteilen vorzufinden. Ein Keil- oder ein Tropfenfalz kommt in der Regel dann zum Einsatz, wenn eine spezielle Funktion erfüllt werden muss, bei der ein möglichst kleiner beziehungsweise großer Biegeradius aus ästhetischen oder funktionalen Gründen erforderlich ist.

Durch das Umlegen des Falzflansches tritt im Wesentlichen eine Biegebeanspruchung auf, die dazu führt, dass an der Blechaußenseite eine Zugspannung und an der Blechinnenseite eine Druckspannung eingeleitet wird. Während des Biegevorgangs überschreiten die Spannungen die Fließgrenze und bewirken somit eine plastische Umformung. Die Fasern im Werkstoffinneren werden hingegen im elastischen Bereich beansprucht. Durch den verbleibenden elastischen Anteil erfolgt nach dem Falzen eine Rückfederung des Falzflansches. Dabei federt der Flansch nach dem Entfernen der äußeren Lasten letztlich so weit zurück bis sich ein im Gleichgewicht befindlicher Eigenspannungszustand eingestellt hat. (Hellwig und Kolbe 2012, S. 109)

Prinzipiell besteht bei der falztechnischen Umsetzung kleiner Biegeradien das Risiko, dass entlang der biegebeanspruchten Zone ein Werkstoffversagen auftritt. Für die Detektion und die Bewertung der resultierenden Oberflächenrauheit, beziehungsweise der initiierten Rissbildung, wurde von Swillo et al. (2005) eine kamerabasierte, optische Messmethodik vorgestellt. Die Biegeeigenschaften eines Werkstoffs können grundsätzlich mit Hilfe verschiedener Verfahren charakterisiert werden. Zu einem der Standardverfahren zählt in diesem Zusammenhang der 3-Punkt-Biegeversuch gemäß DIN EN ISO 7438, dessen Versuchsdurchführung im Prüfblatt

VDA 238-100 weiter spezifiziert ist (DIN 2016, VDA 2010). Im Vergleich zum Tiefziehen, bei dem der Versagensmechanismus auf einer Membraninstabilität beruht und der Riss durch ein Porenwachstum von innen nach außen initiiert wird, ist das Biegeversagen durch eine Rissbildung gekennzeichnet, die von der Werkstoffoberfläche ausgeht und von außen nach innen gerichtet ist (Schleich 2010, S. 106-107).

Zur Charakterisierung der Biegeeigenschaften von Blechwerkstoffen wurden hierzu bereits zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Neben grundlegenden Versuchen, wie beispielsweise die von Thuillier (2014), bei denen der Einfluss einer Vordehnung auf das verbleibende Biegevermögen ermittelt wurde, wurden ebenso verschiedene Ansätze unternommen, um eine Prognose des Biegeversagens zu ermöglichen. Von Lin et al. (2009) wurden hierzu Versuche an gebogenen und gefalzten Blechen durchgeführt, bei denen die resultierenden Dehnungen zum Zeitpunkt des Werkstoffversagens mit den erzielten Werten aus einem „plane-strain“-Zugversuch verglichen wurden. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die aus beiden Versuchen ermittelten Dehnungswerte eine gute Übereinstimmung aufweisen. Um das Biegeversagen mit Hilfe eines Versagenskriteriums beurteilen zu können, wurde in der Arbeit von Schleich (2010) die sogenannte „Bending Limit Curve“ vorgestellt, die eine dehnungsbasierte Charakterisierung des Biegevermögens ermöglicht. Ein anderer Ansatz zur Prognose des Biegeversagens, der auf einer Bestimmung der Triaxialität und des Lode-Winkels beruht, wurde hierzu in der Arbeit von Zubeil (2014) anhand von experimentellen und simulationsgestützten Biege- und Falzversuchen dargelegt.

Für die Realisierung einer möglichst fertigungsnahen Charakterisierung der Falzbarkeit von Blechwerkstoffen, wurden neben den Vorrichtungen zur Durchführung von konventionellen Biegeversuchen stets weitere falzspezifische Prüfwerkzeuge entwickelt. Schleich et al. (2007) stellten in diesem Zusammenhang eine Prüfvorrichtung vor, die auf der Grundlage eines Backenfalzwerkzeugs aufgebaut ist. Durch eine prozessnahe Kinematik der Falzwerkzeuge und durch ein variables Spannsystem wird eine Versuchsdurchführung ermöglicht, die vergleichbare Spannungszustände in der Blechebene hervorruft, wie sie auch beim Falzen von Karosseriebauteilen in der Automobilproduktion auftreten. Ergänzend hierzu wurde von Liewald et al. (2016) eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus einem 3-Punkt-Biegeversuch und denen aus einem prozessnahen Backenfalzversuchswerkzeug gegeben. Anhand eines Aluminiumblechwerkstoffs konnte gezeigt werden, dass die resultierende Oberflächenrauheit aus beiden Versuchen unterschiedlich ausgeprägt ist. Daraus wurde gefolgert, dass die beim Falzen existierende Beanspruchung nicht direkt durch einen konventionellen Biegeversuch abgebildet werden kann. Um hierbei eine möglichst gute Beurteilung zu ermöglichen, ist es demzufolge notwendig, den Einfluss aller Fertigungsprozessschritte zu berücksichtigen.

Golovashchenko (2005) zeigte anhand von experimentellen Falzversuchen mit verschiedenen Abkantradien, dass die versagensfreie Falzbarkeit eines Blechwerkstoffs mit der Größe des zugrunde gelegten Abkantradius zusammenhängt. Darüber hinaus wurde von Hönle und Liewald (2013a) eine detaillierte Aufschlüsselung der prozessspezifischen Biegebeanspruchung der Fertigungsschritte Abkanten und Falzen vorgestellt. Hierbei konnte gezeigt werden, dass eine gleichmäßige Dehnungsverteilung in der biegebeanspruchten Zone dann erreicht werden kann, wenn die Überlagerung der maximalen Dehnungsbeträge der jeweiligen Fertigungsprozessschritte lokal verteilt wird. Somit wurde dargelegt, dass es möglich ist, scharfkantige und markante Falzradien versagensfrei zu realisieren, indem eine gezielte Auslegung der Dehnungsverteilung entlang der biegebeanspruchten Zone vollzogen wird.

Bei dem Umlegen des Falzflansches treten zusätzlich neben der reinen Biegebeanspruchung weitere geometrieabhängige Spannungen auf. Aufgrund der Bauteilkontur, die designbedingte und funktionale Merkmale beinhaltet, resultieren gekrümmte Biegelinien. Beim Falzen dieser konkaven oder konvexen Geometrieverläufe wird die Biegespannung von zusätzlichen, tangential wirkenden Zug- oder Druckspannungen überlagert. Die Art der überlagerten Spannung wird hierbei von der Geometrie der Biegelinie bestimmt (Birkert et al. 2013, S. 279-281). Abbildung 2.2 zeigt in diesem Zusammenhang eine Probe mit einer geraden, einer konkaven und einer konvexen Biegelinie sowie die daraus resultierende Spannung in tangentialer Richtung.

Konvexe Biegelinien bewirken beim Falzen eine Materialanhäufung im Flanschbereich, sodass tangentiale Druckspannungen resultieren. Als Folge kommt es in diesen Bereichen vermehrt zu einer Faltenbildung (Livatyali et al. 2004). Konkave Kanten bewirken hingegen, dass das Material im Flansch reduziert wird und tangentiale Zugspannungen auftreten. Mit größer werdender Flanschlänge werden diese Effekte verstärkt, da hierdurch der Unterschied zwischen der Bogenlänge an der äußeren Blechkante und der Bogenlänge am Radiuseinsatz zunimmt. Die resultierenden Dehnungen bzw. Stauchungen werden dadurch in Richtung zur äußeren Blechkante betragsmäßig am größten. Bei dem Auftreten von tangentialen Zugspannungen steigt bei Leichtbaublechwerkstoffen, in Kombination mit der bereits vorverfestigten Schnittkante aus dem Scherschneidprozess, zusätzlich das Risiko einer Rissbildung im Flanschbereich (Held et al. 2009). Demzufolge ist es erforderlich, dass bereits bei der frühzeitigen Auslegung von Falzprozessen geeignete Maßnahmen unternommen werden, um zu falzende Karosseriebauteile im Vorfeld gegen ein mögliches Bauteilversagen abzusichern.

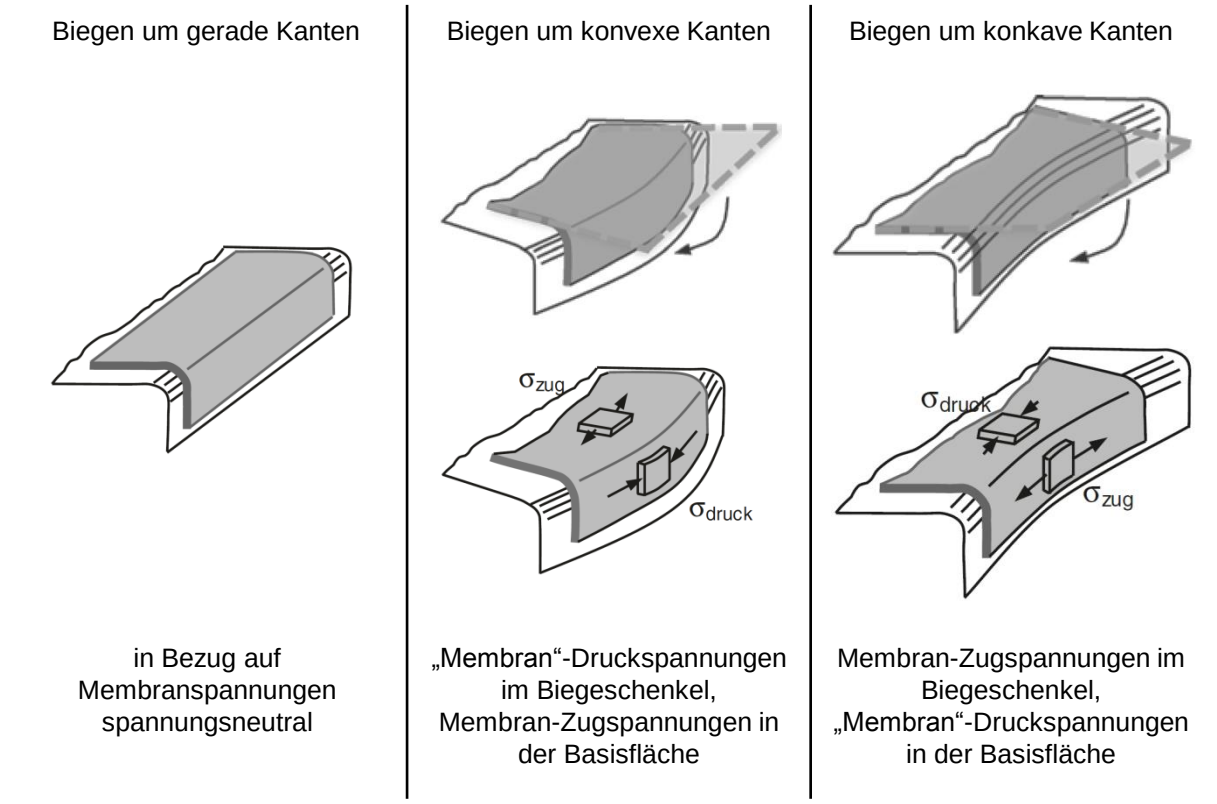


Abbildung 2.2: Tangentiale Spannungen beim Falzen aufgrund der Geometrie der Biegelinie (Birkert et al. 2013, S. 281)

2.1.2 Anforderungen an die Bauteilmaßhaltigkeit

Bei dem Falzen von Karosseriebauteilen ist neben der versagensfreien Herstellbarkeit insbesondere die Zielerreichung von geforderten geometrischen Maßen relevant. In Abbildung 2.3 sind die hierzu typischen Maße beispielhaft an einem Falzquerschnitt dargestellt. Zu den wichtigsten Parametern vor dem Falzen zählen hierbei die abgekantete Flanschlänge, der Öffnungswinkel und die Falzzugabe. Nach dem Falzen sind vor allem die gefalzte Flanschlänge und der resultierende Biege- beziehungsweise Falzradius von Bedeutung.

Darüber hinaus ist beim Falzen von Karosseriebauteilen das Einrollverhalten des Falzflansches von besonderem Interesse. Durch einen Vergleich des Umrissmaßes vor und nach dem Falzen wird ein Wert für das Einrollen ermittelt, der als Falzverlust bezeichnet wird. Um ein gefordertes Zielumrissmaß zu erreichen, ist es erforderlich, dass das presswerkfallende Einzelteil auf den Falzprozess und das damit verbundene Einrollverhalten abgestimmt wird. Hierzu wird am presswerkfallenden Einzelteil eine konstruktive Vergrößerung des Umrissmaßes umgesetzt, dessen Wert als Falzzugabe bezeichnet wird. Ist der resultierende Falzverlust beim Falzen größer als der vorgehaltene Wert, rollt das Bauteil zu weit ein und das Umrissmaß wird zu klein. Ist hingegen der resultierende Falzverlust beim Falzen kleiner als die vorgehaltene Falzzugabe,

rollt das Bauteil zu wenig ein und das Umrissmaß wird demnach zu groß. Dieser Sachverhalt ist insbesondere bei der Realisierung kleiner Spaltmaße und konstant verlaufender Fugen entscheidend.

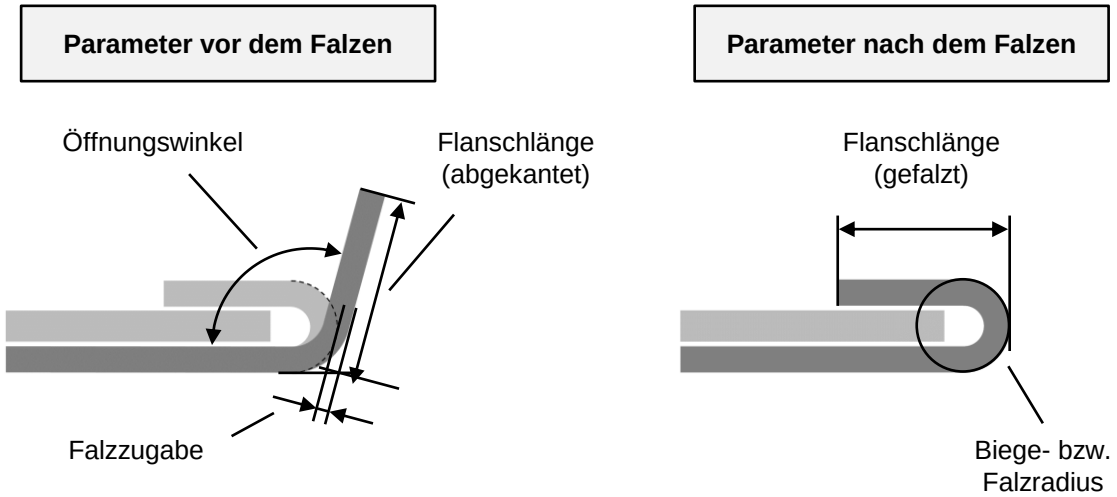


Abbildung 2.3: Geometrische Parameter am Falzquerschnitt

Für das optisch wahrgenommene Spaltmaß an Fahrzeugkarosserien spielt neben dem Einrollverhalten ebenfalls die Größe des resultierenden Falzradius eine wichtige Rolle. In Abbildung 2.4 ist hierzu ein Vergleich für die optische Wahrnehmung eines Spaltes in Bezug auf große und kleine Falzradien am Beispiel der Fuge zwischen einer Fahrer- und einer Fondtür dargestellt. Große Falzradien bewirken, dass das wahrgenommene Spaltmaß im Bereich des Radiuseinlaufs für einen Betrachter optisch größer wirkt als die tatsächlich vorhandene Spaltgröße (Birkert et al. 2013, S. 63-64). Dadurch wird trotz eines engen Spaltmaßes das Vorhandensein einer breiten Fuge suggeriert. Durch die Realisierung von möglichst kleinen Falzradien, in Kombination mit konstant verlaufenden Fugenbildern, kann somit die Wertanmutung eines Fahrzeugs für einen Betrachter zusätzlich gesteigert werden.

Das ästhetische Gesamterscheinungsbild einer Fahrzeugkarosserie wird letztlich durch ein Zusammenspiel von verschiedenen Designmerkmalen, wie Form, Spalt, Bündigkeit und Oberfläche bestimmt (Rupp et al. 2012). Allerdings stellen insbesondere Flächenkrümmungen und Kanten dominante Merkmale dar, deren Ausführung sich entscheidend auf die wahrgenommene Bauteilqualität und das Erscheinungsbild eines Spaltes auswirkt (Hönle und Liewald 2013b). In diesem Zusammenhang wurde in der Arbeit von Hönle (2016) eine umfassende Feldstudie durchgeführt, um wahrnehmbare Merkmale für die Anmutungsqualität von Karosseriefugen beschreiben und quantifizieren zu können.

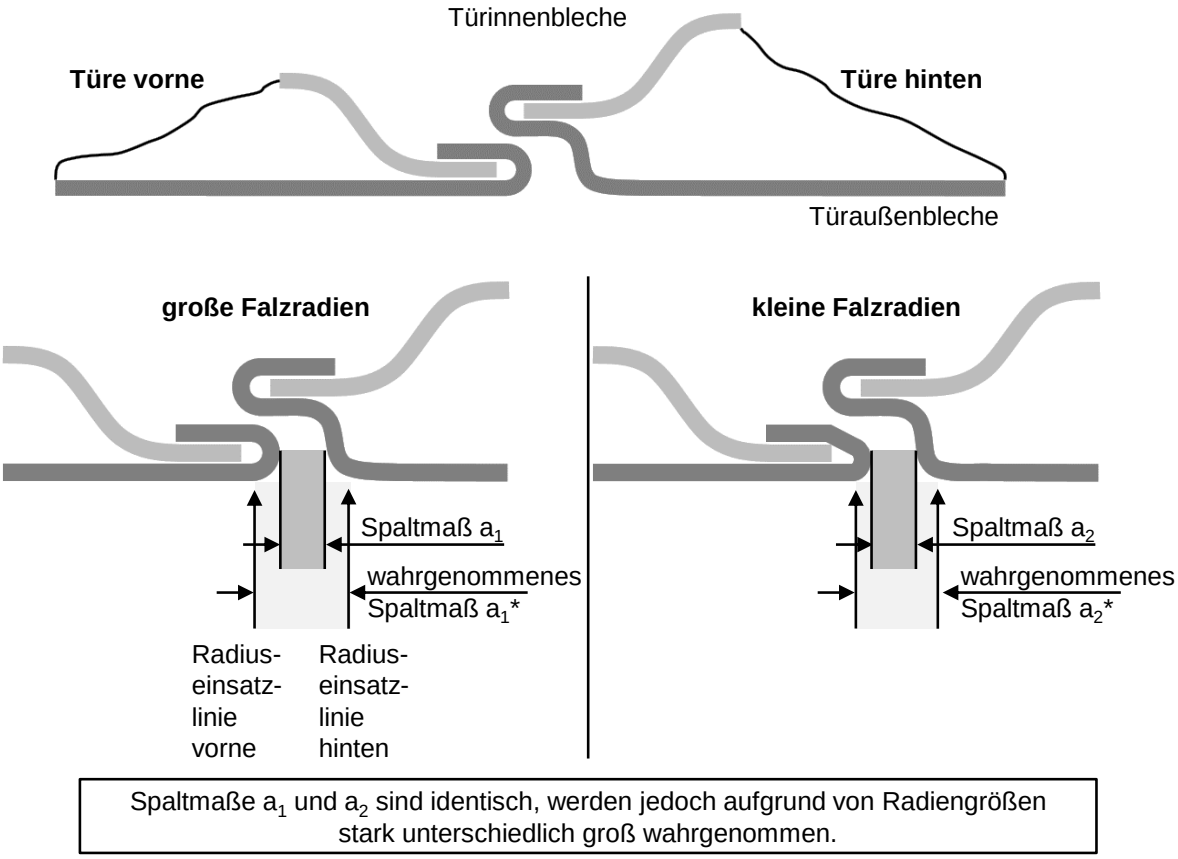


Abbildung 2.4: Abhängigkeit des wahrgenommenen Sichtspalts a von der Größe der Falzradien (Birkert et al. 2013, S. 64)*

Durch die Gestaltung eines Spaltes werden neben den ausschließlich optischen Gesichtspunkten aber auch funktionale Aspekte, wie beispielsweise Windgeräusche, Treibstoffverbrauch, Dichtheit und Schließkräfte, mitbeeinflusst (Beyer et al. 2008). Aus diesen Gründen resultieren in der Automobilproduktion hohe Anforderungen an die geometrische Maßhaltigkeit von Fugenbildern, die wiederum signifikant durch die Qualität des Falzprozesses beeinflusst werden.

2.1.3 Einsatz von Roll- und Backenfalzprozessen

Prinzipiell kann das Umlegen des Falzflansches auf verschiedene Arten erfolgen. Aufgrund der spezifischen Anforderungen der Fahrzeugproduktion sind in der Automobilindustrie heutzutage überwiegend die Verfahren Roll- und Backenfalzen im Einsatz.

Bei dem Rollfalzen erfolgt der Falzvorgang mittels einer robotergeführten Falzrolle, die den abgekanteten Flansch inkrementell umformt und schrittweise schließt. Das Backenfalzen, auch „Tabletop“-Falzen genannt, findet mittels einer Vorrichtung statt, die den Falzflansch durch das definierte Bewegen von Umformbacken umlegt. Für das Falzen sind hierbei mehrere Prozess-

schritte notwendig, die in die Kategorien Vor- und Fertigfalzen untergliedert sind. Abbildung 2.5 zeigt hierzu schematisch eine Gegenüberstellung der Fertigungsschritte für das Roll- und das Backenfalzen.

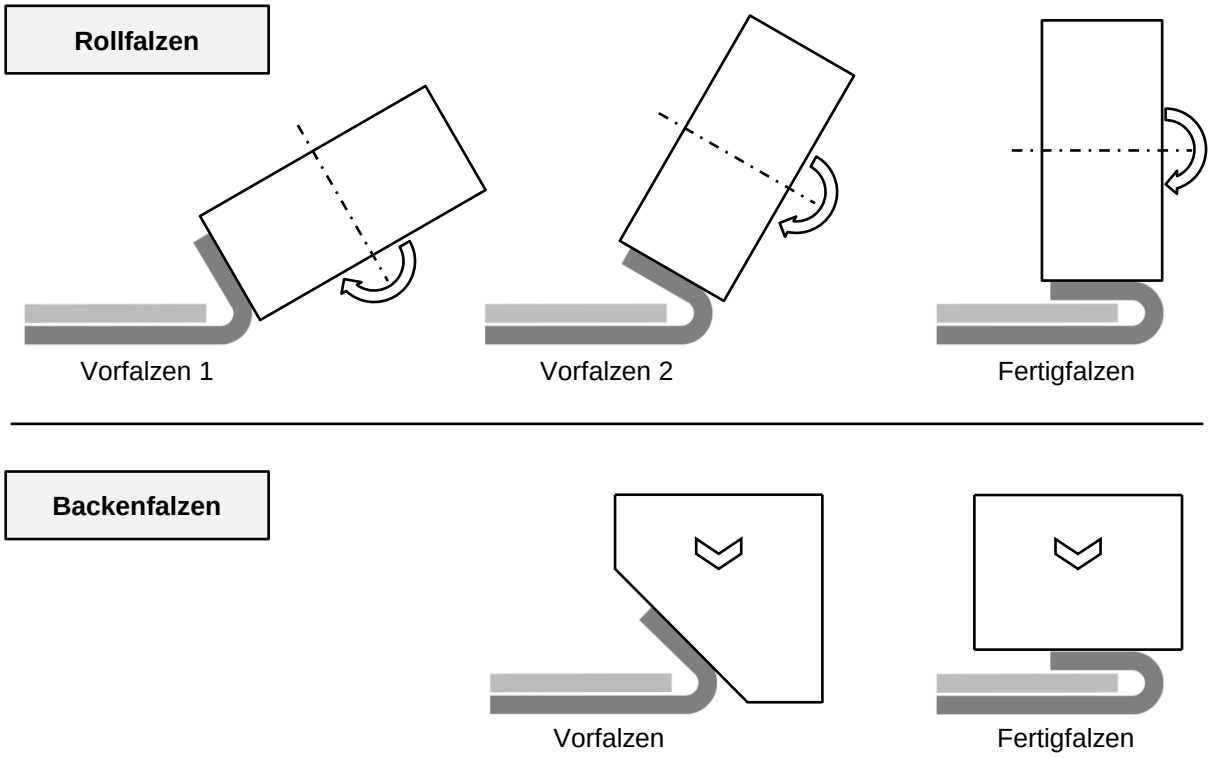


Abbildung 2.5: Fertigungsschritte beim Roll- und Backenfalzen von Karosseriebauteilen

Beide Prozesse unterscheiden sich grundlegend hinsichtlich ihrer Werkzeuggestaltung und ihrer Werkzeugbewegung. Darüber hinaus sind den Verfahren weitere spezifische, prozessbedingte Eigenschaften zuzuordnen. Im Vergleich zum Backenfalzen ist das Rollfalzen durch eine höhere Flexibilität, durch eine geringere Werkzeugkomplexität, durch geringere Kosten aber auch durch eine längere Prozesszeit gekennzeichnet. In der Automobilindustrie werden daher Rollfalzprozesse häufig für die Produktion kleiner bis mittlerer und Backenfalzprozesse für die Produktion großer Stückzahlen eingesetzt.

Neben den aufgezeigten wirtschaftlichen Aspekten bestehen ebenso fertigungsrelevante Unterschiede zwischen beiden Fertigungsverfahren. Da beim Rollfalzen ein inkrementelles Umlegen des Falzflansches entlang der Bauteilkontur erfolgt, wird im Vergleich zum Backenfalzen hierbei ein unterschiedlich ausgeprägter Spannungszustand im Falzflansch hervorgerufen (Carsley 2005, Oueslati et al. 2010). In diesem Zusammenhang untersuchten Zubeil et al. (2010) das Werkstoffgefüge in der biegebeanspruchten Zone für Roll- und für Backenfalzprozesse. Aufbauend auf diesen Ergebnissen konnte in der Arbeit von Zubeil (2014) dargelegt werden, dass

für beide Falzverfahren eine unterschiedlich ausgeprägte, lokale Dehnungsverteilung in der biegebeanspruchten Zone vorherrscht und somit bei der Herstellbarkeit kleiner Biegeradien verfahrensbedingte Unterschiede existieren.

Für die Untersuchung des Einrollverhaltens wurden unter anderem von le Maoût et al. (2010a) Falzversuche mit unterschiedlich gekrümmten Proben durchgeführt, die zum einen roll- und zum anderen backengefalzt wurden. Hierbei konnte gezeigt werden, dass der resultierende Falzverlust sowohl von der geometrischen Gestalt der Proben als auch vom jeweils eingesetzten Falzverfahren abhängig ist. In den Untersuchungen von Livatyali et al. (2000) wurde ein spezieller Fokus auf das Backenfalzen gelegt und insbesondere der Einfluss der Bewegungsrichtung der Umformbacken auf den Falzverlust untersucht. Durch unterschiedlich definierte Werkzeugbewegungen konnte dargelegt werden, dass das Einrollverhalten der Bauteile beim Backenfalzen signifikant von der zugrunde gelegten Prozessdefinition abhängig ist. Eisele (2012) betrachtete später speziell den Rollfalzprozess und untersuchte dabei die Auswirkungen von verschiedenen Produkt- und Prozessparametern, wie beispielsweise Blechdicken, Flanschöffnungswinkel, Vordehnung, Rollenzustellung und Anzahl an Falzschritten, um daraufhin einen Zusammenhang mit dem resultierenden Falzverlust aufzustellen. Dabei konnte gezeigt werden, dass insbesondere die Art der Rollenzustellung einen deutlichen Effekt auf das Einrollverhalten des Bauteils ausübt.

Eine zusätzliche Einflussgröße beim Rollfalzen stellt der Falzroboter selbst dar, dem eine gewisse Systemsteifigkeit zugrunde liegt. Um dessen Einfluss zu charakterisieren haben Eisele et al. (2010a) die gefahrenen Bahnkurven während eines Rollfalzvorgangs mittels eines optischen Messsystems aufgenommen und analysiert. Dabei wurde das Falzprogramm zum einen im entlasteten und zum anderen im belasteten Zustand abgefahren. Anhand eines Vergleichs beider aufgezeichneter Bahnkurven konnte gezeigt werden, dass der Falzroboter unter Belastung von der programmierten Bahnkurve sichtbar abweicht. In diesem Zusammenhang untersuchten Drossel et al. (2014) zunächst das Steifigkeitsverhalten eines Falzroboters für verschiedene Roboterstellungen auf Basis experimenteller Versuche. Anschließend wurde ein Ansatz vorgestellt, bei dem dieses Systemverhalten mit Hilfe einer Simulation prognostiziert wird, um somit eine Möglichkeit zu schaffen, den Effekt der Robotersteifigkeit bereits bei der Rollfalzprogrammierung mitberücksichtigen zu können.

Die in der Automobilindustrie eingesetzten Roll- und Backenfalzprozesse werden stetig weiter optimiert und an neue Anforderungen angepasst. In diesem Zusammenhang stellten Waltl et al. (2013) eine Vision für die Ausführung zukünftiger Rollfalzprozesse vor, bei der die Falzroboter

mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet sind, um somit die Qualität des Fertigungsprozesses fortlaufend zu überwachen. Ein Nachregeln der Bahnkurven während des Einsatzzeitraums soll hierbei selbstständig durch den Falzroboter erfolgen. Neben den Bestrebungen zur weiteren Prozessautomatisierung, gewinnt gleichzeitig eine möglichst ressourceneffiziente Fertigung im Automobilbau immer mehr an Bedeutung. Hierzu untersuchten Liewald et al. (2013) unter anderem den Kraft- und Energiebedarf von Backenfalzprozessen und hoben dabei die Notwendigkeit von nachhaltigen sowie wirtschaftlichen Herstellungsprozessen hervor.

2.2 Digitale Auslegung des Falzprozesses

Für eine effiziente Planung und Auslegung von Falzprozessen im Karosseriebau wird vermehrt auf digitale Methoden zurückgegriffen. Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über die Einsatzmöglichkeiten von FE-Simulationen für die Herstellbarkeitsbewertung von gefalzten Karosseriebauteilen gegeben. Darüber hinaus wird auf die Anwendungsgebiete von Assistenzsystemen und auf die Möglichkeiten zur simulationsgestützten Planung der Falzmethode eingegangen. Anschließend erfolgt eine Darlegung der aktuellen Ansätze zur Realisierung einer durchgängigen virtuellen Fertigungsprozesskette im Pkw-Karosseriebau.

2.2.1 Einsatz von FE-Simulationen

In der Automobilindustrie wird im Bereich der Blechumformung für die digitale Bewertung von Herstellungsprozessen unter anderem auf Simulationen zurückgegriffen, die auf der Methode der finiten Elemente beruhen. Die Weiterentwicklung dieser Umformsimulationen hat in den vergangenen Jahren maßgeblich dazu beigetragen, dass Umformwerkzeuge in kürzerer Zeit entwickelt und somit frühzeitiger für die Produktion eingesetzt werden können. Roll (2008) gibt hierzu einen kurzen Überblick über die Entstehungsgeschichte der Umformsimulation und stellt weitere, zukünftig erforderliche Entwicklungsschritte vor. Neben der Simulation von presswerkseitigen Umformoperationen werden auch für die Absicherung von Falzprozessen FE-Simulationen herangezogen, um die zu falzenden Bauteile in Bezug auf die umformtechnischen Fragestellungen untersuchen zu können (Sigvant und Mattiasson 2005).

Mit den Anfängen der FE-Falzsimulationen lag der Fokus zunächst überwiegend in der Betrachtung von Backenfalzprozessen. Dabei wurden in einem ersten Schritt Möglichkeiten untersucht, den Fertigungsprozess des Falzens durch geeignete Modellierungsmaßnahmen in einer FE-Simulation abbilden zu können. Svensson und Mattiasson (2000) führten hierzu unter anderem Falzsimulationen auf Basis von Schalen- und Volumenelementen in LS-DYNA® durch, bei denen gezeigt werden konnte, dass eine Elementformulierung mit Schalenelementen

für die Simulation von Falzprozessen grundsätzlich möglich ist. Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden hierbei experimentelle Versuche herangezogen, bei denen das Einrollverhalten, die Kräfte beim Falzen und die resultierenden Dehnungen für das Vor- und das Fertigfalzen betrachtet wurden. In der Arbeit von Sigvant (2003) wurde ebenfalls zunächst ein grundlegender Vergleich von Schalen- und Volumenelementen dargelegt, indem zweidimensionale Simulationsmodelle eines einfachen Bauteils aufgebaut wurden. Anschließend wurde dann ein komplexeres Karosseriebauteil in Form eines dreidimensionalen Simulationsmodells in LS-DYNA® simuliert und hierbei der Effekt von verschiedenen Elementformulierungen sowie der Einfluss von unterschiedlichen Materialmodellen auf den resultierenden Falzverlust untersucht. Gleichzeitig kam verstärkt die Fragestellung nach dem Einfluss auf, der durch den verwendeten FE-Solver beziehungsweise durch die verwendete Programmversion resultiert, sodass unter anderem von Svensson und Mattiasson (2002) verschiedene Versionen von LS-DYNA® hinsichtlich ihrer Vergleichbarkeit bei der Simulation von Falzprozessen getestet wurden.

Im weiteren Anwendungsverlauf der FE-Falzsimulationen rückte verstärkt die Identifikation von relevanten Materialparametern, welche einen Effekt auf das Bauteilverhalten während des Falzens ausüben, in den Fokus des Interesses. Thuillier et al. (2005) untersuchten in diesem Zusammenhang den Einfluss eines isotropen, eines kinematischen und eines gemischten Verfestigungsverhaltens sowie den Effekt von verschiedenen Fließkriterien bei der Simulation von Backenfalzprozessen auf Basis eines zweidimensionalen FE-Simulationsmodells in ABAQUS®. Ergänzend hierzu wurden von le Maoût et al. (2010b) auch die Auswirkungen eines anisotropen Werkstoffverhaltens auf das Einrollverhalten sowie auf die auftretenden Kräfte beim Falzen von Proben mit gekrümmten Biegelinien betrachtet. Die FE-Falzsimulationen wurden dafür in PAM-STAMP2G® durchgeführt, bei denen sowohl Schalen- als auch Volumenelemente eingesetzt wurden.

Darüber hinaus wurde auch vermehrt auf den Einfluss, der von verschieden ausgeprägten Produkt- und Prozessparametern beim Falzen hervorgerufen wird, eingegangen. So wurden unter anderem von Lin et al. (2007) die Auswirkungen von unterschiedlich gestalteten Bauteilformen mit gekrümmten Biegelinien auf den dabei resultierenden Falzverlust, das Rücksprungverhalten und die resultierenden Dehnungen anhand einer simulationsgestützten statistischen Versuchsplanung untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass das Einrollverhalten durch den Vorfalzwinkel und die Krümmung der Proben signifikant beeinflusst wird, wobei die Krümmung wiederum selbst eine Auswirkung auf das resultierende Rücksprungverhalten ausübt.

Darüber hinaus wurden die Gestaltung des Abkantradius und die bis dato eingebrachte Vordehnung als relevante Einflussgrößen identifiziert, die die resultierenden Dehnungen am Biegeradius wesentlich beeinflussen.

Mit zunehmendem Maße gewann im weiteren Verlauf verstärkt die FE-Simulation von Rollfalzprozessen an Bedeutung. Dabei stand zunächst insbesondere ein Vergleich der Fertigungsverfahren Roll- und Backenfalzen im Fokus des Interesses. Anhand von einfachen Proben mit konvex gekrümmter Biegelinie führten Thuillier et al. (2008) in diesem Zusammenhang Rollfalzsimulationen durch, die anschließend mit den resultierenden Ergebnissen eines Backenfalzprozesses verglichen wurden. Hierbei konnte durch die Simulation gezeigt werden, dass Unterschiede zwischen beiden Falzverfahren hinsichtlich des Einrollverhaltens und der resultierenden Dehnungen am Biegeradius existieren. Zubeil et al. (2011) legten anschließend den Fokus speziell auf die simulationsgestützte Untersuchung der biegebeanspruchten Zone für Roll- und für Backenfalzprozesse. Dabei wurde der vorherrschende Spannungszustand für beide Falzverfahren anhand von Simulationen untersucht, sodass daraufhin verfahrensbedingte Unterschiede durch einen Vergleich der ermittelten Triaxialität dargelegt werden konnten.

Ähnlich wie beim Backenfalzen wurden darüber hinaus auch beim Rollfalzen zahlreiche simulationsgestützte Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluss von diversen Produkt- und Prozessparametern mit Hilfe von FE-Rollfalzsimulationen ermitteln zu können. Le Maoût et al. (2006) verwendeten hierzu zunächst eine einfache, konvex gekrümmte Probe aus einem Aluminiumblechwerkstoff, um mittels einer Rollfalzsimulation das Einrollverhalten und die auftretenden Kräfte an der Falzrolle für diese spezifische Probengestaltung zu untersuchen. Darauf aufbauend führten le Maoût et al. (2012) später weitere simulationsgestützte und experimentelle Versuche mit komplexer gekrümmten Proben durch. Die Proben bestanden wiederum aus einem Aluminiumblechwerkstoff, die zunächst biaxial vorgedehnt und anschließend rollgefalzt wurden. Anhand dieser Versuche konnte unter anderem gezeigt werden, dass die eingebrachte Vordehnung einen Effekt auf den Falzverlust und die Faltenbildung beim Rollfalzen ausübt.

In den bisher unternommenen FE-Rollfalzsimulationen wurde der Einfluss der Systemsteifigkeit des Falzroboters bislang nicht berücksichtigt. Arroyo et al. (2010) stellten diesbezüglich einen einfachen Ansatz für ein FE-Simulationsmodell vor, bei dem die Robotersteifigkeit durch einen Elastizitätskennwert in der Simulation des Rollfalzprozesses mitbetrachtet wird. Darüber hinaus wurde insbesondere in der Arbeit von Eisele (2012) der Einfluss der Falzrollenzustellung eines Falzroboters untersucht. Bei den hierzu durchgeführten Simulationen wurden zusätzlich verschiedene Produkt- und Prozessparameter variiert und deren Auswirkungen auf das Rollfalzergebnis dargelegt. Dabei konnte gezeigt werden, dass das Einrollverhalten durch die

Rollenzustellung beim Falzen signifikant beeinflusst wird. Auf dieser Grundlage konnte daraufhin eine Strategie entwickelt werden, mit der es möglich ist, durch eine gezielte Rollenzustellung das Umrissmaß eines Bauteils auf einen geforderten Wert zielgerichtet einzustellen und somit mit weniger Iterationsschleifen eine bessere Bauteilqualität zu ermöglichen.

Damit mit Hilfe von FE-Falzsimulationen ein mögliches Bauteilversagen prognostiziert werden kann, sind spezifische Versagensmodelle erforderlich. In diesem Zusammenhang wurde unter anderem von Zubeil et al. (2012) und Zubeil (2014) die Biegebeanspruchung beim Falzen von Karosseriebauteilen sowohl experimentell als auch simulationsgestützt untersucht. Darauf aufbauend konnte ein auf der Triaxialität und dem Lode-Winkel basierendes Versagensmodell für Biegeumformprozesse entwickelt werden, welches es ermöglicht, Risse entlang des Biegeradius in der FE-Falzsimulation zu detektieren. Ein dehnungsbasiertes Versagenskriterium, das zur Bewertung der Biegebeanspruchung unter Berücksichtigung der Umformhistorie in FE-Simulationen herangezogen werden kann, wurde von Denninger et al. (2012) vorgestellt. Hierbei wird die sogenannte „combined Bending Limit Curve“ als Grenzkriterium für ein Bauteilversagen unter Biegebeanspruchung herangezogen, die eine Erweiterung der von Schleich (2010) präsentierten „Bending Limit Curve“ ist.

Trotz der Vielzahl an bereits durchgeführten Untersuchungen sind weiterhin Optimierungsmaßnahmen für die Durchführung von FE-Falzsimulationen erforderlich, um insbesondere die Effizienz der Produkt- und Prozessabsicherung im Umfeld der Karosserieteilefertigung weiter steigern zu können. Neugebauer et al. (2014) stellten in diesem Zusammenhang eine Übersicht speziell für Rollfalzanwendungen auf, in der sowohl die bereits etablierten Themenfelder als auch der noch offene Forschungsbedarf für Rollfalzsimulationen aufgezeigt wird. Hierbei wurden insbesondere die Berücksichtigung der Systemsteifigkeit des Falzroboters, die Schnittstellte zwischen Roboter- und FEM-Software sowie die Notwendigkeit für ein System zur effizienten Optimierung von Produkt- und Prozessparametern als Potential für weitere Forschungsaktivitäten ausgewiesen.

2.2.2 Assistenzsysteme und metamodellbasierte Ansätze

Im industriellen Umfeld ist eine effiziente Auslegung der Fertigungsprozesse von großer Bedeutung. In diesem Zusammenhang werden vermehrt simulationsgestützte Planungssysteme eingesetzt, um insbesondere in den frühen Entwicklungsphasen verschiedene Konzepte hinsichtlich ihrer fertigungstechnischen Umsetzbarkeit bewerten und daraufhin zielgerichtet optimieren zu können. Durch metamodellbasierte Ansätze ist es beispielsweise möglich, Karosseriebaukomponenten bereits in den frühen Design-Phasen in Bezug auf eine produktionsgerechte

Produktgestaltung zu prüfen (Volk und Charvet 2009). Zu diesem Zweck wurden bereits im Bereich der Blechumformung sowohl presswerkseitige als auch rohbauseitige Planungssysteme entwickelt, um somit eine wirkungsvolle Unterstützung für die Umsetzung verschiedener Planungsaufgaben bereitzustellen.

In der Methodenplanung für die presswerkseitigen Umformoperationen ist die effiziente Auslegung von Umformwerkzeugkomponenten von großer Bedeutung. Schenk und Hillmann (2004) stellten hierzu ein Planungssystem zur automatischen Erzeugung von Ankonstruktionen an Umformwerkzeugen vor, um dadurch den erforderlichen Modellierungsprozess bei FE-Simulationen zu beschleunigen und gleichzeitig anwenderfreundlicher zu gestalten. Darüber hinaus wurde für eine verbesserte Planung von Werkzeugkonzepten und den dabei resultierenden Werkzeugkosten in der Arbeit von Wagner (2012) ein Verfahren zur schnellen Erstellung und Bewertung von Konzeptmethoden für Blechbauteile beschrieben. Hierbei wurde eine Methodik vorgestellt, die über eine spezielle Geometrieanalyse des zu bearbeitenden Bauteils einen Bezug zu den notwendigen Fertigungsschritten und den damit verbundenen Kosten herstellt, um somit eine fundierte Planungsgrundlage für die Blechteilefertigung bereitzustellen. Um den Methodenplaner zusätzlich bei der Auslegung von Umform- und Schneidprozessen zu unterstützen, wurde von Hitz (2012) ein spezifisches Planungssystem entwickelt, das auf Grundlage spezifischer metamodellbasierter Ansätze, wie unter anderem anhand von Kriging-Modellen, eine Herstellbarkeitsbewertung von unterschiedlich gestalteten Bauteilformen ermöglicht.

Darüber hinaus wurden auch stets weitere spezifische Anwendungsfälle durch entsprechende Systemlösungen unterstützt. In diesem Zusammenhang wurde in der Arbeit von Klimmek (2004) ein System zur Optimierung der Methodenplanung für die Hochdruck-Blechumformung vorgestellt. Hierbei wurde ein Ansatz eines modularen, virtuellen Werkzeugsystems beschrieben, das aus einzelnen geometrischen Grundkörpern aufgebaut ist. Mit Hilfe von statistischen Verfahren wurde dabei ein Zusammenhang zwischen der geometrischen Werkzeuggestaltung und verschiedenen Qualitätsmerkmalen aufgestellt, um somit bei der Werkzeugerstellung eine auf den Umformprozess abgestimmte, geeignete Werkzeuggeometrie in kurzer Zeit auslegen zu können. Eine spezielle Lösung für Tiefziehprozesse wurde in der Arbeit von Cwiekala (2011) vorgestellt. Hierbei wurde eine Simulationsmethode entwickelt, die auf einer Schnittlinienberechnung beruht, sodass die Formänderungen beim Tiefziehen unter Berücksichtigung aller relevanten Einflussgrößen zeiteffizient berechnet werden können. Dabei konnte gezeigt werden, dass im Vergleich zu numerischen Einschritt-Lösern eine kürzere Berechnungsdauer erreicht wird.

Neben der Auslegung von entsprechenden Fertigungsschritten ist ebenfalls eine optimierte Prozessanalyse von großer Bedeutung. Quetting et al. (2013a) und Quetting et al. (2013b) stellten diesbezüglich ein metamodellbasiertes Planungs- und Kontrollsystem zur Erhöhung der Robustheit von Blechumformprozessen vor. Mit diesem System ist es möglich, effizient auf Prozessschwankungen, die beispielsweise durch einen Werkzeugverschleiß hervorgerufen werden, zu reagieren, sodass erforderliche Optimierungsmaßnahmen zielgerichtet eingeleitet werden können.

Im Karosseriebau stellt der Falzprozess einen umformtechnisch relevanten Fertigungsschritt dar, der durch die Falzmethode beschrieben wird. Für die effiziente Planung dieser Methode wird hierbei ebenfalls auf FE-Simulationen und auf spezifische Planungssysteme zurückgegriffen. Burchitz et al. (2011) stellten in diesem Zusammenhang ein spezielles Programmsystem von AutoForm® vor, mit dem Falzprozesse in kurzer Zeit modelliert und für die FE-Simulation vorbereitet werden können. Durch eine automatisierte Erzeugung von Falzwerkzeugen und Werkzeugwegen ist es möglich, den benötigten Zeitaufwand für den gesamten Modellierungsprozess signifikant zu reduzieren, was insbesondere für die Anwendung in der Automobilindustrie von großem Vorteil ist.

Darüber hinaus wurde von Eisele et al. (2010b) ein metamodellbasierter Ansatz zur Prognose des Einrollverhaltens beim Rollfalzen von Karosseriebauteilen vorgestellt. Mit Hilfe von Regressionsanalysen wurden hierbei Metamodelle aufgebaut, die unter anderem den funktionalen Zusammenhang zwischen verschiedenen Falzrollenzustellungen und dem dabei resultierenden Falzverlust wiedergeben. Ein Ansatz zur metamodellbasierten Ermittlung von spezifischen Falzergebnissen aus Backenfalzprozessen unter Berücksichtigung unterschiedlich gekrümmter Bauteilkonturen wurde von Zhang et al. (2000) dargelegt. Dabei wurden die Falzkonturen in verschiedene Klassen eingeteilt und die geometrierelevanten Parameter mit statistischen Verfahren variiert. Durch anschließende Regressionsanalysen konnte ein mathematischer Zusammenhang zwischen den geometrischen Parametern und den Auswertegrößen Falzverlust, Oberflächenabzeichnung, Rücksprungverhalten sowie den Kräften für das Vor-und Fertigfalzen hergeleitet werden. Ergänzend zu diesen Untersuchungen wurden daraufhin von Zhang et al. (2003) mögliche Maßnahmen zur Optimierung des Backenfalzprozesses an geraden Falzkonturen untersucht. Hierbei wurden verschiedene Produkt- und Prozessparameter, wie unter anderem Blechdicke, Flanschlänge und Werkzeugzustellung, mit Hilfe von statistischen Verfahren variiert. Anschließend wurden durch Regressionsanalysen Antwortflächen erstellt, die als Basis für eine Prozessoptimierung in Bezug auf die Auswertegrößen Falzverlust, Oberflächenabzeichnung und Rücksprungverhalten herangezogen wurden.

2.2.3 Simulationsgestützte Planung der Falzmethode

In der Karosserieteilefertigung werden bei der Auslegung von Falzprozessen unter anderem die Fertigungsschritte, die erforderlichen Falzwerkzeuge und der geplante Gesamtablauf zum Falzen der Bauteile in der sogenannten Falzmethode festgelegt. Die Falzmethode stellt somit ein Dokument dar, das die spezifischen Anforderungen des geplanten Herstellungsprozesses beschreibt. Auf dieser Grundlage wird daraufhin die Anlagen- und Falztechnik ausgelegt. Um hierbei im Vorfeld eine gute Planung zu ermöglichen, finden im Rahmen der Falzmethodenerstellung üblicherweise verschiedene produkt- und prozessbezogene Absicherungsmaßnahmen statt. Eine Übersicht der gängigsten Maßnahmen ist hierzu in Tabelle 2.1 aufgelistet.

Tabelle 2.1: Produkt- und prozessbezogene Absicherungsmaßnahmen bei der Falzmethodenerstellung

Kategorie	**Absicherungsmaßnahmen**
Produkt	Absicherung der Maßhaltigkeit des Falzes → Definition von Flanschlängen → Definition von Falzzugaben
	Absicherung gegen Faltenbildung → Definition von Flanschrückschnitten
	Absicherung gegen Bauteilversagen durch Reißer → Maßnahmen gegen Risse am Biegeradius → Maßnahmen gegen Risse am Falzflansch
Prozess	Absicherung des Falzprozesses → Einsatz der Falztechnik (bspw. Roll- oder Backenfalzen) → Zugänglichkeit für Falzwerkzeuge → Auslegung der Einlegekinematik für Innenteile
	Absicherung der Maßhaltigkeit des Gesamtbauteils → Ermittlung von prozessbedingten Einflussfaktoren → Richtungsdefinition für Rollfalzbahnen
	Absicherung der Prozesszeiten → Anzahl an Falzschritten pro Flansch → Erforderliche Nachdrückoperationen
	Absicherung der Layout-Planung → Anordnung und Flächenbedarf der Falzstation → Werkzeuge und weiteres Equipment

Um bereits in den frühen Fahrzeugprojektphasen eine produktbezogene Auslegung der Falzmethode zu ermöglichen, wird hierbei vermehrt auf simulationsgestützte Systeme zurückgegriffen. Dabei steht zunächst die fertigungstechnische Herstellbarkeit des gefalzten Karosseriebauteils im Vordergrund. Mit Hilfe von FE-Simulationen können in diesem Zusammenhang verschiedene Varianten für den geplanten Fertigungsprozess untersucht und zielgerichtet optimiert werden. Eine der Kernaufgaben ist hierbei eine Absicherung des Herstellungsprozesses gegen Bauteilversagen sowie hinsichtlich der geforderten Qualitätsmerkmale (Rössinger 2015).

Im Anschluss an die produktbezogenen Absicherungsthemen gewinnen zunehmend die prozessbezogenen Optimierungsmaßnahmen an Bedeutung. Hierzu werden neben FE-Simulationen auch Mehrkörpersimulationen eingesetzt, um den Anlagenablauf für eine virtuelle Inbetriebnahme und eine Offline-Programmierung zu optimieren. Parallel zu den durchgeführten digitalen Absicherungsmaßnahmen wird die Falzmethode im weiteren Projektverlauf stetig weiterentwickelt, indem zusätzlich die Erkenntnisse aus der Prototypteilefertigung in die Ausdetaillierung miteinfließen. Eine Übersicht des dabei zugrunde gelegten, prinzipiellen Prozessablaufs ist hierzu in Abbildung 2.6 dargestellt.

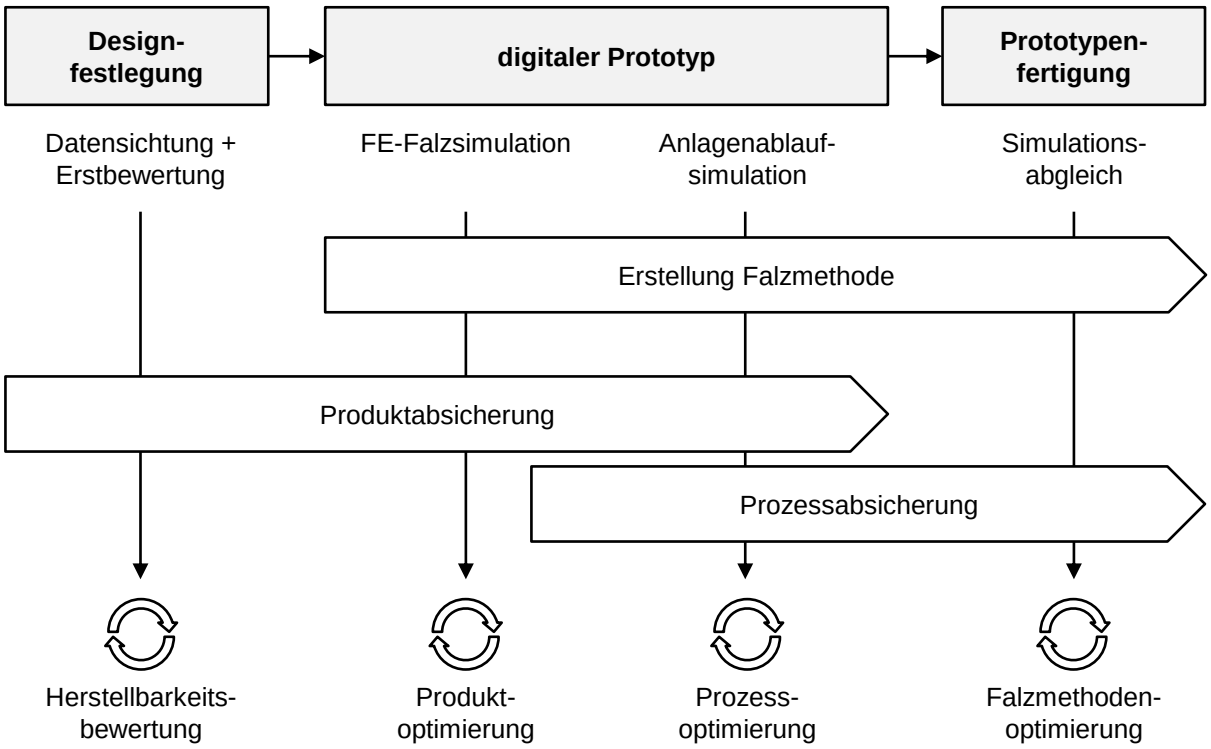


Abbildung 2.6: Prinzipieller Prozessablauf zur Absicherung des Herstellungsprozesses Falzen in einem Fahrzeugprojekt

Grundsätzlich sind bei der Auslegung von Falzprozessen im automobilen Umfeld verschiedene Bereiche, wie Bauteilentwicklung, Methodenplanung, Rohbauplanung, Anlagenbau und Prototypenfertigung direkt oder indirekt involviert. Eine besondere Schnittstelle besteht dabei zur presswerkseitigen Methodenplanung. Da unter anderem die Flanschstellungen, die erforderlichen Falzzugaben sowie die Konturbeschnitte des presswerkfallenden Einzelteils für den geplanten Falzprozess bauteilspezifisch ausgelegt werden müssen, wird hierdurch der presswerkseitige Methodenplan für die zu falzenden Karosseriebauteile mitbeeinflusst (Birkert et al. 2013, S. 668-669). Um geänderte produkt- oder prozessbezogene Anforderungen in der Falzmethode berücksichtigen zu können, sind somit während eines Fahrzeugprojekts wiederkehrende Optimierungsschleifen sowie fortlaufende Simulationen zur Produkt- und Prozessabsicherung erforderlich.

2.2.4 Falzsimulationen in der virtuellen Fertigungsprozesskette

Für eine frühzeitige Absicherung der Planungsumfänge hinsichtlich Herstellbarkeit und Zielerreichung werden in der Automobilindustrie Methoden und Prozesse angewendet, die auf der Basis von digitalen Fahrzeugdaten beruhen (Spindler et al. 2015). In Bezug auf die Blechteilefertigung werden durch die digitalen Absicherungsmaßnahmen dabei unter anderem die Planungsprozesse im Presswerk, im Rohbau, in der Lackierung und in der Montage kontinuierlich optimiert. Durch einen Zusammenschluss der beteiligten Bereiche entsteht eine Fertigungsprozesskette, wie sie schematisch in Abbildung 2.7 am Beispiel für die Herstellung und den Verbau von Karosseriebauteilen dargestellt ist.

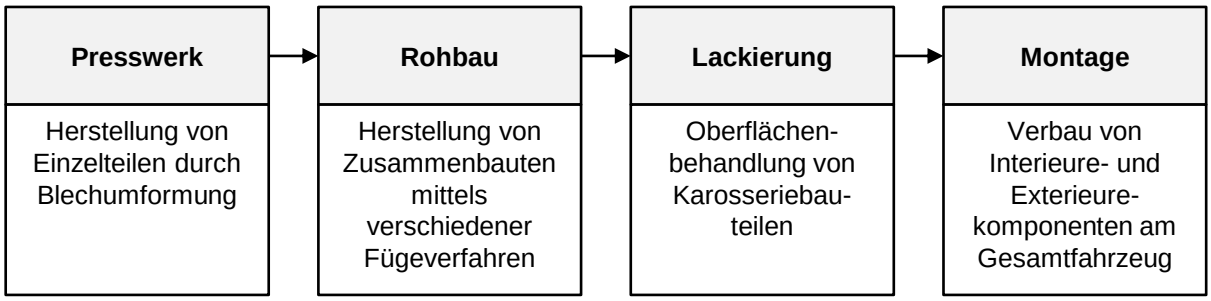


Abbildung 2.7: Fertigungsprozesskette für die Herstellung und den Verbau von Karosseriebauteilen

Grundsätzlich sind für die Blechteilefertigung neben den reinen Machbarkeitsanalysen die Prozesse relevant, die zu einer Veränderung der Materialstruktur und damit zu einer Veränderung der Bauteileigenschaften führen (Roll 2011). Mit dem Bestreben einer durchgängigen virtuellen Fertigungsprozesskette wird ein Ansatz verfolgt, das Zusammenspiel der diversen Fertigungs-

einflüsse aus den jeweiligen Einzelprozessen anhand von Computersimulationen zu untersuchen, sodass auf dieser Grundlage entsprechende Optimierungsmaßnahmen wirkungsvoll und zielgerichtet definiert werden können. Dabei liegt der Fokus insbesondere auf der Absicherung der Gesamtmaßhaltigkeit einer Zusammenbaugruppe unter der Berücksichtigung von maßbestimmenden Fertigungseinflüssen (Poelmeyer et al. 2015).

Im Bereich der presswerkseitigen Methodenplanung ist die FE-Simulation der Umform- sowie der Beschnitt- und Abstelloperationen ein fester Bestandteil der Bauteilauslegung (Roll 2007). Die Maßhaltigkeit des Einzelteils kann hierbei durch Rückfederungssimulationen bestimmt werden, bei denen die Formabweichung zu einem Soll-Bauteil durch das Entfernen der äußeren Lasten nach dem Umformprozess berechnet wird (Roll 2011). Auf dieser Grundlage können nun spezifische Überbiegungsstrategien für das Umformwerkzeug definiert werden, sodass die Bauteilrückfederung kompensiert und dadurch die Fertigung maßhaltiger Einzelteile ermöglicht wird (Schroeder 2007).

Im weiteren Verlauf der Fertigungsprozesskette werden aus den umgeformten Karosserieeinzelteilen im Rohbau Zusammenbaugruppen erstellt, deren Gesamtmaßhaltigkeit wiederum von den dort eingesetzten Fügeverfahren und der Spanntechnik mitbeeinflusst wird. In der Arbeit von Eckert (2012) wurde in diesem Zusammenhang der Einfluss von punktförmigen, mechanischen Fügeverfahren, wie beispielsweise Durchsetzfügen, Halbholstanznieten und Vollstanznieten, auf die Gesamtmaßhaltigkeit einer Baugruppe untersucht und ein Ansatz zur numerischen Simulation des Zusammenbauprozesses vorgestellt. Darauf aufbauend wurde die Robustheit der Fertigungsprozesskette Umformen und Fügen von Konrad et al. (2016) anhand von simulationsgestützten Untersuchungen analysiert. Hierbei wurden spezifische Parameter in Bezug auf den Umform- und Fügeprozess variiert, um unter anderem den Effekt auf die Maßhaltigkeit der Zusammenbaugruppe weitergehend zu ermitteln. In der Arbeit von Kästle (2016) wurde insbesondere der Einfluss, der durch das Rollfalzen hervorgerufen wird, betrachtet und diesbezüglich ein Ansatz zur simulationsgestützten Bewertung der Gesamtmaßhaltigkeit vorgestellt.

Die FE-Falzsimulation ist somit im Rahmen der Falzmethodenerstellung nicht nur ein Hilfsmittel zur Produkt- und Prozessabsicherung, sondern stellt auch einen wichtigen Bestandteil zur Realisierung einer durchgängigen virtuellen Fertigungsprozesskette dar. Abbildung 2.8 zeigt hierzu eine Einordnung der FE-Falzsimulation innerhalb der virtuellen Fertigungsprozesskette in Bezug auf die presswerk- und rohbaurelevanten Simulationsabfolgen während eines Fahrzeugentwicklungsprozesses.

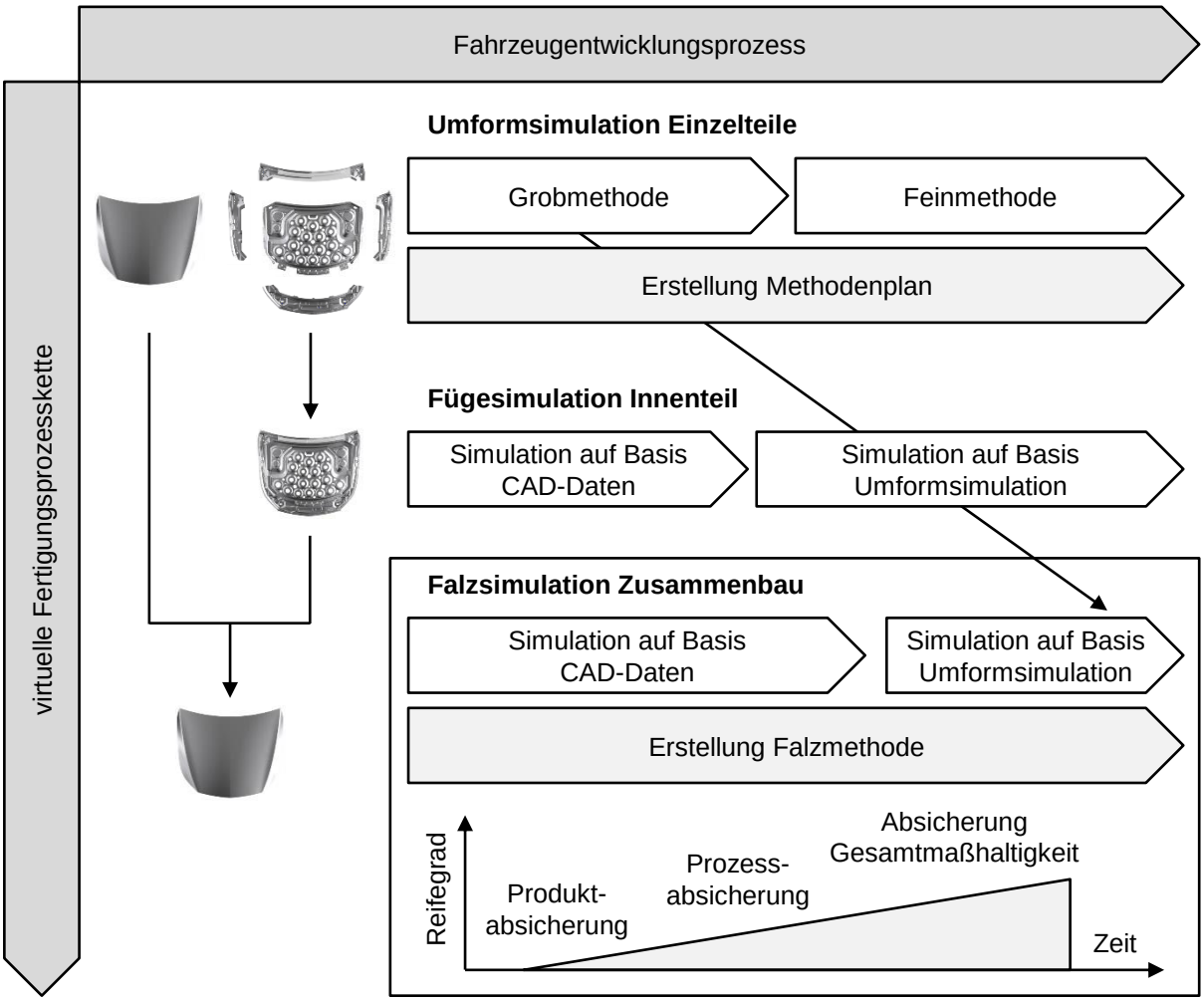


Abbildung 2.8: Einordnung der FE-Falzsimulation im Fahrzeugentwicklungsprozess und in der virtuellen Fertigungsprozesskette

In den frühen Projektphasen eines Fahrzeugentwicklungsprozesses findet hierbei in der Regel ein Simultaneous Engineering der entsprechenden Fertigungsschritte statt. Für die FE-Falzsimulation bedeutet das, dass hierzu eine spezifische Produktoptimierung zunächst auf der Basis von CAD-Bauteildaten erfolgt. Eine Umformhistorie, die Rückschlüsse über die vorausgehenden Fertigungseinflüsse liefert, kann in dieser Phase nicht berücksichtigt werden. Im Vordergrund steht hierbei in erster Linie eine Reifegradsteigerung hinsichtlich einer produktionsgerechten Produktgestaltung. Im weiteren Projektverlauf wird daraufhin vermehrt auf bereits bestehende Simulationen der vorausgehenden Prozessschritte zurückgegriffen, sodass die virtuelle Fertigungsprozesskette schrittweise aufgebaut werden kann. Aufgrund der bis dato erzielten Reifegradsteigerung hinsichtlich der falztechnisch relevanten Produkt- und Prozessthemen, wandert der Fokus in diesen Phasen verstärkt auf die Absicherung der Gesamtmaßhaltigkeit der Zusammenbaugruppe unter Berücksichtigung des in der Falzmethode definierten Prozessablaufs.

Für die möglichst gute Realisierung einer durchgängigen virtuellen Fertigungsprozesskette ist somit sowohl ein abgestimmtes Zusammenspiel als auch die individuelle Effizienz der jeweiligen Prozessbestandteile entscheidend. Die simulationsgestützte Definition von produkt- und prozessrelevanten Maßnahmen zur effizienten Absicherung und Auslegung von Falzvorgängen stellt hierbei eine wichtige Schlüsselfunktion dar.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird nun zunächst die Ausgangssituation beschrieben, die die Grundlage der vorliegenden Arbeit bildet. Anschließend wird auf deren Zielsetzung eingegangen und die hierzu zugrunde gelegte Vorgehensweise vorgestellt.

3.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Zur Absicherung der Herstellbarkeit von gefalzten Karosseriebauteilen werden in der Automobilindustrie vermehrt digitale Methoden eingesetzt. Hierbei kommen unter anderem Falzsimulationen zum Einsatz, die auf der Methode der finiten Elemente beruhen und die eine Prognose des zu erwartenden Bauteilverhaltens ermöglichen. Neben der Detektion von falten- oder risskritischen Bauteilbereichen kann ebenso die Erreichung einer geforderten Bauteilmaßhaltigkeit prognostiziert werden.

Die Durchführung und Auswertung dieser Simulationen ist derzeit jedoch mit einem signifikanten Arbeits- und Zeitaufwand verbunden, da die Simulationsmodelle hierbei bauteilspezifisch aufgebaut, berechnet und ausgewertet werden müssen. Insbesondere im Umfeld der Automobilindustrie ist durch die steigende Anzahl an Fahrzeugderivaten, sowie durch die strikter werdenden Vorgaben für immer kürzer werdende Entwicklungszeiten, eine möglichst effiziente Bauteilbewertung anzustreben. Besonders in den frühen Fahrzeugentwicklungsphasen, in denen das Design der Fahrzeugaußenhaut noch nicht final festgelegt ist, fließen stetig Bauteiländerungen in den Konstruktionsprozess ein. Die Umrisskonturen und Dimensionen der Bauteile werden hierbei immer wieder an die neuen Designanforderungen angepasst. Aufgrund dieser stetigen konstruktiven Bauteiländerungen ist eine Bewertung der Herstellbarkeit mittels FE-Simulationen wegen des hohen Modellierungs- und Rechenaufwands in diesen frühen Projektphasen nicht zweckmäßig.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, bereits in den frühen Fahrzeugprojektphasen eine effiziente Auslegung des Falzprozesses zu ermöglichen, indem eine metamodellbasierte Produkt- und Prozessabsicherung realisiert werden soll. In Abbildung 3.1 ist der hierfür zugrunde gelegte Ansatz dargestellt.

Die Bewertung der Herstellbarkeit soll hierbei auf Grundlage erster Design-Datenstände stattfinden können, um somit eine Möglichkeit zu schaffen, bereits in den frühen Fahrzeugprojektphasen eine Machbarkeitsbewertung durchzuführen und eine produktionsgerechte Produktgestaltung definieren zu können. Darüber hinaus sollen hierdurch auch Prozesseinflüsse frühzeitig identifiziert werden, damit die Auslegung von Falzprozessen verbessert wird. Durch das

effiziente Definieren von Optimierungsmaßnahmen soll letztlich die Qualität des gesamten digitalen Absicherungsprozesses gesteigert werden.

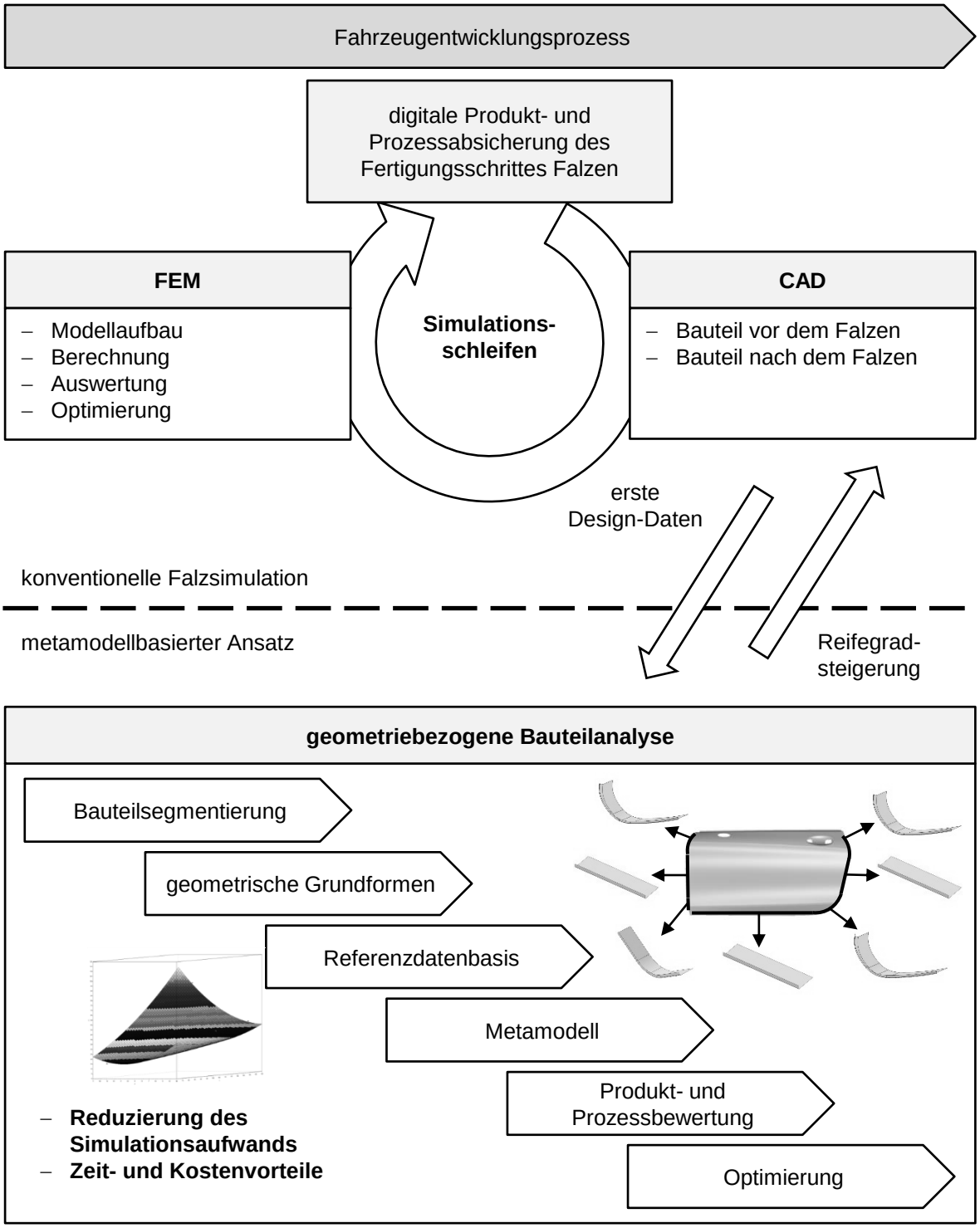


Abbildung 3.1: Ansatz für eine metamodellbasierte Produkt- und Prozessabsicherung von gefalzten Karosseriebauteilen

Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der falzspezifischen Auslegung der presswerkfallenden Beplankung. Für den Methodenplaner im Presswerk stellt die Fertigung dieses Bauteils eine Zielgröße dar, die durch eine geeignete Auslegung der Operationsfolgen und insbesondere der Beschnittkurve erreicht werden muss. Für das Falzen stellt dieses Bauteil hingegen eine Eingangsgröße dar. Hieraus resultiert eine wichtige Schnittstelle zwischen Presswerk und Rohbau. Dabei ist es besonders wichtig, den Einfluss der produkt- und prozessseitigen Parameter beim Falzen frühzeitig zu erfassen und aufzuschlüsseln, damit eine möglichst effiziente Fertigungsstrategie für den Presswerk- und Rohbauprozess festgelegt werden kann. Als Beispiel sei an dieser Stelle die Definition der Vorhaltemaße Falzzugabe und Flanschlänge am abgekanteten, presswerkfallenden Beplankungsteil genannt, die anhand des Falzprozesses ermittelt werden und daraufhin in den Methodenplan für das Presswerk miteinfließen.

3.2 Darlegung der Vorgehensweise

Der Kerngedanke zur Ermöglichung einer frühzeitigen und effizienten Auslegung von Falzprozessen besteht in der Entwicklung eines Assistenzsystems, welches eine geometrieabhängige Bauteilbewertung beinhaltet und mit Hilfe eines metamodellbasierten Ansatzes auf das Wissen von bereits bekannten Karosseriekonturen in Form einer Referenzdatenbasis zurückgreift.

In einem ersten Schritt wird dazu in Kapitel 5.1 zunächst der Einfluss von verschiedenen Produkt- und Prozessparametern auf das Falzergebnis untersucht. Anhand von Versuchen werden insbesondere die Parameter ermittelt, die bei der Definition des metamodellbasierten Ansatzes berücksichtigt werden müssen.

Daraufhin wird in Kapitel 5.2 eine Methodik für eine geometriebezogene Bauteilanalyse definiert, mit der charakteristische Karosseriekonturverläufe erfasst und bewertet werden können. Hierzu wird ein Ansatz erarbeitet, mit dem ein zu analysierendes Karosseriebauteil in individuelle Bauteilsegmente aufgegliedert und ersatzweise durch geometrische Grundformen wiedergegeben werden kann.

Auf dieser Basis wird in Kapitel 5.3 ein allgemeingehaltener und erweiterbarer Metamodellansatz definiert, mit dem ein entsprechender Bauteilzustand nach dem Falzen für die jeweiligen geometrischen Grundformen prognostiziert werden kann. Hierfür wird eine Referenzdatenbasis mit spezifischen geometrischen Grundformen herangezogen auf deren Grundlage eine Bewertung von ähnlich gestalteten geometrischen Grundformen erfolgt. Durch eine segmentweise Auswertung kann daraufhin das Gesamtverhalten des gefalzten Karosseriebauteils näherungsweise wiedergegeben werden.

Damit eine automatisierte Bauteilanalyse für ein komplexes Karosseriebauteil erfolgen kann, wird hierzu in Kapitel 5.4 ein speziell entwickeltes Falzassistenzprogramm vorgestellt. Dieses stellt auf Basis einer automatisierten Bauteilkonturerkennung die Eingangsgrößen für das definierte Metamodell bereit und gibt die falzspezifischen Auswertegrößen grafisch aufbereitet wieder. Dadurch wird ein Assistenzsystem realisiert, welches den Falzmethodenplaner bei der Auslegung des Falzprozesses in den frühen Fahrzeugprojektphasen effizient unterstützt.

Die Informationen über die falztechnische Herstellbarkeit von bereits bekannten geometrischen Grundformen müssen im Vorfeld in einer Datenbank bereitgestellt werden. In einem weiteren Schritt wird daher in Kapitel 6.1 eine Möglichkeit zum effizienten Aufbau einer geeigneten Referenzdatenbasis angestrebt. Aufgrund der großen Variantenvielfalt an möglichen Umrisskonturen und Falzflanschgestaltungen wird hierzu ein simulationsgestützter Ansatz gewählt. Hierbei steht eine effiziente Simulationsdurchführung im Vordergrund, sodass insbesondere der Modellierungsaufwand, die Anzahl an Simulationsvarianten und die Rechenzeit möglichst gering gehalten werden.

Gleichzeitig ist ein hoher Automatisierungsgrad bei der Simulationsauswertung von großer Bedeutung, um die Ergebnisdaten der jeweiligen geometrischen Grundformen effizient analysieren, bewerten und in die Referenzdatenbasis einpflegen zu können. Aufgrund dieser Anforderungen werden in Kapitel 6.2 spezielle Maßnahmen zur Automatisierung des Modellaufbaus sowie der Simulationsauswertung getroffen. Im Anschluss erfolgt die eigentliche Simulationsdurchführung, um die entsprechende Referenzdatenbasis für den definierten Metamodellaufbau zu generieren.

In einem begleitenden Schritt findet die Modellvalidierung statt. Dabei werden zunächst die Simulationsmodelle, die für den Aufbau der Referenzdatenbasis erforderlich sind, in Kapitel 6.1.3 validiert. Hierfür werden gerade sowie konvex und konkav gekrümmte Versuchsproben in einem Backenfalzversuchswerkzeug gefalzt, sodass anschließend die Ergebnisse mit denen der entsprechenden Simulationsmodelle verglichen werden können. Da anhand dieser Simulationsmodelle die Stützpunkte für den metamodellbasierten Ansatz generiert werden und diese somit die Grundlage zahlreicher Simulationsvarianten darstellen, ist hierbei eine hinreichende Modellgenauigkeit sicherzustellen.

Für die Verifizierung und Validierung des metamodellbasierten Ansatzes werden im weiteren Verlauf sowohl experimentelle Versuche als auch erweiterte FE-Simulationen von seriennahen

Karosseriebauteilen herangezogen. Dabei wird die Prognosegüte des entwickelten Assistenzsystems in Kapitel 7 durch einen Vergleich mit konventionellen FE-Falzsimulationen und mit experimentell gefalzten Karosseriebauteilen ermittelt und die Gültigkeit geprüft.

In einem letzten Schritt wird in Kapitel 8 der Anwendungsbereich der entwickelten, metamodellbasierten Bauteilanalysemethodik in die virtuelle Fertigungsprozesskette eingeordnet. Hierbei wird neben den grundlegenden Möglichkeiten für eine effiziente Produkt- und Prozessabsicherung auch letztlich auf rollfalzspezifische Maßnahmen für eine verbesserte Inbetriebnahme von Karosseriefertigungsanlagen eingegangen.

4 Simulationsprogramme und Versuchseinrichtungen

In der vorliegenden Arbeit wurden für die erforderlichen Untersuchungen sowohl simulationsgestützte als auch experimentelle Versuche durchgeführt. Die verwendeten Simulationsprogramme und Versuchseinrichtungen werden nun im Folgenden vorgestellt.

4.1 Programme für die simulationsgestützten Versuche

Bei der Durchführung der Finite-Elemente-Umformsimulationen wurde überwiegend auf das kommerzielle Simulationsprogramm AutoForm®plus R6 der AutoForm Engineering GmbH zurückgegriffen. Die Software ist speziell für die Simulation der umformtechnischen Fertigungsschritte konzipiert und ermöglicht die Durchführung einer durchgängigen Simulation beginnend vom Beschneiden der Platine bis hin zum Falzen der Bauteile. Alle erforderlichen Modellierungsmaßnahmen, wie die Definition von Werkzeugwegen und Rollfalzbahnen, wurden daher in AutoForm® umgesetzt.

Die grundlegenden Simulationseinstellungen erfolgten dabei auf Basis der Einstellungsvariante „Final Validation“ mit dem Elementtyp „EPS-11“. Bei der Durchführung der Simulationen und der entsprechenden Validierungsmaßnahmen konnte die Ergebnisgenauigkeit durch die Modifizierung spezifischer Parameter weiter gesteigert werden. In diesem Zusammenhang wurden daher zum einen die für die adaptive Netzverfeinerung relevanten Parameter „max. Element Angle“ und „Radius Penetration“ auf die Werte 15,0° und 0,2 mm modifiziert. Zum anderen wurden in den erweiterten Simulationseinstellungen der Parameter „Convergence Tolerance“ auf den Wert 0,5 gesetzt und der für Rollfalzprozesse wichtige Parameter „max. Roller Displacement“ auf den Wert 3,0 mm eingestellt.

Die Vernetzung der Modellgeometrie erfolgt in AutoForm® automatisch mit 3-Knoten-Schalenelementen. In der Simulation stellen die Abkant- und Falzwerkzeuge sowie das Innenteil „Rigid-Bodys“ dar, die auf eine maximale Elementkantenlänge von 10,00 mm begrenzt wurden. Für die umzuformende Platine wurde eine initiale Elementkantenlänge von 5,00 mm definiert. Während der Simulation findet standardmäßig eine adaptive Netzverfeinerung statt. Als weitere Maßnahme wurde für die biegedominierten Umformoperationen eine Netzneuausrichtung definiert, bei der die Elemente während der Simulation entlang der Biegelinie neu orientiert werden. Darüber hinaus wurde eine weitere Netzverfeinerung für die Elemente am Falzflanschende eingerichtet. Hierdurch kann, wie in Abbildung 4.1 dargestellt, sowohl eine geordnete Elementausrichtung entlang der Biegelinie als auch eine gleichmäßige und feine Vernet-

zung am Falzflansch realisiert werden. Dies ist insbesondere bei der Simulation von stark gekrümmten Konturen von Bedeutung, da hierbei eine detaillierte Auswertung der plastischen Dehnungen entlang des Falzflansches erforderlich ist.

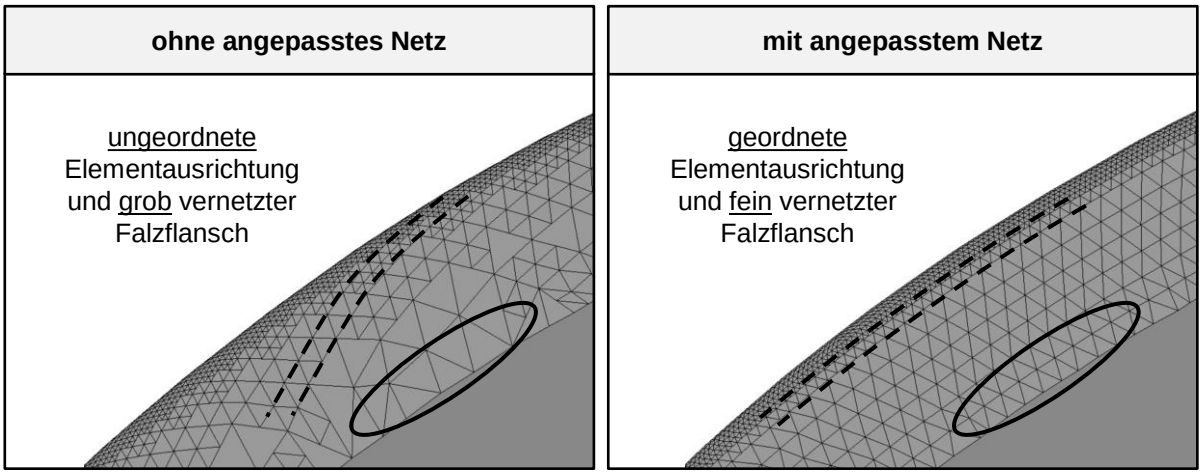


Abbildung 4.1: Vergleich der Elementausrichtung am Falzflansch ohne und mit den Maßnahmen zur Netzanpassung

Die genannten Simulationseinstellungen wurden für alle Simulationen der Prozessschritte Abkanten, Roll- und Backenfalzen angewendet. Darüber hinaus ist bei der Simulationsdurchführung ein werkstoffabhängiger Reibungskoeffizient für den Werkzeug-Blech-Kontakt verwendet worden. Bei Stahlblechen wurde hierzu der Wert 0,15 und bei Aluminiumblechen der Wert 0,12 herangezogen.

In der vorliegenden Arbeit wurden für die simulationsgestützten und die experimentellen Untersuchungen der Aluminiumblechwerkstoff AA6014 im T4-Zustand in einem Alterungszeitfenster von maximal drei Monaten nach Herstellung und der Stahlblechwerkstoff CR4 gemäß VDA 239-100 (VDA 2016) betrachtet. Für die Simulationen mit AutoForm® kamen dabei standardmäßige Materialkarten zum Einsatz, wie sie auch unter anderem im Bereich der Methodenplanung für die Absicherung der presswerkseitigen Herstellungsprozesse verwendet werden. In Abbildung 4.2 sind die entsprechend in der Simulation herangezogenen Materialparameter, Fließkurven und Fließortkurven für den Werkstoff AA6014-T4 dargestellt. Zur Beschreibung der Fließkurve ist hierbei eine Approximation nach Hockett-Sherby und zur Darstellung der Fließortkurve das Modell nach Barlat-89 zugrunde gelegt.

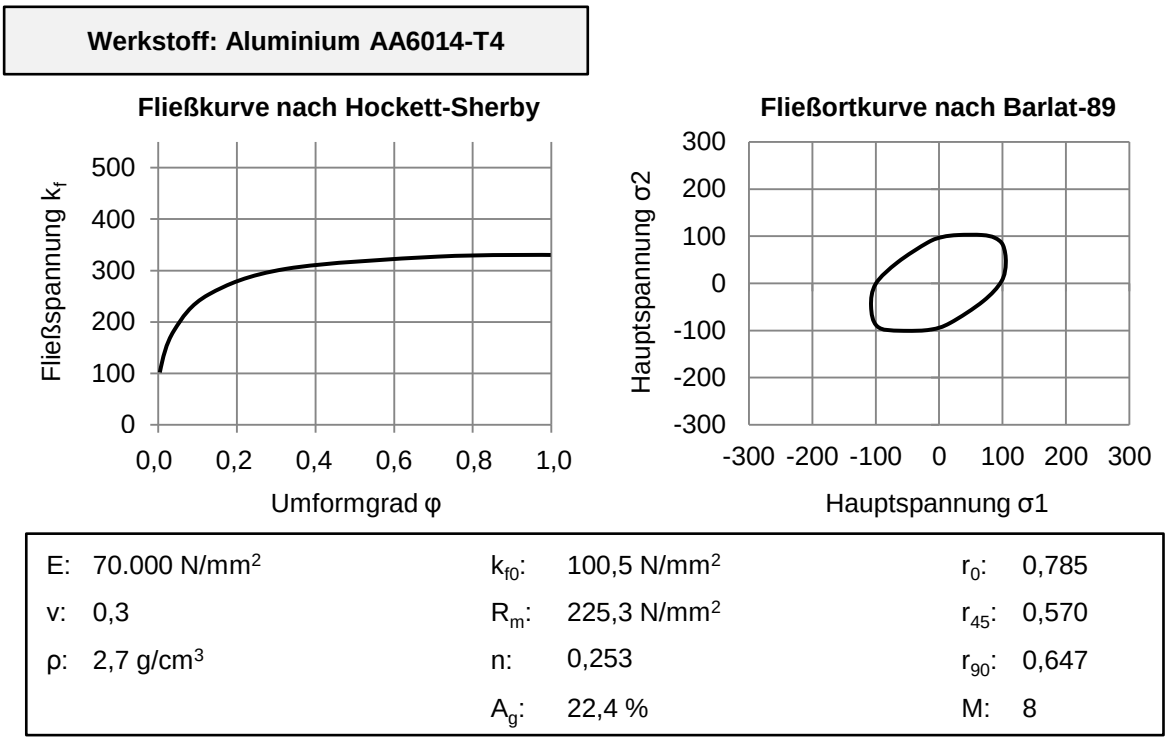


Abbildung 4.2: In der Simulation mit AutoForm® verwendete Fließkurven und Fließortkurven für den Werkstoff AA6014-T4

Analog dazu sind die entsprechend in der Simulation verwendeten Materialkenngrößen des Werkstoffs CR4 in Abbildung 4.3 dargestellt. Die Werkstoffeigenschaften werden hierbei durch eine Fließkurvenapproximation nach Ghosh und dem Fließortkurvenmodell nach Hill-48 beschrieben.

Neben dem Programm AutoForm®plus R6 wurde darüber hinaus zur Durchführung weiterführender Versuche das von der Livermore Software Technology Corporation entwickelte FEM-Berechnungsprogramm LS-DYNA® verwendet. Hierbei kam die Solver-Version 7.0 zum Einsatz. Alle Maßnahmen zum Modellaufbau und zur Simulationsauswertung wurden dabei mit dem Programm LS-PrePost® in der Version 4.0 unternommen.

Um zwischen den beiden Simulationsprogrammen eine gute Vergleichsmöglichkeit zu realisieren, wurden hierzu bei der Simulation mit LS-DYNA® alle Umformwerkzeuge, analog zu der Modellierung in AutoForm®, mit Schalenelementen vernetzt und als „Rigid-Bodys“ definiert. Darüber hinaus wurden sämtliche Randbedingungen, wie beispielsweise Art des Modellaufbaus, Reibzahlen und Kontaktbedingungen, so weit wie möglich übernommen.

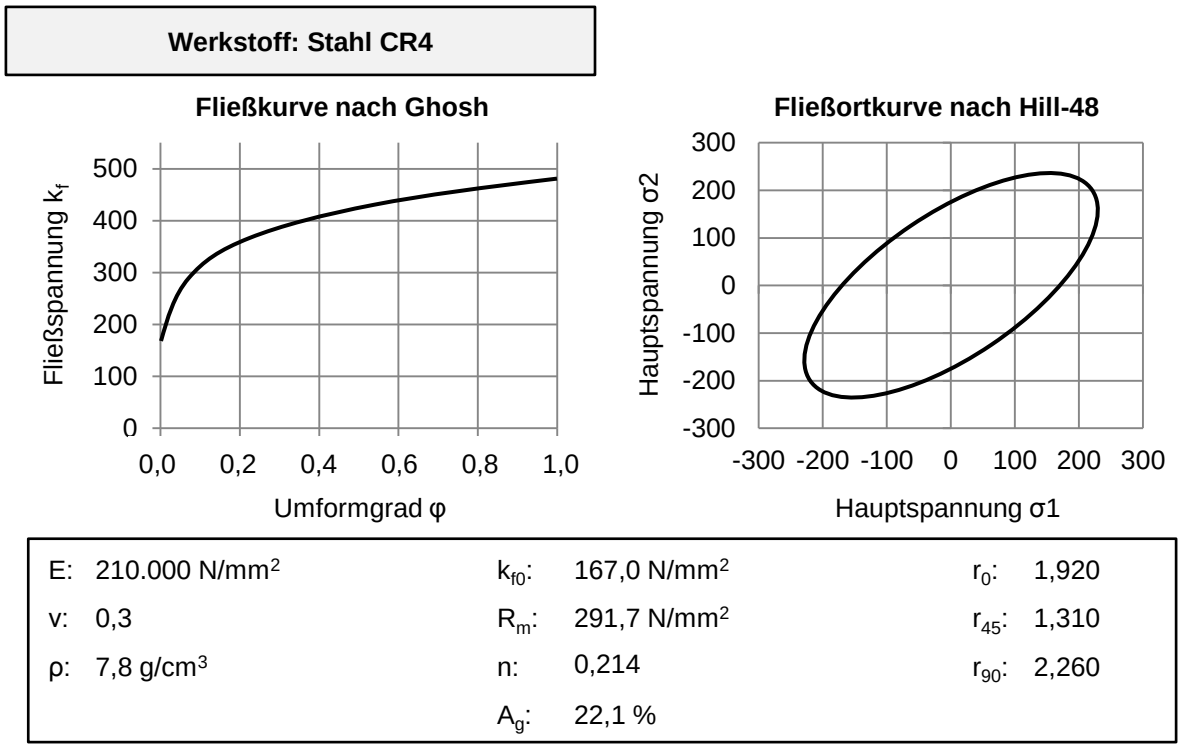


Abbildung 4.3: In der Simulation mit AutoForm® verwendete Fließkurven und Fließortkurven für den Werkstoff CR4

Da bei den entsprechenden Untersuchungen mit LS-DYNA® ein bewusst hoher Detaillierungsgrad der Simulation zugrunde gelegt werden sollte, ist die umzuformende Platine mit fein vernetzen 8-Knoten-Volumenelementen und mehreren Elementschichten über der Blechdicke modelliert worden. Die hierzu gewählten Parameter sind auszugsweise in Tabelle 4.1 aufgeführt.

Tabelle 4.1: Übersicht der Modellparameter für das FE-Simulationsmodell in LS-DYNA®

Materialmodell	Elementtyp	Kantenlänge [mm]	Layer über Blechdicke
*MAT_033	Solid Typ 1	0,3 x 0,3 x 0,1	9

Aufgrund der fein gestalteten Vernetzung wurde während der Simulation auf eine adaptive Netzverfeinerung verzichtet. Darüber hinaus wurden alle Simulationen ohne Massenskalierung und mit dem Verfahren der expliziten Zeitintegration durchgeführt.

4.2 Versuchseinrichtungen für die experimentellen Versuche

Neben den simulationsgestützten Versuchen zur grundlegenden Erfassung von falztechnisch relevanten Produkt- und Prozessparametern wurden insbesondere für die Durchführung von entsprechenden Validierungsmaßnahmen experimentelle Roll- und Backenfalzversuche herangezogen.

Für die Backenfalzversuche wurde dabei ein modulares Backenfalzversuchswerkzeug der Daimler AG verwendet. Der grundlegende Werkzeugaufbau besteht hierbei, wie in Abbildung 4.4 dargestellt, aus spezifischen Werkzeugelementen, mit denen gerade, konvex und konkav gestaltete, ebene Versuchsproben zunächst abgekantet und anschließend vor- und fertiggefalzt werden können. Hierzu wurde je nach Anwendungsfall ein entsprechender Werkzeugsatz herangezogen, um somit das Falzen der unterschiedlich gestalteten Versuchsproben zu ermöglichen.

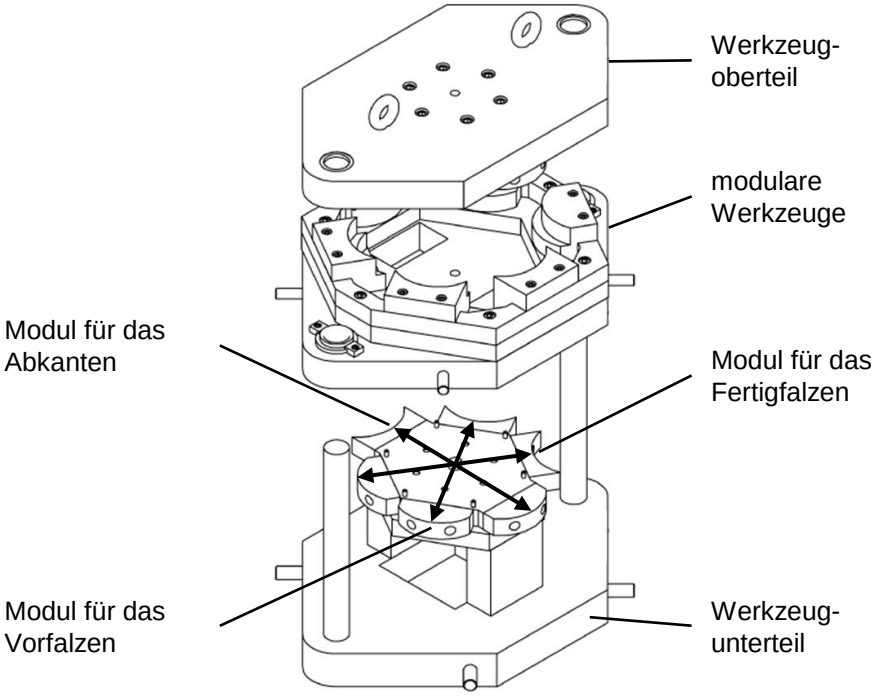


Abbildung 4.4: Versuchseinrichtung für die backenfalzspezifischen Validierungsmaßnahmen an einfach gestalteten Versuchsproben

Für die experimentellen Rollfalzversuche wurden seriennahe Karosseriebauteile verwendet, die in spezifischen Rollfalzversuchszellen gefalzt wurden. Bei der Versuchsdurchführung wurden die abgekanteten Karosseriebauteile unter möglichst seriennahen Bedingungen gefalzt. Um darüber hinaus unterschiedliche Einflussfaktoren bei der Durchführung der Validierungsmaß-

nahmen untersuchen zu können, wurden neben den seriennahen auch modifizierte Bauteile herangezogen. In Abbildung 4.5 ist hierzu beispielhaft eine entsprechende Rollfalzversuchszelle dargestellt.

Abbildung 4.5: Versuchseinrichtung für die rollfalzspezifischen Validierungsmaßnahmen an seriennahen Karosseriebauteilen

Die Versuchszellen sind hierbei standardmäßig mit einem Falzroboter, einem drehbaren Falzbett sowie einem koppelbaren Niederhalter ausgestattet und dienen im Allgemeinen zur prototypischen Absicherung von Karosseriebauteilen.

Bei der messtechnischen Auswertung der gefalzten Versuchsproben und der Karosseriebauteile standen in erster Linie die Bewertung der sichtbaren Faltenbildung am Falzflansch und die Beurteilung der geometrischen Maßhaltigkeit des Falzes im Vordergrund. Um hierbei insbesondere eine Vergleichsmöglichkeit mit den Ergebnissen aus der FE-Simulation zu ermöglichen, wurden die Bauteile hierzu digitalisiert. Hierfür kam zum einen das optische Messsystem ARGUS® der Firma GOM GmbH zum Einsatz, das durch eine Bestimmung von 3D-Koordinaten ein fein aufgelöstes Netz mit der Oberfläche des gemessenen Bauteils bereitstellt und somit beispielsweise eine computerbasierte Auswertung von Falzflanschwelligkeiten ermöglicht.

Zum anderen wurde das optische Profilmessgerät CALIPRI® der Firma NEXTSENSE GmbH zur Beurteilung der geometrischen Maßhaltigkeit des Falzes verwendet, mit dem Profilformen der gemessenen geometrischen Daten ausgewertet und mit Soll-Profilen verglichen werden können. Aufgrund des portablen Systems ist es darüber hinaus möglich, in situ Messungen

durchzuführen und somit während der Versuchsdurchführung die Querschnittsprofile der Bauteile in eingespannter Falzbettlage an definierten Stellen aufzunehmen. Diese Messmöglichkeit bietet insbesondere bei der Ermittlung des Falzverlustes Vorteile. Messungen können direkt am Versuchsaufbau mit eingespannten Bauteilen durchgeführt werden, um somit das Flanschprofil vor und nach dem Falzen ohne Bauteilneuausrichtung aufnehmen zu können.

5 Entwicklung eines Assistenzsystems

In diesem Kapitel wird die Entwicklung eines Assistenzsystems vorgestellt, mit dem eine effiziente, metamodellbasierte Auslegung des Falzprozesses ermöglicht wird.

Als Metamodelle werden in der Regel mathematische Formulierungen verstanden, mit denen ein funktionaler Zusammenhang zwischen definierten Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems wiedergegeben werden kann. Im Vergleich zu FE-Simulationsmodellen, die teilweise lange Rechenzeiten aufweisen, kann hierdurch das Systemverhalten innerhalb kürzester Zeit für die geltenden Rahmenbedingungen berechnet werden. Aufgrund der hohen Komplexität des Falzprozesses im Karosseriebau sind bei der Definition des Assistenzsystems und der Metamodellformulierung spezielle Anforderungen zu berücksichtigen. Durch die zahlreichen Produkt- und Prozessvarianten beim Falzen resultieren viele Einflussgrößen, deren Abhängigkeiten im Vorfeld erfasst werden müssen.

In diesem Zusammenhang erfolgt zunächst eine Auswahl von systemrelevanten Falzparametern. Anschließend wird eine Methodik vorgestellt, mit der komplexe Karosseriekonturen durch einfache geometrische Grundformen ersatzweise wiedergegeben werden können, womit die Grundlage für eine geometriebezogene Bauteilanalyse geschaffen wird. Um unterschiedliche Produkt- und Prozessvarianten abbilden zu können, wird daraufhin eine geeignete Metamodellformulierung angestrebt. Hierzu wird ein Metamodellaufbau definiert, der auf einem elementbasierten Ansatz beruht. Darauf aufbauend konnte anschließend ein spezielles Falzassistenzprogramm zur effizienten Auslegung von Falzprozessen erstellt werden, in welchem eine Funktionsweise für eine automatisierte Bauteilanalyse implementiert ist.

5.1 Allgemeine Anforderungen und systemrelevante Parameter

Im Folgenden werden nun zunächst die allgemeinen Anforderungen an das Assistenzsystem beschrieben. Anschließend wird auf die Einflussgrößen beim Falzen von Karosseriebauteilen eingegangen, um auf dieser Grundlage die systemrelevanten Produkt- und Prozessparameter ermitteln zu können.

5.1.1 Anforderungen an das Assistenzsystem

Für eine effiziente Absicherung des Herstellungsprozesses von gefalzten Karosseriebauteilen wird die Entwicklung eines speziellen Assistenzsystems angestrebt. Das System soll hierbei eine Möglichkeit bieten, beliebige Karosseriebauteile in Bezug auf deren falztechnische Herstellbarkeit bewerten und absichern zu können. In diesem Zusammenhang ist es notwendig, dass das Assistenzsystem alle falztechnisch relevanten Parameter berücksichtigen und insbesondere die Effekte von verschiedenen Produkt- und Prozessvarianten auf das Falzergebnis wiedergeben kann.

Die Bewertung der Herstellbarkeit soll dabei durch eine Bauteilanalyse auf Basis erster CAD-Bauteildaten erfolgen können, um somit bereits in den frühen Fahrzeugprojektphasen die Umsetzung einer produktionsgerechten Produktgestaltung vorantreiben zu können. Um hierbei eine anwenderfreundliche Benutzerumgebung zu schaffen, ist es notwendig, dass möglichst viele Eingangsgrößen für das Assistenzsystem bei der Bauteilanalyse automatisch erfasst und ausgewertet werden. Bei der Ergebnisermittlung ist daher eine spezielle Bauteilanalysemethodik vorzusehen, die speziell für die Anforderungen beim Falzen von Karosseriebauteilen ausgelegt ist. Hierzu ist insbesondere die Definition eines geeigneten Metamodellansatzes von großer Bedeutung, um die zahlreichen falztechnisch relevanten Auswertegrößen effizient ermitteln zu können.

Darüber hinaus ist eine intuitiv bedienbare Benutzeroberfläche entscheidend, um eine bestmögliche Anwenderfreundlichkeit zu realisieren. Darunter fällt auch, dass die Darstellung der Ergebnisse hierbei speziell für die falztechnischen Fragestellungen konzipiert sein muss, sodass eine effiziente Bewertung der Herstellbarkeit erfolgen kann und ebenso mögliche Optimierungsmaßen für die Verbesserung der Falzbarkeit des Bauteils unmittelbar abgeleitet werden können.

5.1.2 Einflussgrößen beim Falzen von Karosseriebauteilen

Das Falzen von Karosseriebauteilen ist durch eine Vielzahl an möglichen Varianten geprägt, bei denen grundsätzlich zwischen produkt- und prozessbezogenen Einflussgrößen unterschieden werden kann. In Tabelle 5.1 sind hierzu die wichtigsten Produktparameter aufgelistet.

Tabelle 5.1: Produktbezogene Einflussgrößen beim Falzen

Produktparameter	Flanschlänge
	Öffnungswinkel
	Falzzugabe
	Bauteilkontur
	Blechdicke von Beplankung und Innenteil
	Werkstoff
	Umformhistorie
	Walzrichtung
	Lage des Innenteils während dem Falzen

Anhand dieser Parameter lassen sich die Produkteigenschaften von Karosseriebauteilen charakterisieren. Darüber hinaus unterliegt das Falzen dem Einfluss diverser Prozessparameter. Die wichtigsten sind hierzu in Tabelle 5.2 aufgeführt.

Tabelle 5.2: Prozessbezogene Einflussgrößen beim Falzen

Prozessparameter	Roll- oder Backenfalzprozess
	Werkzeug- bzw. Falzrollengestaltung
	Werkzeug- bzw. Falzrollenzustellung beim Vorfalzen
	Anzahl der Falzschritte
	Spann- und Fixierkonzept während dem Falzen
	Reibung zwischen Werkzeug bzw. Falzrolle und dem zu falzendem Blechteil

Die dargestellte Auflistung verdeutlicht die große Variantenvielfalt, die durch eine Modifikation dieser Einflussgrößen beim Falzen von Karosseriebauteilen entsteht. Gleichzeitig setzen die Anforderungen an eine hohe Bauteilmaßhaltigkeit sowie an einen hohen Automatisierungsgrad in der Bauteilproduktion stabile und robuste Prozesse voraus. Aufgrund der vielen Variationsmöglichkeiten der genannten Produkt- und Prozessparameter ist der Falzprozess dadurch von einer hohen Komplexität geprägt. Auf der anderen Seite ergibt sich allerdings auch eine Möglichkeit die Bauteile gezielt hinsichtlich ihrer Maßhaltigkeit zu beeinflussen, wenn hierzu die Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen den jeweiligen Parametern bekannt sind.

5.1.3 Systemrelevante Produkt- und Prozessparameter

Um aus der Vielzahl der vorliegenden Produkt- und Prozessparameter diejenigen zu identifizieren, die für einen anwendungsorientierten, metamodellbasierten Ansatz relevant sind, ist es im Vorfeld erforderlich, die Effekte der jeweiligen Parameter auf das resultierende Falzergebnis anhand von Sensitivitätsanalysen zu untersuchen.

Neben den diversen Eingangsgrößen müssen hierzu zunächst die notwendigen Auswertegrößen festgelegt werden. Für eine aussagekräftige Bewertung der Herstellbarkeit von gefalzten Karosseriebauteilen sind hierbei insbesondere die nachfolgend aufgeführten Falzergebnisse von Bedeutung:

- Resultierende Flanschlänge nach dem Falzen
- Umrissmaßabweichung zu einem Soll-Bauteil / Falzverlust
- Tendenz zur Faltenbildung am Falzflansch
- Plastische Dehnung am Biegeradius und am Falzflansch

In zahlreichen vergangenen Untersuchungen wurden bereits Effekte von verschiedenen Einflussgrößen auf diverse Falzergebnisse ausführlich dargelegt. Dabei wurden sowohl experimentelle als auch simulationsgestützte Versuche durchgeführt, bei denen einfache sowie komplexere Bauteilkonturen gefalzt wurden. An dieser Stelle seien hierzu beispielhaft die Arbeiten von Livatyali et al. (2000), Zhang et al. (2000), le Maoût et al. (2010a) und Eisele (2012) genannt, bei denen der Einfluss von grundlegenden Produkt- und Prozessparametern auf verschiedene Ergebnisgrößen für das Roll- und das Backenfalzen ermittelt wurden.

Ergänzend zu den genannten Untersuchungen wurden in der vorliegenden Arbeit nun weitere simulationsgestützte Falzversuchsreihen durchgeführt, um die speziell für einen metamodellbasierten Ansatz erforderlichen Parameter zu identifizieren. Für die hierzu durchgeführten Falzsimulationen wurde das in Kapitel 4.1 beschriebene Programm AutoForm®plus R6 mit den aufgeführten Simulationseinstellungen herangezogen. Als Ausgangsbasis wurden einfache Versuchsproben aus dem Aluminiumblechwerkstoff AA6014 im T4-Zustand mit 1,0 mm Innenteil- und Außenteilblechdicke verwendet, die sowohl roll- als auch backengefalzt wurden. Der grundlegende Modellaufbau für die Simulation der einfach gestalteten Grundformen wird dazu noch im späteren Kapitel 6.1.2 detailliert beschrieben. Durch eine Variation von spezifischen Produkt- und Prozessparametern konnte deren Effekt auf die resultierende Flanschlänge, den Falzverlust, die Faltenbildung und die resultierenden plastische Dehnungen untersucht werden. Auf dieser Basis war es daraufhin möglich, die betrachteten Parameter, unter Berücksichtigung

der bereits bekannten Erkenntnisse, miteinander zu vergleichen. Hatte ein Parameter einen vergleichsweise großen Effekt auf die betrachtete Auswertegröße, so wurde dieser als relevant (+) eingestuft. War der Effekt hingegen nur teilweise oder kaum ausgeprägt, wurde die Relevanz als mittel (o) oder niedrig (-) beurteilt. Tabelle 5.3 zeigt hierzu die nach Relevanz sortierte, resultierende Einordnung für die betrachteten Produktparameter.

Tabelle 5.3: Einfluss von Produktparametern auf das Falzergebnis

Produktparameter	**Relevanz**	**Erklärung**
Flanschlänge	+	Einfluss u.a. auf Faltenbildung
Öffnungswinkel	+	Einfluss u.a. auf Faltenbildung und Falzverlust
Falzzugabe	+	Einfluss u.a. auf Umrissmaßhaltigkeit
Bauteilkontur	+	Einfluss u.a. auf Faltenbildung und Falzverlust
Werkstoff	+	Einfluss u.a. auf Faltenbildung
Blechdicke Innenteil	+	Einfluss u.a. auf gefalzte Flanschlänge
Lage des Innenteils	o	Einfluss steigt bei Öffnungswinkeln größer 90°, da das Innenteil auch eine Niederhalterfunktion erfüllt
Umformhistorie	o	Vernachlässigung in früher Projektphase möglich, wenn die Konzeptbewertung im Vordergrund steht
Blechdicke Beplankung	-	Relativ kleine Blechdickenunterschiede der Beplankung, da überwiegend die Innenteilblechdicke variiert
Walzrichtung	-	Kein wesentlicher Effekt erkennbar

Neben den hier aufgezählten Produktparametern wird das resultierende Falzergebnis zusätzlich signifikant von der zugrunde gelegten Prozessausführung beeinflusst. Da der Falzvorgang in die Prozessschritte Vor- und Fertigfalzen untergliedert ist, sind beispielsweise allein beim Rollfalzen bereits durch die Rollenzustellung im entsprechenden Falzschritt zahlreiche Variationsmöglichkeiten für die Prozessausführung gegeben. Hierdurch wird wiederum ein maßgeblicher Einfluss auf das Einrollverhalten des Bauteils und damit auf das Erreichen eines geforderten Soll-Umrissmaßes entlang der Bauteilkontur ausgeübt.

Die aus der simulationsgestützten Versuchsreihe ermittelten, prozessbedingten Einflussgrößen sind hierzu in Tabelle 5.4 aufgelistet und sind ebenfalls nach entsprechender Relevanz eingeteilt.

Tabelle 5.4: Einfluss von Prozessparametern auf das Falzergebnis

Prozessparameter	Relevanz	Erklärung
Falzverfahren	+	Roll- und Backenfalzprozesse zeigen u.a. Unterschiede im Bauteileinrollverhalten
Werkzeuggestaltung	+	Einfluss u.a. auf Falzverlust
Werkzeugzustellung	+	Einfluss u.a. auf Falzverlust
Anzahl Falzschritte	+	Einfluss u.a. auf Faltenbildung und Falzverlust
Spannkonzept	o	Vernachlässigung in früher Projektphase möglich, wenn die Konzeptbewertung im Vordergrund steht
Reibung	o	Bei Backenfalzprozessen relevant

Grundsätzlich sind im Zuge der Herstellbarkeitsbewertung zu falzender Karosseriebauteile alle Produkt- und Prozessparameter, die einen großen Effekt auf das Falzergebnis ausüben, besonders relevant für die Definition von Optimierungsmaßnahmen. Insbesondere für die frühzeitige Auslegung von Falzprozessen sind dabei die Kenntnisse über mögliche Prozessfenster, die zum Erreichen eines maßhaltigen und versagensfreien Bauteils führen, von großer Bedeutung. Durch die zielgerichtete Formulierung von entsprechenden produkt- und prozessseitigen Optimierungsmaßnahmen kann hierdurch bereits in frühen Projektphasen eine Reifegraderhöhung effizient umgesetzt werden.

Um im Folgenden eine Bauteilanalysemethodik mit einem anwendungsorientierten Metamodellansatz erarbeiten zu können, ist es notwendig, dass die Komplexität des zugrunde gelegten Modellaufbaus in Anbetracht an die zahlreichen Parameter und deren Variationsmöglichkeiten handhabbar bleibt. Aus diesem Grund wurden für die nachfolgenden Untersuchungen daher ausschließlich alle mit einer hohen (+) Relevanz eingestuften Parameter weiter berücksichtigt, um für die Modelldefinition letztlich alle wesentlichen Haupteinflussfaktoren zugrunde legen zu können. Die Parameter, deren Relevanz in der Vorauswahl als mittel (o) oder niedrig (-) eingestuft wurde, zeigen einen geringfügigeren Effekt auf das Falzergebnis und werden daher aus Gründen einer ansonsten zusätzlich gesteigerten Modellkomplexität nicht weiter herangezogen.

5.2 Definition einer geometriebezogenen Bauteilanalysemethodik

Im Folgenden wird nun eine geometriebezogene Bauteilanalysemethodik definiert, mit der eine effiziente Absicherung der Herstellbarkeit von gefalzten Karosseriebauteilen ermöglicht werden soll. Eine schematische Prozessbeschreibung ist hierfür in Abbildung 5.1 dargestellt.

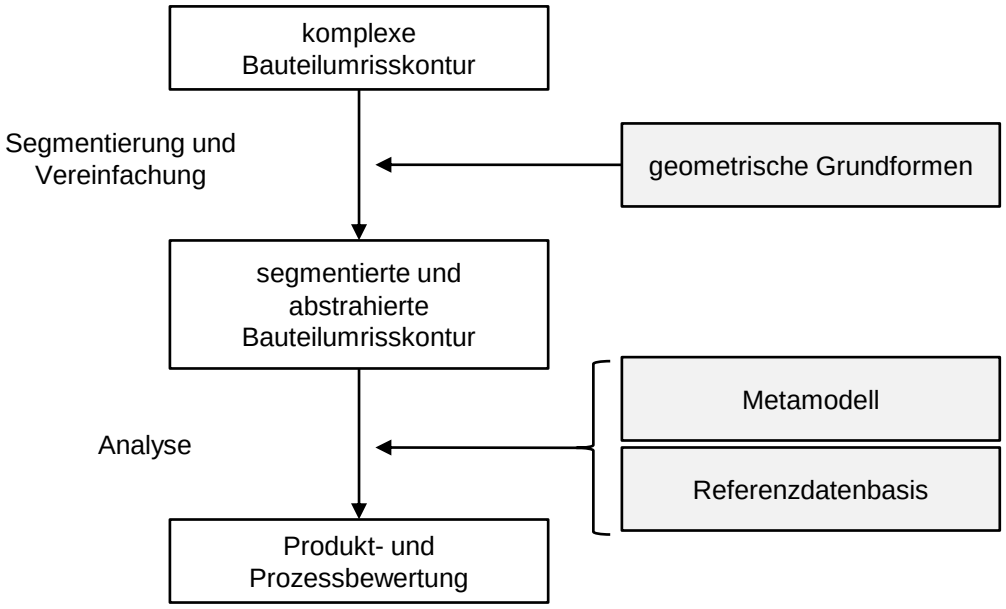


Abbildung 5.1: Schematische Prozessbeschreibung für die geometriebezogene Bauteilanalysemethodik

Hierbei besteht der Kerngedanke darin, das Bauteil nicht in seiner Gesamtheit zu betrachten, sondern die Umrisskontur in individuelle Bauteilsegmente aufzuteilen. Nach einer Parametrisierung der geometrischen Gestalt werden die Bauteilsegmente in übergeordnete Klassen, den sogenannten geometrischen Grundformen, eingeordnet. Dadurch ist es möglich, das entsprechende Karosseriebauteil, unabhängig von dessen komplexer Gesamtgestalt, segmentweise anhand von abstrahierten Geometrieelementen zu analysieren.

Die entsprechenden falztechnisch relevanten Auswertegrößen werden dabei anhand eines metamodellbasierten Ansatzes für die vorliegende geometrische Grundform bereitgestellt. Durch das darauffolgende Zusammensetzen der individuell ausgewerteten Bauteilsegmente wird letztlich die Gesamtkontur des komplex gestalteten Karosseriebauteils näherungsweise wiedergegeben.

5.2.1 Charakteristische Konturen von Karosseriebauteilen

Das typische Design von Karosseriebauteilen ist zum einen durch die grundsätzliche Funktionserfüllung und zum anderen durch spezifisch ausgeprägte Designmerkmale gekennzeichnet. Als Beispiel seien hierzu markante Strukturkanten oder speziell gestaltete Konturverläufe genannt. Insbesondere bei Fahrzeugtüren ist es nicht unüblich, dass auf Grundlage eines Bauteildesigns verschiedene Variationen des Konturverlaufs abgeleitet werden. In Abbildung 5.2 ist hierzu ein Vergleich von unterschiedlich gestalteten Konturen am Beispiel verschiedener Fahrzeugtüren einer Baureihe dargestellt.

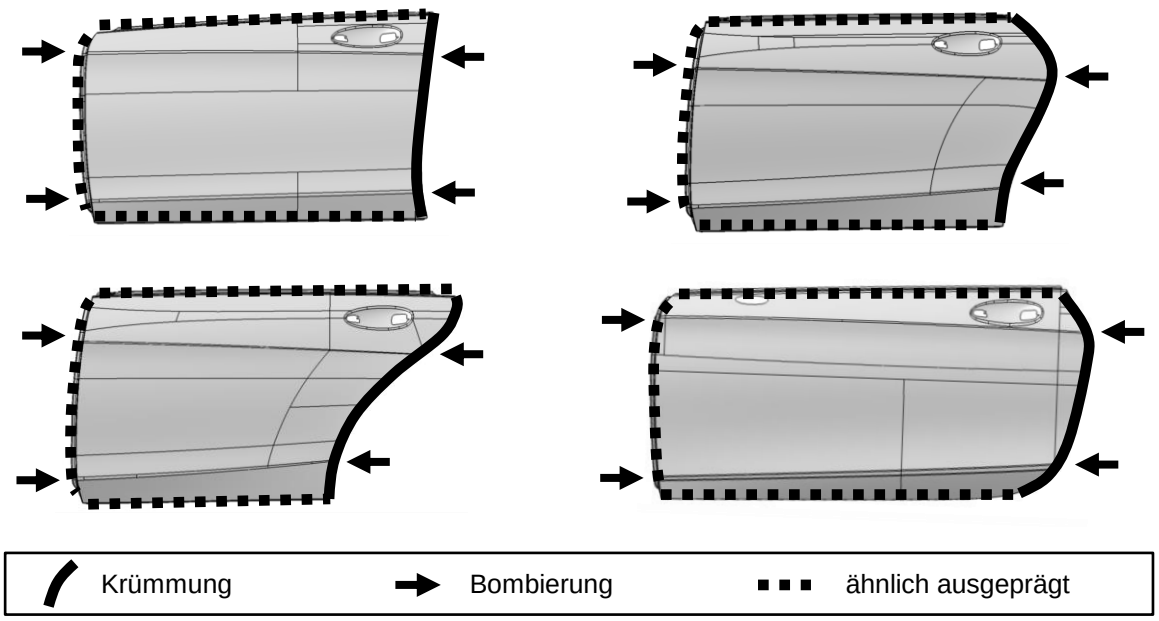


Abbildung 5.2: Vergleich verschiedener Karosseriebauteilkonturen am Beispiel einer Türbeplankung

Bei allen Türen kann hierbei ein grundlegendes Bauteildesign wiedergefunden werden, welches durch markante Strukturkanten im oberen und im unteren Türbereich geprägt ist. Darüber hinaus ist erkennbar, dass ein großer Teil entlang der Umrisskontur bei allen Bauteilen sehr ähnlich gestaltet ist.

Aufgrund der designbedingten Strukturkanten resultieren teilweise stark bombierte Bauteilbereiche, die eine erhöhte Anforderung für das Falzen der Karosseriebauteile mit sich bringen. Zusätzlich sind entlang des Konturverlaufs weitere, verschieden gekrümmte Bauteilbereiche vorzufinden. Im Allgemeinen kann hierbei zwischen geraden, konvex und konkav gekrümmten Konturen unterschieden werden. Die Art der jeweiligen geometrischen Ausprägung beeinflusst wiederum das Bauteilverhalten beim Falzen. Insbesondere konvex gekrümmte Bauteilbereiche

bewirken hierbei eine Tendenz zur Faltenbildung am Falzflansch, sodass in den betreffenden Bereichen Flanschrückschnitte zur Reduzierung der Flanschlänge erforderlich sind.

Grundsätzlich sind die beschriebenen, charakteristischen Konturen nicht nur bei Fahrzeugtüren, sondern bei allen Arten von gefalzten Karosseriebauteilen, wie unter anderem Motorhauben, Kotflügel, Heckdeckel und Rückwandtüren, vorzufinden. In Abbildung 5.3 sind hierzu beispielhaft unterschiedlichste Karosseriebauteile dargestellt, an denen markante Konturverläufe hervorgehoben sind.

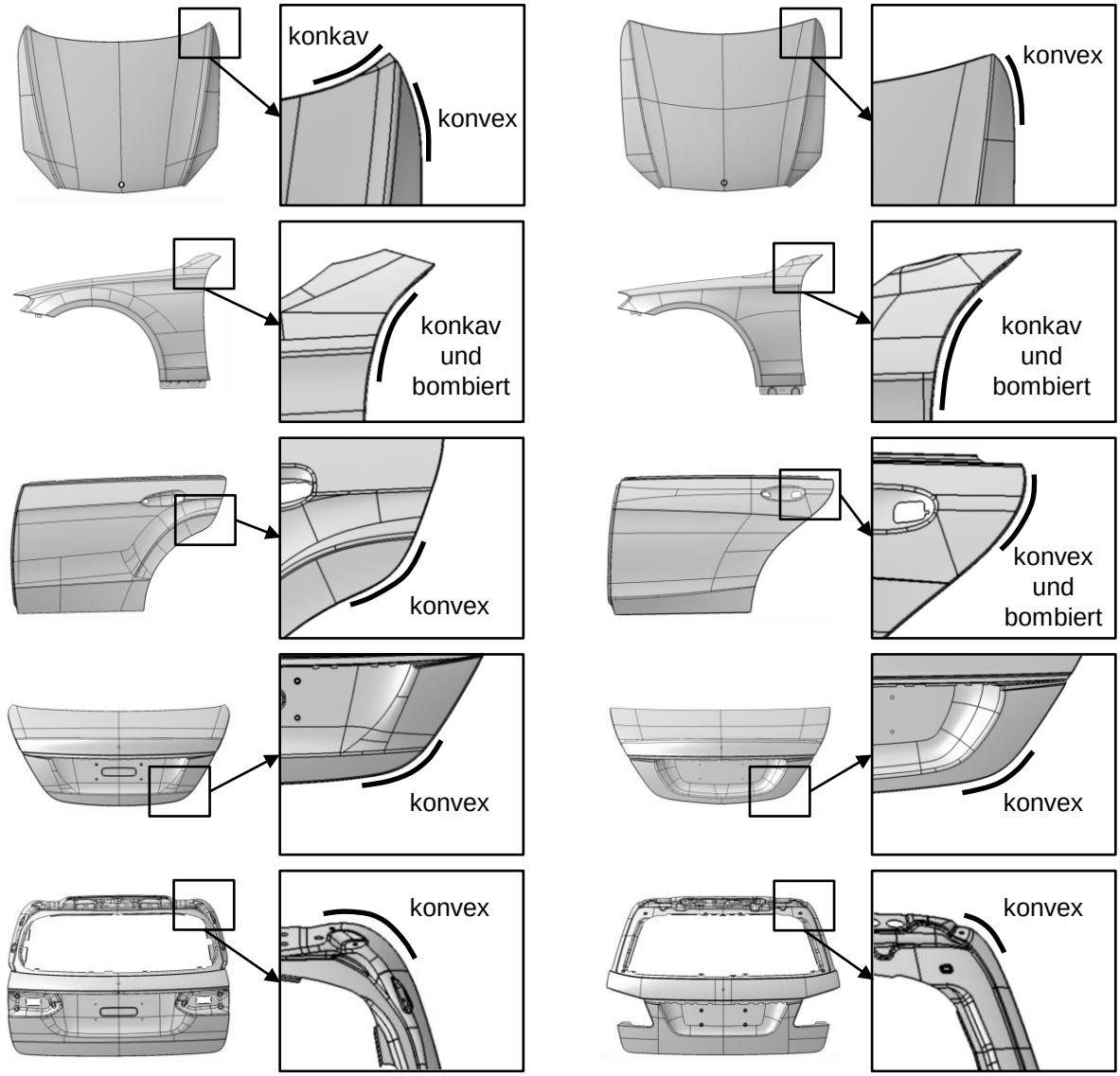


Abbildung 5.3: Wiederkehrende und charakteristische Bauteilkonturen am Beispiel verschiedener Karosseriebauteile

Unabhängig von der Art des Karosseriebauteils treten grundsätzlich entlang der Umrisskontur ähnlich gestaltete Bauteilbereiche auf, die durch spezifische Krümmungen und Bombierungen

charakterisiert sind. Dabei unterscheidet sich der Konturverlauf der entsprechenden Karosseriebauteile hauptsächlich durch verschieden ausgeprägte geometrische Dimensionen. Die geometriebedingen Eigenschaften, die für das Falzen relevant sind, treten demnach für die unterschiedlichen Karosseriebauteile bereichsweise auf und müssen in Bezug auf ihre produkt- und prozessbedingte Herstellbarkeit bei der Auslegung von Falzprozessen spezifisch abgesichert werden.

5.2.2 Geometrische Grundformen als Ersatzkontur

Im Folgenden wird nun eine Möglichkeit angestrebt, die charakteristischen Designmerkmale und Bauteilkonturen mit Hilfe einer geometriebezogenen Bauteilanalyse in Bezug auf deren falztechnische Herstellbarkeit bewerten zu können.

Hierfür soll der teilweise komplex gestaltete Konturverlauf eines Karosseriebauteils durch einfach zu beschreibende Geometrieelemente näherungsweise wiedergegeben werden. Ein in Teilen ähnlicher Ansatz wurde hierzu unter anderem von Zhang et al. (2000) und von le Maoût et al. (2010a) unternommen, die in ihrer Arbeit bereits verschieden gestaltete und einfach aufgebaute Versuchsproben mit gerader, gekrümmter und bombierter Biegelinie in einzelne, geometriebezogene Klassen eingeteilt haben, um den Effekt, der aufgrund der Bauteilform beim Falzen hervorgerufen wird, systematisch untersuchen zu können. Als Fortführung zu diesen Arbeiten wird nun eine Bauteilanalysemethodik angestrebt, die es ermöglicht, auf Grundlage von einfachen und parametrisierten Geometrieelementen, komplexe und beliebig verlaufende Bauteilkonturen nachzubilden und damit eine umfassende Bauteilanalyse zu ermöglichen.

Hierzu werden nun geometrische Grundformen (Geo) definiert, die durch standardisierte Parameter in ihrer geometrischen Form beschrieben werden können. In Abbildung 5.4 ist der grundlegende Aufbau der geometrischen Grundformen dargestellt. Dabei ist jede geometrische Grundform durch die Parameter Krümmungsradius RK, Bombierungsradius RB und Bombierungsdistanz LB definiert. Der Krümmungsradius RK beschreibt hierbei den Konturverlauf in Blickrichtung der Flächennormalen zur Bauteilauflagefläche, sodass zwischen konvex, konkav und gerade ausgeprägten geometrischen Grundformen unterschieden werden kann. Hierbei wird folgende Vorzeichenkonvention eingeführt: Konvexe geometrische Grundformen werden durch ein positives Vorzeichen, konkave geometrische Grundformen durch ein negatives Vorzeichen von RK beschrieben.

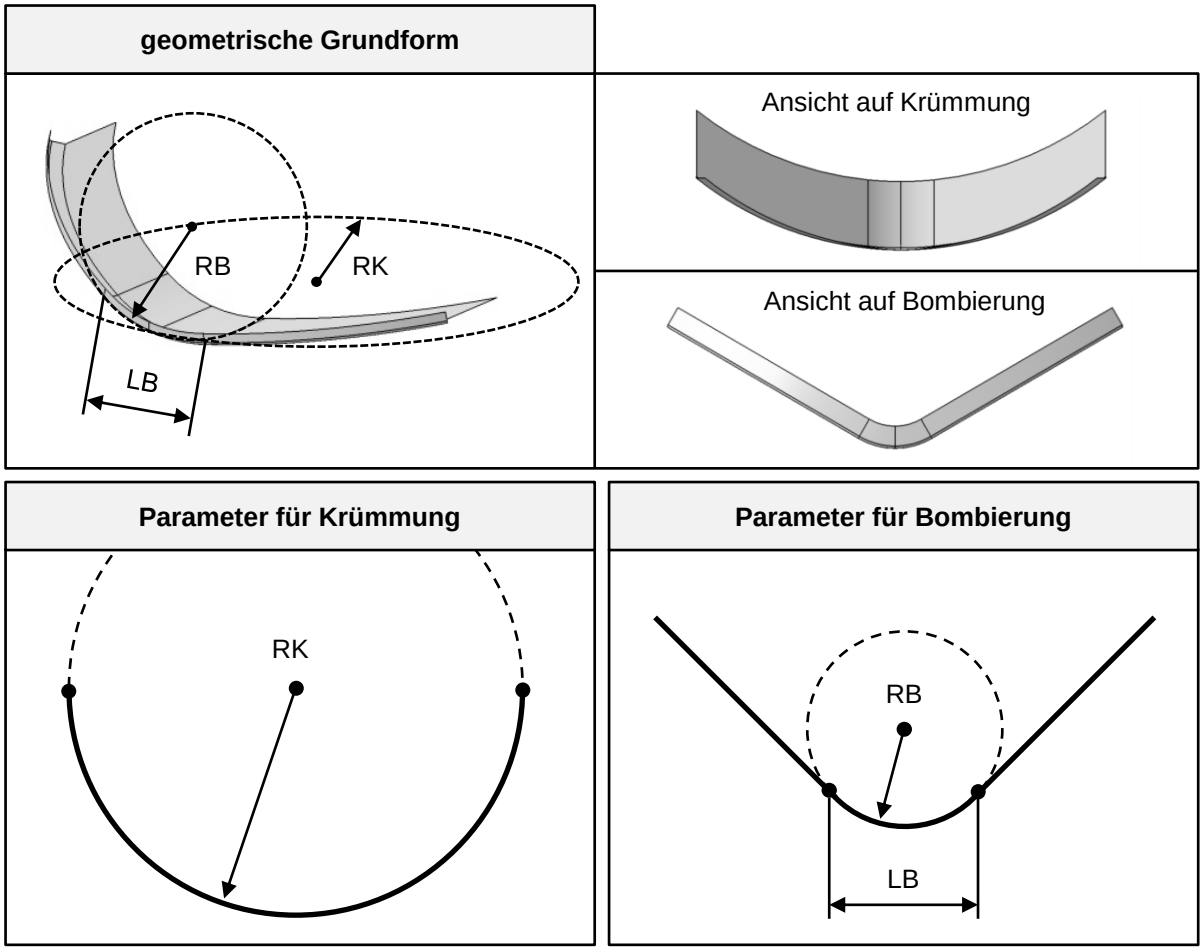


Abbildung 5.4: Grundlegender Aufbau der geometrischen Grundformen

Zusätzlich zu dem Krümmungsradius beschreibt der Bombierungsradius RB den Konturverlauf in Blickrichtung parallel zur Bauteilauflagefläche. Hierbei erfolgt wiederum eine Einteilung in neutrale, positiv bombierte und negativ bombierte Formen. Die Art der Bombierung wird durch folgende Konvention festgelegt: Positiv bombierte geometrische Grundformen werden durch ein positives Vorzeichen, negativ bombierte geometrische Grundformen durch ein negatives Vorzeichen von RB beschrieben.

Zur vollständigen Beschreibung der Bombierung ist zusätzlich die Angabe der Bombierungsdistanz LB erforderlich, die den Winkel zwischen den Schenkeln der Grundform festlegt. Anhand von Recherchen zur typischen Ausprägung von Bauteilbombierungen konnte beobachtet werden, dass LB durch einen festen Wert von 50 mm beschrieben werden kann. Mit diesem Wert konnten charakteristische Bombierungen an verschiedensten Karosseriebauteilen hinreichend nachgebildet werden, sodass alle geometrischen Grundformen in dieser Arbeit im weiteren Verlauf mit diesem Wert von LB definiert sind. Das bedeutet, dass die Variation der geometrischen Grundformen daher ausschließlich durch die unterschiedlichen Ausprägungen des

Krümmungsradius RK und des Bombierungsradius RB erfolgt. Durch die Variation dieser Parameter lassen sich verschiedenste Geometrieelemente realisieren, die wiederum in einzelne Klassen unterteilt werden können.

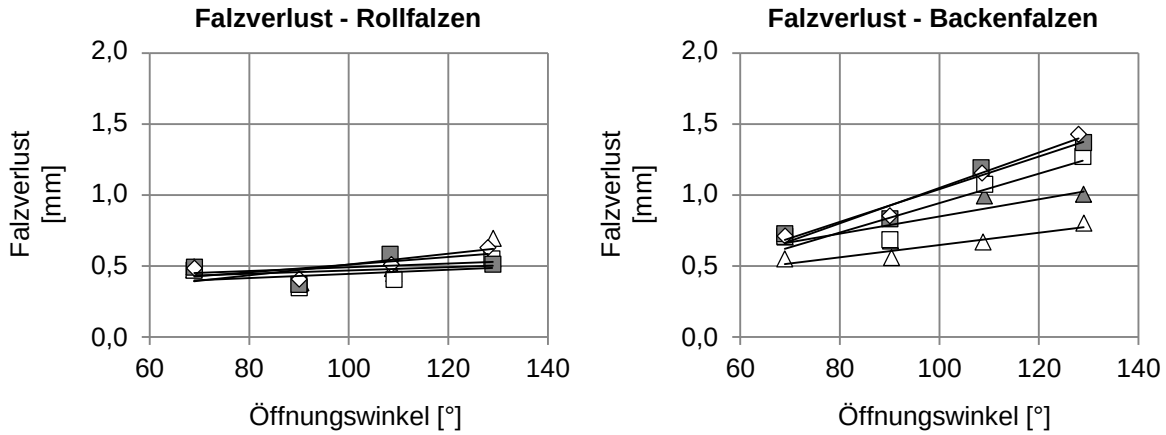
Insgesamt kann hierbei zwischen neun verschiedenen Klassen unterschieden werden. Tabelle 5.5 gibt hierzu eine Übersicht über die möglichen Ausprägungsformen der jeweiligen Klassen.

Tabelle 5.5: Klassen der geometrischen Grundformen

Krümmung / ***Bombierung***	**konvex (+)**	**konkav (-)**	**gerade (o)**
neutral (o)	Geo1	Geo4	Geo7
positiv (+)	Geo2	Geo5	Geo8
negativ (-)	Geo3	Geo6	Geo9

Aufgrund der parametrischen Beschreibung der geometrischen Grundformen stellen gerade Bereiche Sonderformen dar, bei denen der Krümmungsradius RK und der Bombierungsradius RB gegen Unendlich tendieren. Für die Abgrenzung der jeweiligen Klassen ist ein Grenzwert für die Krümmungs- und Bombierungsradien erforderlich. In diesem Zusammenhang wurde auf eine simulationsgestützte Sensitivitätsanalyse zurückgegriffen, um daraufhin geeignete Schwellwerte für den Übergangsbereich der geometrischen Grundformen definieren zu können. Hierbei sind sowohl Roll- als auch Backenfalzprozesse in AutoForm® mit den in Kapitel 4.1 beschriebenen Simulationseinstellungen simuliert worden, deren grundlegender Modellaufbau in Kapitel 6.1.2 detailliert beschrieben ist.

Für die Ermittlung eines maximalen Krümmungsradius RK_{max}, der die Abgrenzung zu den geraden geometrischen Grundformen festlegt, wurde zunächst eine Referenzsimulation mit einer geraden geometrischen Grundform aufgebaut, die anschließend mit Simulationen von sowohl konvex als auch konkav gekrümmten geometrischen Grundformen unter Variation der Krümmungsradien verglichen wurde. In Abbildung 5.5 sind hierzu die Auswerteergebnisse am Beispiel des resultierenden Falzverlusts für einen Roll- und einen Backenfalzprozess gegenübergestellt.



Werkstoff:	Aluminium AA6014-T4	Varianten:
Blechdicke BPL:	1,0 mm	Geo7, gerade
Blechdicke IT:	1,0 mm	Geo1, RK = 800 mm
Flanschlänge:	8,0 mm (fertig gefalzt)	Geo1, RK = 600 mm
Falzform:	Flachfalz	Geo1, RK = 400 mm
Prozess:	– Backenfalzen in den Schritten 90°, 45°, 0° – Rollfalzen in den Schritten 90°, 60°, 30°, 0°	Geo1, RK = 200 mm

Abbildung 5.5: Grenzwerte zur Definition der Übergangswerte für die geometrischen Grundformen

Die Auswertung zeigt, dass vor allem bei Backenfalzprozessen der resultierende Falzverlust auch bei größer werdenden Krümmungsradien von der Bauteilgeometrie beeinflusst wird. Auf dieser Basis konnte nun für den maximalen Krümmungsradius RK_{max} ein Grenzwert von 800 mm ermittelt werden, da bei größeren Krümmungsradien keine ausgeprägten Unterschiede mehr zwischen den Falzergebnissen von konvexen, konkaven und geraden Formen festgestellt werden konnten.

Die Ermittlung des Bombierungsgrenzwerts erfolgte in analoger Vorgehensweise. Nach Auswertung der Simulationen konnte ein maximaler Bombierungsradius RB_{max} von 200 mm definiert werden, der als Schwellwert für den Übergang zu den geraden geometrischen Grundformen fungiert. Die ermittelten Grenzwerte werden im Folgenden sowohl für den Übergang zu den positiv als auch zu den negativ ausgeprägten geometrischen Grundformen herangezogen.

Prinzipiell kann ein geometrieabhängiges Bauteilverhalten durch die Einordnung in geometrische Klassen kategorisiert werden. Dadurch kann auch das Verhalten von verschiedenen Auswertegrößen beim Falzen durch eine Geometrieklassifizierung charakterisiert werden. Als Beispiel sei an dieser Stelle die Auswertung des resultierenden Falzverlustes genannt. Hierbei zeigt

der Vergleich von konvex und konkav gekrümmten Bauteilkonturen ohne Bombierung, dass bei konvex gekrümmten Konturen der Falzverlust mit stärker werdender Krümmung zunimmt, während hingegen bei konkav gekrümmten Konturen eine Abnahme des Falzverlustes mit stärker werdender Krümmung beobachtet werden kann. Ein ähnliches Beispiel kann durch die Auswertung der resultierenden Spannungszustände im Falzflansch beschrieben werden. Mit zunehmender konvexer Krümmung bedingen die implizierten Druckspannungen eine Faltenbildung am Falzflansch, während hingegen bei zunehmender konkaver Krümmung Zugspannungen am Falzflansch hervorgerufen werden, die wiederum eine Rissgefahr bewirken. Die parametrische Beschreibung der geometrischen Grundformen bietet nun die Möglichkeit, dass durch eine Anpassung der Parameter RK und RB komplexe Konturverläufe beliebiger Karosseriebauteile für einen charakteristischen Bauteilbereich (Segment) nachgebildet werden können. Damit kann die ursprüngliche Bauteilkontur segmentweise durch geometrische Grundform beschrieben werden (Kaiser et al. 2014). Je nach Ausprägungsform der geometrischen Grundformen können daraufhin jedem Segment spezifische geometriebezogene Eigenschaften zugeordnet werden.

Damit die unterschiedlich ausgeprägten Designmerkmale und Bauteilkonturen eines Karosseriebauteils in die entsprechenden Klassen eingeordnet werden können, ist es erforderlich, deren geometrische Ausprägung auf eine reproduzierbare Weise zu erfassen. Hierfür wird nun eine Methodik beschrieben, die auf einer Segmentierung, Parametrisierung, Klassifizierung und Geometriezuweisung beruht und die die Grundlage für eine geometriebezogene Bauteilanalyse bildet (Kaiser et al. 2015). In Abbildung 5.6 ist hierzu eine Übersicht mit den entsprechenden Prozessschritten dargestellt.

Zunächst wird die umlaufende Kontur eines zu analysierenden Karosseriebauteils durch die Bauteilsegmentierung in individuelle Teilbereiche untergliedert, sodass einzelne Segmente entlang der Bauteilumrisskontur erzeugt werden. Die Segmente stellen dabei charakteristische Bauteilbereiche dar, deren Konturverlauf nun durch die geometrischen Grundformen näherungsweise nachgebildet wird. Dabei werden die Parameter Krümmungsradius RK und Bombierungsradius RB so angepasst, dass der originale Konturverlauf möglichst gut angenähert wird. Anschließend erfolgt eine Klassifizierung der erstellten geometrischen Grundformen, sodass grundlegende geometrieabhängige Bauteileigenschaften vorab kategorisiert werden können. Die originale Bauteilkontur wird schließlich durch das segmentweise Zusammensetzen der individuellen geometrischen Grundformen als abstrakte Ersatzkontur dargestellt. Dabei wird durch die parametrische Beschreibung der Kontur die Grundlage für eine metamodellbasierte Bauteilanalyse geschaffen, mit der eine detaillierte geometriebezogene Produkt- und Prozessbewertung ermöglicht wird.

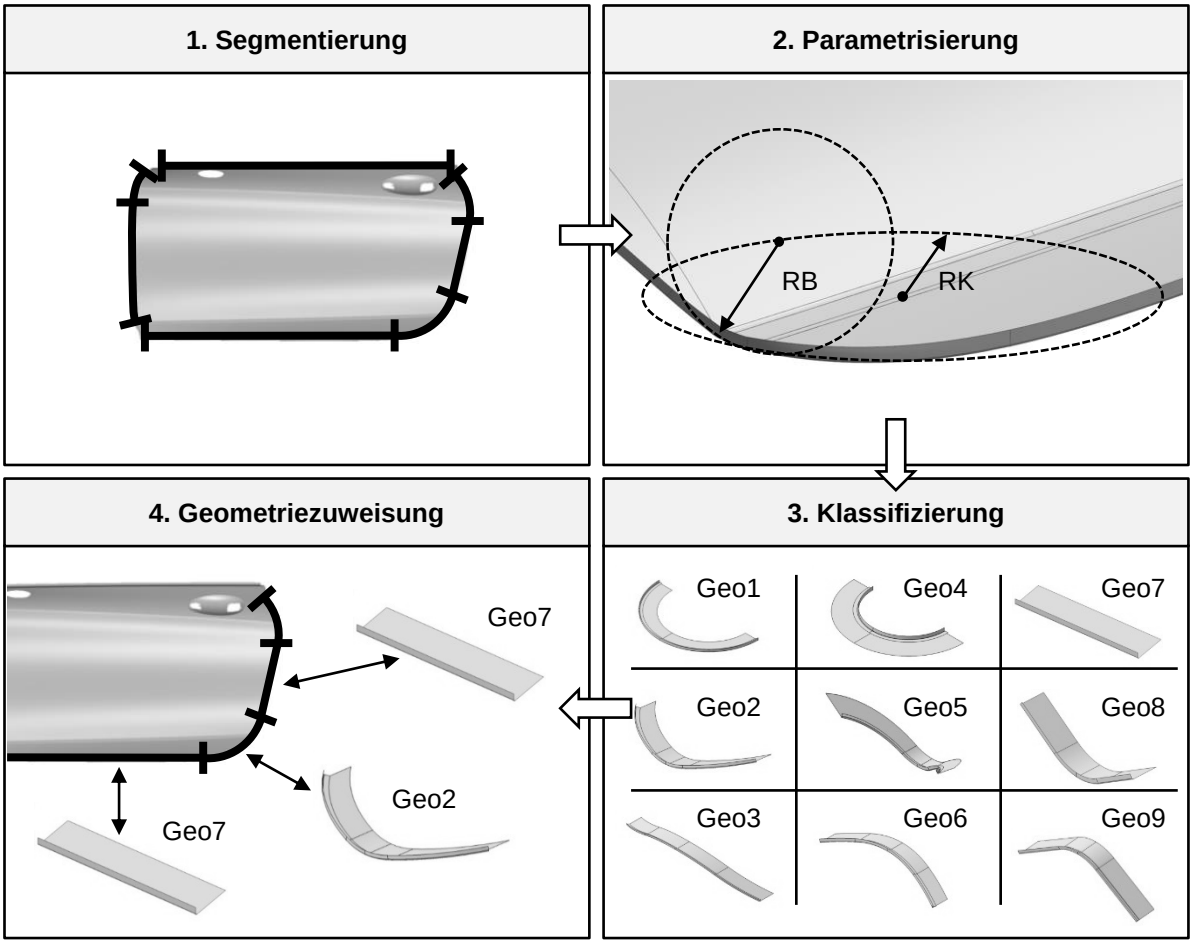


Abbildung 5.6: Methodik zur Segmentierung, Parametrisierung, Klassifizierung und Geometriezuweisung

5.2.3 Auswertefunktionalität bei der Bauteilanalyse

Um eine frühzeitige und effiziente Produkt- und Prozessauslegung für gefalzte Karosseriebauteile realisieren zu können, ist eine falzspezifische Bauteilanalysefunktion erforderlich. Im Folgenden wird nun die hierfür definierte Funktionsweise vorgestellt.

Der grundlegende funktionale Ansatz der Bauteilanalyse basiert dabei, wie in Abbildung 5.7 dargestellt, auf einer individuellen Bewertung von geometrischen Grundformen, die den Konturverlauf eines Karosseriebauteils ersatzweise wiedergeben. Dabei wird für die Analyse eine abstrahierte Bauteilbetrachtung vorausgesetzt, die ausschließlich den zu falzenden Bereich des Karosseriebauteils berücksichtigt. Diese Vorgehensweise ist insbesondere in den frühen Projektphasen zweckmäßig, in denen in der Regel noch keine Informationen über den Vordehnungszustand des presswerkseitigen Herstellungsprozesses zur Verfügung stehen. Die Bauteilanalyse findet somit auf Basis der Geometrieinformation der vorliegenden geometrischen

Grundform statt. Dabei wird das falztechnische Bauteilverhalten der zu analysierenden geometrischen Grundform auf Basis eines Metamodells prognostiziert (Kaiser et al. 2017).

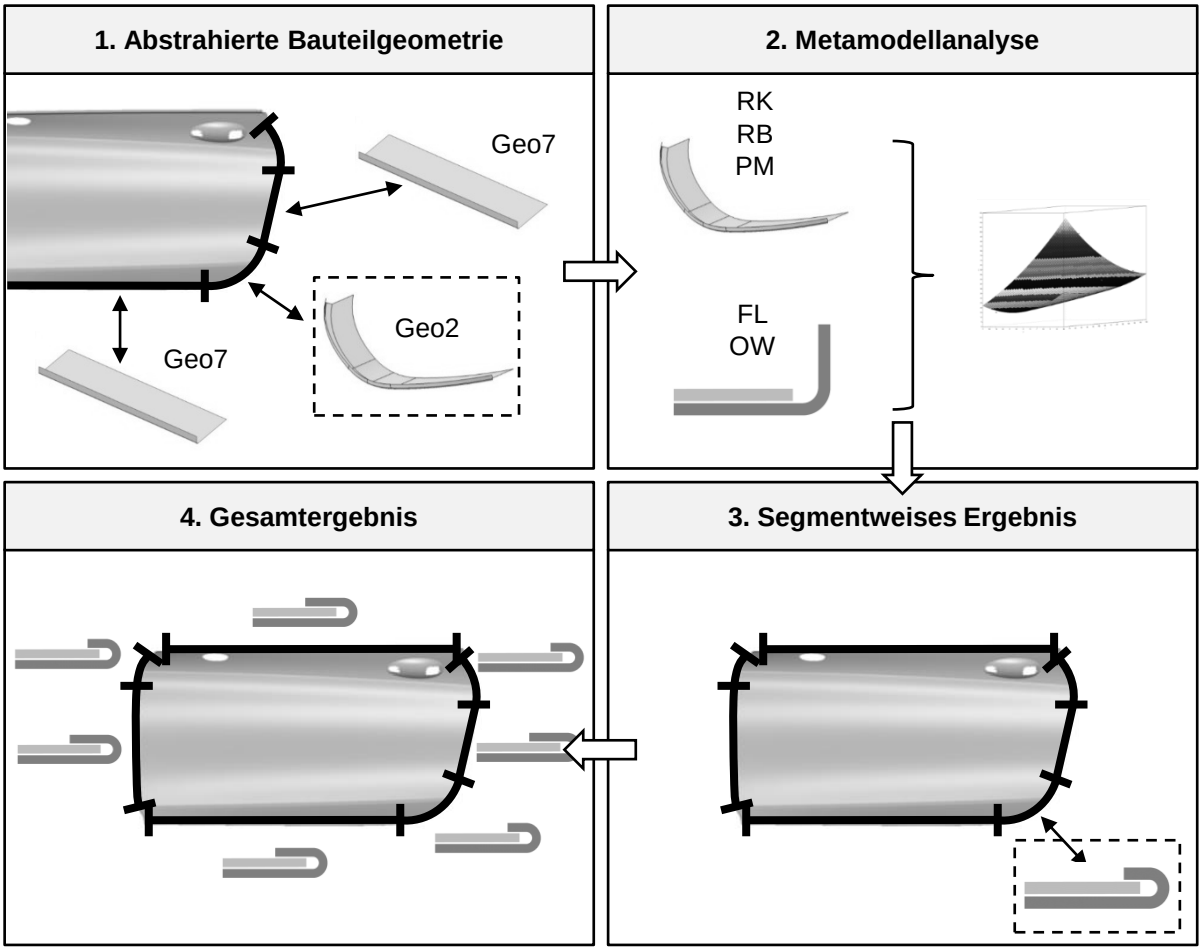


Abbildung 5.7: Prozessablauf der geometriebezogenen Bauteilanalyse nach Kaiser et al. (2017)

Die Eingangsgrößen für das Metamodell beschreiben einen Bauteilzustand vor dem Falzen, der dem des presswerkfallenden Einzelteils entspricht. In Tabelle 5.6 ist hierzu eine Übersicht dargestellt, bei der die Eingangsgrößen nach entsprechender Kategorie geordnet sind. Dabei sind vor allem die Parameter von Bedeutung, die für die Gestaltung der geometrischen Grundformen und des Falzflansches notwendig sind. Darüber hinaus ist zur vollständigen Produktdefinition zusätzlich die Angabe des Werkstoffs und des Packmaßes erforderlich, welches sich aus der Innenteil- und Außenteilblechdicke zusammensetzt. Die weiteren Parameter stellen wiederum prozessspezifische Eingangsgrößen dar, die zum einen das entsprechende Falzverfahren und zum anderen das dabei verwendete Falzwerkzeug definieren.

Tabelle 5.6: Übersicht der Eingangsgrößen des Metamodells

Eingangsgrößen des Metamodells	Geometrische Grundform	Krümmungsradius (RK)	mm
		Bombierungsradius (RB)	mm
	Falzflansch	Flanschlänge vor dem Falzen ($FL_{abgekantet}$)	mm
		Öffnungswinkel (OW)	°
	Allgemein	Packmaß (PM)	mm
		Werkstoff	-
		Falzverfahren	-
		Flachfalz / Keilfalz	-

Nach erfolgter Auswertung wird anhand der spezifischen Auswertegrößen ein durch das Metamodell prognostizierter Bauteilzustand nach dem Falzen beschrieben. In Tabelle 5.7 ist hierzu eine entsprechende Übersicht mit den Auswertegrößen des Metamodells aufgeführt.

Tabelle 5.7: Übersicht der Auswertegrößen des Metamodells

Auswertegrößen des Metamodells	Maßhaltigkeit	Flanschlänge nach dem Falzen ($FL_{gefalzt}$)	mm
		Umrissmaßabweichung (U)	mm
		Falzverlust (FV)	mm
	Herstellbarkeit	Faltenbildung	-
		Plastische Dehnung Biegeradius	-
		Plastische Dehnung Falzflansch	-

Die Auswertegrößen lassen sich grundsätzlich in die Kategorien Maßhaltigkeit und Herstellbarkeit einordnen. Zur Bewertung der Maßhaltigkeit des geschlossenen Falzes werden hierzu die Ergebnisgrößen für die resultierende Flanschlänge, die Umrissmaßabweichung zu einem Soll-Bauteil und der Falzverlust ausgegeben. Darüber hinaus stellt die ermittelte Tendenz zur Faltenbildung sowie die resultierenden plastischen Dehnungen am Biegeradius und am Falzflansch die Basis für eine Bewertung der Herstellbarkeit gefalzter Karosseriebauteile dar. Die geometriebezogene Bauteilanalyse bildet somit die funktionale Grundlage des Assistenzsystems, bei dem die beschriebenen Prozessschritte automatisiert ausgeführt werden.

5.3 Definition des metamodellbasierten Auswerteverfahrens

Im Folgenden wird nun detailliert auf die Definition des metamodellbasierten Auswerteverfahrens eingegangen, welches als zentraler Bestandteil bei der geometriebezogenen Bauteilanalyse fungiert. Hierbei wird ein allgemeingehaltener und erweiterbarer Metamodellansatz vorgestellt, mit dem es ermöglicht wird, die falztechnisch relevanten Auswertegrößen für die zu analysierenden geometrischen Grundformen zu ermitteln.

5.3.1 Vorauswahl der Metamodellformulierung

Grundsätzlich werden für die Erzeugung eines Metamodells Datenstützpunkte benötigt, die den Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems hinreichend genau beschreiben. Durch die Wahl einer geeigneten Metamodellformulierung kann daraufhin ein funktionaler Zusammenhang zwischen den Datenpunkten aufgestellt werden.

Siebertz et al. (2010) geben eine Übersicht über gängige Arten von Metamodellen und stellen deren zugrunde gelegte Formulierungsansätze, wie beispielsweise durch lineare Regression, Polynome, Splines, Kriging, Radial Basis Funktion, Kernel-Regression und Künstliche Neuronale Netze, vor. Diese gängigen Metamodellformulierungen sind allerdings für die vorliegende Arbeit nur eingeschränkt anwendbar, da die Wertebereiche für die Eingangs- und Auswertegrößen durch die zahlreichen Produkt- und Prozessvarianten beim Falzen stark variieren. Dies würde einen erheblichen Anpassungsaufwand bei der Modelldefinition zur Folge haben, sodass die Verwendung einer konventionellen Metamodellformulierung in diesem Fall nicht zweckmäßig ist.

Als Metamodellformulierung wird daher ein spezifisch zu definierender Ansatz angestrebt, der insbesondere in Bezug auf die Variantenvielfalt beim Falzen flexibel angepasst werden kann. Hierbei wird nun auf einen speziell formulierten, elementbasierten Ansatz zurückgegriffen, der von Volk et al. (2012) und Volk et al. (2013) für die Versagensprognose von Blechumformvorgängen mit nichtlinearen Dehnpfaden vorgestellt wurde.

Der dort beschriebene Ansatz beruht auf der Definition von Knoten und Elementen in Analogie zur Methode der finiten Elemente. Dabei besteht das Grundprinzip darin, dass ein Wertebereich für die Systemeingangsgrößen durch die Definition von Knoten und Elementen abgedeckt wird. Die für den Metamodellansatz relevanten Datenstützpunkte werden dabei in Form von Knotenfunktionswerten bereitgestellt. Innerhalb der Elemente erfolgt eine Interpolationsrechnung auf Basis der umliegenden Knotenfunktionswerte, um das Ergebnis für einen spezifischen Auswer-

tepunkt zu berechnen. Dabei wird auf eine Methodik zurückgegriffen, die auf dem isoparametrischen Konzept beruht. In Abbildung 5.8 ist hierzu das grundlegende Prinzip bei der Interpolationsrechnung dargestellt.

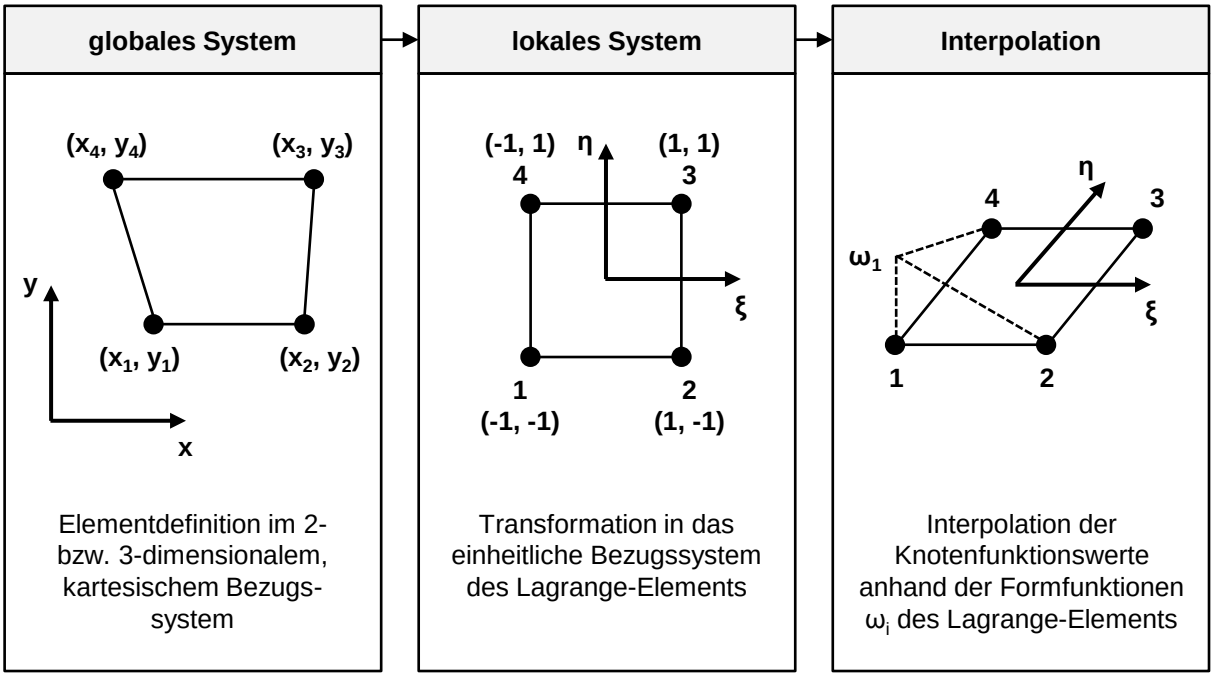


Abbildung 5.8: Grundprinzip der Interpolationsrechnung auf Basis des isoparametrischen Konzepts am Beispiel eines 2-dimensionalen Elements

Das im kartesischen Bezugssystem aufgespannte Element wird dabei durch eine Transformation in das einheitliche, lokale Bezugssystem des Lagrange-Elements überführt. Dadurch ist es möglich, die Formfunktionen des Lagrange-Elements als Interpolationsfunktionen für die Interpolationsrechnung heranzuziehen.

Die Verwendung des beschriebenen Ansatzes bietet alle Voraussetzungen, um die spezifischen Anforderungen für das Falzen bedarfsgerecht definieren zu können. Zum einen ist es dadurch möglich, spezifische Geometriestützpunkte so festzulegen, dass bei der elementweisen Vernetzung verschiedene Geometriebereiche abgedeckt werden können. Zum anderen wird mit diesem Ansatz eine gewisse Flexibilität im Modellaufbau gewährleistet. So kann das grundlegende Modell beispielsweise unabhängig von den Auswertegrößen definiert werden, da durch die Knoten- und Elementdefinition zunächst nur ein Wertebereich für die Eingangsgrößen festgelegt wird. Die Auswertegrößen lassen sich anschließend jederzeit in Form von Knotenfunktionswerten an das Modell anbinden beziehungsweise durch andere Auswerteparameter ersetzen. Gleichzeitig kann der Modellaufbau durch das nachträgliche Hinzufügen oder Entfernen von Elementen bedarfsgerecht an geänderte Anforderungen angepasst werden.

5.3.2 Grundlegender Metamodellaufbau

Der elementbasierte Ansatz bildet nun die Grundlage für den hier definierten Metamodellaufbau. Dieser ist speziell für die Bauteilanalyse mit geometrischen Grundformen ausgelegt. Um dabei alle geometrierelevanten Eingangsparameter erfassen zu können, wurden die Modellebenen „geometrische Grundformen“, „Falzflansch“ und „Referenzdatenbasis“ definiert. In Abbildung 5.9 ist hierzu der grundlegende Metamodellaufbau mit den verschiedenen Modellebenen dargestellt.

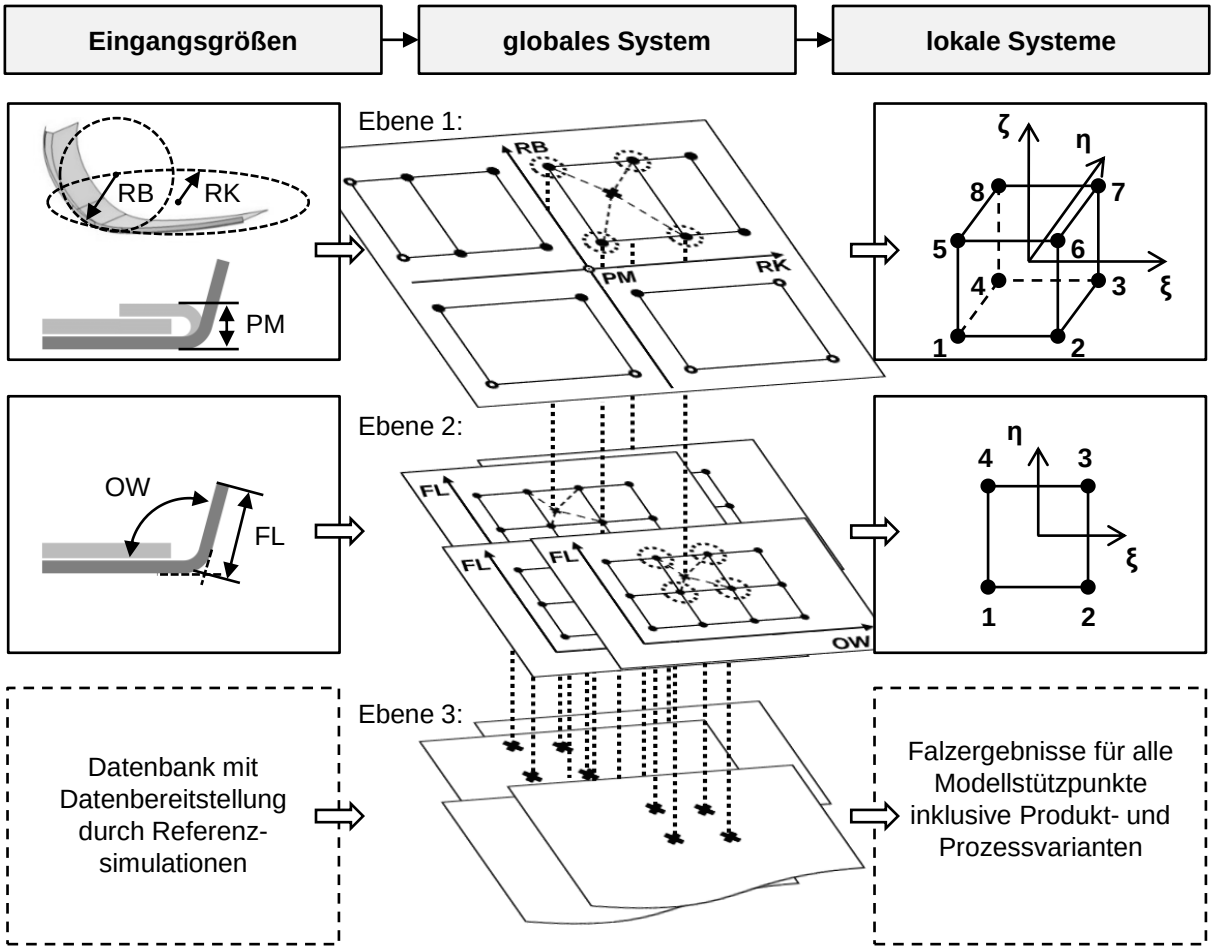


Abbildung 5.9: Grundlegender Metamodellaufbau für die geometriebezogene Bauteilanalyse nach Kaiser et al. (2017)

In der ersten Modellebene wird die Gestaltung der zu analysierenden geometrischen Grundform betrachtet. Eine besondere Anforderung stellt hierbei das große Spektrum an gekrümmten und bombierten Bauteilkonturen dar, das über eine geeignete Elementdefinition hinreichend genau abgedeckt werden muss. Jeder Elementknoten wird dabei durch einen spezifischen Geometriestützpunkt beschrieben, der durch eine bestimmte Krümmungs- und Bombierungsvariante (RK und RB) einer geometrischen Grundform sowie durch die Blechdickenkonstellation von Innenteil und Beplankung in Form des Packmaßes (PM) definiert ist.

Für jeden dieser Geometriestützpunkte existiert in der zweiten Modellebene ein individuelles Falzflanschmodell, welches verschiedene Flanschlängen- und Öffnungswinkelvarianten (FL und OW) beinhaltet. Die Modellebene des Falzflansches besteht somit aus mehreren Modellvarianten, die wiederum von den Geometriestützpunkten in der ersten Modellebene abhängig sind.

In der dritten Modellebene werden die spezifischen Auswertegrößen für die entsprechenden Datenstützpunkte in Form einer Referenzdatenbasis bereitgestellt. Die Referenzdatenbasis stellt somit eine geometriebezogene Datenbank von spezifischen Auswertegrößen dar, die an den Modellaufbau gekoppelt ist.

Nach Erfassung der Modelleingangsgrößen werden bei der Ergebnisermittlung für eine beliebig zu analysierende geometrische Grundform zunächst Modellauswertepunkte in der ersten und zweiten Modellebene generiert. In einem ersten Schritt werden daraufhin die umliegenden Elementknoten der ersten Modellebene herangezogen, um die dazugehörigen Falzflanschmodelle in der zweiten Modellebene aufzurufen. Daraufhin werden für jeden der Geometriestützpunkte die entsprechenden Ergebnisse für die vorliegende Flanschlängen- und Öffnungswinkelkonstellation ermittelt.

Hierzu erfolgt in den jeweiligen Falzflanschmodellen wiederum eine Elementzuordnung, um die umliegenden Elementknoten als Stützpunkte heranzuziehen. Jedem Stützpunkt wird dabei ein spezifischer Datensatz an Auswertegrößen aus der Referenzdatenbasis übertagen. Für den Sonderfall, dass die zu analysierende geometrische Grundform exakt einem Geometriestützpunkt in der ersten Modellebene und gleichzeitig einem Stützpunkt in der zweiten Modellebene entspricht, werden die Auswertegrößen aus der Referenzdatenbasis direkt ohne Interpolation als Endergebnis an die zu analysierende geometrische Grundform übergeben. Für alle anderen Fälle erfolgt in den jeweiligen Modellebenen eine Interpolationsrechnung mit linearem Interpolationsansatz, sodass eine beliebige geometrische Grundform anhand der Referenzdaten ausgewertet werden kann. Die hierfür definierten Modellebenen und deren zugrunde gelegter Interpolationsansatz werden im Folgenden detailliert vorgestellt.

5.3.3 Modellebene der geometrischen Grundformen

Die zahlreich vorkommenden Karosseriebauteilkonturen werden durch die geometrischen Grundformen in der ersten Modellebene wiedergegeben. In dieser wird das Spektrum an verschiedenen Varianten für gekrümmte und bombierte Bauteilkonturen abgedeckt. Darüber hin-

aus werden verschiedene Blechdickenvarianten berücksichtigt, sodass hiermit die grundlegende Gestalt der zu analysierenden geometrischen Grundform erfasst wird. In Abbildung 5.10 ist der hierzu definierte Modellaufbau dargestellt.

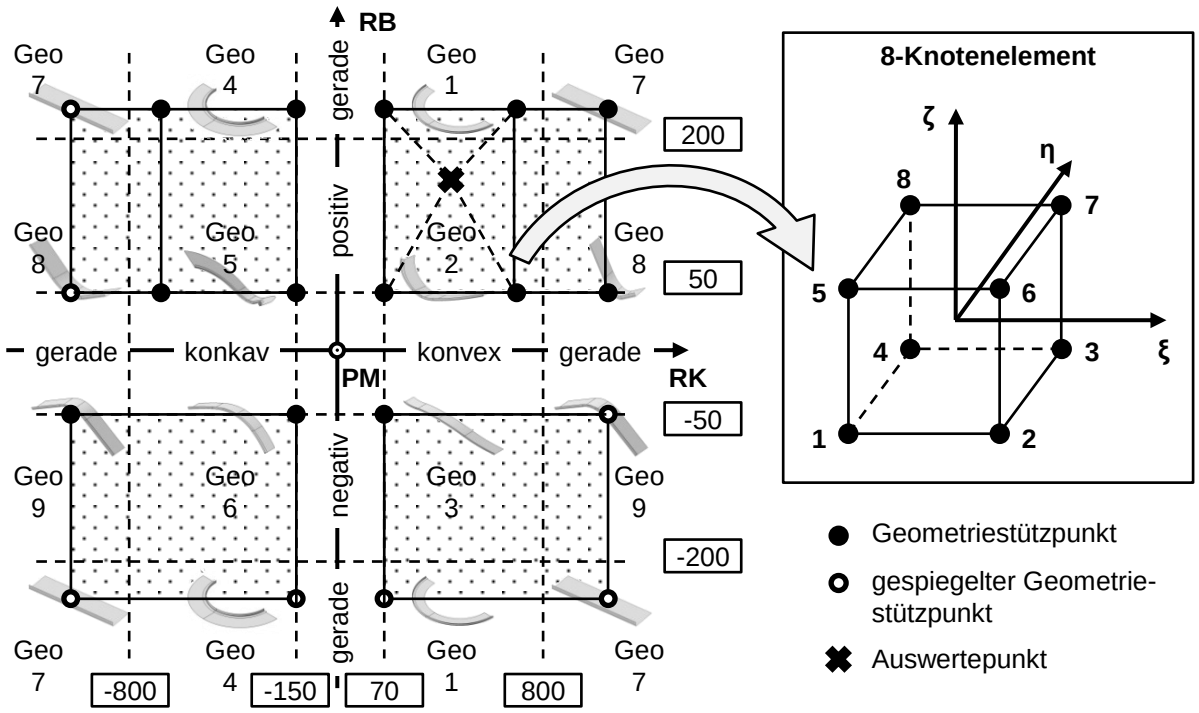


Abbildung 5.10: Geometriestützpunkte und Elementdefinition in der Modellebene der geometrischen Grundformen

Hierbei wurde ein dreidimensionaler Ansatz gewählt, der auf einem 8-Knotenelement basiert. In den ersten beiden Dimensionen beschreiben die Parameter Krümmungsradius RK und Bombierungsradius RB die Ausprägung der geometrischen Grundform. Durch die dritte Dimension wird das Packmaß PM des Falzes berücksichtigt, das eine Kombination aus Beplankungsblechdicke T_{BPL} und Innenteilblechdicke T_{IT} darstellt (vergleiche Abbildung 5.9). Jeder Knoten stellt somit einen spezifischen Geometriestützpunkt dar, der durch die Parameter RK, RB und PM eindeutig beschrieben ist.

Die Geometriestützpunkte wurden dabei so festgelegt, dass in Bereichen mit häufig vorkommenden geometrischen Grundformen eine feinere Untergliederung der Elemente definiert ist. Zur Ermittlung von geeigneten Geometriestützpunkten wurden daher zunächst im Vorfeld zahlreiche Karosseriebauteile hinsichtlich ihrer charakteristischen Bauteilkonturen untersucht. Hierbei wurden sowohl unterschiedliche Fahrzeugderivate als auch Baureihen betrachtet. Anhand dieser Datenerfassung konnte daraufhin eine Übersicht mit einer Häufigkeitsverteilung erstellt werden, die die Krümmungs- und Bombierungsradien der dabei erfassten geometrischen

Grundformen quantitativ und qualitativ wiedergibt. Die Ergebnisse der Datenerfassung sind in Abbildung 5.11 dargestellt.

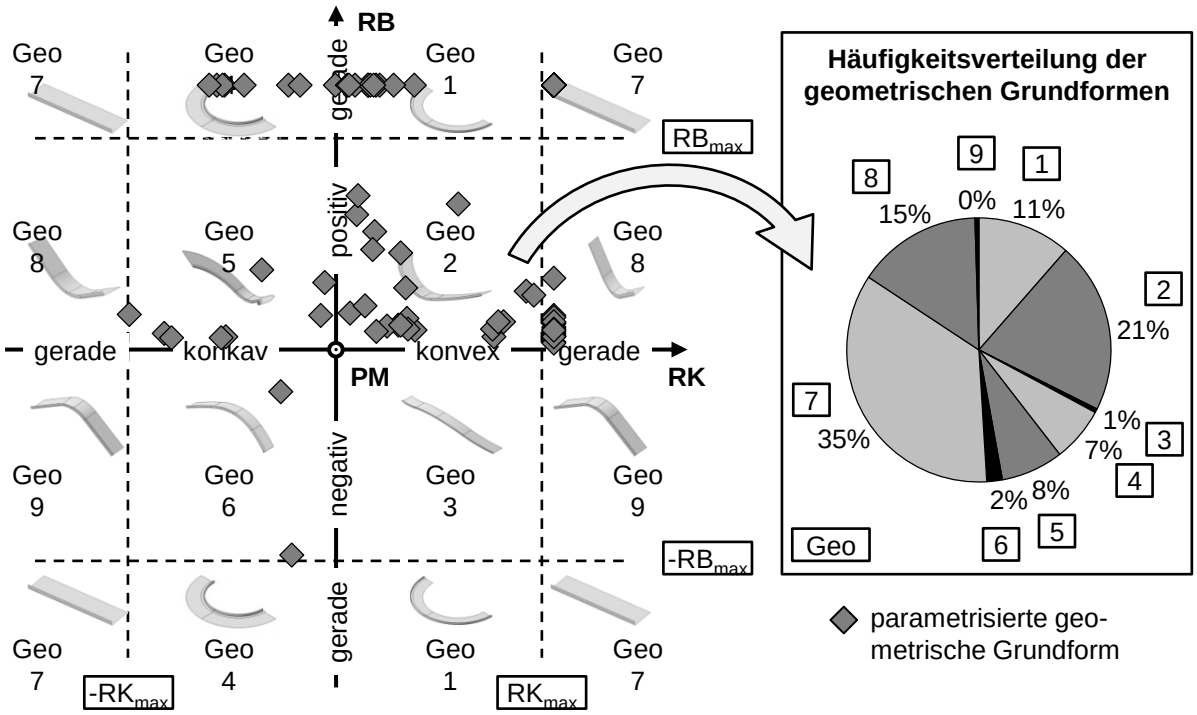


Abbildung 5.11: Häufigkeitsverteilung geometrischer Grundformen auf Basis der Analyse verschiedener Karosseriebauteile

Wie in Kapitel 5.2.2 beschrieben, sind die Übergänge zwischen geraden und gekrümmten beziehungsweise bombierten geometrischen Grundformen durch die Parameter RK_{max} (800 mm) und RB_{max} (200 mm) definiert. Unter Berücksichtigung dieser Grenzwerte war bei den hierfür durchgeführten Untersuchungen die Klasse der geraden geometrischen Grundformen ohne Bombierung (Geo7) am häufigsten vorzufinden. Dahinter waren insbesondere konvexe geometrische Grundformen ohne Bombierung (Geo2) und gerade geometrische Grundformen mit positiver Bombierung (Geo8) häufig vertreten.

Die Datenerfassung umfasste hierbei eine Vielzahl an verschiedenen Karosseriebauteilen unterschiedlicher Fahrzeugderivate und Baureihen. Da jedoch das Design der Fahrzeuge stetig im Wandel ist, stellt die hier dargestellte Auswertung eine Momentaufnahme dar. Die Häufigkeitsverteilung der entsprechenden geometrischen Grundformen ist somit als aktueller Trend zu verstehen. Wie bereits in Kapitel 5.2.1 beschrieben, treten die genannten charakteristischen Bauteilbereiche wiederkehrend an unterschiedlichsten Karosseriebauteilen und unabhängig von Fahrzeugherstellern auf. Von etwaigen Designänderungen ist dabei häufig lediglich die geometrische Dimension der Krümmungen und Bombierungen betroffen. Die übergeordnete Klas-

sifizierung der geometrischen Grundform bleibt daher quasi unberührt, sodass für den grundlegenden Metamodellaufbau keine Einschränkungen entstehen. Darüber hinaus ist das Modell durch den elementbasierten Ansatz jederzeit erweiterbar und bietet somit die Möglichkeit jederzeit Geometriestützpunkte bedarfsgerecht zu ergänzen.

Prinzipiell ist es erforderlich, in Bereichen mit häufig vorkommenden geometrischen Grundformen eine größere Anzahl an Geometriestützpunkten zu definieren, um somit in diesen Bereichen eine höhere Elementauflösung realisieren zu können. Da bei der Ergebnisberechnung ein linearer Interpolationsansatz herangezogen wird, ist zusätzlich eine Prüfung der Prognosegüte sinnvoll, sodass in den entsprechenden Bereichen bei Bedarf eine Elementverfeinerung vollzogen werden kann. Hierfür ist ein Vergleich von verschiedenen Auswertegrößen erforderlich, die zum einen durch das Metamodell und zum anderen durch ein validiertes FE-Simulationsmodell berechnet werden. Die entsprechend zugrunde gelegte Vorgehensweise für die Elementverfeinerung ist hierzu in Abbildung 5.12 am Beispiel eines 2-Knotenelements veranschaulicht.

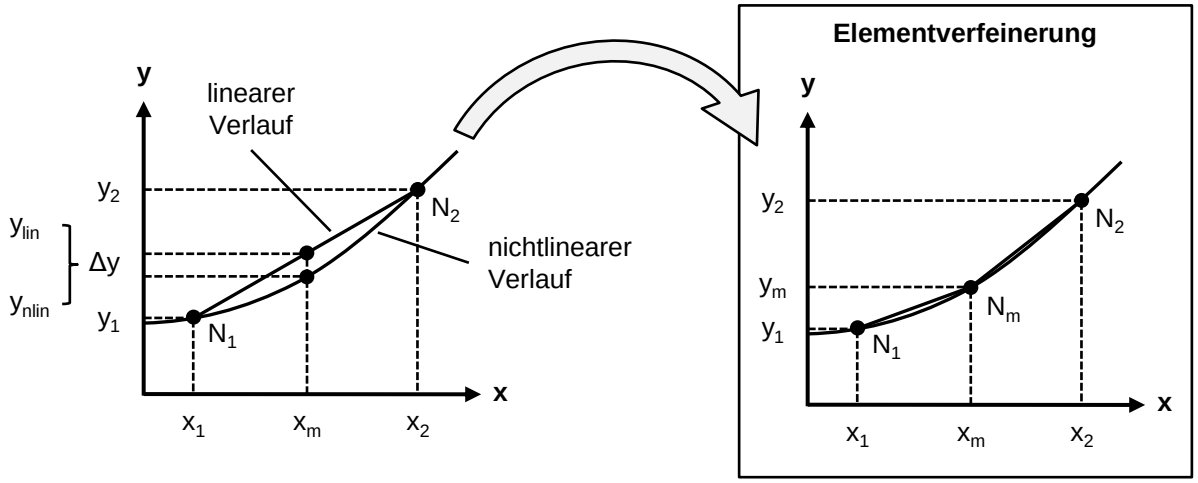


Abbildung 5.12: Vorgehensweise zur Elementverfeinerung am Beispiel eines 2-Knotenelements mit linearem Interpolationsansatz

Das 2-Knotenelement setzt sich aus den Elementknoten N_1 und N_2 zusammen zwischen denen linear interpoliert wird. Da die Elementknoten den Datenpunkten aus der simulationsgestützten Referenzdatenbasis entsprechen, ist hierbei eine Übereinstimmung der Funktionswerte gegeben. Um die Prognosegüte des Metamodells bezüglich eines nichtlinearen Funktionsverlaufs prüfen zu können, wird der Modelleingangsparameter x_m herangezogen, der zwischen den Knoten N_1 und N_2 liegt. Dieser Wert dient als Eingangsgröße für das Metamodell und für das entsprechende FE-Simulationsmodell.

Daraufhin kann die Abweichung Δy, welche die Differenz der Ausgangsparameter y_{lin} für den linearen und y_{nlin} für den nichtlinearen Funktionsverlauf wiedergibt, wie folgt ermittelt werden:

$$x_m = x_1 + \frac{1}{2} \cdot (x_2 - x_1) \qquad \textit{Gleichung 5.1}$$

$$\Delta y = | y_{lin} - y_{nlin} | \qquad \textit{Gleichung 5.2}$$

x_i	*Eingangsparameter am Knoten i*
y_i	*Ausgangsparameter am Knoten i*
x_m	*Eingangsparameter zwischen den Knoten*
y_{lin}	*Ausgangsparameter aus linearem Verlauf*
y_{nlin}	*Ausgangsparameter aus nichtlinearem Verlauf*
Δy	*Ergebnisabweichung von linearem und nichtlinearem Verlauf*

Die Auswertegröße Δy steht hierbei für ein spezifisches Falzergebnis, wie beispielsweise die resultierende Flanschlänge, der Falzverlust oder die durch das Falzen auftretenden plastischen Dehnungen. Ist die Abweichung Δy bei einer der auszuwertenden Falzergebnisse größer als ein festgelegter Grenzwert, ist daraufhin eine Elementverfeinerung für den Metamodellaufbau vorzusehen. An der Stelle x_m wird hierzu ein zusätzlicher Knoten N_m eingefügt, sodass daraufhin zwei Elemente erzeugt werden und der nichtlineare Funktionsverlauf approximiert wird. Die Elementverfeinerung wird dabei solange wiederholt bis eine zufriedenstellende Modellgenauigkeit erreicht worden ist. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass durch jeden hinzugefügten Modellstützpunkt der Aufwand zur Erstellung der simulationsgestützten Referenzdatenbasis erhöht wird (vergleiche Kapitel 6.2.1).

In Tabelle 5.8 sind nun die für die erste Modellebene des Metamodells definierten Hauptwertebereiche als Übersicht aufgeführt.

Grundsätzlich kann der Modellaufbau in vier Hauptbereiche unterteilt werden, die für sich wiederum feiner untergliedert sein können, um somit eine detaillierte Auswertung für häufig vorkommende geometrische Grundformen zu ermöglichen (vergleiche Abbildung 5.10). Damit ein möglichst großes Bauteilspektrum abgedeckt werden kann, ist es erforderlich, den maximalen Wertebereich durch die Wahl von geeigneten Modellrändern entsprechend festzulegen. Der Übergang zu den geraden geometrischen Grundformen wird, wie bereits in Kapitel 5.2.2 beschrieben, durch die Werte von RK_{max} und RB_{max} definiert. Dadurch sind die äußeren Modellränder bestimmt. Für die inneren Modellränder, die den Wertebereich für die kleinstmögliche Krümmung und Bombierung begrenzen, wurden hierbei die Werte so ausgewählt, dass bei der Bauteilanalyse ein möglichst breites Spektrum an Karosseriekonturen abgedeckt werden kann.

Analog dazu wurden die Wertebereiche für das Packmaß PM so definiert, dass bei der Auswertung möglichst viele Blechdickenvarianten berücksichtigt werden können.

Tabelle 5.8: Definierte Hauptwertebereiche für die Modellebene der geometrischen Grundformen

Hauptbereiche	**RK [mm]**	**RB [mm]**	**PM [mm]**
Konvex mit pos. Bombierung	800	200	$2 \cdot T_{BPL} + 2 \cdot T_{IT}$
	70	50	$2 \cdot T_{BPL} + T_{IT}$
Konvex mit neg. Bombierung	800	-200	$2 \cdot T_{BPL} + 2 \cdot T_{IT}$
	70	-50	$2 \cdot T_{BPL} + T_{IT}$
Konkav mit pos. Bombierung	-800	200	$2 \cdot T_{BPL} + 2 \cdot T_{IT}$
	-150	50	$2 \cdot T_{BPL} + T_{IT}$
Konkav mit neg. Bombierung	-800	-200	$2 \cdot T_{BPL} + 2 \cdot T_{IT}$
	-150	-50	$2 \cdot T_{BPL} + T_{IT}$

Bei der Analyse einer beliebigen geometrischen Grundform werden zunächst die Modelleingangsgrößen RK, RB und PM erfasst, sodass ein entsprechender Modellauswertepunkt festgelegt werden kann. Befindet sich dieser innerhalb eines Elements und damit innerhalb des Modellwertebereichs, werden daraufhin die umliegenden Elementknoten herangezogen. Jeder Elementknoten beschreibt dabei einen spezifischen Geometriestützpunkt, dem ein entsprechendes Zwischenergebnis aus der zweiten Modellebene in Form eines Knotenfunktionswerts hinterlegt ist. Daraufhin erfolgt eine lineare Interpolationsrechnung, um für den vorliegenden Modellauswertepunkt das entsprechende Endergebnis auf Basis der umliegenden Geometriestützpunkte zu ermitteln. In Analogie zu dem isoparametrischen Konzept wird hierzu eine Transformation zwischen dem globalen, kartesischen Bezugssystem und dem lokalen, einheitlichen Bezugssystem des Lagrange-Elements zugrunde gelegt. Zwischen beiden Bezugssystemen besteht dabei der folgende Zusammenhang:

$$x = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \cdot x_i \qquad \textit{Gleichung 5.3}$$

$$y = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \cdot y_i \qquad \textit{Gleichung 5.4}$$

$$z = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \cdot z_i \qquad \textit{Gleichung 5.5}$$

x	*globale Koordinate x*
y	*globale Koordinate y*
z	*globale Koordinate z*
n	*Anzahl Elementknoten*
ω	*Formfunktion / Interpolationsfunktion*

Nachdem die globalen Koordinaten RK, RB und PM in die lokalen Koordinaten ξ, η und ζ des Lagrange-Elements überführt worden sind, können die folgenden, für das 8-Knotenelement gültigen, linearen Formfunktionen ω als Interpolationsfunktionen herangezogen werden:

$$\omega_1 = \frac{1}{8} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 - \eta) \cdot (1 - \zeta)$$ *Gleichung 5.6*

$$\omega_2 = \frac{1}{8} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 - \eta) \cdot (1 - \zeta)$$ *Gleichung 5.7*

$$\omega_3 = \frac{1}{8} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 + \eta) \cdot (1 - \zeta)$$ *Gleichung 5.8*

$$\omega_4 = \frac{1}{8} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 + \eta) \cdot (1 - \zeta)$$ *Gleichung 5.9*

$$\omega_5 = \frac{1}{8} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 - \eta) \cdot (1 + \zeta)$$ *Gleichung 5.10*

$$\omega_6 = \frac{1}{8} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 - \eta) \cdot (1 + \zeta)$$ *Gleichung 5.11*

$$\omega_7 = \frac{1}{8} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 + \eta) \cdot (1 + \zeta)$$ *Gleichung 5.12*

$$\omega_8 = \frac{1}{8} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 + \eta) \cdot (1 + \zeta)$$ *Gleichung 5.13*

ξ	*lokale Koordinate ξ*
η	*lokale Koordinate η*
ζ	*lokale Koordinate ζ*

Als Ausgangsbasis für die lineare Interpolationsrechnung dienen dabei die Knotenfunktionswerte f_k des Elements. Das Ergebnis für den vorliegenden Modellauswertepunkt wird durch den interpolierten Funktionswert f wiedergegeben, der durch folgende Gleichung bestimmt wird:

$$f = \vec{\omega}^T \cdot \vec{f}_k$$ *Gleichung 5.14*

mit $\vec{\omega}^T = (\omega_1\ \omega_2\ \omega_3\ \omega_4\ \omega_5\ \omega_6\ \omega_7\ \omega_8)$

und $\vec{f}_k^T = (f_{k1}\ f_{k2}\ f_{k3}\ f_{k4}\ f_{k5}\ f_{k6}\ f_{k7}\ f_{k8})$

f	*interpolierter Funktionswert*
f_k	*Funktionswert an Knoten*

Hierbei stehen die Knotenfunktionswerte f_k für die spezifischen Zwischenergebnisse, die aus der Modellebene des Falzflansches an die jeweiligen Geometriestützpunkte des Elements übergeben werden. Jedes Zwischenergebnis gibt dabei den in der zweiten Modellebene ermittelten, interpolierten Funktionswert der Falzflanschgestaltung des Geometriestützpunktes an.

5.3.4 Modellebene des Falzflansches

Die unterschiedlichen Flanschlängen- und Öffnungswinkelkonstellationen der im Presswerk hergestellten Karosseriebeplankungsteile werden in der zweiten Modellebene berücksichtigt. In dieser Modellebene werden die verschiedenen Varianten für die Falzflanschgestaltung eines Geometriestützpunktes abgedeckt. Hierzu werden die Parameter Flanschlänge FL und Öffnungswinkel OW (vergleiche Abbildung 5.9) verwendet, mit denen die geometrische Gestalt des abgekanteten Falzflansches für das presswerkfallende Einzelteil beschrieben wird. Analog zu der Modellebene der geometrischen Grundformen wird hierbei ebenfalls der elementbasierte Modellansatz zugrunde gelegt. In Abbildung 5.13 ist der hierzu definierte Modellaufbau dargestellt.

Das Modell basiert hierbei auf einem zweidimensionalen Ansatz mit einem 4-Knotenelement, dessen Dimensionen durch die Parameter FL und OW beschrieben werden. Die Elementknoten stellen Stützpunkte dar, denen spezifische Auswerteergebnisse der Referenzdatenbasis als Knotenfunktionswerte hinterlegt sind. Durch die Geometriestützpunkte in der ersten Modellebene sind die Gestalt und die Blechdicke definiert. Deren Flanschlängen- und Öffnungswinkelvarianten werden nun durch die hier beschriebenen Stützpunkte ermittelt.

Aus der Kombination der ersten und zweiten Modellebene ergeben sich zahlreiche Varianten für die ein entsprechender Datensatz mit den spezifischen Auswertegrößen in der Referenzdatenbasis hinterlegt sein muss. Die Anzahl der definierten Modellstützpunkte hat somit direkte Auswirkungen auf den Umfang der Referenzdatenbasis. Da die Referenzdatenbasis für die entsprechenden Modellstützpunkte spezifisch erstellt werden muss, ist im Vorfeld der Modelldefinition ein besonderer Fokus auf die Wahl geeigneter Modellstützpunkte zu legen. Bei der

Falzflanschausführung von Karosseriebauteilen sind typischerweise Flanschlängen im geschlossenen Falzzustand im Bereich von 6,0-8,0 mm und Öffnungswinkel im Bereich von 70-130° vorzufinden. Aus diesem Grund werden diese Werte zunächst für die Definition der Modellränder herangezogen.

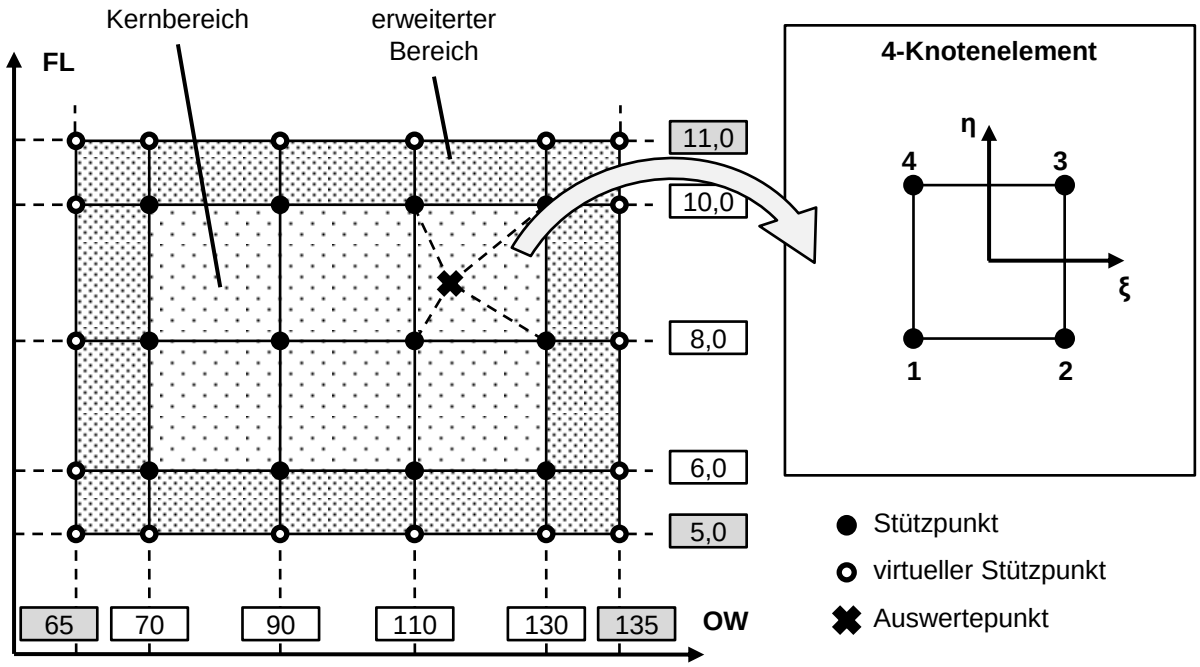


Abbildung 5.13: Stützpunkte und Elementdefinition in der Modellebene des Falzflansches

Um die Modellstützpunkte innerhalb der Wertebereiche festlegen zu können, konnte für die erste Modellebene eine Häufigkeitsverteilung der geometrischen Grundformen herangezogen werden. In der zweiten Modellebene steht eine möglichst effiziente Stützpunkdefinition im Vordergrund, da deren Anzahl einen erheblichen Einfluss auf die Erstellung der Referenzdatenbasis hat. Gleichzeitig muss auf Basis dieser Stützpunkte das Bauteilverhalten hinreichend genau wiedergegeben werden können. Aus diesem Grund wurde daher zunächst eine simulationsgestützte Sensitivitätsanalyse in AutoForm® mit den in Kapitel 4.1 beschriebenen Simulationseinstellungen durchgeführt, um die Parameter FL, OW und verschiedene Auswerteergebnisse hinsichtlich linearer und nichtlinearer Abhängigkeiten zu charakterisieren. Dabei wurden sowohl Roll- als auch Backenfalzprozesse betrachtet, bei denen die Werkstoffe AA6014-T4 mit 1,0 mm und CR4 mit 0,7 mm Innen- und Außenteilblechdicke untersucht wurden. Die hierfür verwendeten Simulationsmodelle sind in Kapitel 6.1.2 detailliert beschrieben.

Nach Auswertung der simulationsgestützten Versuche konnte die erforderliche Anzahl an Stützpunkten für die Modellebene des Falzflansches definiert werden. Durch die Wahl der Flanschlängenstützpunkte bei 6,0, 8,0 und 10,0 mm Fertigflanschlänge und die Wahl der Öffnungswinkelstützpunkte bei 70, 90, 110 und 130° ist es möglich, ein etwaiges nichtlineares

Verhalten der Ergebnisgrößen durch den linearen Modellansatz hinreichend genau wiederzugeben.

Zusätzlich zu den standardmäßigen Modellstützpunkten ist es darüber hinaus erforderlich, das Modell gegen selten vorkommende Sonderfälle abzusichern, die nicht durch die Standardwertebereiche abgedeckt sind. Um sicherstellen zu können, dass durch diese Szenarien keine Interpolationsfehler in den Modellebenen entstehen, wird der Wertebereich an den Modellrändern erweitert. Hierfür werden zusätzliche virtuelle Stützpunkte eingeführt, die durch eine Extrapolation der vorhandenen Stützpunkte erzeugt werden. Die Extrapolation ist hierbei auf kleine Bereichserweiterungen an den Rändern des Modells beschränkt (vergleiche Abbildung 5.13). Durch die virtuellen Stützpunkte können somit zusätzliche Elemente entlang des Randbereichs definiert werden, sodass auch seltene Kombinationen aus FL und OW mit dem elementbasierten Modellansatz erfasst werden können. In Tabelle 5.9 ist hierzu eine Übersicht mit den definierten Wertebereichen der spezifischen Modellparameter dargestellt.

Tabelle 5.9: Definierte Wertebereiche für die Modellebene des Falzflansches

Stützpunkte		**Virtuelle Stützpunkte**	
FL [mm]	**OW [°]**	**FL [mm]**	**OW [°]**
6,0	70	5,0	65
8,0	90	11,0	135
10,0	110		
	130		

Für die Interpolationsrechnung wird in dieser Modellebene ein Modellauswertepunkt durch die Eingangsgrößen FL und OW festgelegt. Befindet sich dieser innerhalb des Modellwertebereichs, kann dem Modellauswertepunkt ein Element zugeordnet werden. Die Elementknoten dienen hierbei wiederum als Basis für die Interpolation, bei der die Ergebnisermittlung analog zur Modellebene der geometrischen Grundformen erfolgt.

Durch die Transformation der globalen Koordinaten FL und OW in die lokalen, einheitlichen Koordinaten ξ und η des 4-Knoten-Lagrange-Elements können wiederum die hierfür gültigen Formfunktionen ω als Interpolationsfunktionen herangezogen werden:

$$\omega_1 = \frac{1}{4} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 - \eta) \qquad \text{Gleichung 5.15}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{4} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 - \eta) \qquad \text{Gleichung 5.16}$$

$$\omega_3 = \frac{1}{4} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 + \eta)$$ *Gleichung 5.17*

$$\omega_4 = \frac{1}{4} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 + \eta)$$ *Gleichung 5.18*

ξ *lokale Koordinate* ξ
η *lokale Koordinate* η

Für die Interpolation des gesuchten Funktionswertes f wird die Gleichung 5.14 unter Berücksichtigung von vier Elementknoten verwendet. In diesem Fall entspricht der Knotenfunktionswert f_k einem spezifischen Auswerteergebnis, das in der Referenzdatenbasis hinterlegt ist. Der interpolierte Funktionswert f kann daraufhin als Zwischenergebnis des Falzflanschmodells an die übergeordnete Modellebene der geometrischen Grundformen übergeben werden.

5.3.5 Modellebene der Referenzdatenbasis

In der dritten Modellebene ist der Metamodellaufbau mit einer Auswertedatenbank gekoppelt. Diese Datenbank stellt die Referenzdatenbasis dar, die die Auswertegrößen für die definierten Modellstützpunkte zur Verfügung stellt. In Abbildung 5.14 ist hierzu der grundlegende Datenbankaufbau dargestellt.

Grundsätzlich sind sowohl produkt- als auch prozessbezogene Auswertegrößen in der Datenbank vorzufinden. Da jeder Modellstützpunkt eine individuelle Produktvariante darstellt, ist hierfür ein eigener Eintrag in der Referenzdatenbank erforderlich. Für einen Geometriestützpunkt in der ersten Modellebene sind für den aktuellen Metamodellaufbau beispielsweise zwölf Modellstützpunkte in der zweiten Modellebene notwendig, die in Form von individuellen Produktvarianten in der Referenzdatenbasis hinterlegt sein müssen.

Darüber hinaus ist jede Produktvariante an diverse Prozessvarianten, wie beispielsweise Roll- oder Backenfalzen mit variierenden Werkzeugzustellungen, gekoppelt, sodass hierdurch zusätzliche, spezifische Auswertegrößen resultieren. Dadurch entsteht eine umfangreiche Auswertedatenbank, die die produkt- und prozessbezogenen Informationen über die Herstellbarkeit der dort eingepflegten Geometrie- und Falzflanschstützpunkte bereitstellt. Die eingepflegten Prozessvarianten sowie die zu betrachtenden Auswertegrößen können dabei bedarfsgerecht festgelegt und jederzeit erweitert werden. Für die vorliegende Referenzdatenbasis wurden beispielsweise vier Roll- und zwei Backenfalzvarianten definiert, die ihrerseits je fünf verschiedene Auswertegrößen bereitstellen.

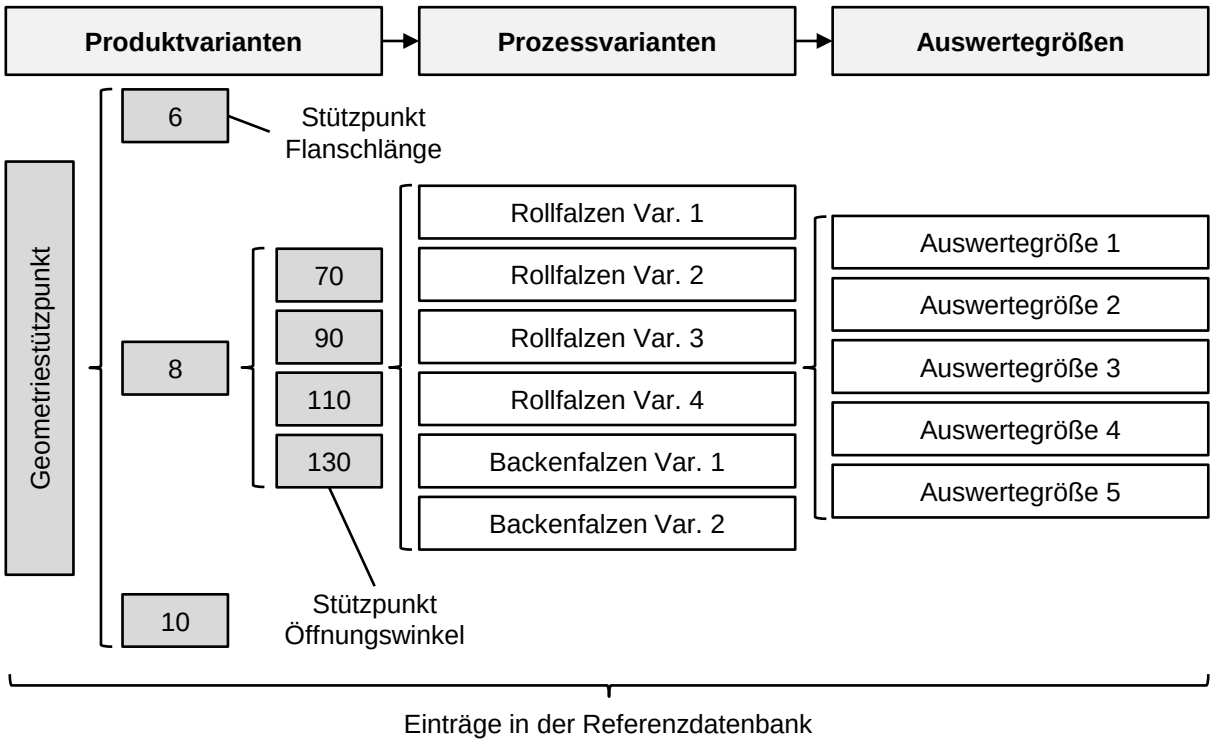


Abbildung 5.14: Modellstützpunktbasierter Aufbau der Referenzdatenbasis

Des Weiteren besteht zusätzlich die Möglichkeit, in der Referenzdatenbank weitere Produktvarianten zu definieren, die nicht über den geometriebezogenen Modellaufbau erfasst werden können. So können beispielsweise verschiedene Varianten für Werkstoffe oder für die konstruktiv vorgehaltene Falzzugabe in der Auswertedatenbank angelegt werden, ohne dass ein zusätzlicher Modellstützpunkt im Metamodellaufbau erforderlich ist. Das Spektrum an Auswertevarianten ist somit flexibel wählbar und hängt in erster Linie von den gegebenen Rahmenbedingungen zur Bereitstellung der Referenzdaten ab.

5.4 Vorstellung des Assistenzsystems

Mit der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Bauteilanalysemethodik wird eine Möglichkeit geschaffen, beliebige Karosseriebauteile in Bezug auf die falztechnische Herstellbarkeit anhand von verschiedenen Auswertegrößen bewerten zu können. Aufgrund des komplexen Datenmanagements ist es dabei erforderlich, dass die dazu notwendigen Arbeitsschritte automatisiert ablaufen. Zu diesem Zweck wurde daher ein spezielles Falzassistenzprogramm erstellt, mit dem eine automatisierte Bauteilanalyse und Ergebnisauswertung ermöglicht wird.

Im Folgenden wird dazu zunächst auf den Programmaufbau und die Funktionsweise des Falzassistenzprogramms eingegangen. Anschließend wird dessen grafische Benutzeroberfläche in einem kurzen Überblick vorgestellt.

5.4.1 Programmaufbau und Funktionsweise

Das Falzassistenzprogramm stellt ein System dar, welches eine Herstellbarkeitsbewertung von gefalzten Karosseriebauteilen ermöglicht. Hierzu greift das mit der Programmiersprache „C#“ erstellte System auf die bereits vorgestellte, geometriebezogene Bauteilanalysemethodik zurück, bei der eine Bauteilbewertung anhand von individuellen geometrischen Grundformen erfolgt. Der grundlegende Programmaufbau besteht hierbei aus einer automatischen Konturerkennung, einer manuellen Systemeingabe, dem Metamodell und einer grafischen Systemausgabe. In Abbildung 5.15 ist hierzu neben dem Programmaufbau auch die prinzipielle Funktionsweise des Falzassistenzprogramms dargestellt.

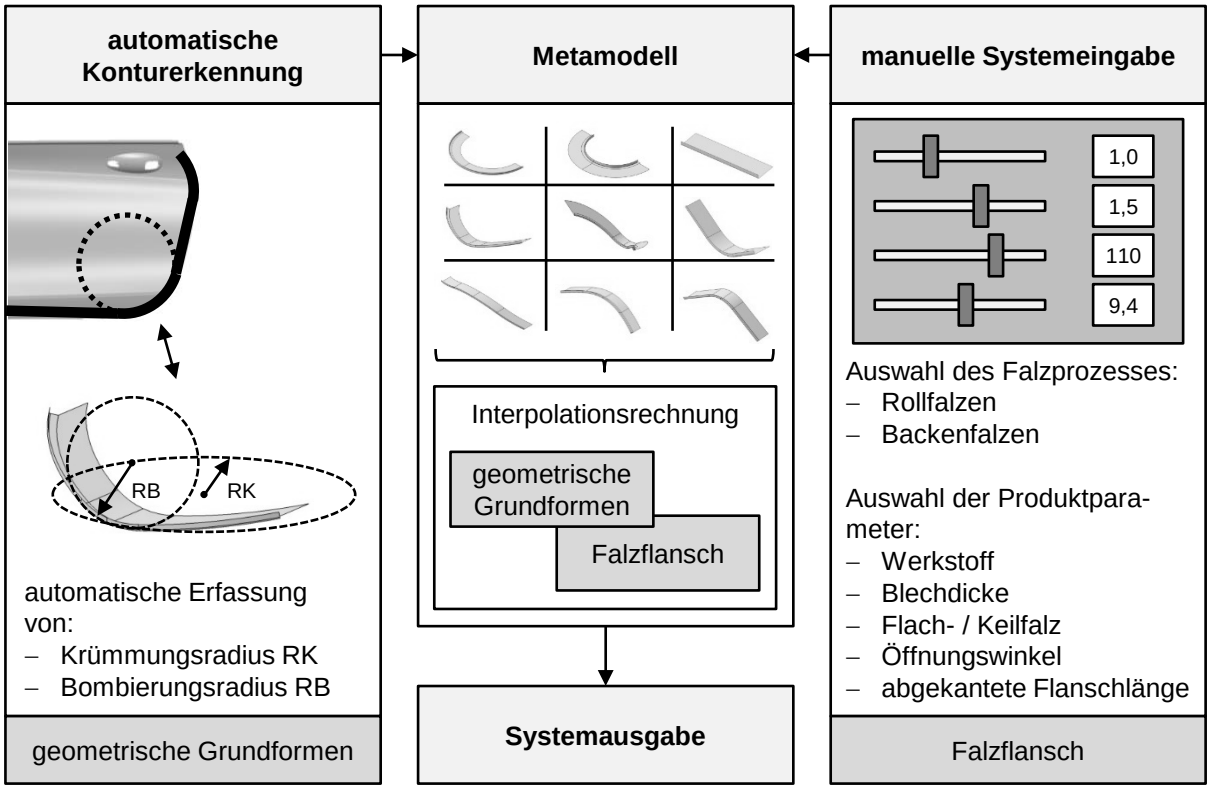


Abbildung 5.15: Programmaufbau und Funktionsweise des Falzassistenzprogramms

Für eine Bauteilanalyse werden zunächst CAD-Daten des zu falzenden Bauteils herangezogen. Zur Ermittlung der produktbasierten Eingangsgrößen wurde eine automatische Konturerkennung umgesetzt, die nach der Methodik der Bauteilsegmentierung, Parametrisierung, Klassifizierung und Geometriezuweisung vorgeht. Dabei werden die geometriebezogenen Eingangsgrößen für das zugrunde gelegte Metamodell bei der Bauteilanalyse automatisch durch eine Konturerkennung des Falzassistenzprogramms erfasst. Gleichzeitig sind manuelle Systemeingaben möglich, um ergänzende Eingangsgrößen anzugeben oder um die automatisch erfassten Werte zu modifizieren. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, prozessrelevante Eingangsgrößen

zu definieren, sodass beispielsweise Roll- oder Backenfalzprozesse für die Bauteilanalyse berücksichtigt werden können.

Nach erfolgter Systemeingabe ermittelt das Programm bei der Bauteilanalyse alle relevanten Auswerteergebnisse für den zu analysierenden Bauteilbereich. Dabei wird ein Ergebnisdatensatz an das System zurückgegeben, der alle produkt- und prozessrelevanten Auswertegrößen beinhaltet. Anschließend werden die Ergebnisse in dem Falzassistenzprogramm grafisch so aufbereitet, dass hierdurch ein Anwender eine schnelle Bewertung in Bezug auf die falztechnische Umsetzbarkeit durchführen kann. Aufgrund der metamodellbasierten Bauteilanalyse ist es möglich, verschiedene Produkt- und Prozessvarianten in kurzer Zeit zu begutachten und miteinander zu vergleichen. Darüber hinaus bietet das System eine Möglichkeit, verschiedene Prozesseinflüsse gegenüberzustellen, um daraus eine passende Falzstrategie ermitteln zu können. Alle Auswertegrößen werden hierbei für mehrere Varianten des Falzprozesses bereitgestellt. Dadurch kann das zu erwartende Bauteilverhalten für unterschiedliche Prozesseinstellungen übersichtlich dargestellt werden. Dies ist insbesondere für die Identifizierung von Prozesseinflüssen von Bedeutung, sodass auf dieser Grundlage eine gezielte Prozessoptimierung erfolgen kann.

In Abbildung 5.16 ist in diesem Zusammenhang die Vorgehensweise bei der Prozessoptimierung am Beispiel der Auswertegröße U dargestellt, welche die Umrissmaßabweichung zu einem Soll-Bauteil im fertig gefalzten Zustand beschreibt.

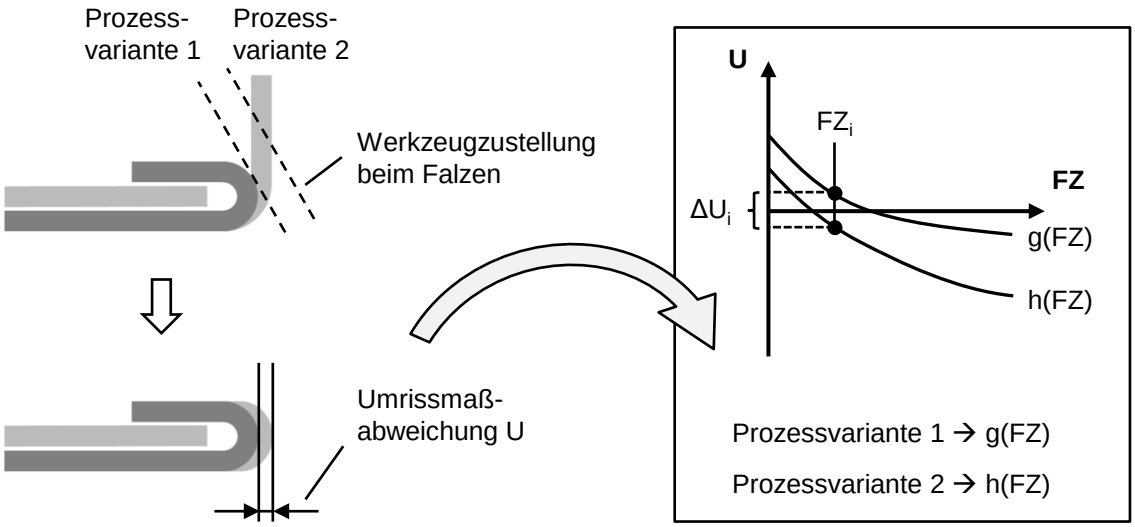


Abbildung 5.16: Beispiel zur Ermittlung einer geeigneten Falzzugabe für ein zu falzendes Karosseriebauteil

Es existieren hierbei zwei Prozessvarianten, die sich hinsichtlich der Werkzeugzustellung beim Vorfalzen unterscheiden. Aufgrund der verschiedenen Varianten resultiert ein unterschiedliches Einrollverhalten beim Falzen, was sich wiederum auf das erzielte Umrissmaß im fertig gefalzten Zustand auswirkt. Damit das Einrollverhalten, das hierbei durch einen Falzverlust gekennzeichnet ist, kompensiert werden kann, wird das Umrissmaß des presswerkfallenden Einzelteils durch eine entsprechende Falzzugabe FZ vergrößert. Der Wert für die dafür vorgesehene Falzzugabe wird in der Regel iterativ anhand von FE-Simulationen oder auf Basis von Erfahrungswerten festgelegt. Um hierbei nun einen geeigneten Wert für eine möglichst robuste und prozessunabhängige Ziel-Umrissmaßerreichung ermitteln zu können, ist die Auswertung zahlreicher Produkt- und Prozessvarianten erforderlich, die in diesem Fall durch das Falzassistenzprogramm bereitgestellt werden können.

Für die Optimierungsaufgabe wird zunächst ein funktionaler Zusammenhang zwischen der resultierenden Umrissmaßabweichung und der konstruktiv vorgehaltenen Falzzugabe aufgestellt. Dabei repräsentieren die Funktionen g(FZ) und h(FZ) jeweils eine Prozessvariante mit einer spezifischen Werkzeugzustellung. Ein geeigneter Wert für die Falzzugabe ist dadurch gekennzeichnet, dass zum einen das Ziel-Umrissmaß bestmöglich erreicht wird und zum anderen die Variation der Werkzeugstellung einen möglichst geringen Effekt auf das resultierende Umrissmaß ausübt. Letzteres ist insbesondere bei Rollfalzprozessen von großer Bedeutung, da hierbei aufgrund der Systemsteifigkeit des Falzroboters Schwankungen der Rollenzustellung entlang des Bahnkurvenverlaufs auftreten können. Für eine möglichst robuste Auslegung kann die Variante mit der minimalen Umrissschwankungsbreite ΔU_{min} wie folgt ermittelt wird:

$$\Delta U_{min} = min(\Delta U_1, \Delta U_2, \ldots, \Delta U_i) \qquad \textit{Gleichung 5.19}$$

$$\text{mit } \Delta U_i = \left| h(FZ_i) - g(FZ_i) \right| \qquad \textit{Gleichung 5.20}$$

ΔU_{min}	*minimale Umrissschwankungsbreite*
g(FZ)	*Funktionsverlauf mit Prozessvariante 1*
h(FZ)	*Funktionsverlauf mit Prozessvariante 2*

Der Wert für die Falzzugabe FZ kann daraufhin so ausgewählt werden, dass eine bestmögliche Kombination aus der minimalen Umrissmaßabweichung U_{min} und der minimalen Umrissschwankungsbreite ΔU_{min} erreicht wird.

Da die Bauteilanalyse des Falzassistenzprogramms segmentweise durchgeführt wird, können einzelne Bauteilbereiche individuell ausgewertet werden. Dadurch ist es möglich, bereichsspezifische Optimierungsmaßnahmen effizient zu definieren, ohne dass eine etwaige Simulation

des kompletten Bauteils erforderlich ist. In Abbildung 5.17 ist hierzu beispielhaft eine Motohaube dargestellt, die aufgrund ihrer komplex gestalteten Umrisskontur bei der Auslegung des Falzprozesses diverse Produktoptimierungsmaßnahmen erfordert.

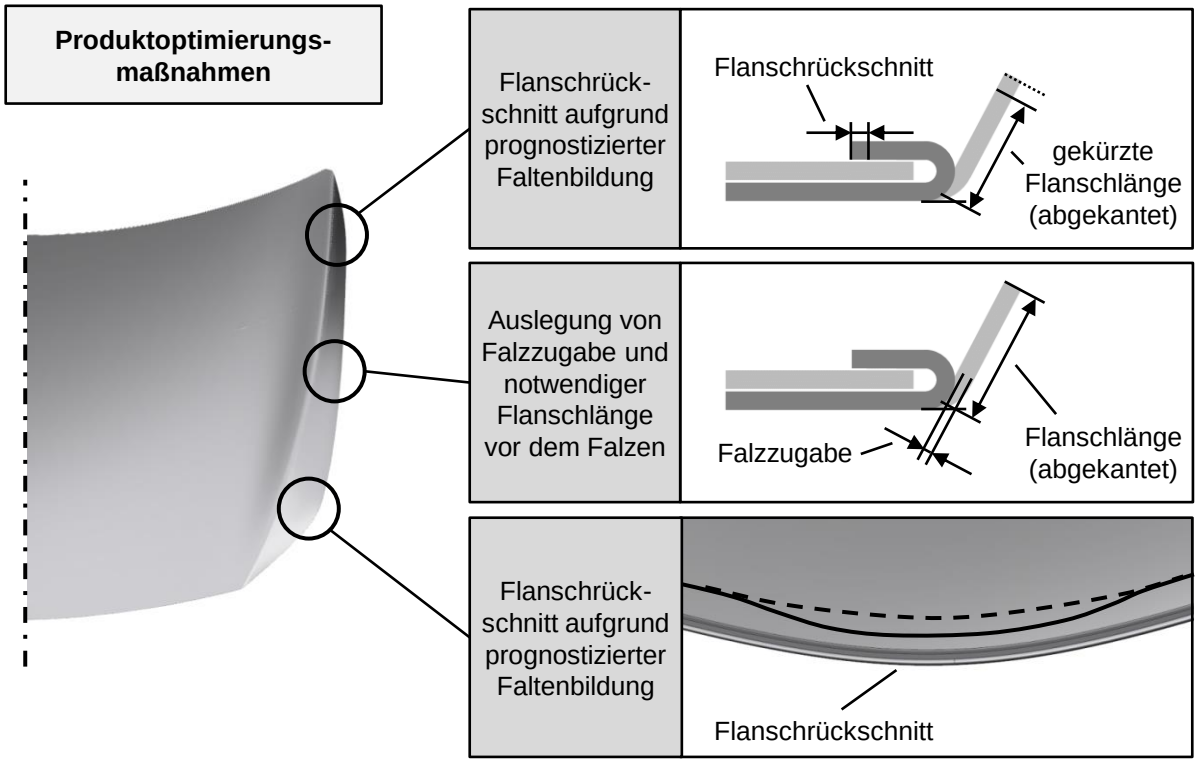


Abbildung 5.17: Beispiel zur Definition von Produktoptimierungsmaßnahmen nach erfolgter Bauteilanalyse

Um beim Falzen der Motorhaube eine Faltenbildung zu vermeiden, ist es erforderlich, dass insbesondere für die konvex gekrümmten Bauteilbereiche mit großen Öffnungswinkeln, Flanschrückschnitte vorgesehen werden. Durch die metamodellbasierte Bauteilanalyse kann hierbei innerhalb weniger Sekunden eine passende Flanschlänge für die entsprechenden Bauteilbereiche ermittelt werden. Gleichzeitig können die Werte für die Vorhaltemaße Falzzugabe und Flanschlänge für das presswerkfallende Einzelteil effizient definiert werden, indem die Effekte von verschiedenen Produkt- und Prozessvarianten bereichsspezifisch erfasst und optimiert werden. Das Falzassistenzprogramm ermöglicht hierbei eine effiziente Absicherung der Herstellbarkeit und verbessert somit die Auslegung des Falzprozesses.

5.4.2 Grafische Benutzeroberfläche

Für eine bessere Anwendbarkeit des Falzassistenzprogramms wurde eine grafische Benutzeroberfläche erstellt. Diese besteht prinzipiell aus einem Eingabe- und einem Ausgabebereich. Zusätzlich stehen zwei Modellansichten zur Verfügung, die zum einen das CAD-Bauteil dreidimensional und zum anderen zweidimensional als Schnittdarstellung durch einen Bauteilbereich visualisieren. In Abbildung 5.18 ist hierzu die grafische Benutzeroberfläche des Falzassistenzprogramms exemplarisch mit einer Kurzbeschreibung der jeweiligen Programmbereiche abgebildet.

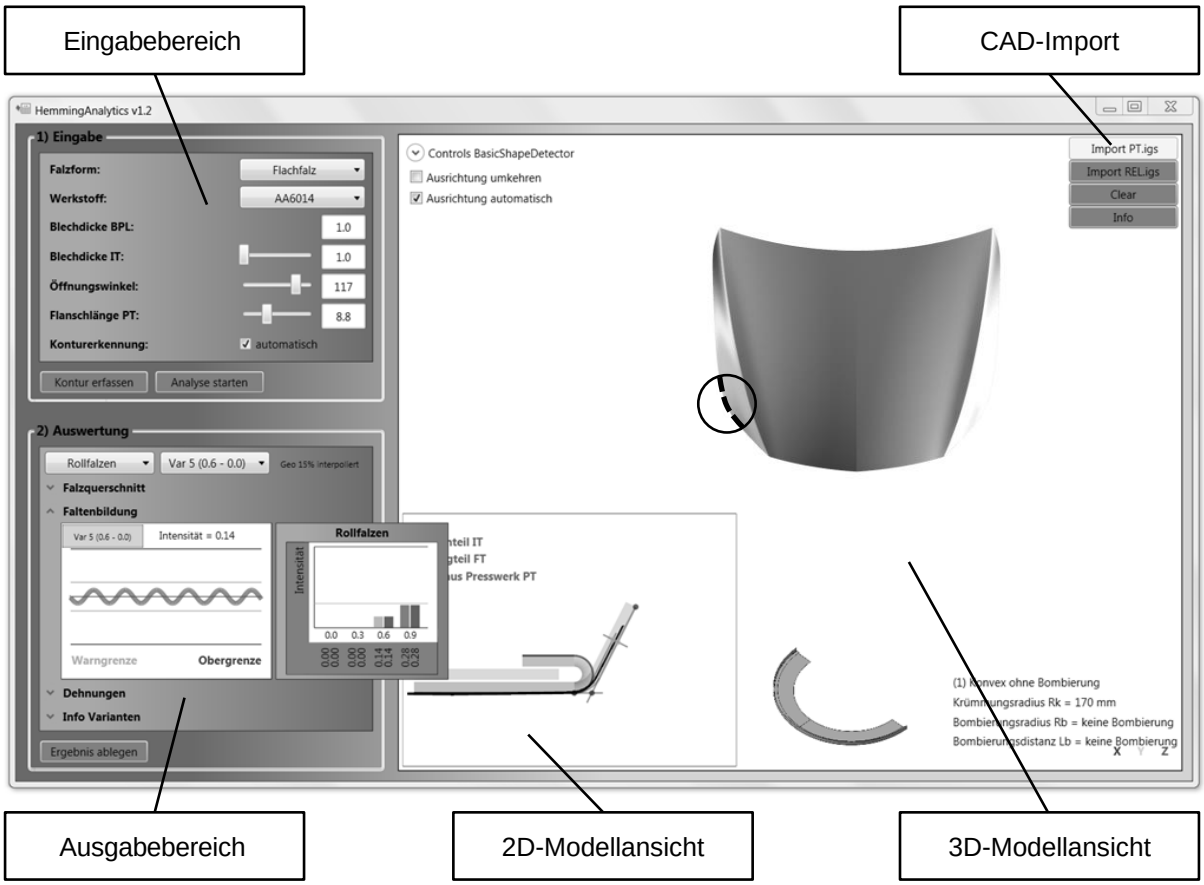


Abbildung 5.18: Grafische Benutzeroberfläche des Falzassistenzprogramms

Nach dem Importieren der CAD-Daten wird das zu analysierende Karosseriebauteil in der 3D-Modellansicht dargestellt, sodass daraufhin entsprechende Bauteilbereiche zielgerichtet untersucht werden können. Mit dem manuellen Eingabebereich können jederzeit unabhängig von der automatischen Konturerkennung verschiedene Produkt- und Prozessvarianten des zu analysierenden Bauteils erstellt werden. Grundsätzlich sind dabei alle Eingangsgrößen des Falzassistenzprogramms individuell modifizierbar. So ist es beispielsweise möglich, die Parameter in Bezug auf die geometrische Grundform, die Falzflanschgestaltung oder aber auch den Werkstoff zu variieren. Dadurch lassen sich in kürzester Zeit verschiedene Varianten von einem zu

falzenden Bauteil erstellen, um diese daraufhin durch die Bauteilanalysefunktion des Falzassistenzprogramms auszuwerten.

In der 2D-Modellansicht ist ein dynamisches Modell der Falzflanschgestaltung dargestellt. Dieses zeigt einen Falzquerschnitt mit den Parametern Flanschlänge und Öffnungswinkel und passt sich dynamisch an die definierten Eingangsgrößen an. Das Modell ist dabei sowohl an die automatische Konturerkennung als auch an den manuellen Eingabebereich gekoppelt und gibt hierbei stets die aktuell vorliegende Parametereingabe grafisch wieder. Bei dem Import von CAD-Daten wird das dynamische Modell zunächst auf Grundlage der automatischen Konturerkennung ausgerichtet. Bei einer anschließenden Modifizierung der Eingabedaten über den manuellen Eingabebereich wird die Falzflanschgestaltung des Modells daraufhin an das modifizierte Szenario angepasst. Der Anwender hat somit unabhängig von den vorliegenden CAD-Daten immer eine visuelle Darstellung der aktuell definierten Produktvariante vorliegen, sodass daraufhin die Effekte verschiedener Bauteilvarianten übersichtlich und effizient ausgewertet werden können.

Der Ausgabebereich des Falzassistenzprogramms ist so gestaltet, dass eine falzspezifische Auswertung ermöglicht wird. Dabei werden die spezifischen Auswertegrößen grafisch so aufbereitet, dass eine bestmögliche Bewertung des zu falzenden Bauteils durchgeführt werden kann und dementsprechend zielgerichtete Maßnahmen für die Auslegung des Falzprozesses definiert werden können.

6 Methodik zur Bereitstellung der Referenzdaten

Die Referenzdatenbasis stellt den zentralen Baustein bei der Metamodelldefinition dar, auf deren Datengrundlage die Herstellbarkeitsbewertung der gefalzten Karosseriebauteile stattfindet. In diesem Kapitel wird nun die methodische Vorgehensweise zur Erstellung dieser geometriebezogenen Datenbank vorgestellt.

Hierfür ist ausschließlich eine simulationsgestützte Datenerfassung zweckmäßig. Aus diesem Grund wird daher zunächst die Vorgehensweise für den Aufbau von entsprechenden Simulationsmodellen und deren Validierung beschrieben. Anschließend wird auf die eigentliche Simulationsdurchführung und die Ergebnisauswertung eingegangen, sodass auf dieser Grundlage eine effiziente Erstellung der Referenzdatenbasis erfolgen kann.

6.1 Definition und Aufbau von FE-Modellvorlagen

Für die Erstellung der Referenzdatenbasis ist die Bereitstellung von zahlreichen Ergebnisdaten gefalzter geometrischer Grundformen erforderlich. Aufgrund der Vielzahl an verschiedenen Produkt- und Prozessvarianten wird hierzu eine simulationsgestützte Ergebnisermittlung auf Basis einer Versuchsdurchführung mit FE-Simulationsmodellen angestrebt. Im Sinne eines virtuellen Labors sollen mit allgemeingehaltenen Simulationsmodellen unterschiedliche geometrische Grundformen effizient simuliert und ausgewertet werden.

Um den notwendigen Modellierungs- und Simulationsaufwand im Vorfeld abschätzen zu können, wird zunächst ein Anforderungsprofil für eine effiziente Simulationsdurchführung erstellt. Der definierte Metamodellaufbau gibt hierbei die notwendigen Produkt- und Prozessvarianten vor, die durch entsprechende FE-Simulationen mit Ergebnisdaten versorgt werden müssen. Auf dieser Grundlage werden daraufhin FE-Simulationsmodelle aufgebaut, mit denen die Operationsfolgen Beschneiden, Abkanten und Falzen für beliebige geometrische Grundformen und ihre entsprechenden Falzflanschvarianten simuliert werden können. Die Gültigkeit und Anwendbarkeit dieser Modelle wird dabei mit Hilfe von experimentellen Versuchen belegt.

6.1.1 Anforderungsprofil an die FE-Modelle

Für das Preprocessing ist insbesondere der Modellierungsaufwand ein entscheidendes Kriterium. Um hierbei den Arbeits- und Zeitaufwand möglichst gering zu halten, ist es sinnvoll, allgemeingehaltene Simulationsvorlagen zu verwenden, die an die jeweiligen geometrischen Grundformen bedarfsgerecht angepasst werden können. Dies erfordert zum einen eine einfache Integration von Bauteil- und Werkzeugdaten in den bestehenden Modellaufbau. Dabei ist es

erforderlich, dass insbesondere die Werkzeugbewegungen flexibel an die Gegebenheiten der vorliegenden geometrischen Grundform angepasst werden können. Darüber hinaus stellt insbesondere die Bahnkurvendefinition bei Rollfalzsimulationen einen signifikanten Teil des Modellierungsaufwands dar. Daher wird zum anderen eine Möglichkeit angestrebt, unterschiedliche Werkzeuggestaltungen und -zustellungen durch eine einfache Modifikation der Simulationsvorlagen zu definieren, sodass verschiedene Prozessvarianten effizient simuliert werden können.

Bei dem Solving besteht die Hauptanforderung an die Berechnungsdauer der Simulationsmodelle. Die Vielfalt der geometrischen Grundformen und die zahlreichen Falzprozessvarianten führen zu einer großen Anzahl an Einzelsimulationen. Des Weiteren besteht die Anforderung, dass die Fertigungsschritte Beschneiden, Abkanten und Falzen durch eine hintereinandergeschaltete, durchgängige Simulationskette berücksichtigt werden. Für jede Einzelsimulation ist daher eine möglichst geringe Berechnungsdauer anzustreben. Insbesondere eine feine Vernetzung mit kleinen Elementkantenlängen hat lange Rechenzeiten zur Folge. Zusätzlich kommen bei der Simulation von Rollfalzprozessen große Werkzeugbewegungen durch die Bahnkurven der Falzrollen hinzu. Die Simulationsmodelle müssen hierbei im Vorfeld so ausgelegt werden, dass ein guter Kompromiss zwischen Rechenzeit und hinreichend genauer Geometrieabbildung erreicht werden kann. Darüber hinaus ist ein stabiler Simulationsdurchlauf erforderlich, da die Einzelsimulationen in der Simulationskette hintereinander berechnet werden und ein etwaiger Fehler in einer Einzelsimulation zum Abbruch der gesamten Simulationskette führt.

Im Postprocessing ist aufgrund der bereits erwähnten großen Variantenvielfalt eine schnelle und weitestgehend automatisierte Simulationsauswertung von besonderem Interesse. Die Simulationsergebnisse sollen hierzu so bereitgestellt werden können, dass keine weiteren manuellen Modifizierungsmaßnahmen zur Befüllung der Referenzdatenbasis erforderlich sind. Insbesondere für die Auswertung der geometriebezogenen Ergebnisgrößen, bei denen geometrische Maße am Modell ermittelt werden müssen, ist darüber hinaus eine messtechnisch reproduzierbare Auswertemethodik anzustreben.

6.1.2 Grundlegender FE-Modellaufbau

Im Hinblick auf eine bestmögliche Erfüllung des beschriebenen Anforderungsprofils wurde für den Modellaufbau und die Simulationsdurchführung das kommerzielle Umformsimulationsprogramm AutoForm®plus R6 mit den in Kapitel 4.1 beschriebenen Simulationseinstellungen herangezogen. Der grundlegende Simulationsaufbau besteht hierbei aus den Prozessschritten

Beschneiden, Abkanten und Falzen, die als hintereinandergeschaltete Operationsfolgen definiert wurden. In Abbildung 6.1 ist hierzu der definierte Prozessablauf als Übersicht dargestellt.

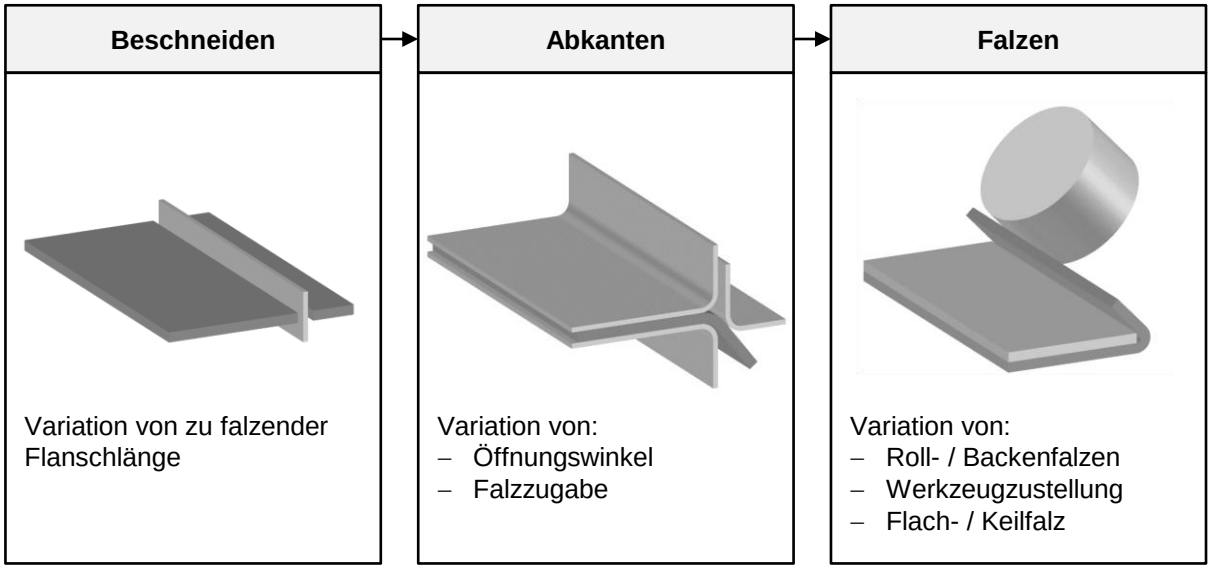


Abbildung 6.1: Übersicht des grundlegenden Prozessablaufs bei den definierten FE-Simulationsmodellen

Die FE-Modelle wurden dabei so aufgebaut, dass verschiedene Varianten für die einzelnen Operationen durch einen einfachen und schnellen Modelldatenaustausch simuliert werden können. Hierzu wurden alle relevanten Falzwerkzeuge sowie deren Werkzeugbewegungen variantenspezifisch vordefiniert, sodass hiermit spezielle FE-Modellvorlagen generiert werden konnten, die dem beschriebenen Anforderungsprofil gerecht werden.

Als Ausgangsbasis für jede Simulation dient eine Platine in Gestalt der entsprechenden geometrischen Grundform. In der Beschneidoperation wird die Platine so vorbereitet, dass eine festgelegte Flanschlänge nach dem Falzen erreicht wird. Hierzu wird eine spezifisch definierte Beschnittkurve herangezogen, um die jeweiligen Flanschlängenvarianten zu realisieren. In der Abkantoperation kommen spezifisch gestaltete Abkantwerkzeuge zum Einsatz, mit denen zum einen die Varianten für die Öffnungswinkel und gleichzeitig die Varianten für die Falzzugaben bereitgestellt werden. Durch den Metamodellaufbau sind hierbei die Konstellationen für die Flanschlängen und die Öffnungswinkel vorgegeben. Darüber hinaus ist es allerdings durch die Modellebene der Referenzdatenbasis möglich, dass verschiedene weitere Produkt- und Prozessvarianten berücksichtigt werden können. In diesem Zusammenhang wurden nun für die Falzoperation spezifische Prozessvarianten von Roll- und Backenfalzprozessen definiert, um somit bei der metamodellbasierten Bauteilanalyse eine möglichst großes Auswertspektrum zu ermöglichen. In Abbildung 6.2 ist hierzu eine Übersicht mit den entsprechend definierten Modellvarianten dargestellt.

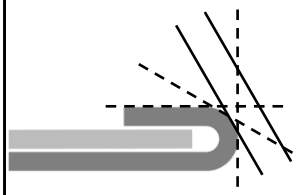
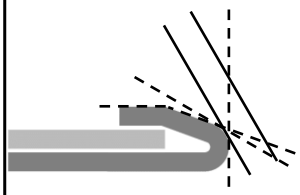
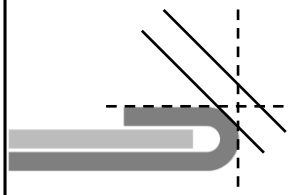
Modellvarianten	Rollfalzen Flachfalz	Rollfalzen Keilfalz	Backenfalzen Flachfalz
Falzwerkzeug: Vorfalzen: Fertigfalzen:	 Zylinderrolle Ø50 Zylinderrolle Ø50	 Zylinderrolle Ø50 Formrolle Ø50	 konturbezogen konturbezogen
Falzschritte: - - - - -	90, 60, 30, 0	90, 60, 30, 0	90, 45, 0
Werkzeug-zustellung: ———	0,0 0,6	0,0 0,6	0,0 0,6
Längenangaben in [mm] und Winkel-angaben in [°]			

Abbildung 6.2: Modellvarianten für die Falzsimulation

Die Rollfalzmodelle wurden so aufgebaut, dass das Falzen in 30°-Schritten erfolgt. Bei Bauteilen mit Öffnungswinkeln kleiner als 90° werden demnach drei Falzschritte und bei Bauteilen mit Öffnungswinkeln größer als 90° werden vier Falzschritte ausgeführt. Die Backenfalzmodelle wurden hierzu nach analoger Vorgehensweise erstellt, wobei die für das Backenfalzen typischen 45°-Falzschritte gewählt wurden. Für beide Prozessvarianten besteht die Möglichkeit die Werkzeugzustellung, welche durch einen spezifischen Abstand zum Falzflansch charakterisiert ist, in einem Vorfalzschritt zu variieren. Hierbei wurden zwei Szenarien abgebildet, bei der zum einen das Falzwerkzeug direkt an dem gedachten Berührpunkt des geschlossenen Falzes anliegt und zum anderen das Falzwerkzeug in einem definierten Abstand zum Falzflansch versetzt ist. Die Rollfalzmodelle sind darüber hinaus in zwei verschiedene Varianten untergliedert, die sich hinsichtlich des zu realisierenden Falztyps unterscheiden. Im Gegensatz zum Flachfalz wird bei der Fertigung des Keilfalzes hierbei im letzten Falzschritt statt einer konventionellen zylindrischen Falzrolle eine speziell gestaltete Formrolle verwendet.

Bei den definierten FE-Modellen wird die Lage des Innenteils bei allen Modellvarianten konstant gehalten und ist lediglich von dem zu realisierenden Falztyp abhängig. Hierbei wurde bei einem Flachfalz ein Wert von 2,0 mm und bei einem Keilfalz ein Wert von 2,5 mm definiert, der den Abstand von Innenteil zu Außenteil in der Falzschlaufe angibt. Da das starre Innenteil in der Simulation mit AutoForm® eine Niederhalterfunktion zur Fixierung des Außenteils übernimmt, wird dadurch das Einrollverhalten von Bauteilen mit Öffnungswinkeln von größer als 90° beeinflusst. Beim Falzen von realen Karosseriebauteilen wird die Bauteilfixierung über einen Niederhalter realisiert, der nach Möglichkeit unmittelbar am Falzflansch positioniert ist.

Hierdurch wird die Tendenz zur elastischen Deformation des Innenteils minimiert, sodass für diese Szenarien die Vereinfachung durch das starre Innenteil möglich ist.

6.1.3 Validierung und Anwendbarkeit der FE-Modelle

Die definierten FE-Modellvorlagen bilden nun die Grundlage für die Erstellung der Referenzdaten, die für die entsprechenden Metamodellstützpunkte erforderlich sind. Da anhand der Referenzdatenbasis die Herstellbarkeit der gefalzten Karosseriebauteile bewertet wird, ist es zunächst notwendig, im Vorfeld der Simulationsdurchführung die Gültigkeit und Anwendbarkeit der definierten FE-Modelle zu prüfen. In diesem Zusammenhang wurden daher spezifische Validierungsmaßnahmen durchgeführt, um die Prognosegüte der Simulationsmodelle in Bezug auf die Auswertegrößen geometrische Falzform, Tendenz zur Faltenbildung und plastische Dehnung zu untersuchen.

Für den Simulationsabgleich wurden dabei experimentelle Versuche mit dem in Kapitel 4.2 vorgestellten Backenfalzversuchswerkzeug durchgeführt. Im Vergleich zum Rollfalzen unterliegt das Backenfalzen weniger Prozesseinflüssen und ist daher prinzipiell besser für die experimentelle Versuchsdurchführung zur Validierung der FE-Modelle geeignet. Beim Rollfalzen stellt der Falzroboter ein rückfederndes Gesamtsystem dar, das sich je nach ausgestreckter Lage des Roboters unterschiedlich verhält (Drossel et al. 2014). Dadurch können Abweichungen zur programmierten Rollfalzbahn entstehen, die wiederum einen Einfluss auf die geometrische Bauteilmaßhaltigkeit ausüben (Eisele et al. 2010a). Bei dem verwendeten Backenfalzversuchswerkzeug findet hingegen eine hubförmige Werkzeugbewegung in einer Säulenführung statt. Die Werkzeuggestaltung ist massiv ausgeführt, sodass die Werkzeugrückfederung beziehungsweise die Durchbiegung des Gesamtaufbaus vernachlässigbar klein ist. Für die experimentelle Versuchsdurchführung wurden gerade sowie konvex und konkav gekrümmte Proben aus dem Aluminiumblechwerkstoff AA6014 im T4-Zustand herangezogen. Der Krümmungsradius RK der Proben betrug hierbei 70 mm, die Außenteilblechdicke 1,0 mm und die Innenteilblechdicke 1,5 mm. In Abbildung 6.3 ist hierzu der entsprechende Versuchsaufbau dargestellt.

Bei der Versuchsdurchführung wurden die Proben zunächst so eingelegt, dass eine initiale Flanschlänge von 9,8 mm eingestellt werden konnte. Das zu validierende Simulationsmodell wurde für den Flanschlängenabgleich dementsprechend mit denselben Bezugswerten eingestellt. Daraufhin wurden die Proben auf einen Öffnungswinkel von 90° abgekantet. Das anschließende Backenfalzen erfolgte in zwei Schritten, bei denen die Probe zunächst auf 45° vorgefalzt und schließlich fertig gefalzt wurde.

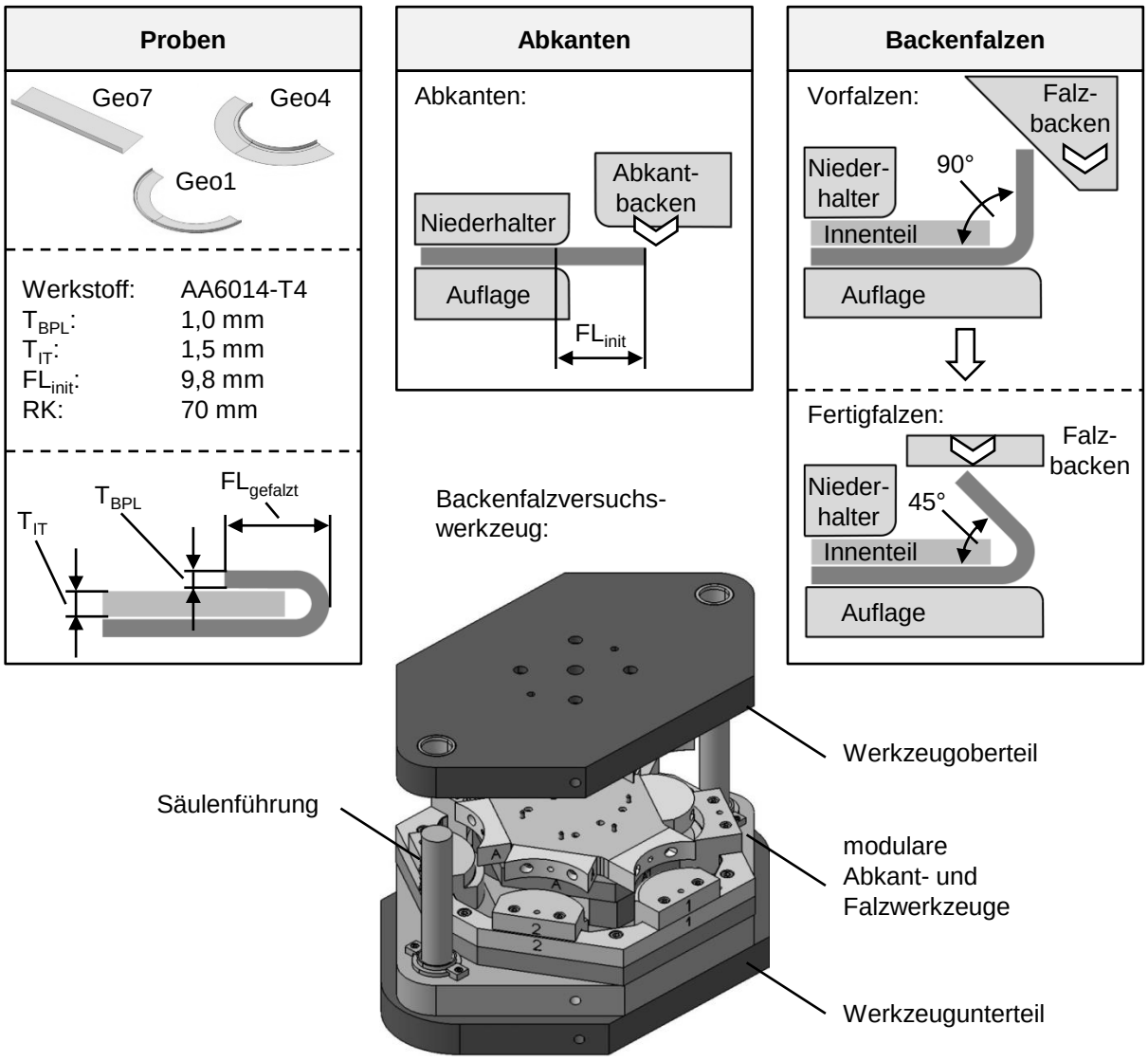


Abbildung 6.3: Versuchsaufbau für die experimentellen Backenfalzversuche

Für die Simulationsvalidierung wurden die definierten FE-Modellvorlagen mit den geometrischen Grundformen Geo7, Geo1 und Geo4 verwendet, die den Proben mit der geraden, der konvexen und der konkaven Bauteilform entsprechen. Daraufhin wurden die FE-Simulationen analog zu den experimentellen Backenfalzversuchen durchgeführt und anschließend ausgewertet. Abbildung 6.4 zeigt hierzu die aus der Simulation resultierende Bauteilgestalt nach den Prozessschritten Abkanten, Vorfalzen und Fertigfalzen.

Im Folgenden werden nun diese Simulationsergebnisse herangezogen, um anhand der falztechnisch relevanten Auswertegrößen einen detaillierten Vergleich mit den Ergebnissen aus den experimentellen Backenfalzversuchen durchzuführen.

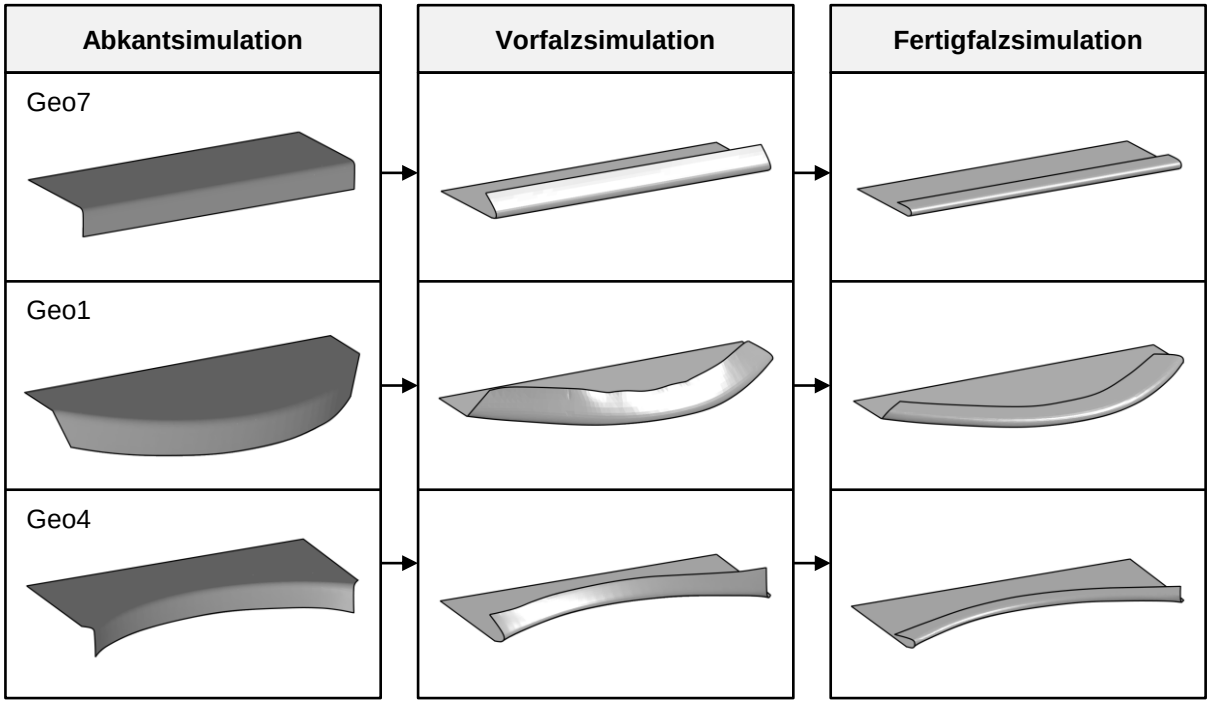


Abbildung 6.4: Resultierende Bauteilgestalt nach der Backenfalzsimulation der Prozessschritte Abkanten, Vorfalzen und Fertigfalzen

In einem ersten Schritt wurde dabei die geometrische Maßhaltigkeit der Proben analysiert, indem die resultierenden Flanschlängen und der Falzverlust betrachtet wurden. Dazu wurde der Falzflansch der Proben jeweils vor und nach dem Falzen in einer mit Fixierstiften definierten, eingespannten Falzbettlage mit dem im Kapitel 4.2 vorgestellten, optischen Profilmessgerät CALIPRI® digitalisiert. Anschließend konnten die aufgenommenen Profilkurven computerbasiert ausgewertet und der Simulation gegenübergestellt werden. In Abbildung 6.5 sind hierzu die entsprechenden Ergebnisse aus Simulation und Experiment dargestellt.

Für alle drei geometrischen Grundformen ist sowohl für die fertig gefalzten Flanschlängen als auch für den Falzverlust eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment erkennbar. Die geometriebedingten Effekte werden beim Falzen der Bauteile durch die definierten FE-Modelle hinreichend genau wiedergegeben. Damit liegt in Bezug auf die Prognose der Bauteilmaßhaltigkeit eine hinreichende Gültigkeit des FE-Modells vor.

In einem nächsten Schritt wurde untersucht, inwieweit die FE-Modelle zur Bewertung der Faltenbildung am Falzflansch herangezogen werden können. Hierzu wurde die konvex gekrümmte Probe in dem Backenfalzversuchswerkzeug mit einem Winkel von 45° vorgefalzt und daraufhin entnommen. Aufgrund der konvexen Krümmung der Probe resultieren tangentiale Druckspannungen im Falzflansch, die eine Faltenbildung initiieren. In der FE-Simulation entsteht

beim Vorfalzen aufgrund der einseitigen Blech-Werkzeug-Kontaktbedingung eine sichtbare Wellenbildung am Falzflansch.

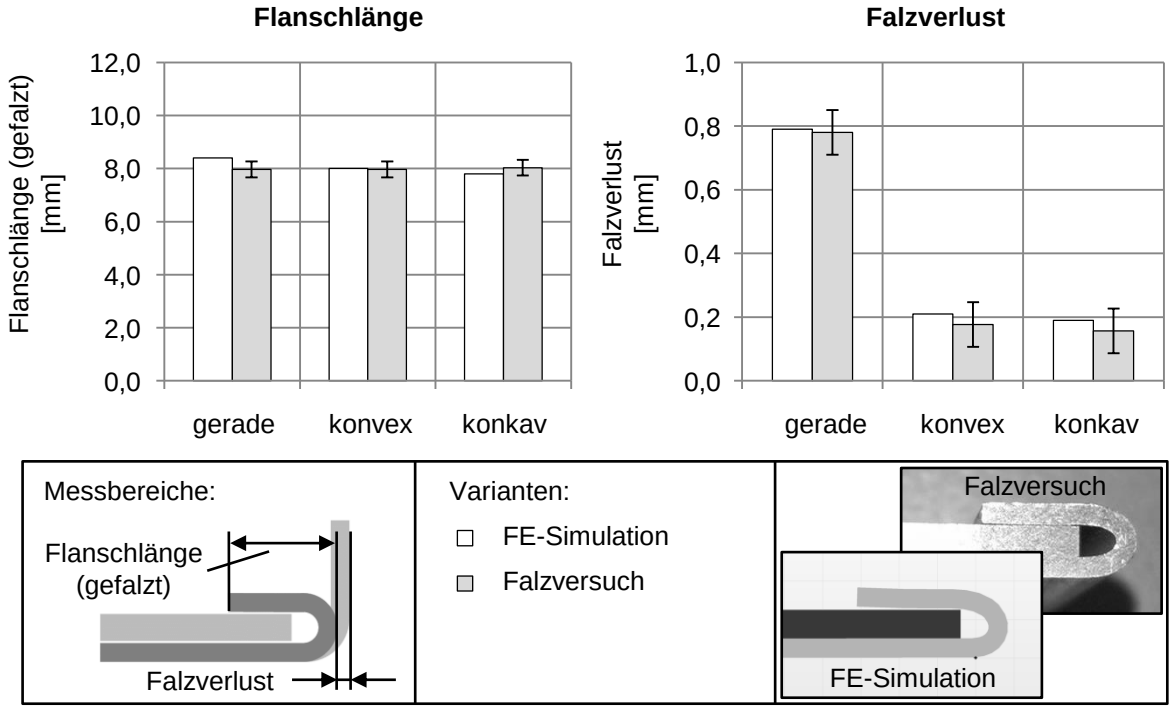


Abbildung 6.5: Experimentelle und simulationsgestützte Ergebnisse hinsichtlich der resultierenden geometrischen Falzform

Zur Bewertung der sichtbar ausgeprägten Falten am FE-Modell ist eine Auswertung der resultierenden Faltenkurve zweckmäßig, die den wellenförmigen Verlauf am Falzflanschende wiedergibt. Die Kurve konnte hierfür direkt am Netz des FE-Modells abgeleitet werden. Für die experimentelle Versuchsprobe erfolgte zunächst eine Aufnahme mit dem optischen Messsystem ARGUS® (vergleiche Kapitel 4.2), um die Oberfläche der Probe zu digitalisieren. Anschließend konnte wiederum die Faltenkurve am digitalen Modell abgeleitet werden, sodass eine computerbasierte Auswertung beider Kurven ermöglicht wurde. Bei dieser Vorgehensweise muss allerdings berücksichtigt werden, dass sich die Faltenkurve aus der Simulation auf die Blechmittelebene und die der aufgenommenen Versuchsprobe auf die Blechaußenseite bezieht. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu erreichen, wurde daher die Kurve aus der Simulation um die halbe Blechdicke nach außen transformiert, sodass beide Kurven nun bezogen auf die Blechaußenseite ausgewertet werden konnten. Abbildung 6.6 zeigt hierzu eine Gegenüberstellung der resultierenden Faltenkurven entlang des Falzflanschendes aus FE-Simulation und experimentellem Falzversuch.

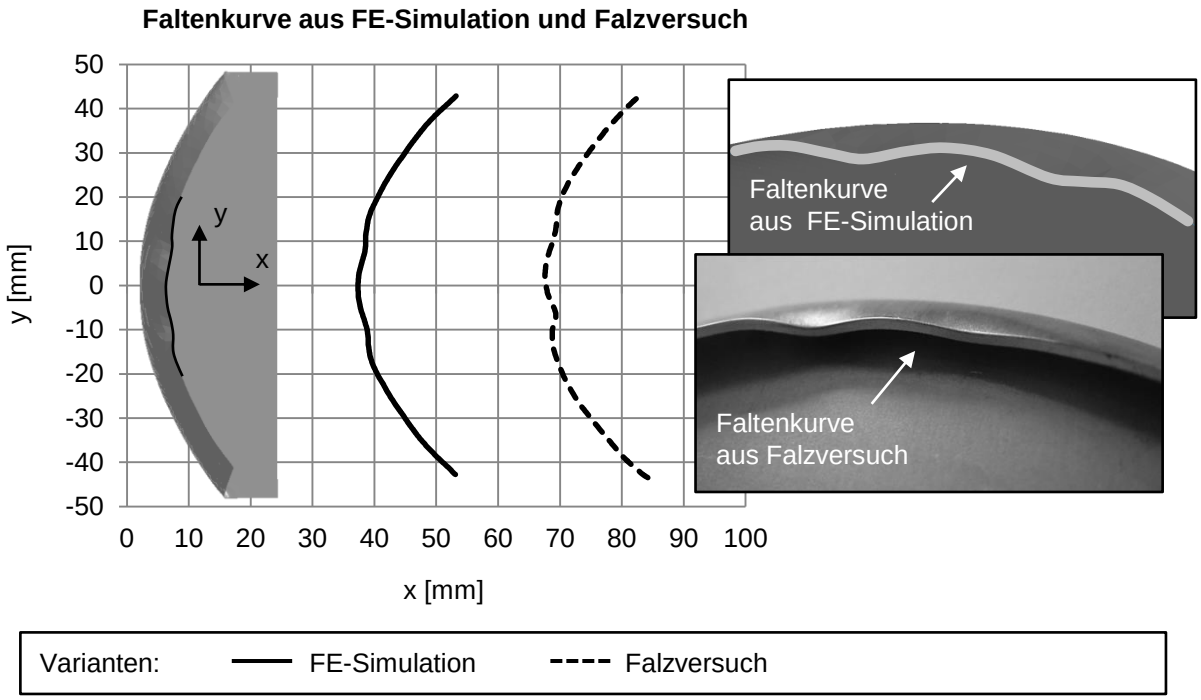


Abbildung 6.6: Experimentelle und simulationsgestützte Ergebnisse hinsichtlich der Tendenz zur Faltenbildung

Mit größer werdender Flanschlänge wird der Effekt der Faltenbildung verstärkt, da der Unterschied der Bogenlänge entlang des äußeren Falzflansches zwischen abgekanteter und gefalzter Probe zunimmt. Der Vergleich beider Faltenkurven zeigt auch hier eine gute Übereinstimmung von Simulation und Experiment. Mit dem berechneten FE-Modell wird hierbei sowohl die Faltenanzahl als auch deren Ausprägung realitätsnah abgebildet.

Bei dem Fertigfalzen der Proben liegt in der Simulation ein anderes Kontaktszenario als beim Vorfalzen vor. Hierbei entsteht bei dem vollständigen Schließen des Falzflansches ein doppelseitiger Kontakt, da sich das Blech nun zwischen Falzbacken und Innenteil befindet. In diesem Fall entsteht keine sichtbare Wellenbildung am Falzflansch. Um hierfür eine mögliche Faltenbildung bewerten zu können, kann das in AutoForm® hinterlegte Faltenkriterium „Potential Wrinkles“ herangezogen werden. Das Kriterium ist speziell für die Bewertung der Faltentendenz in geschlossenen Werkzeugen definiert und basiert auf einer dehnungsbasierten Analyse. Anhand eines Vergleichs mit experimentellen Versuchen, bei denen die Flanschlänge solange schrittweise erhöht wurde bis eine beginnende Faltenbildung erkennbar war, konnte ein Grenzwert für das Kriterium „Potential Wrinkles“ definiert werden. Ab einem Wert von größer als 0,03 konnte eine beginnende, sichtbar ausgeprägte Faltenbildung an den Versuchsproben detektiert werden. Dieser Wert wird daher im Folgenden zur simulationsgestützten Bewertung der Faltentendenz an fertig gefalzten Bauteilen herangezogen.

In einem weiteren Schritt wurde der Fokus auf die plastischen Dehnungen am Biegeradius und am Falzflanschende gelegt. Für die Dehnungsmessung an experimentellen Versuchsproben werden in der Umformtechnik üblicherweise optische Dehnungsmessverfahren eingesetzt. Hierbei werden speziell präparierte Proben, beispielsweise in Form eines stochastischen Streifenmusters, in Form von Punkten oder in Form von quadratischen Gitterlinien, während der Umformung mit einem Kamerasystem aufgenommen, sodass daraufhin eine Auswertung der Haupt- und Nebenformänderungen möglich ist. Prinzipiell können die optischen Dehnungsmessverfahren auch beim Falzen angewendet werden. Bei konventionellen Falzprozessen ist eine solche optische Dehnungsmessung allerdings meist aus Gründen der Zugänglichkeit gar nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich. Die Werkzeugwirkflächen sind hierbei in der Regel direkt in Kontakt mit dem zu analysierenden Falzflansch beziehungsweise verdecken den zu analysierenden Biegeradius. Aus diesen Gründen wird an dieser Stelle nun ein Ansatz zur Validierung des FE-Simulationsmodells herangezogen, der auf einem numerischen Overkill beruht. Hierzu ist ein weiteres Simulationsmodell erforderlich, das eine entsprechende Vergleichssimulation liefert.

Zu diesem Zweck wurde ein FE-Modell für die Berechnung mit LS-DYNA® aufgebaut, bei dem der Modellaufbau auf denselben Randbedingungen beruht, wie sie in der Simulation mit AutoForm® definiert wurden. Die dabei zugrunde gelegten Simulationsparameter sind hierzu in Kapitel 4.1 beschrieben. Um einen hohen Detaillierungsgrad der Simulation zu erhalten, wurde die umzuformende Platine unter anderem mit Volumenelementen kleiner Elementkantenlänge und mit mehreren Schichten über der Blechdicke vernetzt. Dadurch resultieren einerseits zwar vergleichsweise lange Rechenzeiten, die andererseits jedoch bei der numerischen Overkill-Lösung zweitrangig sind, da hier in erster Linie der möglichst hohe Modelldetaillierungsgrad im Vordergrund steht. In Abbildung 6.7 sind die resultierenden plastischen Dehnungen am Biegeradius und am Falzflanschende aus der konventionellen Simulation und der numerischen Overkill-Lösung gegenübergestellt.

Die Auswertung der geraden, konvexen und konkaven geometrischen Grundformen zeigt, dass bei beiden Simulationsmodellen ähnliche Werte für die Haupt- und Nebenformänderungen am Biegeradius und am Falzflanschende ausgegeben werden. Bei der Auswertung ist zu berücksichtigen, dass bei der Simulation mit LS-DYNA® das Verfahren der expliziten Zeitintegration zugrunde gelegt ist. Dies hat wiederum zur Folge, dass in der Simulation dynamische Effekte auftreten, die sich insbesondere bei großen Werkzeugbewegungen bemerkbar machen. Dennoch zeigt der Vergleich zwischen AutoForm® und LS-DYNA® für die berechneten FE-Modelle auch hier eine gute Ergebnisübereinstimmung in Bezug auf die resultierenden plastischen Dehnungen.

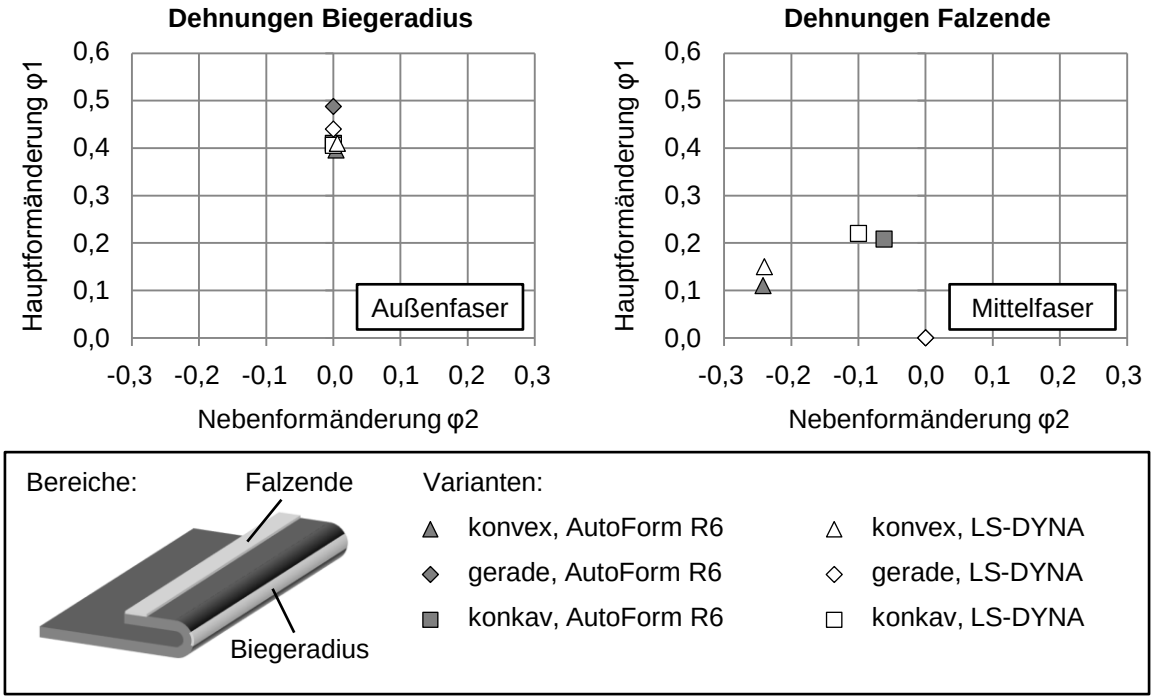


Abbildung 6.7: Resultierende plastische Dehnungen aus konventioneller Simulation und numerischer Overkill-Lösung

Um darüber hinaus die Gültigkeit der resultierenden Dehnungen zu prüfen, wurde als zusätzliche Validierungsmaßnahme ein Vergleich der Maßhaltigkeit der geometrischen Falzform herangezogen. Die diesbezüglich gute Übereinstimmung von FE-Simulation und Falzversuch (vergleiche Abbildung 6.5) ist ein weiteres Indiz dafür, dass die in der Simulation ausgegebenen Dehnungswerte in einer realistischen Größenordnung liegen, wodurch das Bauteilverhalten letztlich realitätsnah abgebildet werden kann.

Insgesamt konnte anhand der durchgeführten Validierungsmaßnahmen die hinreichende Gültigkeit zur Prognose der Auswertegrößen geometrische Falzform, Tendenz zur Faltenbildung und plastische Dehnung für alle definierten FE-Modellvorlagen gezeigt werden, sodass diese Modelle nun für die weitere Vorgehensweise zur Erstellung der Referenzdatenbasis verwendet werden.

6.2 Simulationsgestützte Erstellung der Referenzdaten

Nach der erfolgreichen Validierung der FE-Modellvorlagen werden nun Maßnahmen für eine effiziente Simulationsdurchführung beschrieben, um die erforderlichen Referenzdaten für das Metamodell generieren zu können.

Hierfür wird zunächst ein Versuchsplan definiert, der auf der Grundstruktur des Metamodellaufbaus beruht und der alle notwendigen Simulationsvarianten abdeckt, sodass die entsprechenden Daten direkt der Referenzdatenbank bereitgestellt werden können. Aufgrund der großen Anzahl an Varianten ist hierbei der Fokus insbesondere auf eine effiziente Simulationsdurchführung sowie auf eine automatisierte Ergebnisauswertung zu legen. Darüber hinaus ist es im Rahmen der Simulationsdurchführung möglich, grundlegende Zusammenhänge und Abhängigkeiten der falzspezifischen Parameter aufzuzeigen, da hierbei unterschiedlichste Kombinationen von Produkt- und Prozessvarianten berücksichtigt werden. Die gewonnen Erkenntnisse werden daher anschließend anhand von ausgewählten geometrischen Grundformen auszugsweise dargelegt und diskutiert.

6.2.1 Vorgehensweise für eine effiziente Simulationsdurchführung

Der Versuchsplan für die Simulationsdurchführung wird in erster Linie durch den Metamodellaufbau festgelegt, bei dem die definierten Modellstützpunkte die Produktvarianten vorgeben. Die Prozessvarianten sind mit dem definierten Ansatz grundsätzlich frei wählbar und auch jederzeit erweiterbar. Für eine umfangreiche Auswertemöglichkeit sind hierbei mehrere Prozessvarianten empfehlenswert. In diesem Zusammenhang wurden beispielsweise sechs unterschiedliche Prozessvarianten definiert. In Abbildung 6.8 ist hierzu der Versuchsplan dargestellt, der für die Erstellung der Referenzdatenbasis verwendet wurde.

Alle erforderlichen Simulationen, die für die Datenbereitstellung eines Geometriestützpunkts der ersten Metamodellebene benötigt werden, wurden in sogenannten Simulationspaketen zusammengefasst. Ein Simulationspaket besteht hierbei aus 72 Einzelsimulationen, die durch die Kombinationsmöglichkeiten aus Falzflanschgestaltung und Prozessvariante resultieren. Jedes Simulationspaket beschreibt hierbei eine spezifische geometrische Grundform eines Geometriestützpunkts mit einer bestimmten Variante eines Werkstoffs, einer Blechdicke und einer Falzzugabe. Um beispielsweise für eine geometrische Grundform mit dem Werkstoff AA6014 im T4-Zustand zwei Varianten für die Blechdicke und vier Varianten für die Falzzugabe zu berücksichtigen, sind hierzu 576 Einzelsimulationen notwendig.

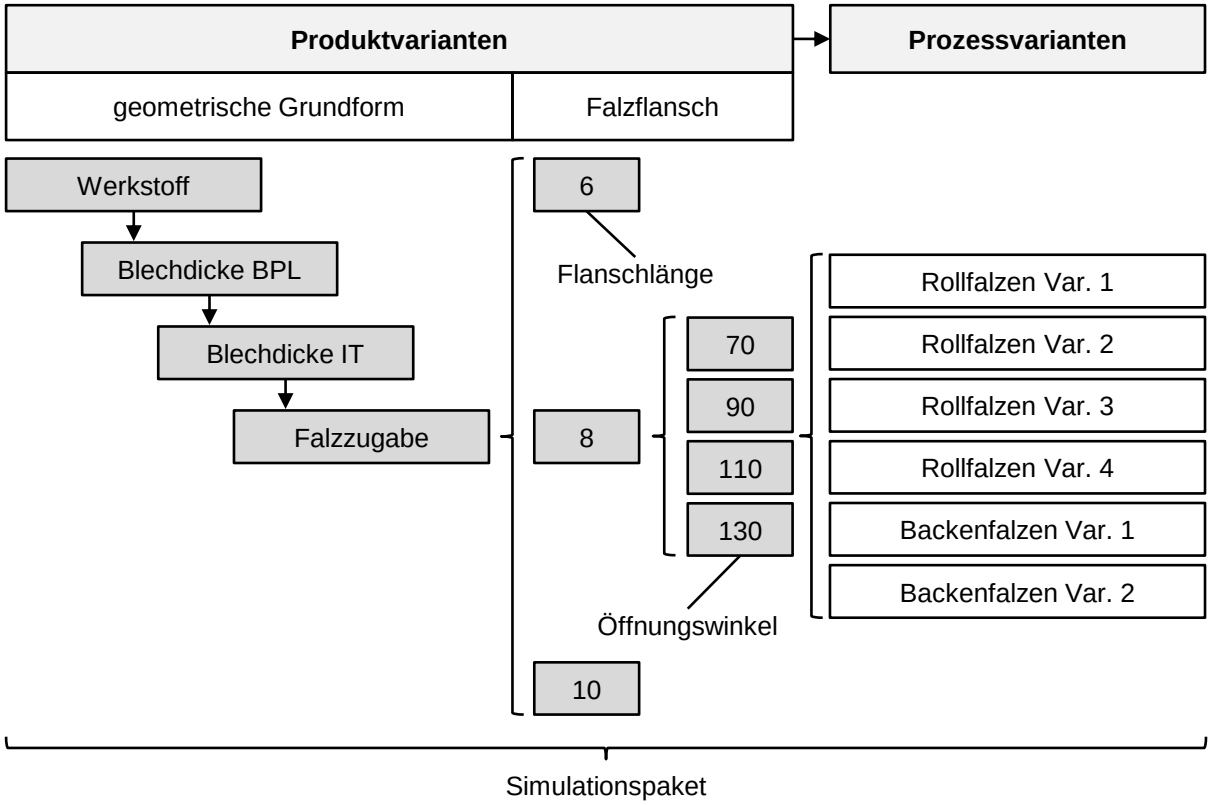


Abbildung 6.8: Versuchsplan zur Bereitstellung der Referenzdaten auf Basis des definierten Metamodellaufbaus

Aufgrund der hohen Anzahl an notwendigen Einzelsimulationen ist nur eine automatisierte Simulationsdurchführung zweckmäßig. Hierzu wurden alle relevanten Arbeitsschritte beginnend vom Modellaufbau bis hin zur Simulationsauswertung durch entsprechende Maßnahmen so weit wie möglich automatisiert. In Abbildung 6.9 ist eine Übersicht mit dem Prozessablauf für die Simulationsdurchführung eines Simulationspakets dargestellt.

In einem ersten Schritt wurde zunächst die für den Modellaufbau benötigte CAD-Modellgeometrie konstruktiv mit dem Programm CATIA V5® von Dassault Systèmes erstellt. Das CAD-Grundmodell ist dabei so aufgebaut, dass alle für die Simulation benötigten Bauteil- und Werkzeugflächen, direkt anhand des Grundmodells durch eine Variation der Modellparameter generiert werden können. Alle CAD-Modellvarianten konnten daraufhin über eine Skript-Funktion in CATIA V5® automatisch erzeugt und exportiert werden. Der benötigte Zeitaufwand beträgt hierbei nur wenige Minuten.

In einem nächsten Schritt wurden die jeweiligen FE-Simulationsmodelle in dem Programm AutoForm®plus R6 aufgebaut. Hierfür wurden die in Kapitel 6.1 vorgestellten FE-Modellvorlagen herangezogen. Nach dem Import der entsprechenden CAD-Daten konnten die vorde-

finierten Operationsfolgen und Werkzeugbewegungen der Prozessschritte Beschneiden, Abkanten und Falzen an die neue Modellgeometrie angepasst werden. Für diesen Arbeitsschritt beinhaltet das Programm AutoForm®plus R6 eine automatisierte Funktion, die einen schnellen Geometrieaustausch für ein bestehendes Simulationsmodell ermöglicht. Für die anschließende Berechnung wurden daraufhin alle Simulationsvarianten hintereinandergeschaltet. Eine Workstation mit vier CPUs je 3,40 GHz sowie 32,0 GB RAM benötigt beispielsweise für die Berechnung eines Simulationspakets (72 Einzelsimulationen) in etwa 24 Stunden.

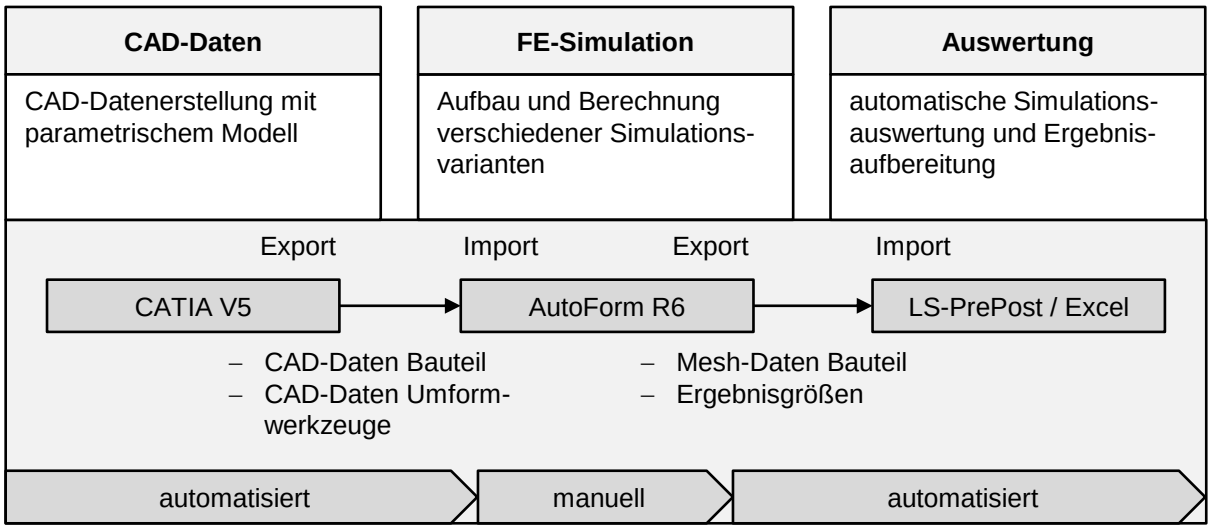


Abbildung 6.9: Prozessablauf zur Durchführung der Simulationen für ein Simulationspaket

Da die Simulationsauswertung aufgrund der Vielzahl an Einzelsimulationen in einem separaten und automatisierbaren Programm ausgeführt werden soll, ist hierzu ein Export des resultierenden FE-Bauteilnetzes sowie der weiteren falztechnisch relevanten Simulationsergebnisse erforderlich. Unter Berücksichtigung aller Arbeitsschritte, die für die Simulation der Modellvarianten mit dem Programm AutoForm®plus R6 erforderlich sind, bleibt festzuhalten, dass hierbei ein nicht unerheblicher manueller Arbeitsaufwand dahintersteht. Alle manuellen Maßnahmen, die hierfür zur Simulationsdurchführung eines Simulationspakets in AutoForm® erforderlich sind, belaufen sich dabei auf etwa 12 Stunden. Trotz dieses manuellen Aufwands überwiegen aber, im Vergleich zu anderen FEM-Berechnungsprogrammen, dennoch die Vorteile von AutoForm®, die insbesondere durch den einfachen Modellaufbau und die schnellen Berechnungszeiten gekennzeichnet sind.

In einem letzten Schritt erfolgte die Auswertung der Simulationsergebnisse mit dem Programm LS-PrePost® von der Livermore Software Technology Corporation und dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel® von Microsoft. Hierzu wurden nun speziell definierte Auswertevorlagen herangezogen, mit denen eine anforderungsgerechte Auswertung der falztechnisch relevanten Ergebnisgrößen möglich ist. Die spezifischen Auswertefunktionalitäten werden hierfür im

nachfolgenden Kapitel erläutert. Durch die Verwendung dieser Vorlagen konnte eine skript-gesteuerte, automatisierte Auswertung der Simulationspakete realisiert werden. Nach erfolgter Auswertung wurden alle relevanten Daten der Referenzdatenbank bereitgestellt. Für die vollständige Auswertung eines Simulationspakets, inklusive der Ergebnisaufbereitung für die Referenzdatenbasis, ist hierbei in etwa eine Auswertedauer von einer Stunde zu berücksichtigen.

Somit kann zusammenfassend festgehalten werden, dass für den Aufbau, die Simulation und die Auswertung eines Simulationspakets insgesamt ein Zeitaufwand von etwa 37 Stunden (davon 12 Stunden manuell und 25 Stunden automatisiert) erforderlich ist. Um darüber hinaus im Metamodellaufbau für eine geometrische Grundform weitere Produktvarianten, beispielsweise in Bezug auf die Blechdicke, bereitstellen zu können, ist die Erstellung eines erneuten Simulationspakets erforderlich, was letztlich mit einem zusätzlichen Zeitbedarf verbunden ist.

6.2.2 Definition einer falzspezifischen Simulationsauswertung

Aufgrund der Vielzahl an Simulationsvarianten ist neben der automatisierten Simulationsdurchführung insbesondere eine automatische Ergebnisauswertung erforderlich. In diesem Zusammenhang wurden spezielle Auswertevorlagen für das Programm LS-PrePost® in Kombination mit Microsoft Excel® erstellt, die eine skript-gesteuerte, vollautomatisierte Auswertung der falzspezifischen Kriterien geometrische Falzform, Tendenz zur Faltenbildung und plastische Dehnungen ermöglichen. Eine Übersicht der entsprechenden Auswerteschritte ist hierzu in Abbildung 6.10 dargestellt.

Für die Auswertung der geometrischen Falzform erfolgt eine messtechnische Analyse der Bauteildaten vor und nach dem Falzen. Hierfür wird die vernetzte Bauteilgeometrie aus der FE-Simulation für die entsprechenden Bauteilzustände herangezogen. Darüber hinaus wird die Information über die Soll-Maße nach dem Falzen benötigt, welche in Form eines CAD-Referenzbauteils bereitgestellt wird.

Im ersten Schritt werden hierzu die Bauteildaten in LS-PrePost® geladen, um an definierten Bereichen entlang der Falzkontur fünf Schnittbereiche zu generieren. In einem zweiten Schritt werden daraufhin die Profilkurven der jeweiligen Schnittbereiche in Excel® messtechnisch ausgewertet, indem ein speziell programmierter Algorithmus die Flanschlänge am abgekanteten und am gefalzten Bauteil, den Falzverlust sowie die Umrissmaßabweichung in Bezug auf das entsprechende Referenzbauteil ermittelt. Die resultierenden Messdaten werden anschließend unter dem Ausschluss etwaiger Ausreißer gemittelt, um somit die Referenzdaten der geometrischen Falzform bereitstellen zu können.

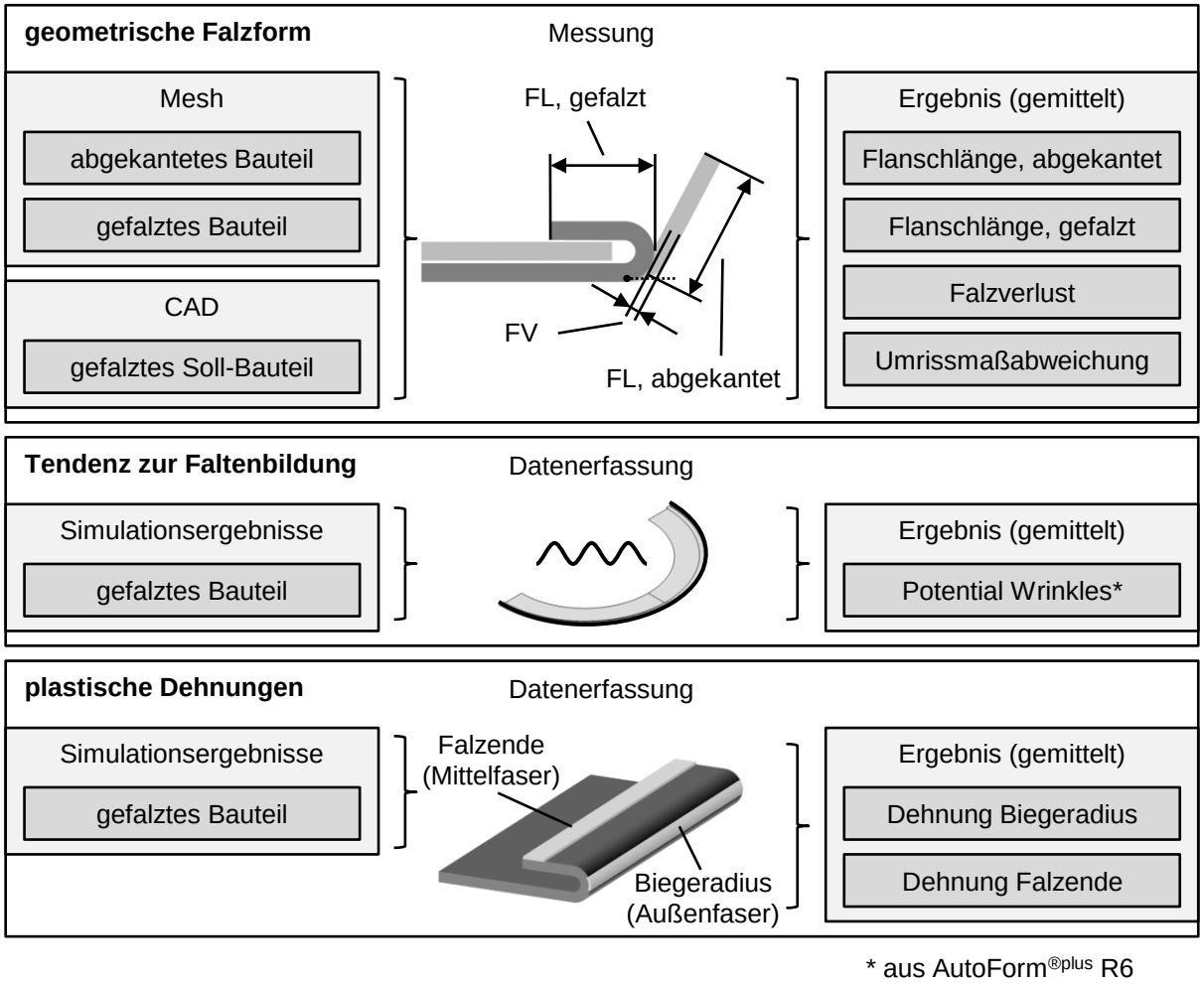


Abbildung 6.10: Auswerteverfahren für die automatische Ermittlung von falzspezifischen Simulationsergebnissen

Bei der Bestimmung der Faltentendenz sind, wie bereits in Kapitel 6.1.3 dargestellt, zwei Auswertefälle zu unterscheiden. Unter einseitigen Kontaktbedingungen, wie etwa beim Vorfalzen, entsteht in der Simulation eine Wellenbildung am Falzflansch, die über eine optische Analyse ausgewertet werden kann. Liegen hingegen doppelseitige Kontaktbedingungen, wie beispielsweise beim Fertigfalzen, vor, kommt es in der Simulation zu keiner sichtbaren Wellenbildung. Die Tendenz zur Faltenbildung kann in diesem Fall durch das in AutoForm®plus R6 hinterlegte Faltenkriterium „Potential Wrinkles“ ausgewertet werden.

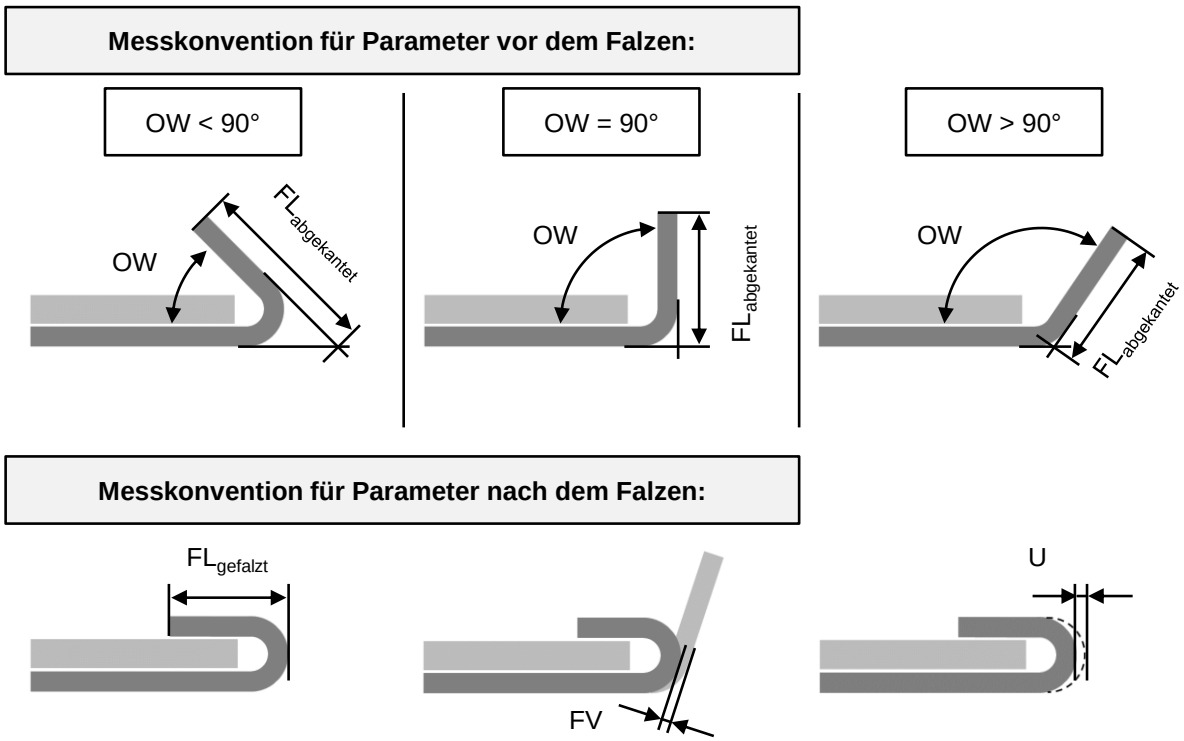
Für die Referenzdaten des Metamodells sind die fertig gefalzten Bauteilzustände von Bedeutung. Aus diesem Grund wird bei der Auswertung der Simulationsdaten ausschließlich das Faltenkriterium „Potential Wrinkles“ zugrunde gelegt. Da die Auswertung automatisiert stattfindet, ist in diesem Zusammenhang eine zusätzliche, prüfende Analyse der resultierenden Faltenkurve erforderlich. Hierzu wird die vernetzte Bauteilgeometrie nach dem Falzen zunächst in

LS-PrePost® geladen. Ein Algorithmus erzeugt daraufhin eine Kurve entlang des Falzflanschendes, die anschließend in Excel® messtechnisch in Bezug auf eine mögliche Wellenbildung ausgewertet wird. Überschreiten die dabei gemessenen Amplituden der Faltenkurve einen festgelegten Grenzwert von 0,5 mm, wird bei der automatischen Ergebnisauswertung eine Warnung ausgegeben. In diesem Fall ist eine manuelle Kontrolle der Simulationsauswertung erforderlich, um die Gültigkeit von „Potential Wrinkles“ zu überprüfen. Alle übrigen Daten können ohne weitere Modifizierungsmaßnahmen unmittelbar in die Referenzdatenbasis des Metamodells aufgenommen werden.

Für die Ermittlung der plastischen Dehnungen werden zunächst ebenfalls, analog zu den vorangegangenen Schritten, die von AutoForm® bereitgestellten FE-Daten mit dem Programm LS-PrePost® erfasst. Durch einen geometriebezogenen Auswertealgorithmus werden daraufhin zum einen die Elemente entlang des Biegeradius und zum anderen die entlang des Falzflanschendes identifiziert. Anschließend erfolgt eine bereichsspezifische Ergebnisauswertung in Excel®, indem die Dehnungen am Biegeradius an der Außenfaser und die Dehnungen am Falzflanschende an der Mittelfaser des Bauteils ausgewertet werden. Dabei werden, unter Ausschluss von etwaigen Ausreißern, die jeweils maximal auftretenden Dehnungswerte der Elemente erfasst und zu einem bereichsspezifischen Ergebnis gemittelt. Die Auswerteergebnisse werden daraufhin für die entsprechende geometrische Grundform als Referenzdaten für das Metamodell verwendet.

6.2.3 Darlegung der Ergebnisse aus der FE-Simulation

Aufgrund der Vielzahl an erforderlichen FE-Falzsimulationen mit unterschiedlichen Produkt- und Prozessvarianten ist es möglich, die entsprechenden Ursache-Wirkungs-Beziehungen der zugrunde gelegten Parameter detailliert zu untersuchen. Im Folgenden wird daher anhand von ausgewählten Auswertegrößen ein Überblick über die hierbei ermittelten Zusammenhänge gegeben. Alle Simulationen wurden dabei in AutoForm® mit den in Kapitel 6.1.2 vorgestellten FE-Modellvorlagen und den in Kapitel 4.1 beschriebenen Simulationsparametern durchgeführt. Die dargelegten Simulationsergebnisse beziehen sich exemplarisch auf eine Versuchsdurchführung eines Rollfalzprozesses, bei dem sowohl für das Außen- als auch für das Innenteil der Aluminiumblechwerkstoff AA6014 im T4-Zustand mit 1,0 mm Blechdicke verwendet wurde. Um insbesondere bei der Auswertung der geometrischen Maßhaltigkeit des Falzes auf vergleichbare Messgrößen zurückgreifen zu können, wurden alle nachfolgend dargelegten Auswerteergebnisse gemäß der in Abbildung 6.11 dargestellten Messkonvention ermittelt.

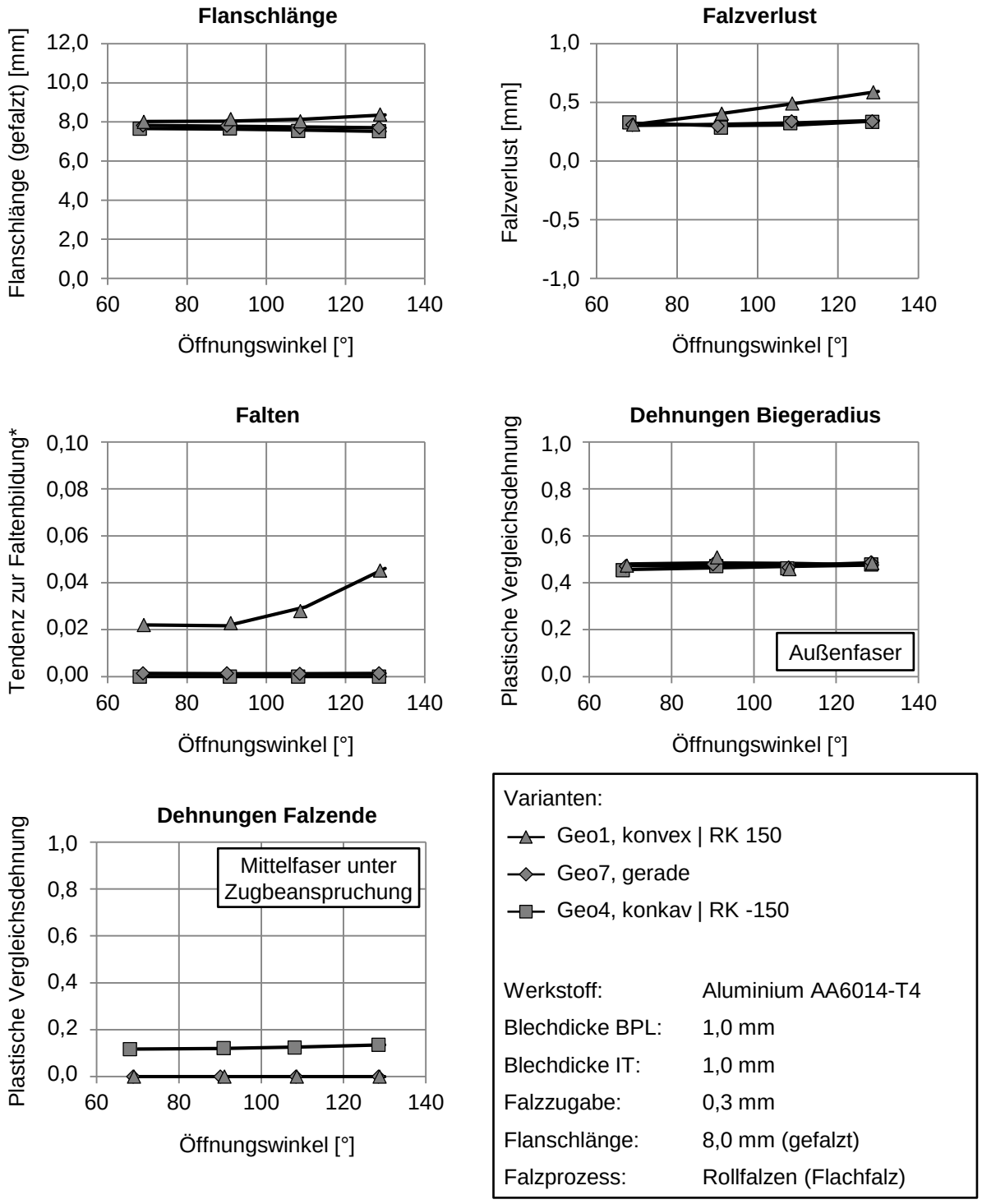


OW:	Flanschöffnungswinkel in °
$FL_{abgekantet}$:	Flanschlänge nach dem Abkanten in mm
$FL_{gefalzt}$:	Flanschlänge nach dem Falzen in mm
FV:	Falzverlust in mm als Maß für das Bauteileinrollverhalten
U:	Umrissmaßabweichung zu einer Soll-Geometrie in mm

Abbildung 6.11: Messkonvention für die Auswertung der geometrischen Maßhaltigkeit des Falzes

Bei der Ergebnisauswertung wird nun zunächst auf den Effekt eingegangen, der durch die unterschiedliche Gestaltung von geometrischen Grundformen hervorgerufen wird. Hierzu zeigt Abbildung 6.12 eine Gegenüberstellung der Falzergebnisse, die von einer geraden, einer konvex und einer konkav gekrümmten geometrischen Grundform resultieren.

Durch die vorliegende Messkonvention wird eine öffnungswinkelabhängige Angabe der abgekanteten Flanschlängen bewirkt. Aus diesem Grund wurde bei der Versuchsdurchführung die fertig gefalzte Flanschlänge als Referenzgröße herangezogen. Hierfür wurden die initialen Flanschlängen vor dem Abkanten so bestimmt, dass nach dem Falzen für alle Öffnungswinkelvarianten eine fertig gefalzte Flanschlänge von 8,0 mm erzielt wird. Um daraufhin etwaige geometriebezogene Effekte ermitteln zu können, wurden Versuche mit einer geraden, einer konvex und einer konkav gestalteten geometrischen Grundform mit jeweils gleicher initialer Flanschlänge durchgeführt, sodass nun die resultierenden fertig gefalzten Flanschlängen miteinander verglichen werden konnten.



* aus AutoForm®plus R6: Potential Wrinkles

Abbildung 6.12: Vergleich der Auswertegrößen einer geraden, einer konvex und einer konkav gekrümmten geometrischen Grundform

Die Auswertung zeigt, dass alle drei Varianten der geometrischen Grundformen nach dem Falzen vergleichbare fertig gefalzte Flanschlängen aufweisen. Damit kann keine Abhängigkeit zwischen der Flanschlänge und der Gestaltung der geometrischen Grundformen festgestellt

werden. Anders hingegen verhält es sich bei dem Falzergebnis des Falzverlustes. Durch die konvex gekrümmte Bauteilform wird im Vergleich zu den beiden anderen geometrischen Grundformen ein unterschiedliches Einrollverhalten hervorgerufen, das darüber hinaus vom vorliegenden Öffnungswinkel abhängig ist. Weitere Untersuchungen konnten bestätigen, dass konvexe Bauteilformen tendenziell einen größeren Falzverlust hervorrufen, während hingegen konkave Bauteilformen tendenziell weniger stark einrollen und bei kleinen Krümmungsradien sogar einen Falzgewinn bewirken können. Eine verstärkte Ausprägung dieses Effekts konnte insbesondere bei größer werdenden Öffnungswinkeln und stärker gekrümmten geometrischen Grundformen beobachtet werden.

In Bezug auf die Faltenbildung am Falzflansch bleibt festzuhalten, dass bei konvex gestalteten Bauteilformen der Effekt der Faltenbildung ebenfalls durch größere Öffnungswinkel und kleinere Krümmungsradien verstärkt wird. Gerade und konkave Bauteilformen sind hierdurch nicht betroffen.

Für die Bewertung der Rissgefahr entlang des Falzradius sind die plastischen Dehnungen an der Außenfaser des Biegeradius von Bedeutung. Die hierzu in der Versuchsreihe ermittelten Dehnungswerte zeigen wiederum bei allen drei geometrischen Grundformen ähnliche Werte, sodass hierbei kein Effekt hinsichtlich der unterschiedlichen Bauteilgestaltung festgestellt werden kann. Beim Falzen von konkav gekrümmten Konturen tritt eine Zugbeanspruchung am Falzflansch auf, die mit stärker werdender Krümmung weiter zunimmt. Anhand der Höhe der plastischen Dehnungen in der Mittelfaser des zugbeanspruchten Falzflanschendes kann hierzu das Risiko für mögliche Kantenrisse beurteilt werden. Dabei ist zu beachten, dass sowohl für die Beurteilung der Rissgefahr entlang des Biegeradius als auch am Falzflansch, die vollständige Umformhistorie zu berücksichtigen ist. Die in dieser Arbeit dargestellten plastischen Dehnungen basieren auf einem konventionellen Abkant- und einem nachfolgenden Falzprozess und geben daher ausschließlich einen Rückschluss über die Dehnungsbeanspruchung, die aus diesen beiden Prozessschritten hervorgeht. Um das verbleibende Restumformvermögen darüber hinaus ermitteln zu können, ist die Einbeziehung sämtlicher Vordehnungszustände zwingend erforderlich.

In einem nächsten Schritt wird nun die konvex gekrümmte geometrische Grundform (Geo1) mit einem Krümmungsradius RK von 150 mm herangezogen, um die für die Falzflanschgestaltung relevanten Zusammenhänge detailliert aufzuzeigen. Dieser Sachverhalt ist wiederum insbesondere für die zweite Modellebene des Metamodells relevant, in der spezifische Auswertegrößen für eine entsprechende geometrische Grundform in Abhängigkeit des Öffnungswin-

kels ermittelt werden. In diesem Zusammenhang ist in Abbildung 6.13 eine Auswertung dargestellt, die zum einen die abgekantete Flanschlänge in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und zum anderen in Abhängigkeit der fertig gefalzten Flanschlänge zeigt.

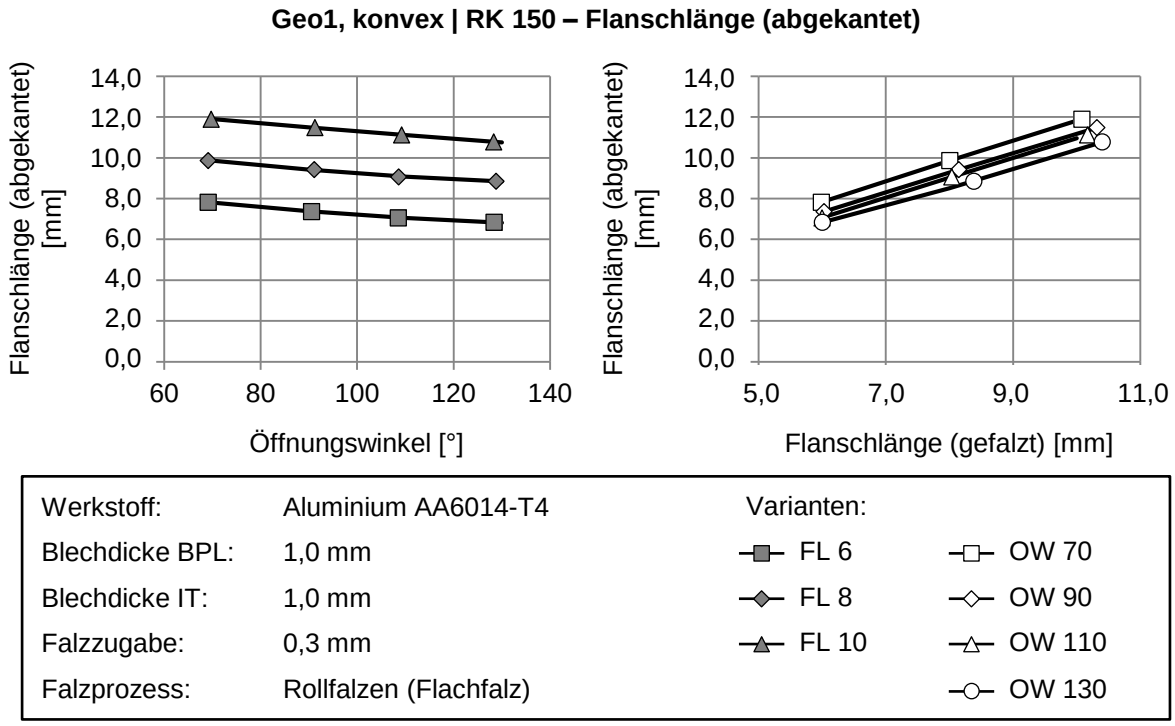


Abbildung 6.13: Auswertung der abgekanteten Flanschlänge in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und der fertig gefalzten Flanschlänge

Die Varianten FL 6, FL 8 und FL 10 stehen dabei für die zu erreichenden fertig gefalzten Zielflanschlängen. Im Vorfeld der Versuchsdurchführung konnten hierbei die erforderlichen Werte für die entsprechenden initialen Flanschlängen vor dem Abkanten anhand von spezifischen Simulationen iterativ ermittelt werden. Der Grund für diese Vorgehensweise liegt darin begründet, dass mit den vorgegebenen Zielflanschlängen im fertig gefalzten Zustand eine einheitliche Vergleichsbasis für verschiedene Produkt- und Prozessvarianten geschaffen wird. Dadurch ist es möglich, dass insbesondere die Tendenz zur Faltenbildung und die resultierenden plastischen Dehnungen am Falzflansch für alle Varianten anhand einer spezifisch fertig gefalzten Flanschlänge verglichen werden können.

Die hierzu definierten Zielwerte stellen hierbei gleichzeitig die im Karosseriebau typischen Wertebereiche für die gefalzten Flanschlängen dar, sodass hierbei eine anwendungsorientierte Ergebnisauswertung möglich ist. Bei der anschließenden simulationsgestützten Versuchsdurchführung wurden nun vier Öffnungswinkelvarianten berücksichtigt, die durch die Parameter OW 70, OW 90, OW 110 und OW 130 beschrieben sind. Die Auswertung der Versuche zeigt,

dass es erforderlich ist, für die abgekantete Flanschlänge einen öffnungswinkelabhängigen Wert zu definieren, damit nach dem Falzen die geforderte Zielflanschlänge erreicht wird. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass zwischen der abgekanteten und der fertig gefalzten Flanschlänge ein linearer Zusammenhang besteht.

Neben der Flanschlänge ist für die Beurteilung der geometrischen Maßhaltigkeit der Falzform ebenso die Kenntnis über das Einrollverhalten relevant. In Abbildung 6.14 ist hierzu die entsprechende Auswertung in Bezug auf den resultierenden Falzverlust dargestellt.

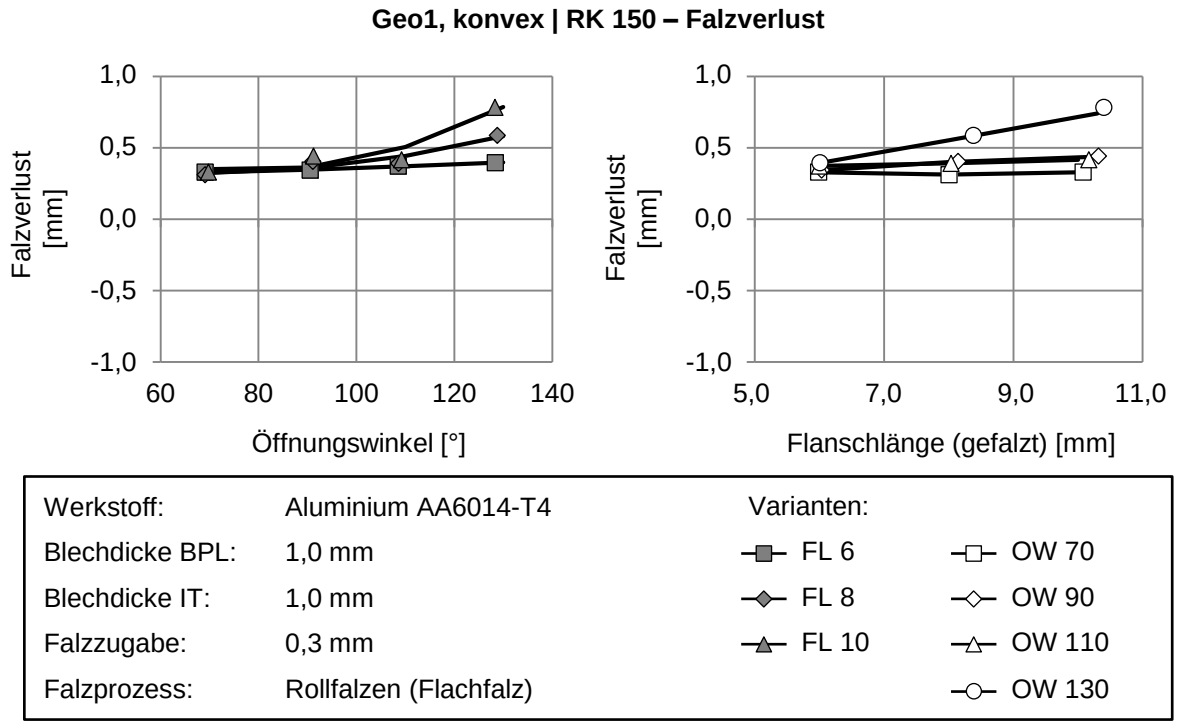
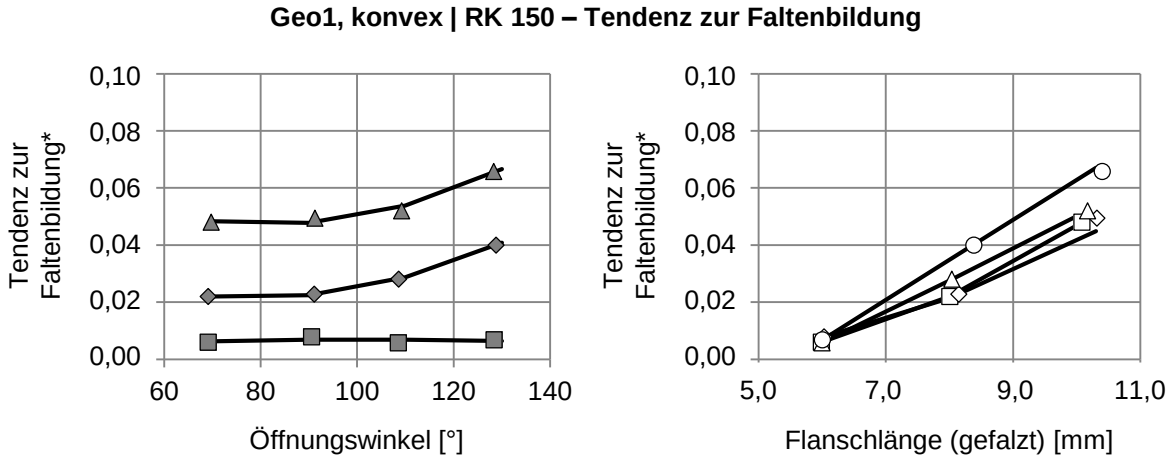


Abbildung 6.14: Auswertung des Falzverlusts in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und der fertig gefalzten Flanschlänge

Hierbei ist zu erkennen, dass bei größer werdenden Öffnungswinkeln der Falzverlust zunehmend von der vorliegenden Flanschlänge beeinflusst wird. Eine Begründung für dieses Phänomen liegt in dem zugrunde gelegten Rollfalzprozess dieser Versuchsreihe, bei dem die Falzrolle so ausgerichtet ist, dass das Bauteil in einem ersten Falzschritt auf 90° angestellt wird. Bei größer werdenden Öffnungswinkeln führt eine Kombination aus dem größeren Falzschritt, der veränderten Krafteinleitung und der konvexen Bauteilkrümmung hierbei zu einem anders ausgeprägten Einrollverhalten. Dieser Effekt wird insbesondere bei kleiner gestalten Krümmungsradien verstärkt.

Beim Falzen von stark konvex gekrümmten Bauteilformen entstehen bereits beim Vorfalzen sichtbare Falten, die auch einen Effekt auf den resultierenden Falzverlust haben. Gleichzeitig

steigt mit größer werdender Flanschlänge die Tendenz zur Faltenbildung zunehmend an, sodass nach dem Falzen markant ausgeprägte Falten am geschlossenen Falzflansch zurückbleiben können. In Abbildung 6.15 ist hierzu die Auswertung in Bezug auf die Tendenz zur Faltenbildung für die untersuchte konvex gekrümmte geometrische Grundform dargestellt.



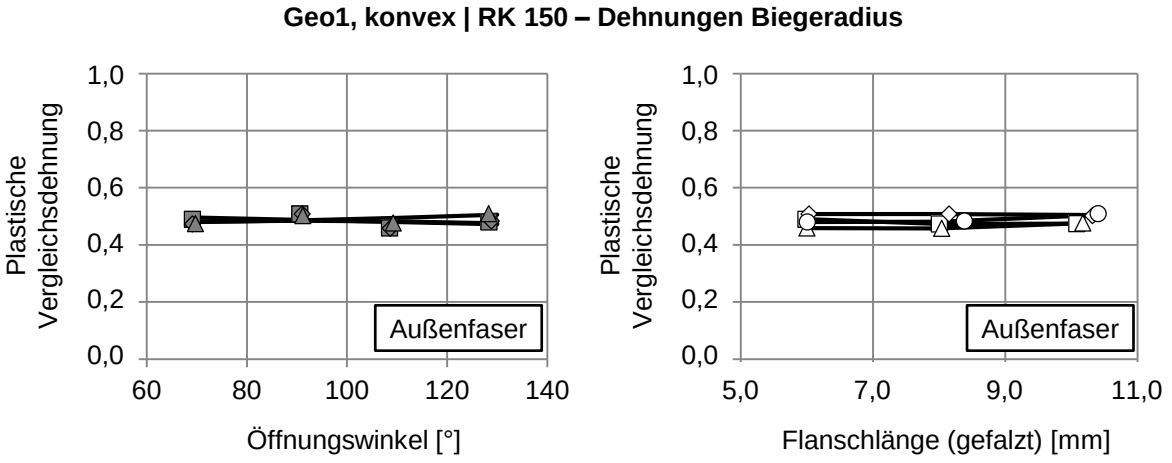
Werkstoff:	Aluminium AA6014-T4	Varianten:	
Blechdicke BPL:	1,0 mm	FL 6	OW 70
Blechdicke IT:	1,0 mm	FL 8	OW 90
Falzzugabe:	0,3 mm	FL 10	OW 110
Falzprozess:	Rollfalzen (Flachfalz)		OW 130

* aus AutoForm®plus R6: Potential Wrinkles

Abbildung 6.15: Auswertung der Tendenz zur Faltenbildung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und der fertig gefalzten Flanschlänge

Für eine produktionsgerechte Bauteilauslegung werden daher in der Regel in den konvex gekrümmten Bereichen eines Karosseriebauteils Falzflanschrückschnitte vorgesehen, um dadurch eine lokale Flanschlängenreduzierung zu bewirken. Durch diese einfach umzusetzende Maßnahme kann effizient auf eine mögliche Faltenbildung reagiert werden.

Zur weiteren Prognose der Herstellbarkeit sind ebenso die während des Falzprozesses auftretenden plastischen Dehnungen relevant. In Abbildung 6.16 ist hierzu die Auswertung für die resultierende plastische Vergleichsdehnung am Biegeradius der konvex gekrümmten geometrischen Grundform dargestellt.



Werkstoff:	Aluminium AA6014-T4	Varianten:	
Blechdicke BPL:	1,0 mm	FL 6	OW 70
Blechdicke IT:	1,0 mm	FL 8	OW 90
Falzzugabe:	0,3 mm	FL 10	OW 110
Falzprozess:	Rollfalzen (Flachfalz)		OW 130

Abbildung 6.16: Auswertung der Dehnungen am Biegeradius in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und der fertig gefalzten Flanschlänge

Die Auswertung zeigt, dass bei den hierbei resultierenden plastischen Dehnungen weder eine Abhängigkeit zu dem Öffnungswinkel noch zu der Flanschlänge besteht. Verschiedene Varianten der Falzflanschgestaltung haben somit keinen relevanten Einfluss auf die resultierenden Dehnungen am Biegeradius.

Um die plastischen Dehnungen am Falzflansch zu bewerten, ist eine konkav gekrümmte Umrisskontur erforderlich. Hierfür wird nun die konkave geometrische Grundform Geo4 herangezogen, die ebenfalls einen Krümmungsradius RK von 150 mm besitzt. Die aus der Simulation resultierenden Ergebnisse sind in Abbildung 6.17 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Flanschlängenvarianten bei der Größenordnung der vorliegenden Bauteilkrümmung quasi kaum mehr einen Einfluss auf die resultierenden Dehnungswerte ausüben. Anders hingegen verhält es sich mit zunehmend kleiner werdenden Krümmungsradien. Bei konkav gekrümmten Grundformen, die beispielsweise einen Krümmungsradius RK von 70 mm aufweisen, existiert bereits eine deutliche Abhängigkeit von der Flanschlänge. Für die Herstellbarkeitsbewertung von noch stärker konkav gekrümmten Bauteilbereichen muss die Flanschlänge daher immer im Detail betrachtet werden. Der vorliegende Öffnungswinkel spielt dabei eine weniger relevante Rolle.

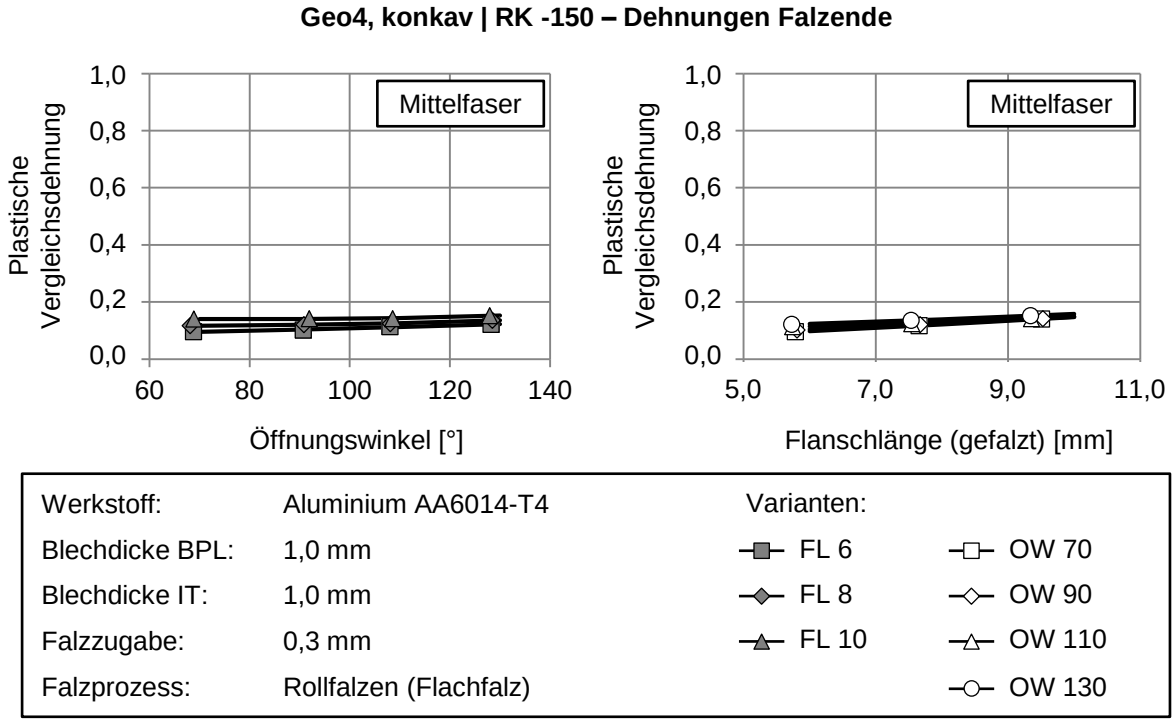


Abbildung 6.17: Auswertung der Dehnungen am Falzflanschende in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und der fertig gefalzten Flanschlänge

Bei der bisher dargelegten Auswertung wurde ausschließlich auf den Effekt eingegangen, der durch die Variation von Produktparametern hervorgerufen wird. Darüber hinaus ist jedoch ebenso die Kenntnis über den Einfluss von prozessspezifischen Parametern relevant. In Abbildung 6.18 ist hierzu eine Übersicht auf Basis einer geraden geometrischen Grundform dargestellt, die eine Gegenüberstellung der Prozessvarianten Roll- und Backenfalzen bezüglich der resultierenden geometrischen Bauteilmaßhaltigkeit zeigt.

Für die Bewertung der Maßhaltigkeit werden hierzu die Auswertegrößen Falzverlust und Umrissmaßabweichung herangezogen. Die Umrissmaßabweichung gibt hierbei eine Differenz des Umrissmaßes zu einem Soll-Bauteil an, wobei ein negativer Wert bei den dargestellten Ergebnissen bedeutet, dass der resultierende Bauteilumriss zu klein ist und somit der Flansch beim Falzen zu weit einrollt. Bei einem positiven Wert hingegen ist der Bauteilumriss nach dem Falzen zu groß, was auf ein zu geringes Einrollen des Flansches zurückzuführen ist. Darüber hinaus umfasst die Auswertung weitere Varianten, die durch eine Variation der Falzzugabe und der Werkzeugzustellung beschrieben sind. Der Parameter FZ steht hierbei für den Wert der vorgehaltenen Falzzugabe, die im presswerkfallenden Einzelteil berücksichtigt ist. Durch den Parameter WZ wird die Werkzeugzustellung beschrieben, die die Werkzeugposition beim Vorfalzen angibt (vergleiche Abbildung 6.2).

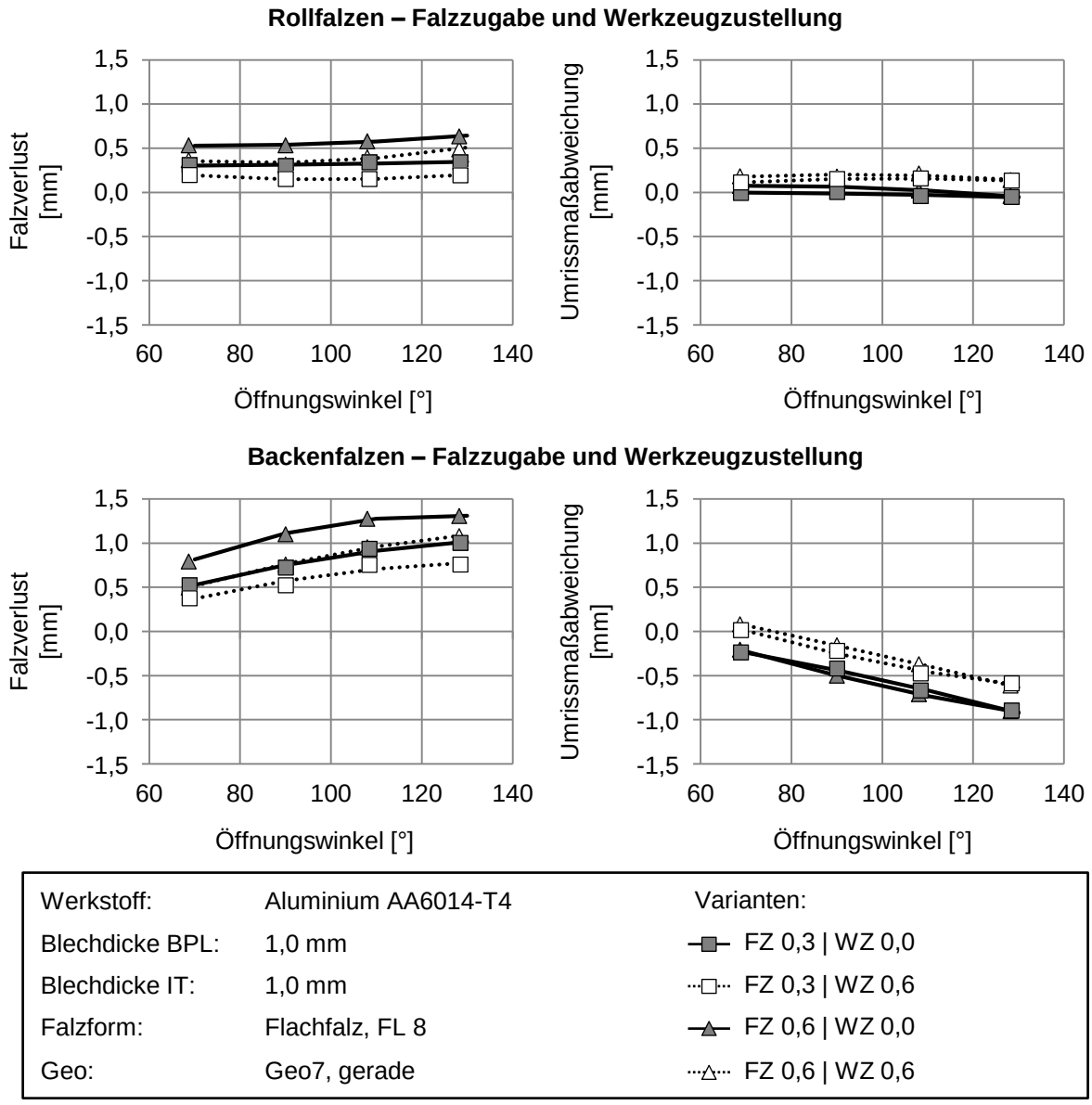


Abbildung 6.18: Auswertung der resultierenden Bauteilmaßhaltigkeit beim Roll- und beim Backenfalzen

Die Auswertung der simulationsgestützten Versuchsreihe zeigt, dass die Verfahren Roll- und Backenfalzen ein grundlegend unterschiedliches Einrollverhalten aufweisen. Hierbei ist zu erkennen, dass bei dem Rollfalzprozess für den Falzverlust ein weitestgehend öffnungswinkelunabhängiger Wert resultiert. Die Variation der Falzzugabe führt dabei zu keiner signifikanten Veränderung im Umrissmaß. Allerdings wird das Umrissmaß durch eine Variation der Rollenzustellung beim Vorfalzen beeinflusst. Daraus kann gefolgert werden, dass bei Rollfalzprozessen in erster Linie die Position der Rollenzustellung für das Erreichen eines maßhaltigen Bauteils von Bedeutung ist.

Beim Backenfalzen ist im Vergleich zum Rollfalzen hingegen eine deutliche Abhängig vom Öffnungswinkel zu erkennen. Darüber hinaus tritt ein vergleichsweise starkes Einrollverhalten auf. Bei der hier durchgeführten Versuchsreihe konnte mit der vorliegenden Konstellation aus Werkzeuggestaltung und Werkzeugzustellung kein zufriedenstellendes Umrissmaß erzielt werden. Die Variation der Werkzeugzustellung führte tendenziell zu einer Reduzierung der Umrissmaßabweichung, allerdings konnte das geforderte Umrissmaß nur bei einem Öffnungswinkel von 70° erreicht werden.

Auch nach der Auswertung weiterer simulationsgestützter Versuchsreihen mit unterschiedlich gestalteten geometrischen Grundformen bleibt festzuhalten, dass der Backenfalzprozess stark von der Ausrichtung und der Gestaltung der Falzwerkzeuge geprägt ist. Bei der Inbetriebnahme von Backenfalzanlagen ist somit ein höherer Aufwand für die Werkzeugeinarbeitung erforderlich, um beim Falzen eine geforderte Bauteilmaßhaltig zu erreichen.

Im Rahmen der Simulationsdurchführung zur Bereitstellung der Referenzdaten für das metamodellbasierte Assistenzsystem wurden neben den bereits vorgestellten Varianten zahlreiche weitere Versuchsreihen simuliert und ausgewertet. Eine Zusammenfassung der hierbei gesammelten Ergebnisse ist hierzu in Tabelle 6.1 aufgelistet.

Die Zusammenfassung verdeutlicht erneut die Komplexität des Falzprozesses, die sich aufgrund der Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten von Produkt- und Prozessparametern ergibt. Eine rein erfahrungsbasierte Prognose des resultierenden Bauteilverhaltens wird darüber hinaus durch sich überlagernde Einflussgrößen zusätzlich erschwert. Durch die umfassende Referenzdatenbasis des metamodellbasierten Bauteilanalyseansatzes wird hierbei nun eine Möglichkeit geschaffen, auch komplexe Sachzusammenhänge beim Falzen von Karosseriebauteilen effizient bewerten zu können. Im folgenden Kapitel soll in diesem Zusammenhang daher auf die Prognosefähigkeit des metamodellbasierten Assistenzsystems eingegangen werden, indem dessen Gültigkeit anhand von entsprechenden Verifizierungs- und Validierungsmaßnahmen an unterschiedlichen Karosseriebauteilen geprüft wird.

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Effekte verschiedener Produkt- und Prozessparameter auf spezifische Auswertegrößen

	Flanschlänge (gefalzt)	**Falzverlust/ Umrissmaß**	**Falten-bildung**	**Plast. Dehn. Biegeradius**	**Plast. Dehn. Falzende**
Geometrische Grundform	-	+	+	-	+
Flanschlänge (abgekantet)	+	o	+	-	+
Öffnungswinkel	+	+	+	-	-
Falzzugabe	+	+	-	o	-
Abkantradius	+	+	-	+	-
Blechdicke Innenteil	+	-	-	+	-
Roll-/ Backenfal-zen	-	+	o	o	-
Werkzeugzustel-lung	-	+	-	-	-

+ = Effekt ausgeprägt vorhanden
o = Effekt teilweise vorhanden
- = Effekt kaum vorhanden

7 Demonstration der Gültigkeit des Assistenzsystems

Die Gültigkeit der in dieser Arbeit vorgestellten geometriebezogenen Bauteilanalyse, inklusive des dabei zugrunde gelegten metamodellbasierten Ansatzes, ist die Voraussetzung, um eine Herstellbarkeitsbewertung für gefalzte Karosseriebauteile durchführen zu können. In diesem Kapitel wird daher nun auf die Verifizierung und Validierung der im Assistenzsystem implementierten Funktionsweise eingegangen. Hierzu wird zunächst die Vorgehensweise, die zur Gültigkeitsprüfung der Bauteilanalysemethodik herangezogen wurde, dargelegt. Anschließend werden die Ergebnisse der Verifizierungs- und Validierungsmaßnahmen an ausgewählten Karosseriebauteilen vorgestellt. In diesem Zusammenhang wird ebenso auf die Fragestellung zur Modellübertragbarkeit eingegangen.

7.1 Vorgehensweise zur Gültigkeitsprüfung der Bauteilanalysemethodik

Mit den hier aufgezeigten Verifizierungs- und Validierungsmaßnahmen soll die Gültigkeit und Anwendbarkeit des metamodellbasierten Assistenzsystems geprüft werden. In Abbildung 7.1 ist die hierzu zugrunde gelegte Vorgehensweise als Übersicht dargestellt.

Die Validierung und Verifizierung fand dabei anhand von unterschiedlich gestalteten Karosseriebauteilen statt. Hierfür wurden zunächst experimentelle Rollfalzversuche an seriennahen Karosseriebauteilen durchgeführt, bei denen die in Kapitel 4.2 beschriebene Versuchseinrichtung verwendet wurde. Parallel dazu wurde der Bauteilfertigungsprozess in AutoForm®plus R6 unter Berücksichtigung aller relevanten Umformoperationen simuliert, um somit einen Vergleich von Assistenzsystem, FE-Simulation und Realprozess zu ermöglichen. Um neben der Validierung der Ergebnisprognosegüte den Ansatz der Bauteilsegmentierung verifizieren zu können, wurden darüber hinaus markante Teilbereiche entlang der Umrisskontur durch geometrische Grundformen nachgebildet und separat mit den in Kapitel 6.1.2 beschriebenen FE-Modellvorlagen simuliert.

Damit eine gute Vergleichbarkeit zwischen den realen und virtuellen Falzversuchen realisiert werden konnte, wurde insbesondere auf übertragbare Rahmenbedingungen geachtet. In diesem Zusammenhang wurden daher die Randbedingungen bei der FE-Simulation des Gesamtbauteils so gewählt, dass der Realprozess in Bezug auf die Bauteileinspannung sowie die Umform- und Falzwerkzeuge möglichst detailliert abgebildet werden konnte. Umgekehrt dienten die in der Simulation generierten Rollfalzbahnen wiederum als Ausgangsbasis für die Umsetzung des Realprozesses. Dazu wurden die Falzbahnen aus der FE-Simulationen über eine Schnittstelle so auf die Falzroboter übertragen, dass die in der Simulation definierten Rollenpositionen und Rollenausrichtungen für die experimentellen Falzversuche herangezogen werden konnten. Der

Einfluss der Systemsteifigkeit des Falzroboters konnte bei der Bahnkurvenerstellung hierbei allerdings nicht explizit berücksichtigt werden.

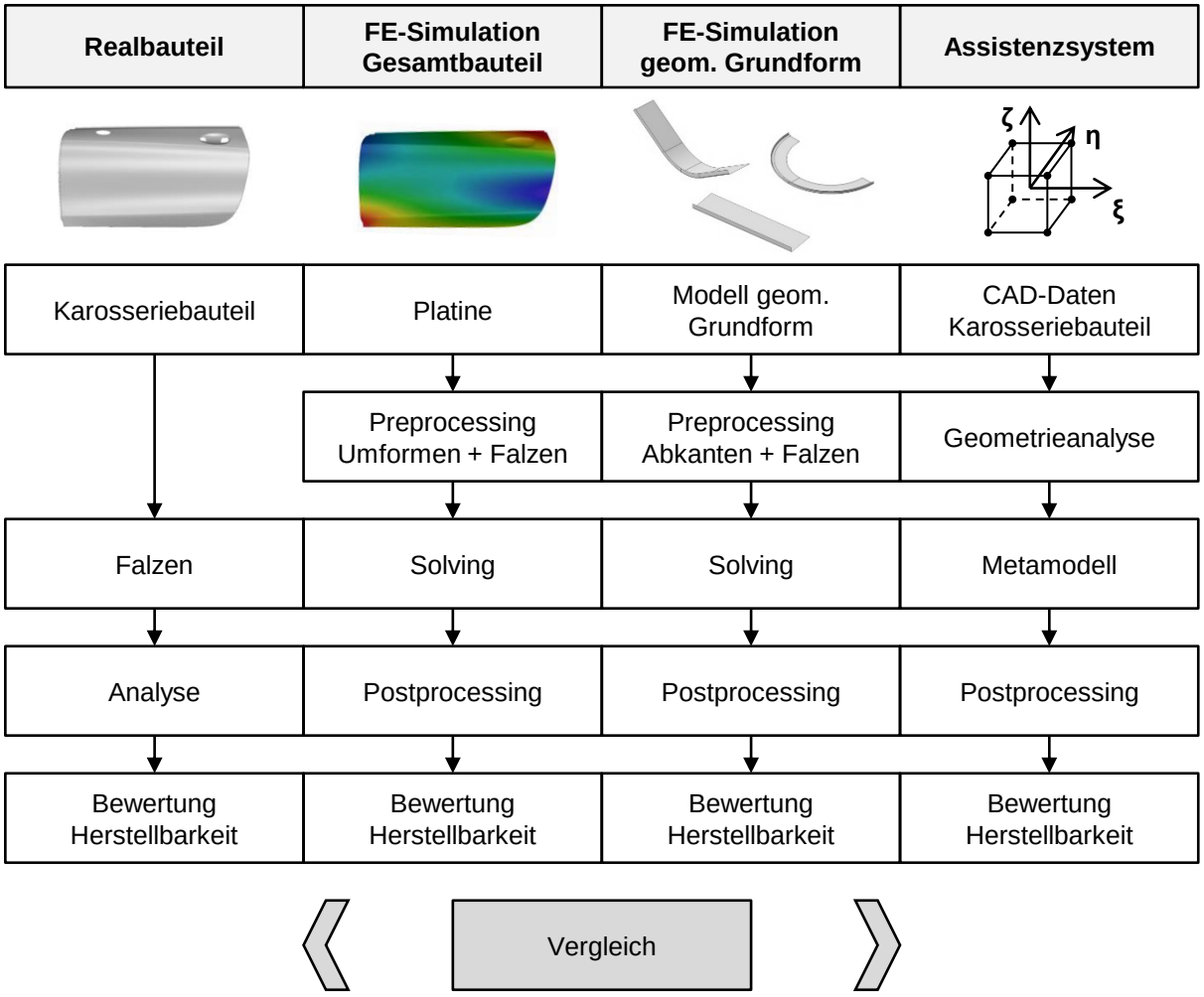


Abbildung 7.1: Vorgehensweise zur Verifizierung und Validierung der metamodellbasierten Bauteilanalysemethodik

Im Anschluss an die Versuchsdurchführung stand insbesondere die Ergebnisauswertung in Bezug auf die resultierende geometrische Falzform und die Tendenz zur Faltenbildung am Falzflansch im Fokus. Dabei wurde die geometrische Maßhaltigkeit des Falzes durch eine messtechnische Analyse erfasst und bewertet. Hierzu kam das in Kapitel 4.2 beschriebene optische Messsystem CALIPRI® zum Einsatz, das den Falzflansch als Profilkurve digitalisiert und somit eine computerbasierte Auswertung ermöglicht. Um hierbei die für das Bauteileinrollverhalten relevanten Messgrößen Falzverlust und Umrissmaßabweichung reproduzierbar bestimmen zu können, ist insbesondere die Art der Bauteillagerung entscheidend. Abbildung 7.2 zeigt hierzu exemplarisch den Einfluss verschiedener Bauteillagerungen beim Messen.

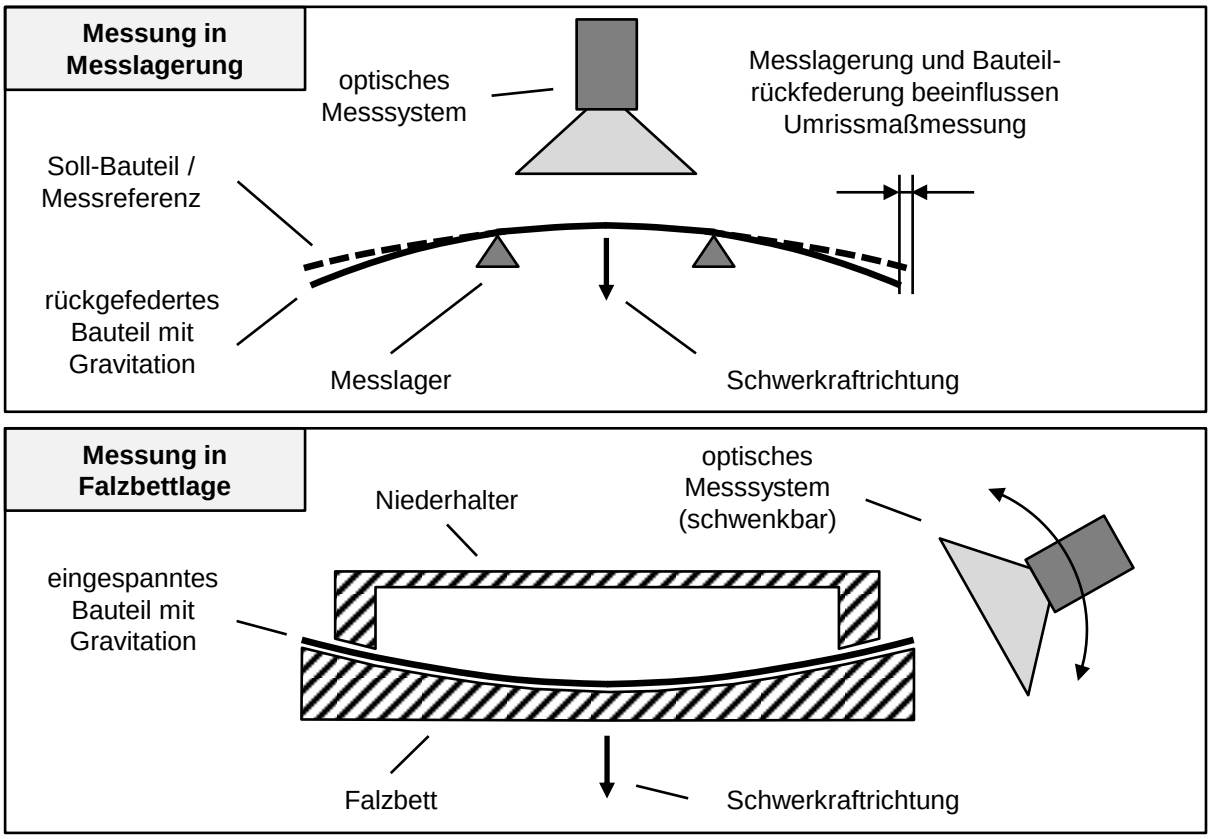


Abbildung 7.2: Einflüsse unterschiedlicher Lagerungen bei der Messung der geometrischen Bauteilmaßhaltigkeit

Nach dem Umformen und Falzen resultiert eine Bauteilrückfederung, wodurch die Gesamtmaßhaltigkeit beeinflusst wird. Zusätzlich unterliegt das Bauteil einem Gravitationseinfluss, wenn es auf einer Messlagerung gelagert wird. Da für die Bewertung der geometrischen Maßhaltigkeit ein Vergleich der Bauteilzustände vor und nach dem Falzen erforderlich ist, resultieren hierbei weitere Störgrößen beim Messen. Um diese zu minimieren wurde daher in der vorliegenden Arbeit für die Auswertung der geometrischen Falzform eine Bauteillagerung in eingespannter Falzbettlage gewählt. Dadurch konnte zum einen der Einfluss, der durch die Bauteilrückfederung und die Gravitation hervorgerufen wird, reduziert werden und zum anderen konnte hierdurch eine definierte Referenzlage für die optische Vermessung der geometrischen Falzgrößen ermöglicht werden.

Neben der geometrischen Maßhaltigkeit des Falzes wurde insbesondere die Prognosegüte in Bezug auf die Tendenz zur Faltenbildung untersucht. Die Bewertung erfolgte dazu bei einer sichtbar ausgeprägten Faltenbildung am Falzflansch rein visuell. Bei leichten Falzflanschunruhen wurde darüber hinaus eine zusätzliche haptische Beurteilung herangezogen, um eine beginnende Faltenbildung erkennen zu können. Die resultierenden Ergebnisse werden nun im Folgenden vorgestellt.

7.2 Ergebnisse der Verifizierungs- und Validierungsmaßnahmen

Für die Verifizierungs- und Validierungsmaßnahmen wurde als erstes Referenzbauteil eine Motorhaube aus dem Aluminiumblechwerkstoff AA6014 im T4-Zustand mit 1,0 mm Innen- und Außenteilblechdicke gewählt. Die Motorhaube ist hierbei zum einen durch eine markant gekrümmte Bauteilkontur gekennzeichnet, sodass beim Falzen geometriebedingte Effekte auftreten. Zum anderen sind die entsprechenden Bauteilbereiche zusätzlich durch spezifische Öffnungswinkel- und Flanschlängenkonstellationen charakterisiert, was insbesondere für eine vergleichende Falzbewertung mit unterschiedlichen Systemen von Bedeutung ist. Für die Ergebnisauswertung wurden daher nun zwei markante Bauteilbereiche ausgewählt und bezüglich der geometrischen Maßhaltigkeit des Falzes untersucht. In Abbildung 7.3 ist hierzu eine Gegenüberstellung der resultierenden Ergebnisse aus dem realen Falzversuch, der FE-Simulation des Gesamtbauteils, der FE-Simulation der entsprechenden geometrischen Grundform und dem Assistenzsystem dargestellt.

Die Auswertung der fertig gefalzten Flanschlängen zeigt, dass in den beiden Bereichen B1 und B2 eine gute Übereinstimmung der jeweiligen Falzergebnisse vorliegt und eine hinreichende Prognose durch das Assistenzsystem ermöglicht wird. Da die im System implementierte, metamodellbasierte Bauteilanalyse auf der Grundlage von Interpolationsrechnungen zwischen Referenzdaten diverser geometrischer Grundformen stattfindet, ist es erforderlich, dass der zugrunde gelegte Bauteilsegmentierungsansatz gültig ist. Um hierzu Rückschlüsse ziehen zu können, wurden die FE-Simulationsergebnisse des komplex gestalteten Gesamtbauteils und mit denen der entsprechenden geometrischen Grundform verglichen, die den vorliegenden Bauteilbereich als abstraktes Geometrieelement nachbildet. Anhand dieser Auswertung ist zu erkennen, dass die resultierenden Ergebnisse der beiden FE-Simulationsvarianten in einem ähnlichen Wertebereich liegen und die segmentierte Betrachtung der Bauteilkontur eine hinreichende Gültigkeit hat.

Für die Auswerteergebnisse des Falzverlustes und der Umrissmaßabweichung ist ebenfalls eine zufriedenstellende Übereinstimmung der jeweiligen Versuchsvarianten für die Bereiche B1 und B2 erkennbar. Die Auswertung dieser Falzergebnisse wird allerdings im Vergleich zur Flanschlängenbestimmung durch eine tendenziell größere Messunsicherheit überlagert, da das fertig gefalzte Bauteil mit dem Bauteil vor dem Falzen beziehungsweise mit einem Referenzbauteil verglichen werden muss. Hierzu ist für die Messung eine möglichst gute Ausrichtung der entsprechenden Falzprofile erforderlich, die trotz Referenzpunkten mit einer gewissen Unschärfe in der Positionierung verbunden ist. Unter Berücksichtigung der genannten Messunsicherheiten

ist für das vorliegende Bauteil auch bei der Auswertung des Falzverlustes und der Umrissmaßabweichung eine hinreichende Genauigkeit der Assistenzsystemprognose und des Bauteilsegmentierungsansatzes zu verzeichnen.

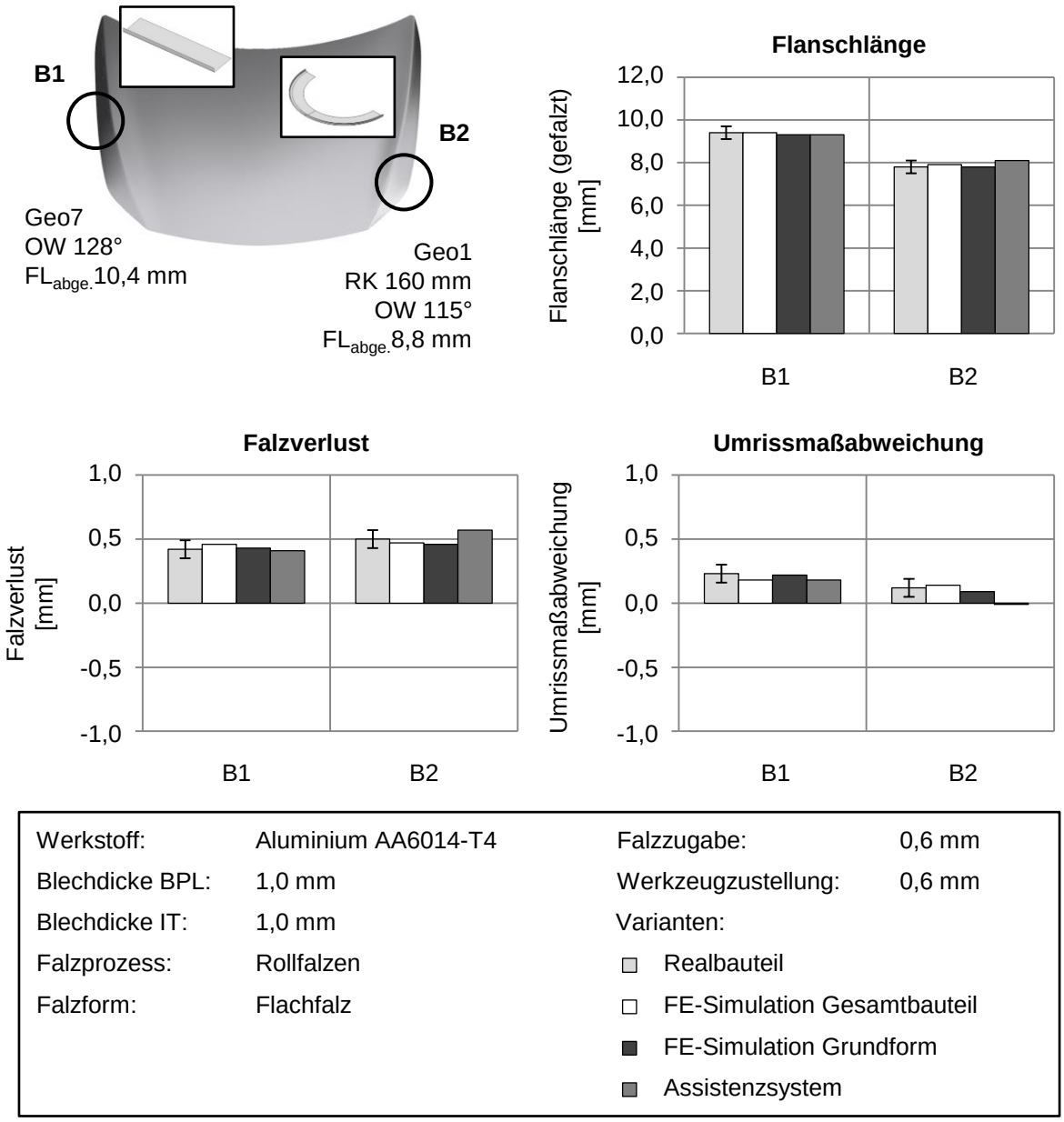
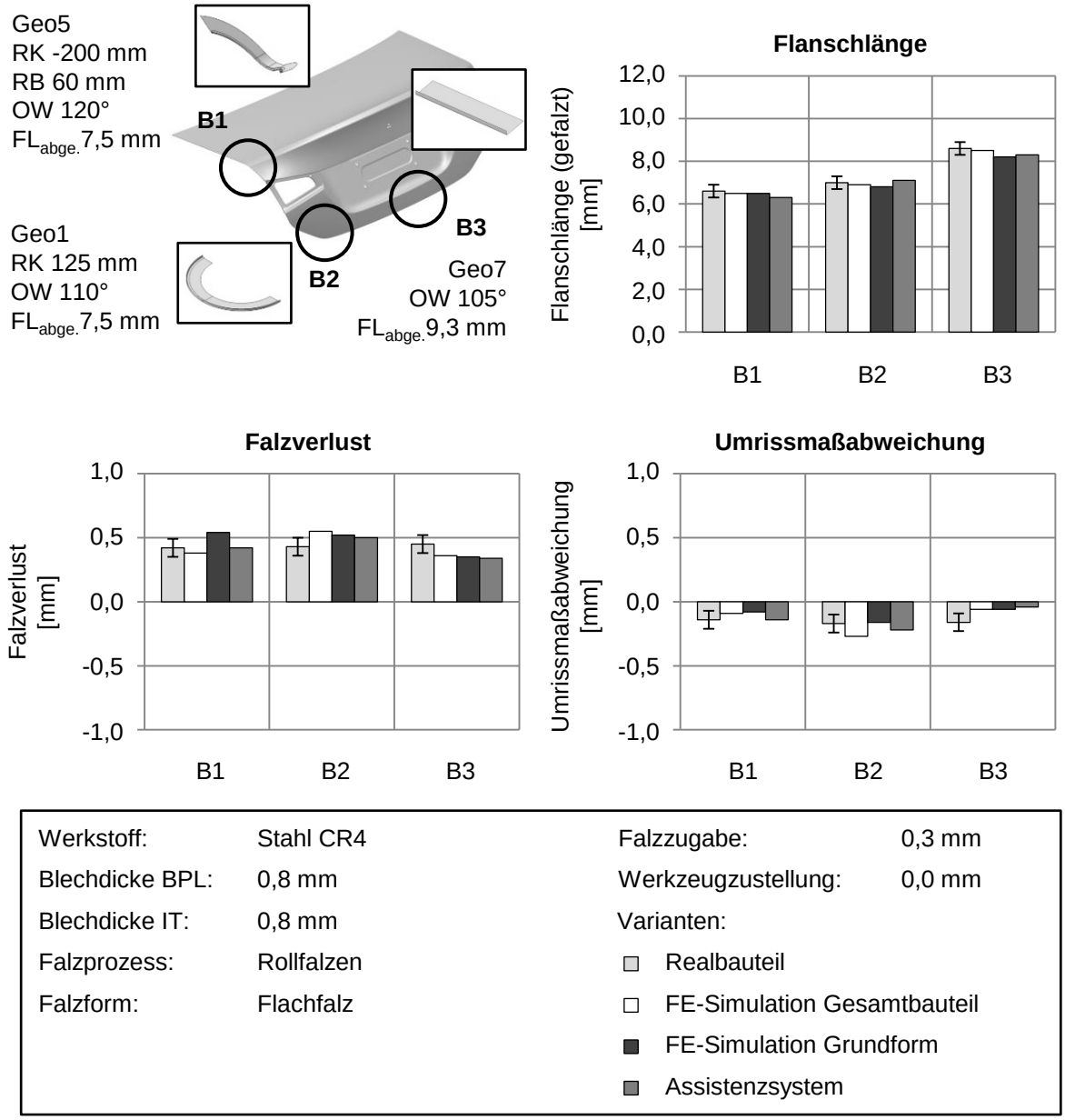


Abbildung 7.3: Validierung der Prognosefähigkeit für die resultierende geometrische Falzform am Beispiel einer Motorhaube

Als zweites Referenzbauteil wurde für die Verifizierungs- und Validierungsmaßnahmen ein Heckdeckel aus dem Stahlblechwerkstoff CR4 mit 0,8 mm Innen- und Außenteilblechdicke herangezogen. Ähnlich wie die Motorhaube ist der Heckdeckel durch mehrere markante Krümmungsbereiche entlang der Bauteilumrisskontur gekennzeichnet. Neben dem unterschiedlichen

Blechwerkstoff wurde hierbei ebenfalls eine alternative Prozessvariante beim Rollfalzen zugrunde gelegt, die durch eine andere Falzrollenzustellung gekennzeichnet ist. Die entsprechende Ergebnisauswertung ist hierzu in Abbildung 7.4 für drei charakteristische Bauteilbereiche des Heckdeckels dargestellt.



Werkstoff:	Stahl CR4	Falzzugabe:	0,3 mm
Blechdicke BPL:	0,8 mm	Werkzeugzustellung:	0,0 mm
Blechdicke IT:	0,8 mm	Varianten:	
Falzprozess:	Rollfalzen	▢ Realbauteil	
Falzform:	Flachfalz	□ FE-Simulation Gesamtbauteil	
		■ FE-Simulation Grundform	
		▩ Assistenzsystem	

Abbildung 7.4: Validierung der Prognosefähigkeit für die resultierende geometrische Falzform am Beispiel eines Heckdeckels

An den Bereichen B1, B2 und B3 ist für die betrachteten geometrischen Auswertegrößen auch in diesem Fall eine hinreichende Übereinstimmung zwischen realem Prozess, FE-Simulation des Gesamtbauteils, FE-Simulation der geometrischen Grundformen und dem Assistenzsystem

erkennbar. Die Werkstoff- und Prozesseinflüsse konnten hierbei ebenfalls durch den metamodellbasierten Ansatz des Assistenzsystems hinreichend genau wiedergegeben werden.

In einem weiteren Schritt wurde nun der Fokus verstärkt auf die Validierung der Prognosefähigkeit für die Faltenbildung am Falzflansch gelegt. Hierfür wurde wiederum eine Motorhaube aus dem Aluminiumblechwerkstoff AA6014 im T4-Zustand mit 1,0 mm Innen- und Außenteilblechdicke herangezogen. Die ausgewählte Motorhaube ist durch einen markanten, konvex gekrümmten Bereich gekennzeichnet, der besonders für eine Faltenbewertung geeignet ist, da in diesem Bereich eine beabsichtigte Faltenbildung durch eine Variation der Flanschlänge hervorgerufen werden kann. Für die Validierung der Faltentendenz wurden daher am Realbauteil zwei Flanschlängenvarianten durch eine Modifikation der Beschnittkontur realisiert, um auf dieser Grundlage die Prognosegüte der FE-Simulation und des Assistenzsystems bewerten zu können. In Abbildung 7.5 ist hierzu eine Gegenüberstellung der entsprechenden Falzergebnisse für die zwei Flanschlängenvarianten dargestellt.

Nach dem Falzen des Realbauteils sind bei der Variante mit kürzerer Flanschlänge keine sichtbaren Falten am Falzflansch zu erkennen. Bei der Variante mit größerer Flanschlänge treten hingegen stark ausgeprägte Falten am Falzflansch auf. Um nun in der FE-Simulation nach dem Falzen sichtbare Falten detektieren zu können, ist für das in AutoForm® hinterlegte Faltenkriterium „Potential Wrinkles“ ein Wert von größer als 0,03 erforderlich (vergleiche Kapitel 6.1.3). Dieser Grenzwert ist für eine Bewertung der Faltenbildung unter doppelseitigen Kontaktbedingungen (Innenteil-Blech-Falzwerkzeug) gültig und konnte durch verschiedene Falzversuche ermittelt werden. Da die Referenzdaten für das Assistenzsystem auf Simulationen von geometrischen Grundformen beruhen, die ausschließlich über das in AutoForm® hinterlegte Faltenkriterium ausgewertet wurden, erfolgt die Faltenbewertung der metamodellbasierten Bauteilanalyse in analoger Weise.

Die Ergebnisauswertung zeigt, dass für die vorliegenden Flanschlängenvarianten eine gute Übereinstimmung von realem Prozess, der FE-Simulation des Gesamtbauteils, der FE-Simulation der geometrischen Grundform und der Assistenzsystemprognose vorliegt. Sowohl durch die FE-Simulationen als auch durch das Assistenzsystem konnte hierbei die Faltenintensität in einer realistischen Größenordnung wiedergegeben werden.

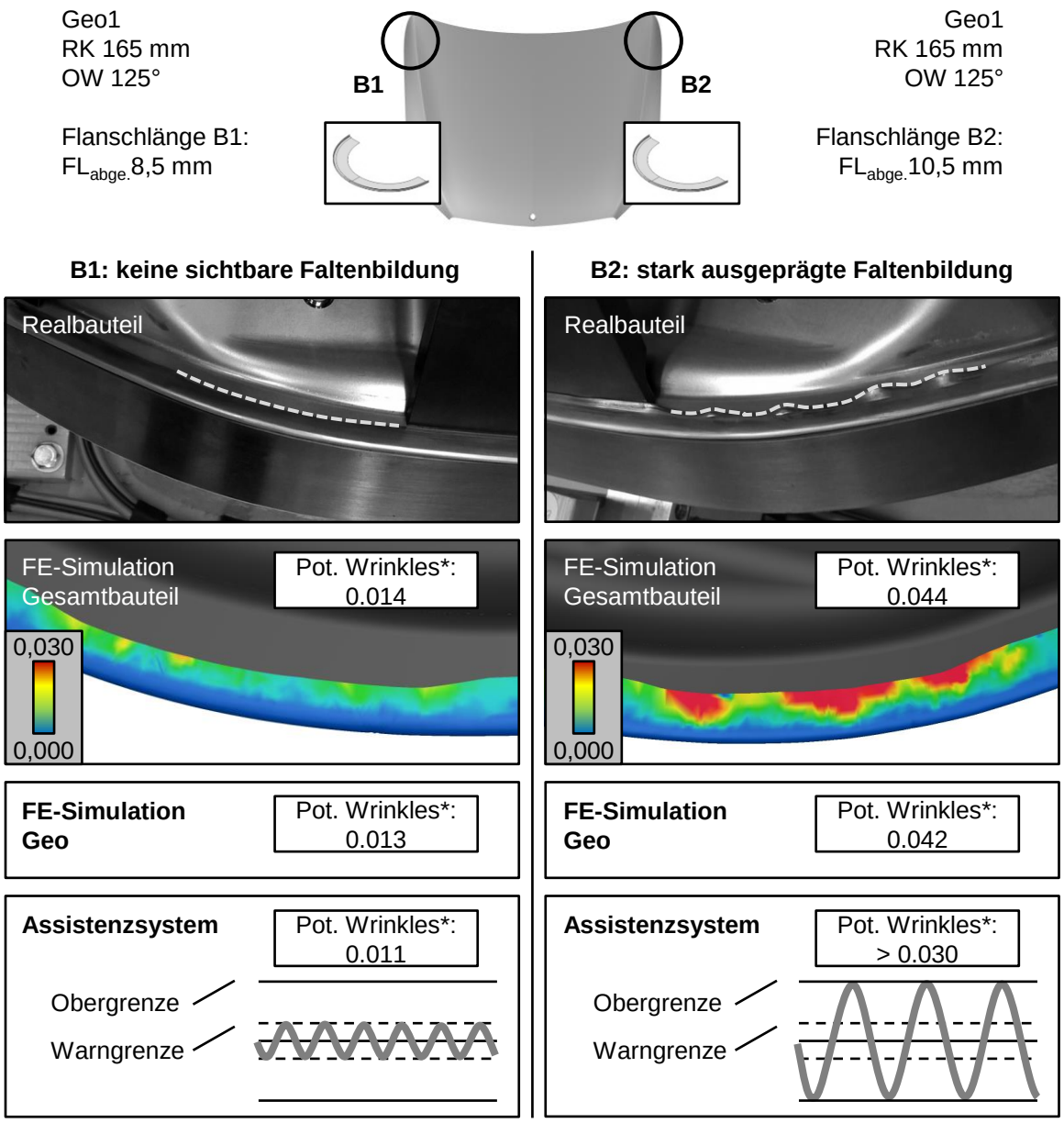


Abbildung 7.5: Validierung der Prognosefähigkeit für die Tendenz zur Faltenbildung am Beispiel einer Motorhaube

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei den durchgeführten Maßnahmen zur Verifizierung- und Validierung eine gute Übereinstimmung der resultierenden Auswerteergebnisse von real gefalztem Karosseriebauteil, den FE-Simulationen und dem metamodellbasierten

Assistenzsystem verzeichnet werden konnte. Dabei konnte unabhängig von der betrachteten Bauteilkontur eine hinreichend genaue Prognose für die spezifischen Auswertegrößen festgestellt werden. Die Bauteil- und Falzflanschgestaltung der dabei untersuchten Karosseriebauteile wurde dabei zufällig ausgewählt und steht in keinem Zusammenhang mit den definierten Stützpunkten des Metamodellaufbaus. Anhand der dargelegten Ergebnisse kann somit gezeigt werden, dass die geometriebezogene Bauteilanalyse, inklusive des dabei zugrunde gelegten metamodellbasierten Ansatzes, für eine Bewertung der falztechnischen Herstellbarkeit von komplex gestalteten Karosseriebauteilen gültig und anwendbar ist.

7.3 Übertragbarkeit der Bauteilanalysemethodik

Mit den vorgestellten Verifizierungs- und Validierungsmaßnahmen konnte die Gültigkeit und Anwendbarkeit der metamodellbasierten Bauteilanalyse für die vorliegenden Karosseriebauteile gezeigt werden. Im Folgenden wird nun auf die Fragestellung zur weiteren Übertragbarkeit der geometriebezogenen Bauteilanalysemethodik eingegangen.

Bei der Bauteilanalyse erfolgt die Prognose der falztechnischen Herstellbarkeit auf Basis von individuellen geometrischen Grundformen, die die originale Bauteilkontur ersatzweise wiedergeben. Dadurch wird es ermöglicht, dass eine Bauteilbewertung unabhängig von der Art des zu analysierenden Karosseriebauteils auf der Grundlage von bereits bekannten, ähnlichen geometrischen Grundformen erfolgt. Der Analyseansatz kann somit bei allen Arten von gefalzten Karosseriebauteilen, wie etwa Kotflügel, Motorhauben, Türen, Heckdeckel und Rückwandtüren, angewendet werden.

Die hierzu erforderliche Referenzdatenbasis kann aufgrund des elementbasierten Metamodellansatzes jederzeit erweitert und an neue geometrische Grundformen angepasst werden, indem eine Modifizierung der Geometriestützpunkte erfolgt. Gleichzeitig können hierdurch zahlreiche Auswertegrößen bei der Herstellbarkeitsbewertung berücksichtigt werden. Im Unterschied zu den Metamodellformulierungen wie sie unter anderem von Zhang et al. (2000) und Zhang et al. (2003) beschrieben wurden, bei denen ein starrer Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen des Modells herrscht, ist mit der vorgestellten Methodik eine flexible Anwendungsmöglichkeit gegeben. Neue Produkt- und Prozessvarianten oder neue Werkstoffe können so in die Referenzdatenbasis eingefügt werden, ohne dass hierbei eine Anpassung der eigentlichen Metamodellformulierung erforderlich ist.

Grundsätzlich ist somit die Übertragbarkeit der hier vorgestellten geometriebezogenen Bauteilanalysemethodik in Bezug auf neue Produkt- und Prozessvarianten sowie auf neue Werkstoffe

gegeben. Die Möglichkeit zur Erweiterbarkeit des Bauteilanalyseansatzes stand in diesem Zusammenhang bei der Entwicklung des Assistenzsystems dabei besonders im Fokus des Interesses.

8 Integration in die virtuelle Fertigungsprozesskette

Die in den vorausgegangenen Kapiteln vorgestellte Methodik zur metamodellbasierten Auslegung von Falzprozessen ist insbesondere in den frühen Fahrzeugprojektphasen von Vorteil, in denen das Bauteildesign noch nicht final festgelegt ist und unterschiedliche Varianten in Bezug auf ihre Machbarkeit bewertet werden müssen. In diesem Kapitel wird nun eine Einordnung in den Gesamtprozess für die digitale Absicherung des Herstellungsprozesses von Karosseriebauteilen gegeben.

Hierzu wird zunächst auf die virtuelle Fertigungsprozesskette eingegangen, um die Vorteile bei der Anwendung des metamodellbasierten Ansatzes in einem Fahrzeugprojekt aufzuzeigen. Anschließend werden in diesem Zusammenhang erweiterte Anwendungsmöglichkeiten für die simulationsgestützte Auslegung von Falzprozessen vorgestellt, die in Zusammenspiel mit der vorausgegangenen metamodellbasierten Produkt- und Prozessoptimierung weitere Vorteile bewirken.

8.1 Optimierung der Produkt- und Prozessabsicherung

Die Durchführung von FE-Falzsimulationen ist sowohl für die simulationsgestützte Planung der Falzmethode als auch für die Umsetzung einer durchgängigen virtuellen Fertigungsprozesskette relevant. Mit dem metamodellbasierten Ansatz, der in dem hierzu entwickelten Falzassistenzprogramm implementiert ist, werden insbesondere die produkt- und prozessbezogenen Absicherungsmaßnahmen in den frühen Projektphasen optimiert. Dadurch ist es möglich, die Anforderungen für eine produktionsgerechte Produktgestaltung effizient zu definieren und somit den Reifegrad des Bauteils durch zielgerichtete Optimierungsmaßnahmen frühzeitig zu erhöhen.

Die produktseitige Reifegradsteigerung wirkt sich daraufhin positiv auf alle nachfolgenden Prozessschritte aus, sodass hierbei der Fokus vermehrt auf die prozessrelevanten Optimierungsmaßnahmen gelegt werden kann. Für die Planung der Falzmethode bedeutet das, dass insbesondere der Aufwand zur Produktabsicherung und zur Auslegung der konstruktiv vorgehaltenen Falzzugaben sowie Flanschlängen deutlich reduziert werden kann. In Abbildung 8.1 ist hierzu eine Prozessübersicht dargestellt, welche die Eingliederung des metamodellbasierten Absicherungsansatzes im Rahmen der Maßnahmen zur simulationsgestützten Planung der Falzmethode aufzeigt.

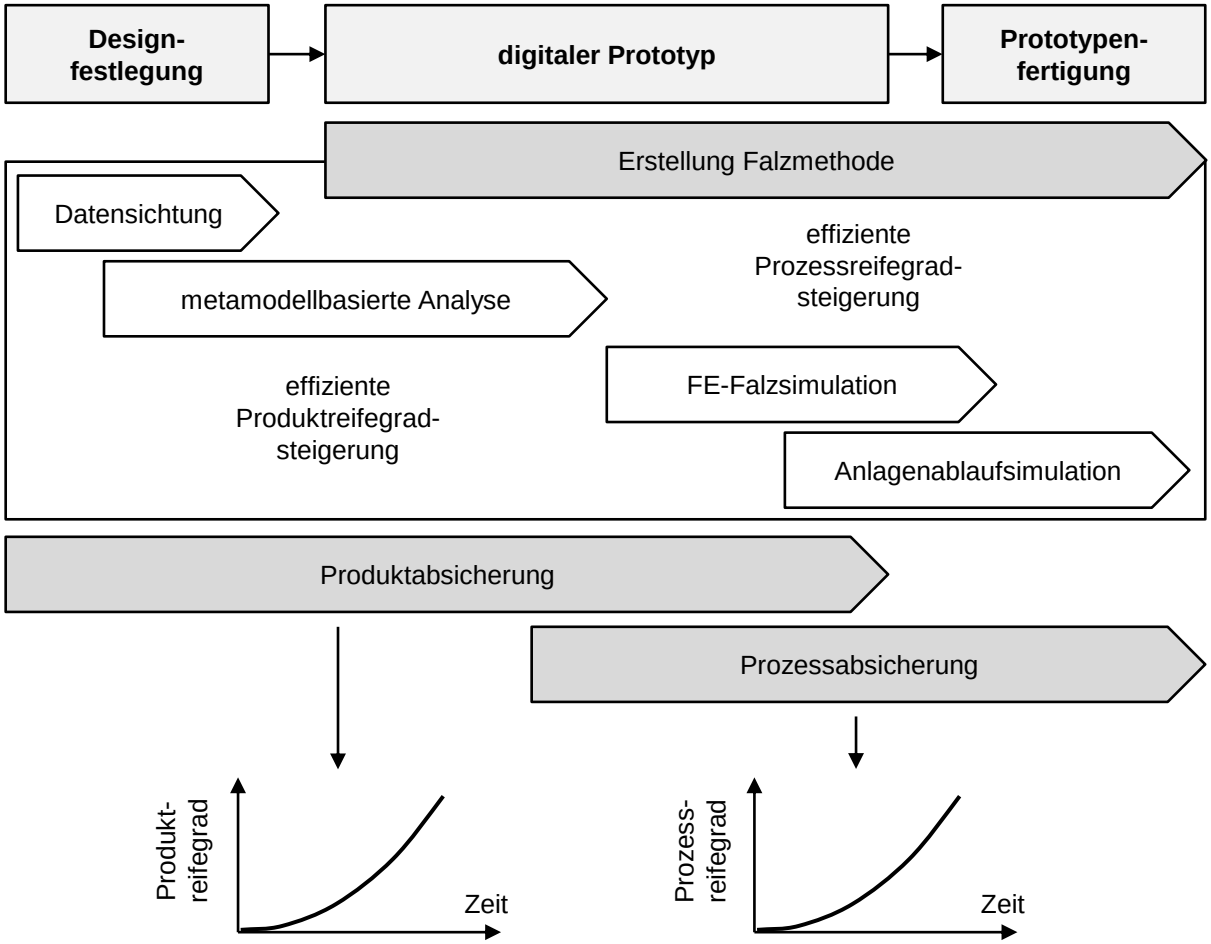


Abbildung 8.1: Eingliederung des metamodellbasierten Ansatzes in die Prozessabfolge zur simulationsgestützten Planung der Falzmethode in einem Fahrzeugprojekt

In den frühen Projektphasen steht hierbei die Produktoptimierung im Vordergrund. Da das Bauteildesign zu diesem Zeitpunkt in der Regel noch nicht final festgelegt ist, ist es meist erforderlich, verschiedene Varianten in Bezug auf die falztechnische Herstellbarkeit zu untersuchen und zu bewerten. Mit Hilfe der geometriebezogenen Bauteilanalyse und des dabei zugrunde gelegten metamodellbasierten Ansatzes ist es möglich, verschiedene Bauteilkonzepte effizient abzusichern und zu bewerten, ohne dass hierzu die Durchführung zahlreicher FE-Simulationsschleifen notwendig ist. Die dazu erforderlichen Optimierungsmaßnahmen können unmittelbar und ohne Zeitverzug in die Bauteilkonstruktion miteingebracht werden, sodass dadurch eine effiziente Reifegradsteigerung erreicht werden kann.

Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 8.2 verdeutlicht, in der eine Gegenüberstellung von FE-Falzsimulation und metamodellbasiertem Assistenzsystem hinsichtlich des erforderlichen Zeitbedarfs zur Durchführung einer Produktabsicherung dargestellt ist.

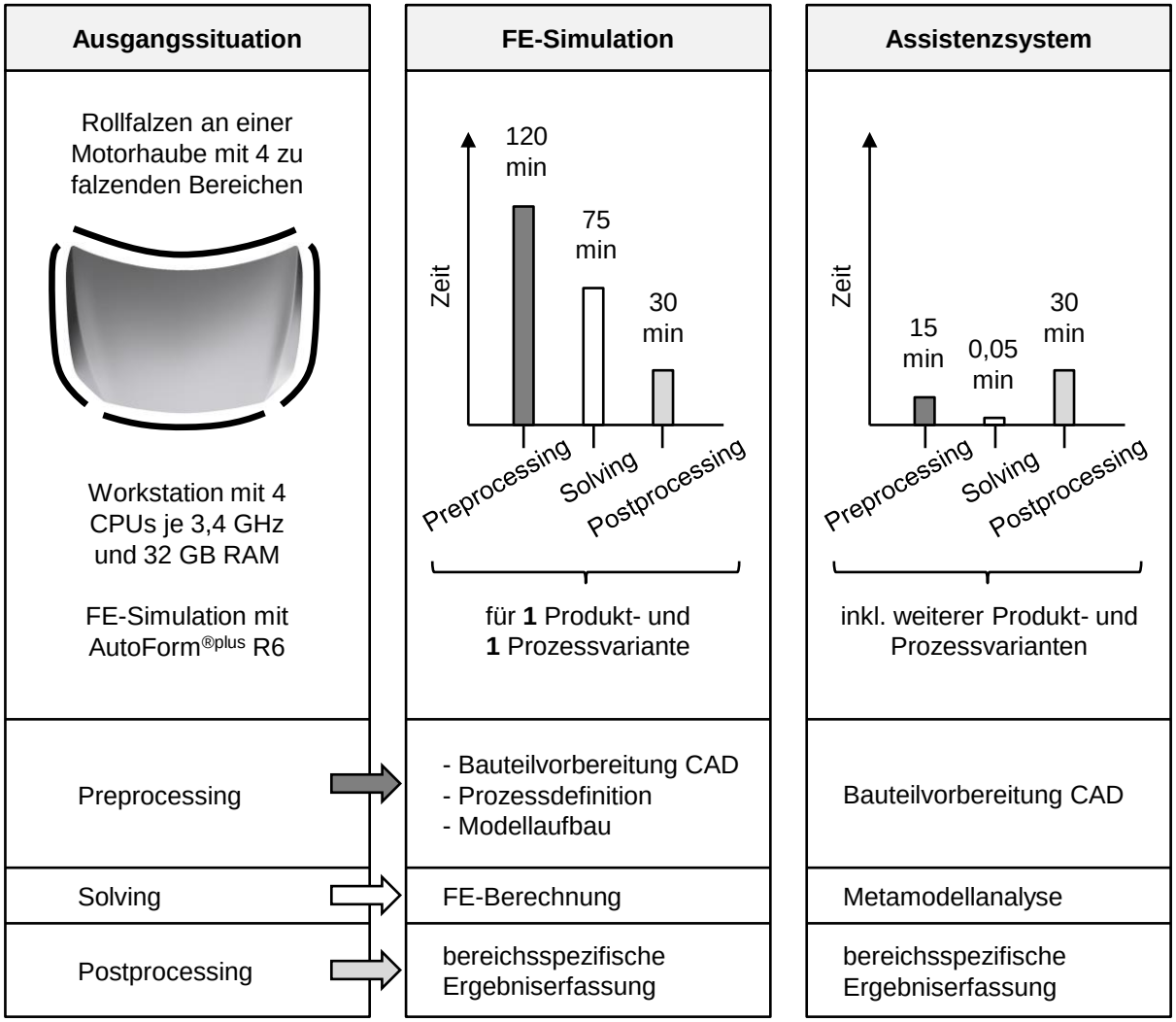


Abbildung 8.2: Gegenüberstellung von FE-Simulation und metamodellbasiertem Assistenzsystem hinsichtlich des Zeitbedarfs zur Durchführung einer Produktabsicherungsschleife

Der größte Vorteil des metamodellbasierten Assistenzsystems liegt in dem geringen Zeitbedarf für das Preprocessing, da im Vergleich zur konventionellen FE-Falzsimulation hierbei keine Maßnahmen für die Simulationsvorbereitung erforderlich sind. Darüber hinaus bietet das Assistenzsystem die Möglichkeit verschiedene Produkt- und Prozessvarianten für ein zu falzendes Karosseriebauteil sekundenschnell zu untersuchen und entsprechende Optimierungsmaßnahmen zu definieren. Mit konventionellen FE-Falzsimulationen ist hierbei ein erheblicher Simulationsaufwand erforderlich, was sich insbesondere in einem eng gesteckten Fahrzeugentwicklungsprozess nachteilig auswirkt. Aus diesem Grund ist insbesondere in den frühen Projektphasen der Einsatz des metamodellbasierten Assistenzsystems für die Umsetzung einer effizienten Produktreifegradsteigerung zu favorisieren.

Im weiteren Verlauf gewinnt verstärkt die Prozessoptimierung an Bedeutung. Auch hier liefert das metamodellbasierte Assistenzsystem einen wertvollen Beitrag. Da in der Referenzdatenbasis die Information über zahlreiche Prozessvarianten hinterlegt ist, kann beispielsweise beim Rollfalzen die Zustellung der Falzrollen für spezifische Bauteilbereiche gezielt optimiert werden. Bei der Durchführung von nachfolgenden FE-Falzsimulationen kann somit bereits einerseits auf reifere Produktdaten als auch auf eine bereits vordefinierte Prozessstrategie zurückgegriffen werden. Damit kann der Fokus nun verstärkt auf erweiterte Anwendungsfälle gelegt werden, um bereits bei der Planung der Falzmethode eine bestmögliche Kopplung von digitaler Absicherung und realem Anlagenkonzept zu ermöglichen.

8.2 Erweiterte Anwendungsfälle für die Anlageninbetriebnahme

Neben der Möglichkeit zur Produkt- und Prozessabsicherung bietet die auf der Methode der finiten Elemente beruhende Falzsimulation weitere Potentiale, um den Falzprozess bestmöglich auszulegen. Insbesondere bei Rollfalzanwendungen kann hierdurch ein deutlicher Mehrwert erzielt werden. Die Simulation stellt in diesem Fall ein Bindeglied zwischen digitaler Absicherung und effizienter Anlageninbetriebnahme dar. Dabei sind vor allem die in der Simulation verwendeten Rollfalzbahnen von Interesse. Mit Hilfe der Falzsimulation können die Bahnen hierbei so erzeugt werden, dass das bauteilkonturspezifische Einrollverhalten in Form einer geeigneten Werkzeugzustellung im Vorfeld berücksichtigt werden kann. Gleichzeitig kann der benötigte Arbeitsaufwand für die virtuelle Anlageninbetriebnahme reduziert werden, indem die Bahnkurven aus der FE-Falzsimulation als Grundlage für das Offline-Programm des Rollfalzroboters herangezogen werden. In Abbildung 8.3 ist hierzu eine Prozessübersicht dargestellt, welche die Interaktion zwischen den Bereichen Produktentwicklung, digitale Absicherung und Anlageninbetriebnahme veranschaulicht.

Das metamodellbasierte Assistenzsystem unterstützt den Falzmethodenplaner in den frühen Phasen bei der Definition von effizienten Produkt- und Prozessoptimierungsmaßnahmen. Hierbei ist es beispielsweise möglich, dass durch das Assistenzsystem geeignete Rollenzustellungen für eine robuste Erreichung eines geforderten Soll-Umrissmaßes entlang der zu falzenden Bauteilkontur ermittelt werden. Darauf aufbauend können nun die nachfolgenden FE-Falzsimulationen so modelliert werden, dass eine Detailplanung des Falzprozesses im Vordergrund steht, bei der spezifische Optimierungsmaßnahmen bezüglich des Gesamtprozessablaufs definiert werden können. Im Anschluss daran besteht zusätzlich die Möglichkeit, dass zur weiteren Unterstützung der virtuellen Anlageninbetriebnahme die in der FE-Simulation erstellten Bahnkurven über eine Schnittstelle der Roboterprogrammierung bereitgestellt werden.

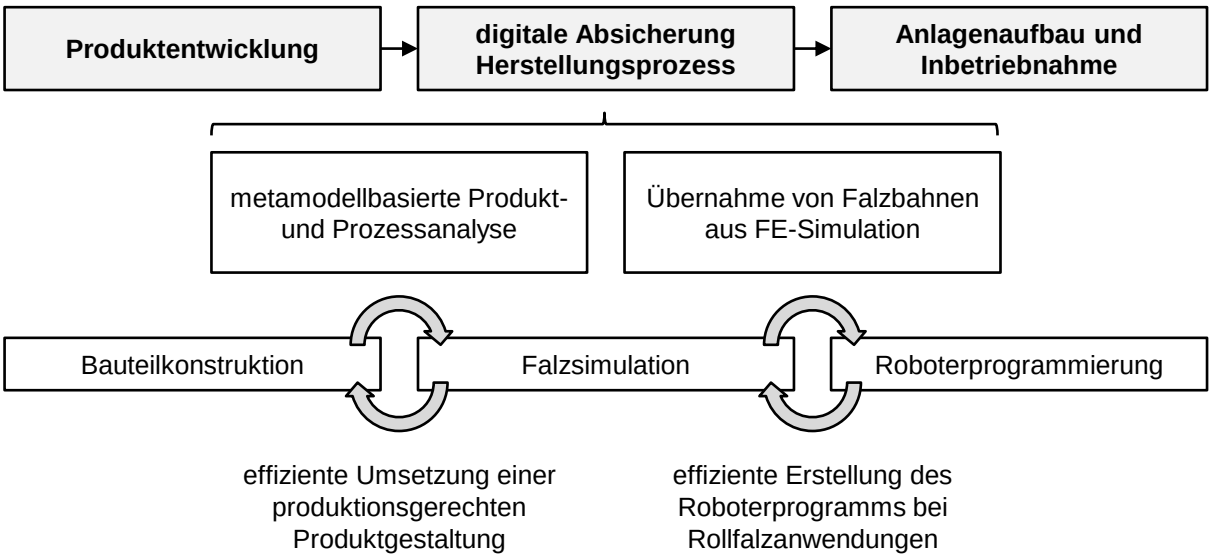


Abbildung 8.3: Interaktion zwischen Produktentwicklung, digitaler Absicherung und Anlageninbetriebnahme

Durch diese Vorgehensweise kann ein deutlicher Zeitgewinn im Vergleich zur konventionellen Anlageninbetriebnahme erzielt werden. Darüber hinaus ist es hiermit möglich, frühzeitiger umrissmaßhaltige Karosseriebauteile zu produzieren, da das Einrollverhalten an spezifischen Bauteilbereichen durch eine simulationsgestützte Produkt- und Prozessbeeinflussung im Vorfeld gezielt ausgelegt werden kann. Eine Schwierigkeit stellt an dieser Stelle noch der Einfluss der Robotersteifigkeit dar, die bei der Übertragung der virtuellen Rollfalzbahnen auf den realen Falzroboter zu berücksichtigen ist. An dieser Stelle knüpfen Arbeiten, wie unter anderem die von Drossel et al. (2014) an, in der bereits ein Ansatz für ein Robotermodell beschrieben wurde, um somit die Systemsteifigkeit des Falzroboters bei der Rollfalzprogrammierung berücksichtigen zu können.

Durch das Zusammenspiel von effizienter Produkt- und Prozessoptimierung sowie den Möglichkeiten für eine bessere Kopplung von Simulation und Anlageninbetriebnahme ist es möglich, wertvolle Zeit- und Kostenvorteile in einem Fahrzeugprojekt zu erzielen. Insbesondere bei den immer kürzer werdenden Entwicklungszeiten und bei der stetig wachsenden Anzahl an Fahrzeugderivaten ist dies von besonderem Interesse. Das metamodellbasierte Assistenzsystem bietet hierzu eine zielgerichtete Hilfestellung, um sowohl produkt- als auch prozessseitige Optimierungsmaßnahmen bei der frühzeitigen Auslegung von Falzprozessen in einem Fahrzeugprojekt effizient und bedarfsgerecht definieren zu können.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Fertigung von Karosseriebauteilen ist im modernen Automobilbau insbesondere durch eine steigende Anzahl an verschiedenen Fahrzeugderivaten und durch immer kürzer werdende Entwicklungszeiten geprägt. Um hierbei eine kurze Anlageninbetriebnahme und schnelle Stückzahlhochläufe erreichen zu können, werden für eine effiziente Produkt- und Prozessabsicherung verstärkt digitale Methoden eingesetzt.

Im Karosseriebau stellt das Falzen einen Fertigungsschritt dar, bei dem insbesondere das Fugenbild eines Fahrzeugs signifikant beeinflusst wird. Durch die Realisierung kleiner Falzradien und konstant verlaufender Umrisskonturen wird die Wertanmutung einer Fahrzeugkarosse merklich gesteigert. Für eine bestmögliche Realisierung eines ästhetischen Gesamterscheinungsbilds werden daher beim Falzen von Karosseriebauteilen hohe Anforderungen in Bezug auf die geometrische Maßhaltigkeit des Falzes gestellt. Gleichzeitig ist es erforderlich, dass eine prozesssichere Herstellbarkeit der Falzverbindung gewährleistet wird. Aus diesen Gründen werden für die Auslegung von Falzprozessen unter anderem FE-Simulationen herangezogen, um zum einen die geometrische Maßhaltigkeit zu verbessern und zum anderen den Fertigungsprozess gegen ein mögliches Bauteilversagen abzusichern. Darüber hinaus spielt bei der Erfassung diverser Fertigungseinflüsse die Realisierung einer durchgängigen virtuellen Fertigungsprozesskette eine wichtige Rolle, bei der die digitale Produkt- und Prozessabsicherung gefalzter Bauteile einen bedeutsamen Baustein darstellt.

Die Erstellung, Durchführung und Auswertung von konventionellen Falzsimulationen auf Basis der Finiten-Elemente-Methode ist mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden, der bei der Simulationsdurchführung aufgebracht werden muss. Insbesondere in den frühen Fahrzeugprojektphasen, in denen das Bauteildesign noch nicht final festgelegt ist, ist aus diesem Grund eine Produkt- und Prozessabsicherung mit konventionellen FE-Simulationen nicht zweckmäßig. In der vorliegenden Arbeit wurde daher für die spezifische Auslegung von Falzprozessen ein metamodellbasiertes Assistenzsystem entwickelt, mit dem insbesondere in den frühen Entwicklungsphasen die falztechnische Herstellbarkeit von verschiedenen Produkt- und Prozessvarianten effizient untersucht und bewertet werden kann.

Das Assistenzsystem umfasst hierbei eine geometriebezogene Bauteilanalyse, der ein metamodellbasierter Ansatz zugrunde gelegt ist. Hierbei wurde eine Methodik definiert, bei der das zu analysierende Karosseriebauteil zunächst entlang der Umrisskontur in einzelne, individuelle Segmente unterteilt wird. Die ursprüngliche Bauteilkontur wird dabei durch eine Ersatzgeometrie ausgetauscht, sodass die Umrisskontur des Karosseriebauteils nun näherungsweise durch individuelle geometrische Grundformen beschrieben wird. Anschließend erfolgt anhand

der vorliegenden geometrischen Grundformen eine Bewertung der falztechnischen Herstellbarkeit. Hierzu wurde ein elementbasierter Metamodellansatz definiert, der in mehrere Modellebenen untergliedert ist und der eine falzspezifische Auswertung ermöglicht. Die Herstellbarkeitsbewertung erfolgt hierbei auf der Grundlage von ähnlichen und bereits bekannten geometrischen Grundformen, die als Referenzdaten zur Verfügung stehen. Um eine anwenderfreundliche Analysemöglichkeit zu gewährleisten, wurde in diesem Zusammenhang ein spezielles Falzassistenzprogramm generiert, mit dem neben einer automatisierten Bauteilanalyse auch eine grafische Ergebnisauswertung möglich ist.

Für die Bereitstellung der Referenzdaten wurde eine methodische Vorgehensweise zur effizienten, simulationsgestützten Datenerfassung vorgestellt. Hierbei wurde auf die Erstellung von speziellen Simulationsmodellen eingegangen, mit denen die Prozessschritte Beschneiden, Abkanten und Falzen variantenspezifisch simuliert werden können. Aufgrund der Vielzahl an relevanten Produkt- und Prozessvarianten wurde hierbei der Fokus insbesondere auf eine effiziente Simulationsdurchführung gelegt. In diesem Zusammenhang wurden unter anderem Maßnahmen für einen flexiblen Modellaufbau und eine automatisierte Simulationsauswertung definiert.

Um die Gültigkeit und die Anwendbarkeit des entwickelten Assistenzsystems zu prüfen, wurden verschiedene Verifizierungs- und Validierungsmaßnahmen auf Basis von simulationsgestützten und experimentellen Falzversuchen durchgeführt. Dabei kamen insbesondere serienahe Karosseriebauteile zum Einsatz. Anhand dieser Maßnahmen konnte gezeigt werden, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den Prognosen des metamodellbasierten Assistenzsystems, den Ergebnissen der FE-Simulation und der im Realprozess ermittelten Ergebnisse vorliegt.

Mit dem entwickelten Assistenzsystem wurde nun eine Möglichkeit geschaffen, die falztechnische Herstellbarkeit eines Karosseriebauteils unter Berücksichtigung zahlreicher Produkt- und Prozessvarianten hinreichend genau auszulegen. Dadurch kann insbesondere in den frühen Fahrzeugprojektphasen eine effiziente Reifegradsteigerung hinsichtlich einer produktionsgerechten Produktgestaltung erreicht werden, die im Zusammenhang mit der Realisierung einer durchgängigen virtuellen Fertigungsprozesskette wertvolle Zeit- und Kostenvorteile mit sich bringt. Die hierzu notwendigen Produktoptimierungsmaßnahmen werden durch einen Anwender des Assistenzsystems ermittelt und anschließend durch den Bauteilentwickler konstruktiv in den CAD-Datensatz des zu fertigenden Karosseriebauteils eingearbeitet. Durch eine Integration der Analysemethodik in die entsprechenden CAD-Systeme könnte zukünftig eine automatisierte Auslegung der Falzflanschgestaltung ermöglicht werden. So könnten beispielsweise

Flanschrückschnitte, die zur Vermeidung einer Faltenbildung erforderlich sind, bereits bei der Bauteilkonstruktion bedarfsgerecht umgesetzt werden. Darüber hinaus könnte durch eine Kopplung von Assistenzsystem und Roboterprogrammierung eine effiziente Anlageninbetriebnahme bei Rollfalzanwendungen realisiert werden, indem Messdaten erfasst und Falzbahnen durch eine metamodellbasierte Analyse optimiert werden.

In diesem Zusammenhang sind jedoch noch weiterführende Entwicklungsschritte notwendig. Des Weiteren besteht noch weiteres Optimierungspotential bei der simulationsgestützten Bereitstellung der Referenzdaten. Die zugrunde gelegte Vorgehensweise zur Modellierung, Berechnung und Auswertung ist bislang mit teils manuellen Arbeitsschritten verbunden. Hier ist eine vollautomatisierte Referenzdatenerzeugung anzustreben, sodass zukünftig eine einfache und schnelle Metamodellerweiterung ermöglicht wird.

A. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Falztypen an Karosseriebauteilen nach Eisele (2012, S. 39) 4

Abbildung 2.2: Tangentiale Spannungen beim Falzen aufgrund der Geometrie der Biegelinie (Birkert et al. 2013, S. 281) 7

Abbildung 2.3: Geometrische Parameter am Falzquerschnitt 8

Abbildung 2.4: Abhängigkeit des wahrgenommenen Sichtspalts a* von der Größe der Falzradien (Birkert et al. 2013, S. 64) 9

Abbildung 2.5: Fertigungsschritte beim Roll- und Backenfalzen von Karosseriebauteilen 10

Abbildung 2.6: Prinzipieller Prozessablauf zur Absicherung des Herstellungsprozesses Falzen in einem Fahrzeugprojekt 19

Abbildung 2.7: Fertigungsprozesskette für die Herstellung und den Verbau von Karosseriebauteilen 20

Abbildung 2.8: Einordnung der FE-Falzsimulation im Fahrzeugentwicklungsprozess und in der virtuellen Fertigungsprozesskette 22

Abbildung 3.1: Ansatz für eine metamodellbasierte Produkt- und Prozessabsicherung von gefalzten Karosseriebauteilen 26

Abbildung 4.1: Vergleich der Elementausrichtung am Falzflansch ohne und mit den Maßnahmen zur Netzanpassung 32

Abbildung 4.2: In der Simulation mit AutoForm® verwendete Fließkurven und Fließortkurven für den Werkstoff AA6014-T4 33

Abbildung 4.3: In der Simulation mit AutoForm® verwendete Fließkurven und Fließortkurven für den Werkstoff CR4 34

Abbildung 4.4: Versuchseinrichtung für die backenfalzspezifischen Validierungsmaßnahmen an einfach gestalteten Versuchsproben 35

Abbildung 4.5: Versuchseinrichtung für die rollfalzspezifischen Validierungsmaßnahmen an seriennahen Karosseriebauteilen 36

Abbildung 5.1: Schematische Prozessbeschreibung für die geometriebezogene Bauteilanalysemethodik 45

Abbildung 5.2: Vergleich verschiedener Karosseriebauteilkonturen am Beispiel einer Türbeplankung 46

Abbildung 5.3: Wiederkehrende und charakteristische Bauteilkonturen am Beispiel verschiedener Karosseriebauteile 47

Abbildung 5.4: Grundlegender Aufbau der geometrischen Grundformen 49

Abbildung 5.5: Grenzwerte zur Definition der Übergangswerte für die geometrischen Grundformen 51

Abbildung 5.6: Methodik zur Segmentierung, Parametrisierung, Klassifizierung und Geometriezuweisung.....53

Abbildung 5.7: Prozessablauf der geometriebezogenen Bauteilanalyse nach Kaiser et al. (2017) 54

Abbildung 5.8: Grundprinzip der Interpolationsrechnung auf Basis des isoparametrischen Konzepts am Beispiel eines 2-dimensionalen Elements.....57

Abbildung 5.9: Grundlegender Metamodellaufbau für die geometriebezogene Bauteilanalyse nach Kaiser et al. (2017).....58

Abbildung 5.10: Geometriestützpunkte und Elementdefinition in der Modellebene der geometrischen Grundformen 60

Abbildung 5.11: Häufigkeitsverteilung geometrischer Grundformen auf Basis der Analyse verschiedener Karosseriebauteile 61

Abbildung 5.12: Vorgehensweise zur Elementverfeinerung am Beispiel eines 2-Knotenelements mit linearem Interpolationsansatz.....62

Abbildung 5.13: Stützpunkte und Elementdefinition in der Modellebene des Falzflansches.....67

Abbildung 5.14: Modellstützpunktbasierter Aufbau der Referenzdatenbasis 70

Abbildung 5.15: Programmaufbau und Funktionsweise des Falzassistenzprogramms.....71

Abbildung 5.16: Beispiel zur Ermittlung einer geeigneten Falzzugabe für ein zu falzendes Karosseriebauteil 72

Abbildung 5.17: Beispiel zur Definition von Produktoptimierungsmaßnahmen nach erfolgter Bauteilanalyse 74

Abbildung 5.18: Grafische Benutzeroberfläche des Falzassistenzprogramms.....75

Abbildung 6.1: Übersicht des grundlegenden Prozessablaufs bei den definierten FE-Simulationsmodellen.....79

Abbildung 6.2: Modellvarianten für die Falzsimulation.....80

Abbildung 6.3: Versuchsaufbau für die experimentellen Backenfalzversuche 82

Abbildung 6.4: Resultierende Bauteilgestalt nach der Backenfalzsimulation der Prozessschritte Abkanten, Vorfalzen und Fertigfalzen.....83

Abbildung 6.5: Experimentelle und simulationsgestützte Ergebnisse hinsichtlich der resultierenden geometrischen Falzform 84

Abbildung 6.6: Experimentelle und simulationsgestützte Ergebnisse hinsichtlich der Tendenz zur Faltenbildung 85

Abbildung 6.7: Resultierende plastische Dehnungen aus konventioneller Simulation und numerischer Overkill-Lösung 87

Abbildung 6.8: Versuchsplan zur Bereitstellung der Referenzdaten auf Basis des definierten Metamodellaufbaus 89

Abbildung 6.9: Prozessablauf zur Durchführung der Simulationen für ein Simulationspaket 90

Abbildung 6.10: Auswerteverfahren für die automatische Ermittlung von falzspezifischen Simulationsergebnissen 92

Abbildung 6.11: Messkonvention für die Auswertung der geometrischen Maßhaltigkeit des Falzes 94

Abbildung 6.12: Vergleich der Auswertegrößen einer geraden, einer konvex und einer konkav gekrümmten geometrischen Grundform 95

Abbildung 6.13: Auswertung der abgekanteten Flanschlänge in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und der fertig gefalzten Flanschlänge 97

Abbildung 6.14: Auswertung des Falzverlusts in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und der fertig gefalzten Flanschlänge 98

Abbildung 6.15: Auswertung der Tendenz zur Faltenbildung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und der fertig gefalzten Flanschlänge 99

Abbildung 6.16: Auswertung der Dehnungen am Biegeradius in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und der fertig gefalzten Flanschlänge 100

Abbildung 6.17: Auswertung der Dehnungen am Falzflanschende in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und der fertig gefalzten Flanschlänge 101

Abbildung 6.18: Auswertung der resultierenden Bauteilmaßhaltigkeit beim Roll- und beim Backenfalzen 102

Abbildung 7.1: Vorgehensweise zur Verifizierung und Validierung der metamodellbasierten Bauteilanalysemethodik 106

Abbildung 7.2: Einflüsse unterschiedlicher Lagerungen bei der Messung der geometrischen Bauteilmaßhaltigkeit 107

Abbildung 7.3: Validierung der Prognosefähigkeit für die resultierende geometrische Falzform am Beispiel einer Motorhaube 109

Abbildung 7.4: Validierung der Prognosefähigkeit für die resultierende geometrische Falzform am Beispiel eines Heckdeckels 110

Abbildung 7.5: Validierung der Prognosefähigkeit für die Tendenz zur Faltenbildung am Beispiel einer Motorhaube 112

Abbildung 8.1: Eingliederung des metamodellbasierten Ansatzes in die Prozessabfolge zur simulationsgestützten Planung der Falzmethode in einem Fahrzeugprojekt 116

Abbildung 8.2: Gegenüberstellung von FE-Simulation und metamodellbasiertem Assistenzsystem hinsichtlich des Zeitbedarfs zur Durchführung einer Produktabsicherungsschleife.....117

Abbildung 8.3: Interaktion zwischen Produktentwicklung, digitaler Absicherung und Anlageninbetriebnahme 119

B. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Produkt- und prozessbezogene Absicherungsmaßnahmen bei der Falzmethodenerstellung 18

Tabelle 4.1: Übersicht der Modellparameter für das FE-Simulationsmodell in LS-DYNA® 34

Tabelle 5.1: Produktbezogene Einflussgrößen beim Falzen 41

Tabelle 5.2: Prozessbezogene Einflussgrößen beim Falzen 41

Tabelle 5.3: Einfluss von Produktparametern auf das Falzergebnis 43

Tabelle 5.4: Einfluss von Prozessparametern auf das Falzergebnis 44

Tabelle 5.5: Klassen der geometrischen Grundformen 50

Tabelle 5.6: Übersicht der Eingangsgrößen des Metamodells 55

Tabelle 5.7: Übersicht der Auswertegrößen des Metamodells 55

Tabelle 5.8: Definierte Hauptwertebereiche für die Modellebene der geometrischen Grundformen 64

Tabelle 5.9: Definierte Wertebereiche für die Modellebene des Falzflansches 68

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Effekte verschiedener Produkt- und Prozessparameter auf spezifische Auswertegrößen 104

C. Literaturverzeichnis

ARROYO, A. et al. (2010). „*Roller hemming: A new simulation model for the automotive industry*". In: *Proceedings of the 36th international Manufacturing Automation and Systems Technology, Applications, Design, Organisation and Management, and Research Conference*, MATADOR, ISBN 978-1-84996-431-9.

BEYER, R. et al. (2008). „*Spalt ist nicht gleich Spalt - über die Philosophie zur Realität*". In: *Inspect*, Heft 02/2008, S. 68-71.

BIRKERT, A., S. HAAGE und M. STRAUB (2013). *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile - Auslegung von Ziehanlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer, ISBN 978-3-642-34669-9.

BURCHITZ, I. et al. (2011). „*Efficient planning and numerical analysis of industrial hemming processes*". In: *Proceedings of the 8th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes*, NUMISHEET, S. 243-250.

CARSLEY, J. E. (2005). „*Microstructural evolution during bending: Conventional vs. roller hemming*". In: *6th global Innovations Proceedings - Trends in materials and manufacturing technologies for transportation industries and powder metallurgy research and development in the transportation industry*, S. 169-174.

CWIEKALA, T. (2011): „*Entwicklung einer Simulationsmethode zur zeiteffizienten Berechnung von Tiefziehprozessen*". Dissertation. Technische Universität Dortmund.

DENNINGER, R., M. LIEWALD und M. SINDEL (2012). „*Failure prediction in sheet metal forming depending in pre-straining and bending superposition*". In: *Key Engineering Materials Vols. 504-506*, Trans Tech Publications, S. 101-106.

DIN (2003). *DIN 8593-5 - Fertigungsverfahren Fügen - Teil 5: Fügen durch Umformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Berlin: Beuth.

DIN (2016). *DIN EN ISO 7438 - Metallische Werkstoffe - Biegeversuch*. Berlin: Beuth.

DROSSEL, W. G. et al. (2014). „*The influence of the robot's stiffness on roller hemming processes*". In: *Proceedings of the 45th international Symposium on Robotics and the 8th German Conference on Robotics*, ISR/ROBOTIK, S. 531-538, ISBN 978-3-8007-3601-0.

ECKERT, A. (2012). „*Prognose der Maßhaltigkeit punktförmig mechanisch gefügter Karosserieanbauteile*". Dissertation. Technische Universität Chemnitz.

EISELE, U., K. ROLL und M. LIEWALD (2010a). „*New approaches for validation of roller hemming process simulation*". In: *Proceedings of the International Deep Drawing Research Group Conference*, IDDRG, S. 851-860, DOI 10.3217/978-3-85125-108-1-091.

EISELE, U.; K. ROLL und M. LIEWALD (2010b). „*Development of an empirical model to determine results from FEA roller hemming processes*". In: *Tagungsband des 9. LS-DYNA Forums*.

EISELE, U. (2012). „*Ein Beitrag zur verbesserten Auslegung von Rollfalzprozessen*". Dissertation. Universität Stuttgart.

GOLOVASHCHENKO, S. F. (2005). „*Sharp flanging and flat hemming of aluminum exterior body panels*". In: *Journal of Materials Engineering and Performance Vol. 14*, S. 508-515.

HELD, C. et al. (2009). „*Untersuchungen zum Einfluss der Verfestigung von schergeschnittenen Kanten auf folgende Umformprozesse*". In: *UTFscience*, Ausgabe 2/2009. Bamberg: Meisenbach.

HELLWIG, W. und M. KOLBE (2012). *Spanlose Fertigung: Stanzen - Integrierte Fertigung komplexer Präzisions-Stanzteile*. 10. Auflage. Wiesbaden: Vieweg-Teubner, ISBN 978-3-8348-1802-7.

HITZ, R. (2012). „*Metamodellbasierte Methodenplanung von Umform- und Feinschneidprozessen*". Dissertation. ETH Zürich.

HÖNLE, S. und M. LIEWALD (2013a). „*Beitrag zur Bewertung der Biegebeanspruchungen beim Falzen von Aluminiumblechwerkstoffen*". In: *UTFscience*, Ausgabe 2/2013. Bamberg: Meisenbach.

HÖNLE, S. und M. LIEWALD (2013b). „*Erfassung und Bewertung von geometrischen Designmerkmalen*“. In: *MM Maschinenmarkt*, Heft 22/2013. Würzburg: Vogel Business Media.

HÖNLE, S. (2016). „*Methode zur Bewertung und Prognose der Anmutungsqualität und der Herstellbarkeit von Falzschlaufen an Karosserieanbauteilen aus Aluminium*“. Dissertation. Universität Stuttgart.

KÄSTLE, C. (2016). „*Simulationsmethode zur Beurteilung der Maßhaltigkeit von rollgefalzten Karosseriebaugruppen im Zusammenbau*”. Dissertation. Universität Stuttgart.

KAISER, C. et al. (2014). „*New approaches for hemming simulation to verify the manufacturing process of hang-on parts*”. In: *Proceedings of the 4th Advanced Metal Forming Processes in Automotive Industry Conference*, AutoMetForm.

KAISER, C. et al. (2015). „*New diagnostic techniques for an automated hemming validation of hang-on parts*“. In: *Key Engineering Materials Vol. 639*, Trans Tech Publications, S. 509-516.

KAISER, C., K. ROLL und W. VOLK (2017). „*Increasing the efficiency of designing hemming processes by using an element-based metamodel approach*”. In: *Journal of Physics: Conference Series 896*, DOI 10.1088/1742-6596/896/1/012041.

KLIMMEK, C. (2004). „*Statistisch unterstützte Methodenplanung für die Hochdruck-Blechumformung*“. Dissertation. Universität Dortmund.

KONRAD, T. et al. (2016). „*Robustness and sensitivity analysis of a virtual process chain using the s-rail specimen applying random fields*”. In: *Journal of Physics: Conference Series 734*, DOI 10.1088/1742-6596/734/3/032126.

LIEWALD, M., S. HÖNLE und M. SINDEL (2013). „*Untersuchung des Kraft- und Energiebedarfs beim Falzen von Aluminiumblechwerkstoffen*“. In *UTFscience*, Ausgabe 3/2013. Bamberg: Meisenbach.

LIEWALD, M., S. HÖNLE und M. SINDEL (2016). „*Surface roughening of an aluminum 6016 alloy during bending and hemming*“. In: *Int J Mater Form*, S. 203-213, DOI 10.1007/s12289-015-1223-1.

LIN, G. et al. (2007). „*A computational response surface study of three-dimensional aluminum hemming using solid-to-shell mapping*". In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering Vol. 129*, S. 360-368.

LIN, G., S. HU, S. J. und W. CAI (2009). „*Evaluation of formability in bending/hemming of aluminum alloys using plane-strain tensile tests*". In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering Vol. 131*, DOI 10.1115/1.3123316.

LIVATYALI, H. et al. (2000). „*Improvement of hem quality by optimizing flanging and prehemming operations using computer aided die design*". In: *Journal of Materials Processing Technology 98*, S. 41-52.

LIVATYALI, H., T. LAXHUBER und T. ALTAN (2004). „*Experimental investigation of forming defects in flat surface-convex edge hemming*". In: *Journal of Materials Processing Technology 146*, S. 20-27, DOI 10.1016/S0924-0136(03)00840-9.

MAOÛT, N. LE. et al. (2006). „*Numerical simulation of flat-surface roll hemming: Influence of geometry and material models*". In: *Proceedings of the International Deep Drawing Research Group Conference*, IDDRG.

MAOÛT, N. LE, S. THUILLIER und P. Y. MANACH (2010a). „*Classical and roll-hemming processes of pre-strained metallic sheets*". In: *Experimental Mechanics 50*, S. 1087-1097, DOI 10.1007/s11340-009-9297-7.

MAOÛT, N. LE, S. THUILLIER und P. Y. MANACH (2010b). „*Drawing, flanging and hemming of metallic thin sheets: A multi-step process*". In: *Materials and Design 31*, S. 2725-2736.

MAOÛT, N. LE, P. Y. MANACH und S. THUILLIER (2012). „*Influence of prestrain on the numerical simulation of the roller hemming process*". In: *Journal of Materials Processing Technology 212*, S. 450-457.

NEUGEBAUER, R. et al. (2014). „*Roller hemming simulation: State of the art and application limits*". In: *Key Engineering Materials Vols. 611-612*, Trans Tech Publications, S. 1062-1070.

OUESLATI, A. et al. (2010). „*Numerical simulation of two types of hemming processes*". In: *Proceedings of the International Deep Drawing Research Group Conference*, IDDRG, S. 839-849.

POELMEYER, J., M. BREME und M. WAHL (2015). „*Process chain simulation at Audi tool shop*". In: *Proceedings of the 5th International Conference on Accuracy in Forming Technology*, ICAFT, S. 377-383.

QUETTING, F., P. HORA und K. ROLL (2013a). „*Increasing the robustness of sheet metal forming processes using an intelligent planning and control system*". In: *Proceedings of the International Deep Drawing Research Group Conference*, IDDRG, S. 81-85.

QUETTING, F., P. HORA und K. ROLL (2013b). „*Increasing the robustness of deep drawing processes using a metamodel based planning and control system*". In: *Proceedings of the 6th Forming Technology Forum*, FTF.

RÖSSINGER, M. et al. (2015). „*Methoden zur effizienten Entwicklung von Falzanlagen: Von der Prozesssimulation bis zur Inbetriebnahme*". In: *Proceedings of the 5th International Conference on Accuracy in Forming Technology*, ICAFT, S. 385-402.

ROLL, K. (2007). „*Simulation der Blechumformung - neue Anforderungen und Tendenzen*". In: *Tagungsband des 12. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminars*.

ROLL, K. (2008). „*Simulation of sheet metal forming - necessary developments in the future*". In: *Tagungsband des 7. LS-DYNA Anwenderforums*.

ROLL, K. (2011). „*Simulation der Prozesskette Blechteilefertigung*". In: *Tagungsband des 20. Umformtechnischen Kolloquiums Hannover*, S. 213-220, ISBN 978-3-00-033656-0.

RUPP, G. et al. (2012). „*Anmutungsqualität von Karosseriebauteilen in Leichtbauweise - Herausforderungen und Lösungen*". In: *Proceedings of the 4th International Conference on Accuracy in Forming Technology*, ICAFT, S. 283-297.

SCHENK, O. und M. HILLMANN (2004). „*Optimal design of metal forming die surfaces with evolution strategies*". In: *Computers and Structures 82*, S. 1695-1705.

SCHLEICH, R., A. PAPAIOANU und M. LIEWALD (2007). „*Entwicklung eines fertigungsprozessnahen Prüfverfahrens zur Charakterisierung der Falzbarkeit von Karosseriefeinblechwerkstoffen*". In: *UTFscience*, Ausgabe 4/ 2007. Bamberg: Meisenbach.

SCHLEICH, R. (2010). „*Entwicklung eines Versagensmodells für Aluminiumlegierungen zur prädiktiven Bestimmung von lastabhängigen Versagensfällen in der Blechumformung*“. Dissertation. Universität Stuttgart.

SCHROEDER, M. (2007). „*Weitere Potenziale der Topologieoptimierung zur Rückfederungskompensation von Blechformteilen*“. In: *Tagungsband des 12. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminars*.

SIEBERTZ, K., D. VAN BEBBER und T. HOCHKIRCHEN (2010). *Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE)*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-05492-1.

SIGVANT, M. (2003). „*The hemming process - A numerical and experimental study*”. Dissertation. Chalmers University of Technology.

SIGVANT, M. und K. MATTIASSON (2005). „*FE-Simulation of hemming in the automotive industry*”. In: *Proceedings of the 6th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Process*, NUMISHEET, S. 675-680.

SPINDLER, J. et al. (2015). „*The Audi toolshop - Taking the next step into the digital dimension*”. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Accuracy in Forming Technology*, ICAFT, S. 15-31.

SVENSSON, M. und K. MATTIASSON (2000). „*Simulation of hemming of automotive body components with the explicit FE-method*”. In: *Proceedings of the European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, ECCOMAS.

SVENSSON, M. und K. MATTIASSON (2002). „*Three-dimensional simulation of hemming with the explicit FE-method*”. In: *Journal of Materials Processing Technology 128*, S. 142-154.

SWILLO, S. J. et al. (2005). „*Detection and characterization of surface cracking in sheet metal hemming using optical method*”. In: *Proceedings of the 30th North American Manufacturing Research Conference*.

THUILLIER, S., N. LE MAOÛT und P. Y. MANACH (2005). „*Numerical simulation of the hemming process in the case of Al alloys*”. In: *Proceedings of the 6th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Process*, NUMISHEET, S. 691-696.

THUILLIER, S. et al. (2008). „*Numerical simulation of the roll hemming process*". In: *Journal of Materials Processing Technology 198*, S. 226-233.

THUILLIER, S. (2014). „*Influence of a tensile pre-strain on bending of aluminium alloy*". In: *Key Engineering Materials Vols. 611-612*, Trans Tech Publications, S. 1742-1749.

VDA (2010). *VDA 238-100 - Plättchen-Biegeversuch für metallische Werkstoffe*, Berlin.

VDA (2016). *VDA 239-100 - Flacherzeugnisse aus Stahl zur Kaltumformung*, Berlin.

VOLK, W. und P. CHARVET (2009). „*Virtual engineering and planning process in sheet metal forming*". In: *Proceedings of the 7th European LS-DYNA Conference*.

VOLK, W. et al. (2012). „*Failure prediction for nonlinear strain paths in sheet metal forming*". In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology 61*, S. 259-262.

VOLK, W. et al. (2013). „*Phenomenological and numerical description of localized necking using genralized forming limit concept*". In: *Proceedings of the International Deep Drawing Research Group Conference*, IDDRG, S. 1-7.

WAGNER, S. (2012). „*Verfahren zur schnellen Erstellung und Bewertung von Konzeptmethoden für Blechbauteile*". Dissertation. ETH Zürich.

WALTL, H. et al. (2013). „*Reduced ramp-up time and robust process control in automotive manufacturing*". In: *Proceedings of the International Deep Drawing Research Group Conference*, IDDRG, S. 21-26, ISBN 978-3-906031-34-7.

ZHANG, G. et al. (2000). „*An experimental investigation of curved surface-straight edge hemming*". In: *Journal of Manufacturing Processes Vol. 2 / No. 4*, S. 241-246.

ZHANG, G., S. J. HU und X. WU (2003). „*Numerical analysis and optimization of hemming processes*". In: *Journal of Manufacturing Processes Vol. 5 / No. 1*, S. 87-96.

ZUBEIL, M., K. ROLL und M. MERKLEIN (2010). „*Untersuchung der Gefügeentwicklung beim Rollfalzen*". In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Metal Forming Processes in Automotive Industry*, AutoMetForm, S. 149-161.

ZUBEIL, M., K. ROLL und M. MERKLEIN (2011). „*Numerical and experimental study of loading conditions in the roller hemming process*". In: *Proceedings of the 10th International Conference on Technology of Plasticity*, ICTP, S. 624-628, ISBN 978-3-514-00784-0.

ZUBEIL, M., K. ROLL und M. MERKLEIN (2012). „*Extension of a failure criterion for hemming applications in the FEM simulation*". In: *Proceedings of the 15th Conference of the European Scientific Association on Material Forming*, ESAFORM, S. 765-770.

ZUBEIL, M. (2014). „*Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren*". Dissertation. Universität Erlangen-Nürnberg.

Dissertationen des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen, Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

01 *Felix Zimmermann*
Generierung von maßgeschneiderten Bauteileigenschaften in PHS-Bauteilen durch Anlassen mittels Flamme; 2014;
Urn: http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20141201-1229030-0-7

02 *Christopher Joseph Thoma*
Simulationsgestützte Optimierung der Maßhaltigkeit in der Prozesskette Druckguss; 2015; ISBN: 978-3-73699-009-8

03 *Joung Sik Suh*
Verbesserung der Kaltumformbarkeit von AZ31 Mg-Blech durch Equal Channel Angular Pressing (ECAP); 2015;
Urn: http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20151215-1271570-1-8

04 *Robert Ramakrishnan*
3-D-Drucken mit einem anorganischen Formstoffsystem; 2016;
Urn: http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20160129-1276474-1-5

05 *Patrick Saal*
Quantitative Phasenanalyse von ausferritischem Gusseisen mithilfe der Neutronendiffraktometrie; 2017;
Urn: http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20170125-1304161-1-8

06 *Peter Sachnik*
Methodik für gratfreie Schnittflächen beim Scherschneiden; 2017;
Urn: http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20160406-1304184-1-8

07 *Thomas Martin Kopp*
Einfluss der Werkzeugsteifigkeit auf Scherschneidprozess und Werkzeugverschleiß beim offenen Schnitt; 2017;
Urn: http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20170426-1327352-1-7

08 *Simon Josef Maier*
Inline-Qualitätsprüfung im Presswerk durch intelligente Nachfolgewerkzeuge; 2018; ISBN: 978-3-95884-004-1

09 *David Jocham*
Bestimmung der lokalen Einschnürung nach linearer und nichtlinearer Umformhistorie sowie Ermittlung dehnungs- und geschwindigkeitsabhängiger Materialkennwerte; 2018;
ISBN: 978-3-95884-012-6

10 *Christoph Kaiser*
Effiziente Produkt- und Prozessabsicherung für gefalzte Karosseriebauteile durch ein metamodellbasiertes Assistenzsystem; 2018; ISBN: 978-3-95884-018-8