

# BEITRÄGE ZUR UMFORMTECHNIK

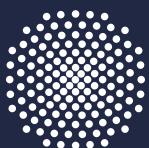


Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA  
Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart

Christian Kästle

# 80

Simulationsmethode zur Beurteilung der  
Maßhaltigkeit von rollgefalzten Karosserie-  
baugruppen im Zusammenbau



Universität Stuttgart



# Simulationsmethode zur Beurteilung der Maßhaltigkeit von rollgefalzten Karosseriebaugruppen im Zusammenbau

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von  
Christian Kästle  
aus Balingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA  
1. Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann (i.R.)  
2. Mitberichter: Hon.-Prof. Dr.-Ing. Karl Roll (i.R.)  
Tag der mündlichen Prüfung: 23. November 2016

Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart  
2016

Dipl.-Ing. Christian Kästle  
Institut für Umformtechnik  
Universität Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA  
Institut für Umformtechnik  
Universität Stuttgart

**D93**

**ISBN 978-3-946818-05-2**

**Institut für Umformtechnik**

Universität Stuttgart  
Holzgartenstraße 17  
70174 Stuttgart  
[www.ifu.uni-stuttgart.de](http://www.ifu.uni-stuttgart.de)

Printed in Germany

## Geleitwort des Herausgebers

Die langjährige Buchreihe „Beiträge zur Umformtechnik“ enthält Forschungsberichte oder abgeschlossene Dissertationen, die am Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart oder durch eine Zusammenarbeit zwischen dem Institut und einem Unternehmen entstanden sind bzw. um andersartige Abschlussberichte langjähriger Forschungsarbeiten.

**Umformen ist die gezielte Änderung der Form, der Oberfläche und der Eigenschaften eines metallischen Körpers unter Beibehaltung von Masse und Stoffzusammenhalt.**

Diese Definition für das Umformen metallischer Körper in Anlehnung an DIN 8580 beschreibt nicht nur die gezielte Änderung der Form, sondern auch die gezielte Änderung der Oberfläche und der Eigenschaften des Produktes durch den Umformvorgang. Die Technik des Umformens befasst sich daher mit einer möglichst guten Vorausbestimmbarkeit von finalen Produkteigenschaften, wobei die mathematische Beschreibung und die Modellbildung des Umformprozesses eine grundlegende Voraussetzung für die numerische Simulation mithilfe der Methode der Finiten Elemente (FEM) liefert.

Oftmals geht die intuitive, auf aktuellen Grundlagenkenntnissen basierende Forschung in der Umformtechnik zusammen mit einer experimentellen Herangehensweise an neue Fragestellungen einher. Die dabei erzielten Forschungsergebnisse dienen dem allgemeinen Wissenserwerb und dem Grundlagenverständnis von werkstofflichen und verfahrensspezifischen Phänomenen und sind somit nicht nur für Wissenschaftler, sondern auch für die in der Praxis stehenden Ingenieure von grundsätzlicher Bedeutung.

Stets kürzere Entwicklungszeiten für neue Produkte der Umformtechnik einerseits und veränderte Wertschöpfungsketten, die Dynamik von Märkten, neue Technologien sowie veränderte Randbedingungen, wie z. B. Leichtbaubestrebungen und Initiativen im Sinne von Industrie 4.0, erfordern heute eine besondere Intensivierung der anwendungstechnisch ausgerichteten Forschung und Entwicklung auf diesen Gebieten. Moderne Forschungsstellen sind in beide Prozesse eingebunden: zum einen in die Grundlagenforschung mit Blick auf Werkstoffe, Verfahren und Maschinen der Umformtechnik und zum anderen in vorwettbewerbliche bzw. stark anwendungsorientierte Prozesse der Lösungsfindung.

Ziel und Motivation für die Herausgabe dieser Berichte ist daher die Publikation solcher teils grundlagenorientierter, teils recht praxisorientierter Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die an meinem Institut entstehen. Ein weiteres Ziel dieser Buchreihe ist das Bereitstellen einer fundierten Basis für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten auf internationalem Niveau.

Mathias Liewald

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als angestellter Doktorand der Daimler AG im Bereich der digitalen Produktionsplanung im Werk Sindelfingen.

Herrn Univ.-Prof. Dr. Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald dem Direktor des Instituts für Umformtechnik danke ich für die Möglichkeit zur Promotion, das entgegengebrachte Vertrauen, die wertvollen fachlichen Diskussionen sowie die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Hon.-Prof. Dr.-Ing. Karl Roll für seine zahlreichen Ratschläge in fachlichen Diskussionen, seine wissenschaftliche Unterstützung und die Übernahme des Mitberichters.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann, Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, danke ich für die Durchsicht meiner Arbeit und die Übernahme des Mitberichters.

Weiterhin danke ich meinen Vorgesetzten während meiner Arbeit als Doktorand Herrn Rainer Eißrich und Herrn Dr.-Ing. Günter Wöhlke für die hervorragend geschaffenen Rahmenbedingungen und das entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Dr.-Ing. Johannes Eckstein, Herrn Dr.-Ing. Oliver Kurz und seinem Team danke ich besonders für die fachliche Unterstützung meiner Arbeit sowie die zahlreichen Diskussionen, die einen sehr wesentlichen Anteil an dieser Arbeit haben.

Meinen Kolleginnen und Kollegen während meiner Zeit als Doktorand möchte ich für die zahlreichen fachlichen, aber auch persönlichen Diskussionen und die Unterstützung danken. Besonderen Dank gebührt dabei, Herrn Klaus Wiegand, Herrn Andreas Brost, Herrn Christoph Kaiser, Herrn Tobias Kleeh, Herrn Florian Quetting, Herrn Dr.-Ing. Christian Bolay, Herrn Dr.-Ing. Martin Zubeil, Herrn Dr.-Ing. Michael Heyde, Herrn Dr.-Ing. Patrick Schäberle, Herrn Dr.-Ing. Urs Eisele, Herrn Martin Grünbaum, Herrn Dr.-Ing. Winfried Nester, Herrn Peter Lax, Frau Dr.-Ing. Alexandra Werber, Frau Verena Ritz und Herrn Julius Klinger. Außerdem danke ich all jenen, die mich während meiner Zeit als Doktorand von Seiten der Daimler AG als auch dem Institut für Umformtechnik unterstütz haben.

Einen ganz besonderen Dank gilt meinen Eltern, meiner Schwester Ines und meiner Freundin Silvia für ihre uneingeschränkte Unterstützung und Ihre grenzenlose Geduld. Ihnen widme ich diese Arbeit.

Stuttgart, November 2016

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verwendete Zeichen und Abkürzungen</b> .....	<b>IV</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>3</b>
2.1 Karosserietechnik .....	4
2.1.1 Bauweisen und Materialmix bei PKW-Karosserien .....	5
2.1.2 Gesamtprozess Karosseriebau .....	9
2.1.3 Pressteilherstellung .....	11
2.1.4 Fertigungsreihenfolge in der Karosserieproduktion .....	13
2.2 Verfahrenstechnische Grundlagen des Karosseriebaus .....	15
2.2.1 Umformtechnische Grundlagen bei der Pressteilherstellung.....	15
2.2.2 Fügeverfahren im Karosseriebau .....	18
2.2.3 Fügen durch Falzen.....	22
2.3 Qualitätskriterien für die Karosseriefertigung .....	29
2.3.1 Ausrichtstrategie und Maßbezugsystem von Pressteilen und Baugruppen .	31
2.3.2 Tolerierung von Pressteilen und Baugruppen.....	35
2.3.3 Messtechnik für die Qualitätsbeurteilung .....	38
2.4 Rückfederungsbedingte Form- und Maßabweichung an Bauteilen aus Blech .....	43
2.4.1 Rückfederung resultierend aus Membranspannungen.....	44
2.4.2 Rückfederung resultierend aus Biegespannungen .....	44
2.4.3 Einflussgrößen auf die Rückfederung aufgrund des Werkstoffverhaltens ..	45
2.5 Maßnahmen zur Maßhaltigkeitsoptimierung – Kompensation der Rückfederung ..	46
2.5.1 Maßnahmen am Pressteil .....	47
2.5.2 Maßnahmen an der Baugruppe .....	52
2.6 Simulation des Karosserieentstehungsprozesses.....	53
2.6.1 Grundlagen der Finite-Elemente-Methode in der Umformtechnik .....	55
2.6.2 Simulation des Tief- und Streckziehvorgangs .....	59
2.6.3 Simulation von Fügeprozessen .....	60
2.7 Zusammenfassung und Diskussion des Standes der Technik .....	61
<b>3 Motivation und Zielsetzung der Arbeit</b> .....	<b>63</b>
3.1 Vorliegende Erkenntnisse der Rückfederungsberechnung von Pressteilen im Zusammenbau .....	63
3.2 Motivation und wissenschaftliche Zielsetzung der Arbeit.....	64
3.3 Vorgehensweise .....	66

---

<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen .....</b>	<b>67</b>
4.1	Konstruktiver Aufbau der Baugruppe Motorhaube .....	67
4.2	Fertigungsprozesskette der Baugruppe Motorhaube.....	68
4.2.1	Presswerk – Fertigung der Pressteile .....	68
4.2.2	Rohbau - Fügen durch Clinchen, Kleben und Rollfalzen .....	69
4.2.3	Induktionsstation – Angelierien des Falzklebers .....	78
4.2.4	Rohbauofen, KTL-Trocknerdurchlauf und Lackierung.....	79
4.2.5	Montageapplikationen am Fahrzeug.....	80
4.3	Spann- und Fixierkonzept / Toleranzkonzept der Einzelteile und der Zusammenbaugruppe .....	82
4.3.1	Spann- und Fixierkonzept der Einzelteile.....	82
4.3.2	Spann- und Fixierkonzept der Baugruppen .....	83
4.4	Maßhaltigkeitshistorie entlang des Produktentstehungsprozesses vom Einzelteil bis zum lackierten Zusammenbau.....	85
4.4.1	Vermessungen der Einzelteile.....	86
4.4.2	Vermessung der gefügten Unterbaugruppe ZB-Innenteil.....	87
4.4.3	Vermessung der gefalzten Baugruppe ZB-Motorhaube .....	88
4.4.4	Vermessung nach der Induktionsstation ZB-Motorhaube .....	90
4.4.5	Vermessung nach Rohbau und KTL-Trockner.....	91
4.5	Einflussgrößen auf die Maßhaltigkeit der gefügten Baugruppe .....	92
4.5.1	Einfluss des Eigengewichts.....	92
4.5.2	Einfluss der Einzelteile auf die Baugruppe.....	94
<b>5</b>	<b>Modellentwicklung der FEM-Rückfederungsberechnung im Zusammenbau .....</b>	<b>97</b>
5.1	Problemmodellierung – Simulation entlang der Prozesskette .....	97
5.2	Anforderungen an die Simulationsmethodik .....	97
5.3	Allgemeine Simulationsparameter .....	100
5.3.1	Geometrische Diskretisierung und Materialverhalten .....	100
5.3.2	Zeitdiskretisierung .....	101
5.4	Aufbereitung der Ergebnisse aus der Umformsimulation.....	102
5.5	Fügen mehrerer Pressteile zu einer Unterbaugruppe .....	106
5.5.1	Prozessschritte für eine vereinfachte Clinch-Simulation.....	106
5.5.2	Simulationsparameter für die Berechnung des Fügevorgangs der Unterbaugruppe.....	107
5.5.3	Definition des Fügeersatzmodells.....	108
5.6	Falzprozesssimulation einer Baugruppe mit elastischem Innenteil .....	111
5.6.1	Prozessschritte der Falzsimulation.....	111
5.6.2	Beschreibung der Falzrollenbewegung.....	112
5.6.3	Parameterwahl für die Rollfalzsimulation mit einem elastischen ZB-Innenteil.....	114



---

5.7	Vereinfachungen in der Simulationsmethode .....	115
5.8	Prozessketten Karosseriebau - Zeitliche Einordnung im Produktentwicklungsprozess .....	116
<b>6</b>	<b>Validierung des Simulationsmodells .....</b>	<b>120</b>
6.1	Simulationskette Zusammenbau der Motorhaube .....	120
6.2	Geometrievarianten der Einzelteile .....	122
6.2.1	Geometrie der Einzelteile auf Basis der CAD-Daten („CAD-Null“) .....	122
6.2.2	Generierung der Einzelteilgeometrie aus der Umformsimulation .....	122
6.2.3	Generierung der Einzelteilgeometrie aus den optischen Oberflächenscans der Prototypenteile .....	125
6.3	Fügesimulation des ZB-Innenteils .....	129
6.4	Falzsimulation der ZB-Motorhaube .....	133
6.4.1	Rückfederungsergebnisse auf Basis der idealisierten „CAD-Null“-Geometrie (Variante 1) .....	136
6.4.2	Rückfederungsergebnis auf Basis der Umformsimulationsergebnissen (Variante 2) .....	138
6.4.3	Rückfederungsergebnis auf Basis der aufbereiteten Daten der optischen Messungen (Variante 3) .....	138
6.5	Genauigkeit der Rückfederungsberechnung der Baugruppe .....	139
6.6	Einfluss der Beplankung auf den Versatz am Umriss der Motorhaube .....	140
6.7	Übertragbarkeit des Ansatzes auf andere Baugruppen .....	142
<b>7</b>	<b>Einflussanalyse mit Hilfe der Simulationsmethodik .....</b>	<b>145</b>
7.1	Rückfederungsergebnisse der Einzelteile .....	146
7.2	Rückfederungsergebnis des gefalzten Zusammenbaus .....	148
7.2.1	Zusammenbau aus idealisierten Einzelteilen .....	149
7.2.2	Zusammenbau aus nicht maßhaltigen Einzelteilen .....	150
7.3	Abgeleitete Kompensationsmaßnahmen am Zusammenbau .....	153
7.4	Kompensationsstrategie mit Hilfe der durchgängigen Prozesssimulation .....	156
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>158</b>
8.1	Zusammenfassung .....	158
8.2	Ausblick .....	160
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>161</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>179</b>
	<b>Lebenslauf .....</b>	<b>186</b>

## Verwendete Zeichen und Abkürzungen

### *Lateinische Bezeichnungen*

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
$a_f$	Abstand Einfalzteil – Innenradius Falzteil	[mm]
$A_o$	oberes zulässiges Abmaß	[mm]
$A_u$	unteres zulässiges Abmaß	[mm]
$C$	chemisch	
$E$	Elastizitätsmodul	[N/mm <sup>2</sup> ]
$F$	Last	[N]
$F_{\text{Druck}}$	Druckkraft	[N]
$F_{\text{Zug}}$	Zugkraft	[N]
$G_o$	Ist-Höchstmaß	[mm]
$G_{\text{ü}}$	Ist-Mindestmaß	[mm]
$K$	kraftschlüssig	
$h_f$	Falzhöhe	[mm]
$l_f$	Falzlänge	[mm]
$l_{\text{ü}}$	Überlappungslänge	[mm]
$M_b$	Biegemoment	[Nm]
$M_r$	Rückfederungsmoment	[Nm]
$m$	Masse	[kg]
$N$	Gewichtskraft	[N]
$r_a$	Falzaußenradius	[mm]
$r_i$	Falzinnenradius	[mm]
$R_p$	Streckgrenze	[N/mm <sup>2</sup> ]
$r_{\text{ü}}$	Überlappungsinnenradius	[mm]
$S$	stoffschlüssig	
$s_o$	Blechdicke Falzteil	[mm]
$t_i$	Blechdicke Einfalzteil	[mm]
$x$	x-Achse (Abszisse)	
$y$	y-Achse (Ordinate)	
$z$	z-Achse (Senkrechte, Hochachse)	

**Griechische Bezeichnungen**

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
$\alpha_{ii}$	Übergangsneigung	[-]
$\varepsilon$	Dehnung	[-]
$\varepsilon_b$	Biegedehnung	[-]
$\varepsilon_{el}$	elastische Dehnung	[-]
$\varepsilon_{pl}$	plastische Dehnung	[-]
$\varepsilon_{res}$	resultierende Dehnung	[-]
$\sigma$	Spannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{biax}$	biaxiale Fließspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{Druck}$	Druckspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_b$	Biegespannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_n$	Normalspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_r$	Rückstellspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{res}$	Restspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_t$	Tangentialspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{Zug}$	Zugspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]

**Abkürzungen**

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
3-2-1-Regel	Ausrichtfolge
AF	AutoForm
CAD	Computer-Aided-Design - rechnergestütztes Konstruieren
CAE	Computer-Aided-Engineering, Rechner-Unterstützung von Arbeitsprozessen in der Entwicklung zur Validierung und Optimierung von Produkten, Prozessen und Herstellungsverfahren
Class-A	krümmungsstetige CAD-Flächenqualität
DMU	Digital-Mock-Up bezeichnet ein möglichst wirklichkeitsgetreues, computergeneriertes Versuchsmodell, das hauptsächlich verwendet wird, um die reale Produktprüfung durch Computersimulationen zu ersetzen
FEM	Finite-Elemente-Methode
FE-Solver	Finite-Elemente Gleichungslöser
GOM	Firmenname: Gesellschaft für optische Messtechnik

GUI	Graphical User Interface - grafische Benutzer-oberfläche / -schnittstelle
KDS	Konstruktionsdatensatz
KTL	kathodische Tauchlackierung
MAG	Metall-Aktivgasschweißen
MIG	Metall-Inertgasschweißen
OEM	Original Equipment Manufacturer
OP..	Operationsprozess / Umformoperation
REL	Radiuseinsatzlinie
RPS	Referenzpunktsystem
SPZ	Spannungszustand
STL	Standard Tessellation Language / Standardschnittstelle vieler CAD-Systeme
ZB	Zusammenbau

## Kurzfassung

Kürzere Produktentwicklungszeiten in der Automobilindustrie, steigende Derivatisierung der Fahrzeuge sowie die stets zunehmenden Kundenanforderungen hinsichtlich der Produktqualität haben in der Vergangenheit dazu geführt, dass Produktionsprozesse durch numerische Simulationen abgebildet werden. Durch die gestiegene Rechenleistung konnten Simulationsmethoden sowohl im Bereich der Produktoptimierung als auch zur Verbesserung von Produktionsprozessen angewendet und weiterentwickelt werden. Insbesondere im Karosseriebau sind in den vergangenen beiden Dekaden für die Einzelteilmontage im Presswerk und die Fügeprozesse im Rohbau sehr unterschiedliche Simulationsmethoden entstanden.

Für die Einzelteilmontage im Presswerk hat sich die Finite-Elemente-Umformsimulation als ein wesentlicher Bestandteil der Produktentwicklung etabliert. In einer frühen Konzeptphase der Produktentwicklung kann der Fertigungsprozess im Presswerk bereits durch die Umformsimulation abgebildet und die Herstellbarkeit des Pressteils hinsichtlich Riss- und Faltenbildung digital abgesichert werden. Neben einem riss- und faltenfreien Bauteil besitzt die Maßhaltigkeit des Pressteils eine besondere Bedeutung, die hauptsächlich durch die elastische Rückfederung der Blechwerkstoffe beeinflusst wird. Weiterentwicklungen der Umformsimulation haben dazu geführt, dass die elastische Rückfederung bei der Pressteilmontage durch die numerische Prozesssimulation abgebildet werden kann. Der kosten- und zeitintensive Aufbau von Prototypenwerkzeugen sowie Werkzeugänderungen zur Kompensation der Rückfederungseffekte konnten dadurch deutlich reduziert werden. Der Fokus der numerischen Simulationsmethoden der einzelnen Fügeprozesse des Rohbaus richtet sich derzeit jedoch nur bei der sogenannten Schweißverzugssimulation auf die Maßhaltigkeit des gefügten Zusammenbaus. In den meisten Fällen beschränkt sich die jeweilige Prozesssimulation meist auf die Fügeverbindung selbst. Eine durchgängige numerische simulative Abbildung der Fertigungsprozesse im Presswerk und dem anschließenden Rohbau zur Betrachtung der Maßhaltigkeit einer gefügten Baugruppe ist folglich heute noch nicht gegeben.

Um weitere Zeit-, Kosten- und Qualitätspotentiale bei der Produktentwicklung und dem Serienanlauf von Neufahrzeugen erschließen zu können, ist eine Verkettung der Umformsimulation der Einzelteile mit den Fugesimulationen daher von besonderer Bedeutung. Da Maßabweichungen der Karosserie vom Kunden am deutlichsten bei Klappen- und Anbauteilen wahrgenommen werden, wird im Rahmen dieser Arbeit der Produktentstehungsprozess im Presswerk und Rohbau am Beispiel einer Motorhaube näher untersucht. Fokussiert werden dabei die Maßhaltigkeit der Einzelteile sowie die des daraus resultierenden Zusammenbaus.

Im ersten Teil der Arbeit wird zunächst der Fertigungsprozess einer PKW-Motorhaube im Presswerk und Rohbau beschrieben und die umgeformten Pressteile und die daraus gefügten Zusammenbauten zunächst messtechnisch erfasst. Die ermittelte Fertigungsmesskette nach jedem Prozessschritt stellt sicher, dass die Maßabweichungen der Pressteile bzw. Zusammenbauten, die entlang der Prozesskette entstehen, ihrer Ursache zugeordnet werden können. Die Auswertung der Messberichte zeigt, dass die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus im Wesentlichen durch die Maßhaltigkeit einzelner Pressteile, der jeweiligen Füge-technik sowie der Gewichtskraft bzw. Steifigkeit der Konstruktion beeinflusst wird.

Die Übertragung der realen Fertigungsprozesse auf einzelne Simulationsschritte erfolgt im zweiten Teil der Arbeit. Wesentliche Bausteine sind zum einen die Datenaufbereitung für die Pressteile aus den Umformsimulationsergebnissen und zum anderen die Definition einzelner Simulationsschritte, wie beispielsweise das Einlegen, Spannen und Fügen der Pressteile. Dazu werden Methoden entwickelt, wie aus den vorliegenden CAD-Daten Eingangsgrößen für die einzelnen Prozesssimulationsschritte, beispielsweise in Form von Randbedingungen, abgeleitet werden können. Die eingesetzten Füge-techniken sind Füge-technologien wie das Clinchen und das Rollfalzen. Die entsprechende Simulationsmethodik wurde dabei in bereits bestehende Bausteine aus der Umformsimulation und der Falzsimulation integriert.

Anschließend erfolgt der Simulationsabgleich für die Motorhaube anhand der ermittelten Messungen. Die Simulationsergebnisse zeigen, trotz einiger Vereinfachungen durch die beschriebene Simulationsmethodik, relativ gute Übereinstimmungen mit den realen Messergebnissen. Der Anwender dieser Simulationsmethodik, kann daher den Fertigungsprozess im Presswerk und im Rohbau ganzheitlich betrachten und Einflussgrößen aus den Fertigungsprozessen sowie die Auswirkungen der Einzelteilmaßhaltigkeit auf den gefügten Zusammenbau können somit digital abgebildet werden. Daraus lassen sich, wie am Ende dieser Arbeit erläutert, beispielsweise zunächst diejenigen Pressteile des Zusammenbaus ermitteln, die für die Maßhaltigkeit der gefügten Komponente den größten Einfluss aufweisen. Anschließend kann durch Maßnahmen in Form von Rückfederungskompensationen oder gezielten Überbiegungen einzelner Pressteile die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus verbessert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte somit eine Simulationsmethode entwickelt werden, die auf Basis heutiger Umformsimulationen das Fügen der Pressteile im Rohbau insbesondere durch Rollfalzen mit einbezieht und folglich die Maßhaltigkeit eines Zusammenbaus berechnet werden kann. Durch den wissenschaftlichen Beitrag zur Maßhaltigkeitsverbesserung mit Hilfe dieser durchgängigen Prozesssimulation können somit in der frühen Phase der Produktentwicklung Produktionsprozesse im Presswerk und Rohbau ganzheitlich betrachtet werden.

## Abstract

Shorter product development times, increased number of derivatives and ever-growing customer demands for product quality have led to the use, and further development of numerical simulation methods. These simulation methods are used not only in the field of product optimization, but also for the improvement of production processes, by increasing computing capacity. In car body manufacturing in particular, a range of very different simulation methods have been developed over the last two decades for the manufacturing of individual parts in the press shop and for joining processes applied to the car body shell.

For the manufacturing of individual parts in the press shop, finite element forming simulation has established itself as a key element in product development. At an early stage in product development, the production process in the press shop can be made visible through forming simulation and the manufacturability of the pressed part is digitally safeguarded in terms of splitting and wrinkling. In addition to a failure free component, the dimensional accuracy of the pressed part has a special significance which is mainly influenced by the elastic springback of the sheet material. Further developments in forming simulation enable the elastic springback in press part manufacturing to be displayed by numerical process simulation. The costly and time-consuming process to build prototype tools and to incorporate tool changes to compensate for the springback effects could therefore be significantly reduced. However, the focus of the numerical simulation methods of the individual joining processes for the car body is currently aimed only at the so-called welding distortion simulation affecting the dimensional accuracy of the assembly. In most cases, the respective process simulation of today is limited to the joint connection point itself. A consistent numerical simulative illustration of the entire production process in the press shop with the subsequent car body, in order to simulate the dimensional accuracy of a joined assembly, is therefore not available.

To achieve the greatest benefit in product development and the ramp up of series production, regarding time, cost and quality, the integration of the forming simulation of individual parts with the joining simulations is of particular importance. Since dimensional deviations of car body components can be perceived most clearly by customers on doors and other closures, this thesis pays particular attention to the product development process in the press shop and body shop using the example of a hood assembly. Focus is placed on the dimensional accuracy of the individual components as well as on the resulting assembled part.

The first part of the thesis describes the production process in the press shop and the shell construction of the hood. At first, the geometry of the pressed components and assembled parts are metrologically recorded. After each process step, the determined production measurement

chain ensures that the deviations of stampings and assemblies that arise along the process chain can be traced back to their cause. The evaluation of the measurement reports shows that the dimensional accuracy of the assembly is primarily influenced by the dimensional accuracy of the individual stampings, the respective joining technology and the weight and rigidity of the structure of assembly consisting of inner and outer skin part respectively.

The transfer of the production processes into individual simulation steps is addressed in the second part of the thesis. Data preparation for the stampings from the forming simulation results as well as the definition of individual simulation steps, such as the insertion, clamping and joining of the pressed parts, are essential elements. Methods will be developed, as to how input variables for each process simulation step can be derived from existing CAD data, for example, in terms of constraints. The two selected joining techniques used are joining by clinching and by roller hemming. The corresponding simulation method has been integrated into already existing forming simulation and the roller hemming simulation codes.

Verification of simulation for the hood, using the determined measurements, is then conducted. Despite some simplifications caused by the simulation methodology described, the simulation results match the actual measuring results very well. The user of this simulation methodology can therefore holistically “observe” the manufacturing process in the press shop and in the body shop. Thus, the determining factors from the manufacturing processes and the effects of the dimensional accuracy of components on the joined assembly can be displayed digitally. As explained at the end of this thesis, the simulation can be applied, for example, to first identify those single components which have the greatest influence on the dimensional accuracy of the assembly. The dimensional accuracy of the assembly then can be improved by measures of springback compensations or the targeted overcrowning of individual stampings.

Within the framework of this thesis, a new method for the simulation of the press shop and body shop manufacturing processes has been developed. It allows for the calculation of the dimensional stability of the joined assembly, based on current forming simulations of pressed parts distortions, resulting from joining processes, such as roller hemming. Through the scientific contribution of simulating the dimensional accuracy of the part to be assembled and by using consistent process simulation, the production processes for doors and other closures of new car designs can thus be viewed already in the early stage of product development. The simulation of dimensional accuracy is therefore no longer limited to single components and the production process in the press shop. The simulation method helps to reduce time- and cost-intensive prototypes, used to ensure the production processes. In addition, a higher dimensional accuracy for the assembled part can be achieved during the ramp up of series production.



# 1 Einleitung

Der Trend zur Individualisierung, verbunden mit der Erschließung neuer Märkte, hat in der Automobilindustrie zu einer starken Derivatisierung der PKW-Modelle geführt. Zusätzlich versuchen insbesondere Premiumhersteller sich den preisumkämpften traditionellen Märkten durch neue Marktsegmente, mit höherer Kundenattraktivität und neuen Nischenprodukten, zu entziehen. Um sich in dieser Produktvielfalt zu differenzieren und der stets steigenden Erwartungshaltung der Kunden gerecht zu werden, spielt heute neben dem Design auch die Qualität des Fahrzeuges eine ganz entscheidende Rolle. Für die Wertanmutung und die Differenzierung von Fahrzeugen wird dabei maßgeblich deren Karosserie wahrgenommen.

Neben den steigenden Qualitätsansprüchen und der Produktdiversifikation kommt die Verkürzung von Produktlebenszyklen hinzu, getrieben durch Innovationen zur Steigerung der Produktattraktivität, wodurch die Komplexität in der Entwicklung und Produktion der Fahrzeuge zusätzlich gesteigert wird.

Um dieser Komplexität gerecht zu werden, werden zum einen Ansätze standardisierter Produktarchitekturen und Produktionskonzepte gewählt und zum anderen wird bei der Produktentwicklung sowie der Produktionsplanung die Verwendung digitaler Methoden zur Produkt- und Produktionsprozessabsicherung vorangetrieben.

Mit Hilfe dieser digitalen Produkt- und Produktionsprozessabsicherung können zum einen Produktions- und Produktstandards in der frühen Entwicklungsphase digital untersucht werden und zum anderen lässt sich die der Serienproduktion vorgelagerte, kosten- und zeitintensive Prototypenphase reduzieren. Im Bereich des Karosseriebaus mit den wesentlichen drei Produktionsbereichen Presswerk, Rohbau und Lackierung hat sich in der vergangenen Dekade im Bereich der Pressteilherstellung die Umformsimulation etabliert. Der Fokus dieser numerischen Prozesssimulation auf Basis der Finite-Elemente-Methode liegt dabei auf der Bewertung der Herstellbarkeit der Pressteile unter Berücksichtigung von deren Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität. Die Maßhaltigkeit des Pressteils wird im Wesentlichen durch das elastische Materialverhalten des Blechwerkstoffes und der daraus resultierenden Rückfederung beeinflusst. Entwicklungen in der Vergangenheit haben dazu geführt, dass die elastische Rückfederung bei der Pressteilherstellung numerisch durch die Umformsimulation erfasst und diese Rechenergebnisse für die Optimierung der Presswerkzeuge genutzt werden können. Variationsrechnungen unterstützen dabei die Prozessplanung zusätzlich, besonders bei der Festlegung der sogenannten Rückfederungskompensationsmaßnahmen. Mit den derzeitigen Simulationsmethoden kann jedoch ausschließlich die Maßhaltigkeit des rückgefederten Pressteils berechnet werden. Digitale Simulationsmethoden, die derzeit im Karosseriebau zur Anwendung gelangen, wie beispielsweise Robotics Ablaufsimulationen oder Untersuchungen einzelner Fügeverfahren, haben bislang einen anderen Betrachtungsschwerpunkt. Für den Produktionsbereich der Lackierung hingegen stehen heute sehr moderne Simulationsmethoden zur

Verfügung, die die Betrachtung der Maßhaltigkeit einzelner Unterbaugruppen oder auch der gesamten Karosserie unter dem Einfluss der thermischen Prozesse ermöglichen.

Die digitale Prozesskette zur Maßhaltigkeitsbetrachtung ist folglich im Karosseriebau unterbrochen, was insbesondere für die Qualitätsoptimierung eines Zusammenbaus aus mehreren Einzelteilen nachteilig ist. Die genannten Rückfederungskompensationsmaßnahmen der Presserteile werden folglich nur auf Basis der jeweiligen Umformsimulation definiert. Auswirkungen auf die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus, die sich beispielsweise aus den Zusammenhängen der Maßhaltigkeit der Einzelteile bzw. den Fügeprozessen in der Karosseriefertigung ergeben können, werden bei diesen Kompensationsmaßnahmen nicht berücksichtigt. Auf Maßabweichungen des Zusammenbaus, die sich aus diesen Zusammenhängen ergeben können, kann derzeit erst in einer späten Phase der Produktentwicklung, in der Regel nach dem ersten realen Fahrzeugaufbau, reagiert werden. In dieser Phase führt dies jedoch, insbesondere bei den Presswerkzeugen, zu hohen Änderungskosten.

Lassen sich die Fertigungsprozesse im Karosseriebau digital abbilden, sodass die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus aus mehreren Einzelteilen prognostiziert werden kann, so könnte dabei die Produktentwicklung beschleunigt und Einsparpotenziale ausgeschöpft werden. Beispielsweise könnten Rückfederungskompensationen auf Basis des Zusammenbaus frühzeitig definiert und somit geometrische Werkzeugänderungen vermieden oder Toleranzen gezielt angepasst werden, um möglichst rasch zu einem hohen Qualitätsstand des Zusammenbaus zu gelangen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zunächst die gängigen Fertigungsprozesse im Karosseriebau und die diesbezüglich vorhandenen Prozesssimulationen aufzeigt. Aus den heute bestehenden Lücken in der digitalen Produktionskette werden Handlungsfelder abgeleitet, um daraus eine Methode zur simulativen Absicherung der Maßhaltigkeit von Pressteilen im Zusammenbau anzustreben. Fokussiert werden dabei Klappen- und Anbauteile, da sie den höchsten Anforderungen der Maßhaltigkeit und der Oberflächenqualität einer Karosserie genügen müssen. Schwerpunkt bildet die praxisnahe numerische Modellierung der damit verbundenen Fertigungsprozesse, beginnend bei der Einzelteilerfertigung im Presswerk bis hin zu den punktuellen Fügeverbindungen und dem Rollfalzprozess im Karosseriebau, die mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode bewerkstelligt werden. Ziel dieser Arbeit ist folglich, den Fertigungsprozess, bestehend aus der Einzelteilerfertigung im Presswerk und dem Zusammenbau im Rohbau vollständig digital abzubilden, um daraus Stellhebel für die Verbesserung der Maßhaltigkeit des Zusammenbaus ableiten zu können. Dadurch können beispielsweise Rückfederungskompensationsstrategien untersucht werden, bei denen durch eine gezielte Formänderung eines Einzelteils die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus verbessert wird. Des Weiteren kann die erarbeitete Simulationenmethodik bei der Definition der Pressteiltoleranzen dazu verwendet werden, Toleranzen, deren Umsetzung für die fertigungstechnische Maßhaltigkeit des Zusammenbaus wirtschaftlich sinnvoll ist, festzulegen.

## 2 Stand der Technik

Dieses Kapitel stellt den Stand der Erkenntnisse sowie die thematisch angrenzenden Gebiete dar, welche von grundlegender Bedeutung für das Verständnis der vorliegenden Arbeit sind.

Im Kapitel 2.1 werden die unterschiedlichen Bauweisen einer Fahrzeugkarosserie beschrieben, dies beinhaltet den Grundaufbau der Karosserie sowie die heutzutage in der Karosserietechnik verwendeten Materialien. Gerade in den vergangenen Dekaden hat die Komplexität im Aufbau der Karosserie, insbesondere durch Leichtbaubemühungen und die steigende Anzahl an Derivaten, deutlich zugenommen. Dies bedingt für die Produktion der Karosserie wiederum eine Vielzahl an unterschiedlichen Fertigungsverfahren, die derzeit in modernen Produktionssystemen der Automobilhersteller im Einsatz sind.

Die Beschreibung der einzelnen Fertigungsverfahren entlang der Produktionsschritte von der Einzelteilherstellung bis hin zur fertig gefügten Gesamtkarosserie erfolgt im zweiten Abschnitt dieses Kapitels. Fokussiert werden dabei die Verfahren der Einzelteilherstellung durch Karosserieziehen im Presswerk sowie der Fügeprozess, insbesondere der des Falzens im sogenannten Rohbau.

Des Weiteren wird auf die Qualitätsanforderungen einer Fahrzeugkarosserie eingegangen. Von besonderer Bedeutung ist die Maßhaltigkeit sowohl der Einzelteile als auch einzelner Baugruppen der Karosserie. Dabei werden die messtechnischen Möglichkeiten zur Bestimmung der Maßhaltigkeit sowie das zugrunde liegende Spann- und Fixierkonzept näher erläutert.

Die anschließenden Abschnitte dieses Kapitels widmen sich zum einen den Ursachen sowie Zusammenhängen von Maßabweichungen durch die elastische Rückfederung und zum anderen werden Möglichkeiten zur Maßhaltigkeitsoptimierung im Karosseriebau, der sogenannten Rückfederungskompensation, untersucht.

Im letzten Abschnitt werden die Simulationsmethoden und Anwendungen dargestellt, die heutzutage einen wesentlichen Bestandteil der Produkt- und Prozessentwicklung im Bereich des Engineerings der Karosserietechnik bilden. Für die beiden Verfahren „Karosserieziehen in der Pressteilherstellung“ und „Falzen im Karosseriebau“ stellt die Finite-Elemente-Methode ein modernes und leistungsfähiges Werkzeug dar. Auf die theoretischen Grundlagen dieser Methode wird hinsichtlich der umformtechnischen Prozesse ebenfalls näher eingegangen.

Auf Grundlage des aktuellen Forschungsstandes bezüglich einer durchgängig digitalen Produktionsabsicherung der Prozesskette im Karosseriebau vom Einzelteil bis hin zur fertig lackierten Karosserie werden Handlungsfelder in der Form eines wissenschaftlichen Defizites abgeleitet.

## 2.1 Karosserietechnik

Bis auf einzelne Ausnahmen sind die meisten derzeitigen PKW-Karosserien aus Blechformteilen hergestellt. Die Herstellung bzw. eingesetzte Produktionstechnik wird durch die wesentlichen Faktoren: Kosten, Gewicht und Qualität beeinflusst. Der Gewichtsanteil der lackierten Rohkarosse kann je nach verwendeten Materialien (Aluminium- oder Stahlbauweise) 15 bis 35 % des Gesamtgewichts des Fahrzeugs betragen. Abhängig von der Komplexität und Bauweise kann eine Karosserie aus 200-500 Einzelteilen bestehen [Ada95]. Eine Karosserie in Rahmenstrukturbauweise besteht beispielsweise aus einer geringeren Teileanzahl als eine Karosserie in Schalenbauweise. Ein Trend zur Reduktion der Teileanzahl ist jedoch nicht erkennbar, da mit sinkender Teileanzahl die geometrische Komplexität der Einzelteile steigt, was wiederum höhere Herstellkosten für diese Einzelteile verursacht. Da die Einzelteile laut [Bir13] zwei Drittel der Gesamtkosten der Karosserie verursachen und nur das verbleibende Drittel auf den Zusammenbau entfällt, sei eine Reduktion der Teileanzahl, insbesondere bei Baureihen mit hoher Stückzahl, über den Produktlebenszyklus nicht zielführend.

Der Gesamtkarosserie kommt, neben vergleichsweise neueren Entwicklungen wie zum Beispiel Infotainment, Assistenzsysteme oder alternativen Antrieben, noch immer eine hohe Bedeutung zu, da sie wie keine andere Komponente des Fahrzeuges das Gesamtdesign des Fahrzeuges prägt [Hei14]. Die Ansprüche an eine Gesamtkarosserie resultieren zum einen aus den Ansprüchen der Kunden und zum anderen aus jenen der Gesetzgeber und können regional sehr unterschiedlich ausfallen (vgl. Abbildung 1). Vor allem Sicherheit und Anmutung stellen die entscheidenden Faktoren dar, um sich im Premiumsegment von den Mitwettbewerbern zu unterscheiden [Wal09].

Für eine wirtschaftliche Produktion der Karosserie ist eine spezielle Frage von besonderer Bedeutung: Wie müssen die Anforderungen an die Gesamtkarosserie auf die jeweiligen Einzelteile übertragen werden, ohne Zugeständnisse hinsichtlich Funktionalität und Qualität des Gesamtprodukts machen zu müssen? Nur eine ganzheitliche Prozessbetrachtung vom Einzelteil bis hin zur fertigen Karosserie kann eine Antwort auf diese Frage liefern.

Am deutlichsten unterscheiden sich funktionale Anforderungen an die Karosserie beim Vergleich von Außenhautteilen und Strukturteilen. Als Außenhautteile lassen sich alle Teile der Karosserie bezeichnen, die am fertigen Fahrzeug wahrgenommen werden. Strukturteile sind nicht sichtbar und dienen dem strukturellen Aufbau der Karosserie. Da die Außenhautteile die Qualitätsmerkmale sowie die Identifikation der Fahrzeugmarke maßgeblich bestimmen, unterliegen sie den allerhöchsten Qualitätsansprüchen hinsichtlich der Oberflächenqualität (sprich Class-A-Oberflächenqualität) [Bon09]. Bei der Bewertung der Pressteilqualität wird deshalb die Oberflächenqualität gegenüber der Toleranzeinhaltung als vorrangig erachtet [Bra13]. Bei Strukturteilen, in der Praxis auch als Innenteile bezeichnet, steht hingegen die Toleranzeinhaltung im Vordergrund, zumal diese auch deutlich enger toleriert sind, da sie als maßbestimmend für den Zusammenbau in der Karosseriefertigung angesehen werden.

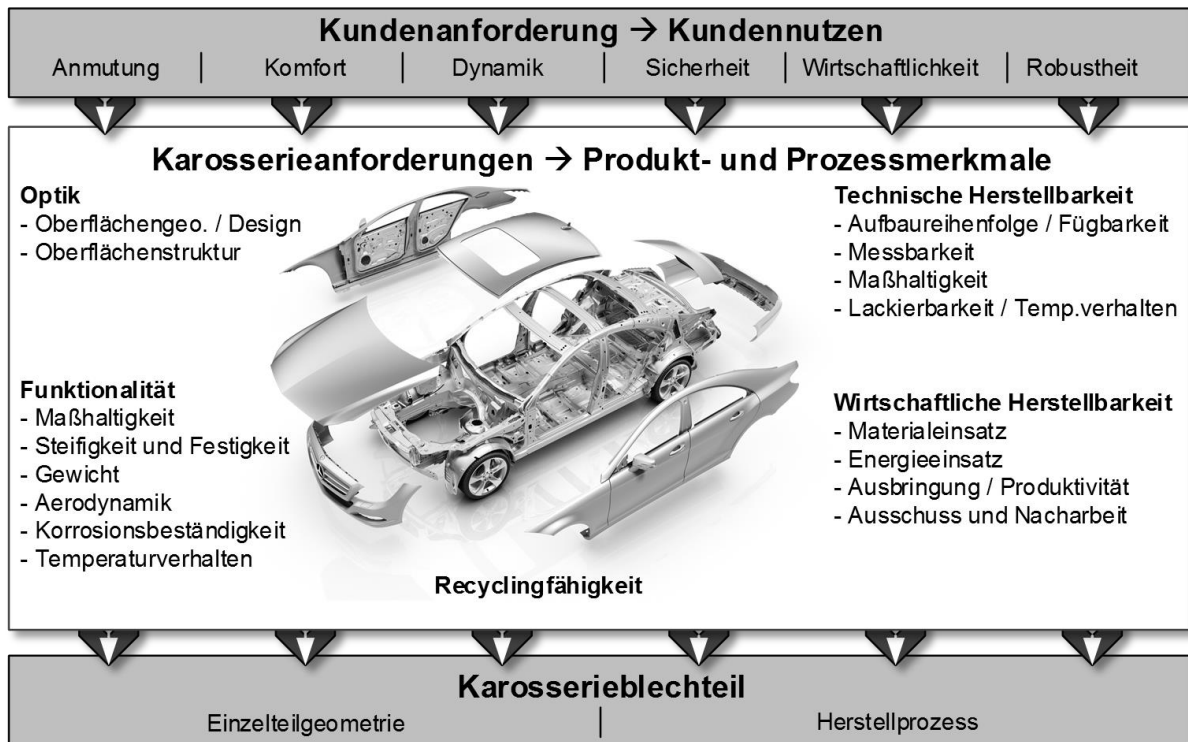


Abbildung 1: Anforderungen an die Gesamtkarosserie und an die Karosserieblechteile [Bir13]

### 2.1.1 Bauweisen und Materialmix bei PKW-Karosserien

Im Wesentlichen werden bei PKW-Karosserien zwei Grundaufbauten unterschieden. Das sind zum einen die Rahmenstrukturbauweise (Space-Frame) und zum anderen der Aufbau in Schalenbauweise. Mischformen aus beiden Varianten werden als struktureller Mischbau bezeichnet [Kle07]. Häufig können sich auch einzelne Baugruppen der Karosserie in ihrem Aufbau in Schalen- oder alternativer Rahmenstrukturbauweise unterscheiden (vgl. Abbildung 2).

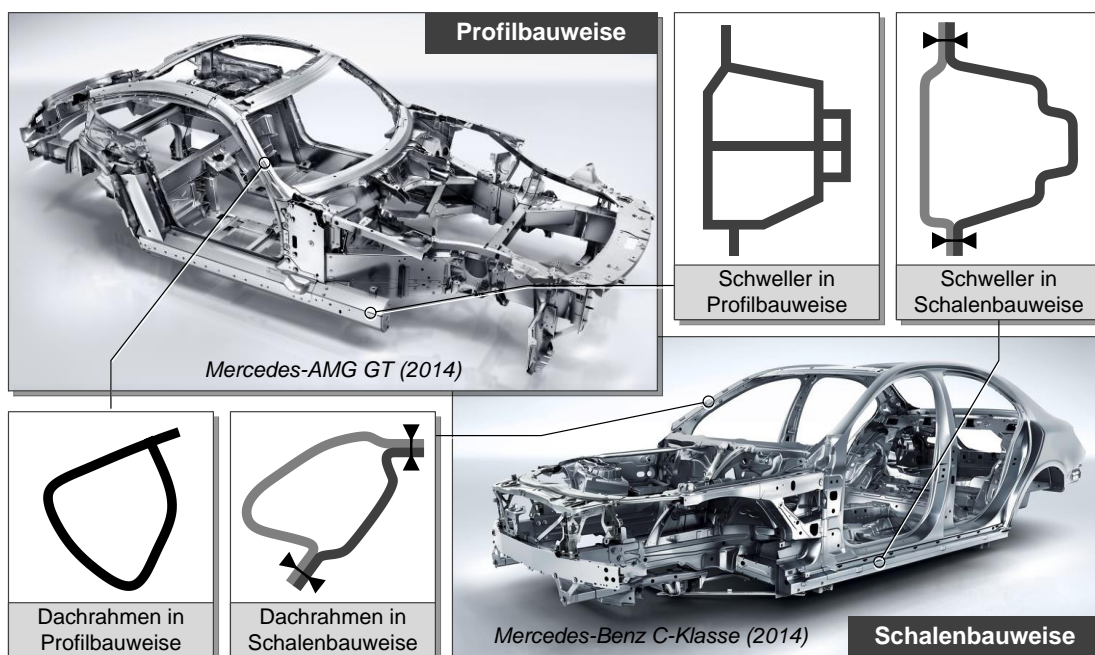


Abbildung 2: Vergleich der Profil- und Schalenbauweisen im Karosseriebau (Bilder von [Dai15])

Bei der Rahmenstrukturbauweise wird die tragende Struktur der Karosserie, welche für ihre Steifigkeit und Festigkeit maßgeblich ist, im Wesentlichen aus profilmförmigen Komponenten aufgebaut. Meist kommen dabei Aluminium-Strangpressprofile mit Hohlprofilquerschnitten und innenliegenden Stegen zum Einsatz. Die einzelnen Profile werden über „Knotenelemente“ aus Druckguss oder Blech miteinander verbunden. Durch diese Baukonzepte kann die Teileanzahl deutlich reduziert werden, was insbesondere bei geringeren Stückzahlen durch geringere Werkzeugkosten Vorteile bietet. Der Materialkosteneinsatz liegt jedoch deutlich höher als bei einer herkömmlichen Stahl-Schalenbauweise. Außerdem erfordert die Mischbauweise aus Halbzeugen oder aus Materialien unterschiedliche, meist aufwändigerer Fügeverfahren.

Bei der Schalenbauweise werden im Wesentlichen umformtechnisch hergestellte Blechteile durch die entsprechenden Fügetechniken zu einer tragenden Gesamtstruktur verbunden. Hohlprofilquerschnitte, welche unter Berücksichtigung von Leichtbauaspekten für die Biege- und Torsionssteifigkeit sowie für die Energieabsorption im Crashfall maßgeblich sind, werden bei der Schalenbauweise durch das Fügen von zwei oder mehreren Blechschalen erzeugt.

Neben ihrem strukturellen bzw. konstruktiven Aufbau lassen sich PKW-Karosserien auch im Hinblick auf die verwendeten Materialien einteilen, wobei sich der strukturelle Aufbau und die verwendeten Werkstoffe gegenseitig bedingen (Aluminium eignet sich zum Strangpressen, folglich kommt es in der Rahmenbauweise zur Anwendung). Neben den am häufigsten eingesetzten Stahlwerkstoffen kommen vermehrt unterschiedliche Aluminiumlegierungen sowie vereinzelt Magnesiumlegierungen oder kohlefaserverstärkter Kunststoff zum Einsatz. Diese Entwicklung wurde unter dem Aspekt des Karosserieleichtbaus vorangetrieben und wird in Anbetracht der angestrebten CO<sub>2</sub>-Reduktion und der Umstellung auf alternative Antriebe auch zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen.

### ***Verwendete Werkstoffe im Karosseriebau***

Im Folgenden wird kurz auf die heute im modernen PKW-Karosseriebau verwendeten Kohlenstoffstähle und Aluminiumlegierungen eingegangen.

Stahlfeibleche im Dickenbereich zwischen 0,3 und 2 mm sind im Karosseriebau aufgrund ihrer guten Umformbarkeit, Fügbarkeit und ihrer mechanischen Eigenschaften sowie den vergleichsweise geringen Kosten dominierend. Die Einteilung moderner Feibleche erfolgt meist auf Basis chemischer oder mechanischer Eigenschaften, der Gefügeausbildung, dem Festigungsverhalten sowie der Verarbeitung und Anwendung. Je nach Anforderung an das Karosserieteil werden möglichst geeignete Stahlwerkstoffe verwendet. Für Außenhautbauteile mit hohen Ziehtiefen werden beispielsweise Tiefziehstähle (DC04-DC06) wegen ihrer guten Umformbarkeit verwendet. Bei Bauteilen mit geringer Ziehtiefe hingegen kommen Bake-Härtungs-Stähle zum Einsatz, da diese nach dem Lacktrocknungsprozess eine höhere Streckgrenze besitzen und somit bei geringerem Auszug dennoch eine hohe Beulfestigkeit aufweisen [Bar08].

Hinsichtlich der Struktur einer Karosserie dominieren hingegen die Anforderungen aus Crash- und Steifigkeitsauslegung, d. h. zum einen für Bauteile, die im Crash viel Energie über deren Verformung aufnehmen sollen und zum anderen Bauteile mit einem möglichst hohen Widerstand gegen Verformung unter Crash-Belastung. Die Erfüllung dieser Anforderungen wird meist durch die Verwendung des entsprechenden Werkstoffs gewährleistet. Daher steht bei der Konzeption dieser Bauteile die Herstellbarkeit des Bauteils aus dem entsprechenden Werkstoff im Vordergrund. Als Beispiele für eine hohe Energieabsorption im Crashfall können die Längsträger vorne und hinten genannt werden. Im Bereich nahe der Insassen (A-Säule, B-Säule oder Seitenaufprallschutz) wird durch die Verwendung hoch- und höchstfester Materialien eine möglichst geringe Verformung zugelassen [Fri08]. Die hohen Festigkeiten werden dabei durch Phaseinlagerungen im Gefüge erreicht. Bei den Dualphasen-Stählen (DP-Stähle) erfolgt dies durch die Einlagerung von Martensit mit einem Gefügeanteil von 5 bis 20 % in die duktile ferritische Matrix. Bei den herkömmlichen TRIP-Stählen (Transformation Induced Plasticity) besteht das Mikrogefüge neben der duktilen ferritischen Matrix aus inselförmig eingelagerten harten Bainitphasen und metastabilem Restaustenit, der sich bei der Umformung in hochfesten Martensit umwandelt. Den wesentlichen Vorteil der TRIP-Stähle stellt somit die gute Dehnbarkeit bei gleichzeitig gezielter Verfestigung durch die plastische Verformung dar [Röt05]. Nachteilig ist jedoch die undefinierte Verteilung der Festigkeit im Bauteil, was wiederum zu einem besonders komplexen Rückfederungsverhalten führen kann.

Im Vergleich zu den DP-Stählen besitzen die Complex-Phasen-Stähle eine extrem feine Mikrostruktur aus Ferrit, Bainit und Martensit, wodurch sich bei ähnlicher Zugfestigkeit weit- aus höhere Streckgrenzen ergeben (somit auch in nur gering umgeformten Bauteilzonen). Complex-Phasen-Stähle wurden speziell für das Rollprofilieren und Biegen bzw. Kanten entwickelt. Eine weitere Steigerung der Festigkeit besitzen die sogenannten Martensit-Phasen-Stähle (Mehrphasenstahl mit überwiegendem Martensit-Anteil). Dieser Werkstoff eignet sich insbesondere für Bauteile mit ausgeprägter Crashrelevanz (Seitenaufprall- und Stoßfängerquerträger), denn er lässt sich aufgrund der im Vergleich zu CP-Stählen geringeren Gleichmaß- und Bruchdehnung schwieriger umformen.

Struktur- und Sicherheitsbauteile der Karosserie mit komplexeren Geometrien werden derzeit häufig aus Mangan-Bor-Stählen gefertigt. Die sogenannten presshärtenden Stähle können durch eine Austenitisierung und die schnelle Abkühlung im Umformwerkzeug Festigkeiten von bis zu 1.900 MPa erreichen. Typische Anwendungen sind beispielsweise Seitenaufprallträger, Verstärkungen (Säulen, Boden u. Tunnel) und Querträger (Stirnwand u. Dach).

In aktuellen Entwicklungsprojekten werden moderne Stahlsorten zur Serienreife gebracht, die einen hohen Gehalt an preisgünstigen Legierungselementen wie Mangan, Aluminium und Silizium aufweisen [Grä00] (HSD<sup>®</sup>-Stähle High (Strength and Ductility) oder Hoch-Mangan-Stahl [Klö13]). Wesentliches Merkmal ist dabei die höhere Festigkeit bei gleichzeitig höherer Duktilität trotz einer reduzierten Dichte (5 %) im Vergleich zu konventionellen Stählen. Bei einem Mangangehalt von ca. 15 % erfolgt die Festigkeitssteigerung ebenfalls durch den sogenannten

TRIP-Effekt, jedoch ermöglichen die Legierungselemente zwei martensitische Umwandlungen – zunächst vom Austenit zum hexagonalen Martensit und im zweiten Schritt von der hexagonalen Struktur zum kubisch raumzentrierten Martensit. Gegenüber den herkömmlichen TRIP-Stählen besitzen HSD<sup>®</sup>-Stähle folglich Dehnungsreserven und lassen sich dadurch im Crashfall weiter verformen, bevor sie versagen. Bei einem Mangengehalt um die 25 % können Bruchdehnungen von bis zu 50 % erzielt werden. Die hohen Dehnungen werden durch den sogenannten TWIP-Effekt (Twinning Induced Plasticity) ermöglicht; unter Belastung klappt dabei die Kristallstruktur an einem Stapelfehler um, und es kommt zu einer durch Zwillingsbildung induzierten Plastizität. Insbesondere für Komponenten der Karosserie mit hohem Energieabsorptionsvermögen (insbesondere bei hohen Dehnraten) sind solche Legierungen heute von besonderer Bedeutung.

Um im Karosseriebau weitere Leichtbaupotenziale nutzen zu können, wird häufig auf den Werkstoff Aluminium zurückgegriffen [Müc08]. Je nach Baureihe kann der Aluminiumanteil der Karosserie im Verhältnis zu den Stahlblechpressteilen unterschiedlich hoch sein. Bei crash-relevanten Strukturteilen der Karosserie wird jedoch auch bei einer sogenannten Vollaluminiumkarosserie nicht auf hoch- und höchstfeste Verstärkungsteile aus Stahlblech verzichtet. Sehr häufig werden gesamte Baugruppen, die beispielsweise lösbar mit der Karosserie verbunden sind (Türen und Klappen), aus Aluminiumkomponenten gefertigt, um zum einen das Gesamtgewicht der Karosserie zu senken und zum anderen verschiedene Problematiken eines Werkstoff-Mischbaus im Hinblick auf die komplexere Fügetechnik und dem damit verbundenen Korrosionsschutz möglichst gering zu halten. Teilweise werden einzelne Blechteile (beispielsweise Dächer) mit geringen Anforderungen an die Gesamtsteifigkeit der Karosserie durch Aluminiumbauteile substituiert. Wenn in der Struktur der Karosserie der Werkstoff Aluminium Verwendung findet, so ist dies bislang meist nur in Form von Strangpressprofilen und Druckgussbauteilen erfolgt. Die Anforderung an Steifigkeit und Festigkeit der Fahrzeugstruktur wird dann über die geometrische Form des Strangpressprofils und nicht über die Eigenschaften des Werkstoffs erfüllt. Bei den Druckgussteilen stehen, wie bereits erwähnt, vielmehr die Funktionsintegration sowie die Substitution mehrerer Bauteile durch ein Druckgussteil und die damit verbundenen produktionswirtschaftlichen Vorteile im Vordergrund.

Kommen Blechteile aus dem Werkstoff Aluminium zum Einsatz, so handelt es sich meist um 5.000er oder 6.000er Legierungen. Die naturharten 5.000er Legierungen kommen überwiegend wegen ihres relativ guten Umformvermögens bei Strukturteilen zum Einsatz (Innenteile von Klappen) [Bar05]. Aufgrund der Fließfigurenbildung finden sie im Bereich der Außenhaut jedoch keine Verwendung. Derzeit sehr häufig eingesetzte 5.000er Legierungen sind AA5182, AA5022, AA5023 und AA5754. 6.000er Legierungen (AlMgSi) kommen vorzugsweise bei Außenhautteilen zum Einsatz, da sie fließfigurenfrei sind und durch entsprechende Wärmebehandlung und Zusätze, wie beispielsweise bei dem Werkstoff Ac170PX, gute Falzeigenschaften aufweisen [Blö01]. „Ac“ steht dabei für „Anticorodal“ und wurde von Novelis als Marke eingeführt. Die Kennzeichnung „PX“ soll ein besseres Aushärteverhalten der Legierung beim



Lackeinbrennen gewährleisten. Im Karosseriebau häufig eingesetzte 6.000er Aluminiumlegierungen sind beispielsweise AA6014 (Ac170), AA6016 (Ac118), AA6181A, AA6022 und AA6111. Tabelle 1 gibt einen Überblick ausgewählter 6.000er Aluminiumlegierungen und deren mechanischen Eigenschaften im lösungsgeglühten und kaltausgelagerten Zustand (T4). Aufgrund der geforderten Steifigkeit und Beulfestigkeit entspricht die Blechdicke bei Aluminiumblechteilen trotz der relativ hohen Festigkeiten nach dem Umformen von  $> 200 \text{ N/mm}^2$  etwa dem 1,45-fachen Wert einer vergleichbaren Stahlblechdicke. Dennoch lassen sich durch die Verwendung von Aluminiumblechen insbesondere bei Innenteilen Gewichtseinsparungen gegenüber Stahlausführungen von knapp 50% realisieren. Wesentlicher Nachteil der Aluminiumlegierungen ist der geringere E-Modul von 70.000 MPa im Vergleich zu Stahlblechen und die daraus resultierende höhere Rückfederung der Pressteile (vgl. Kapitel 2.4.3).

Legierungsbezeichnung EN AW bzw. AA	min. $R_m$ [MPa]	min. $R_{p0,2}$ [MPa]	$A_5$ [%]	$A_g$ [%]	Anwendungsbereich
6014-T4 (Ac170)	140	70	25	22	Struktur- & Außenteile
6501-T4	135	70	25	22	Fußgängerschutz
6016-T4 (Ac118)	210	100	26	22	Innen- & Außenteile
6022-T4	257	148	26	22	Innen- & Außenteile
6111-T4	275	160	28	n. b.	Karosserieaußenteile
6181A-T4	235	125	25	22	Karosserieaußenteile

**Tabelle 1:** Mechanische Eigenschaften ausgewählter Werkstoffe der 6.000er Aluminiumlegierung für Karosserieteile [DIN755]

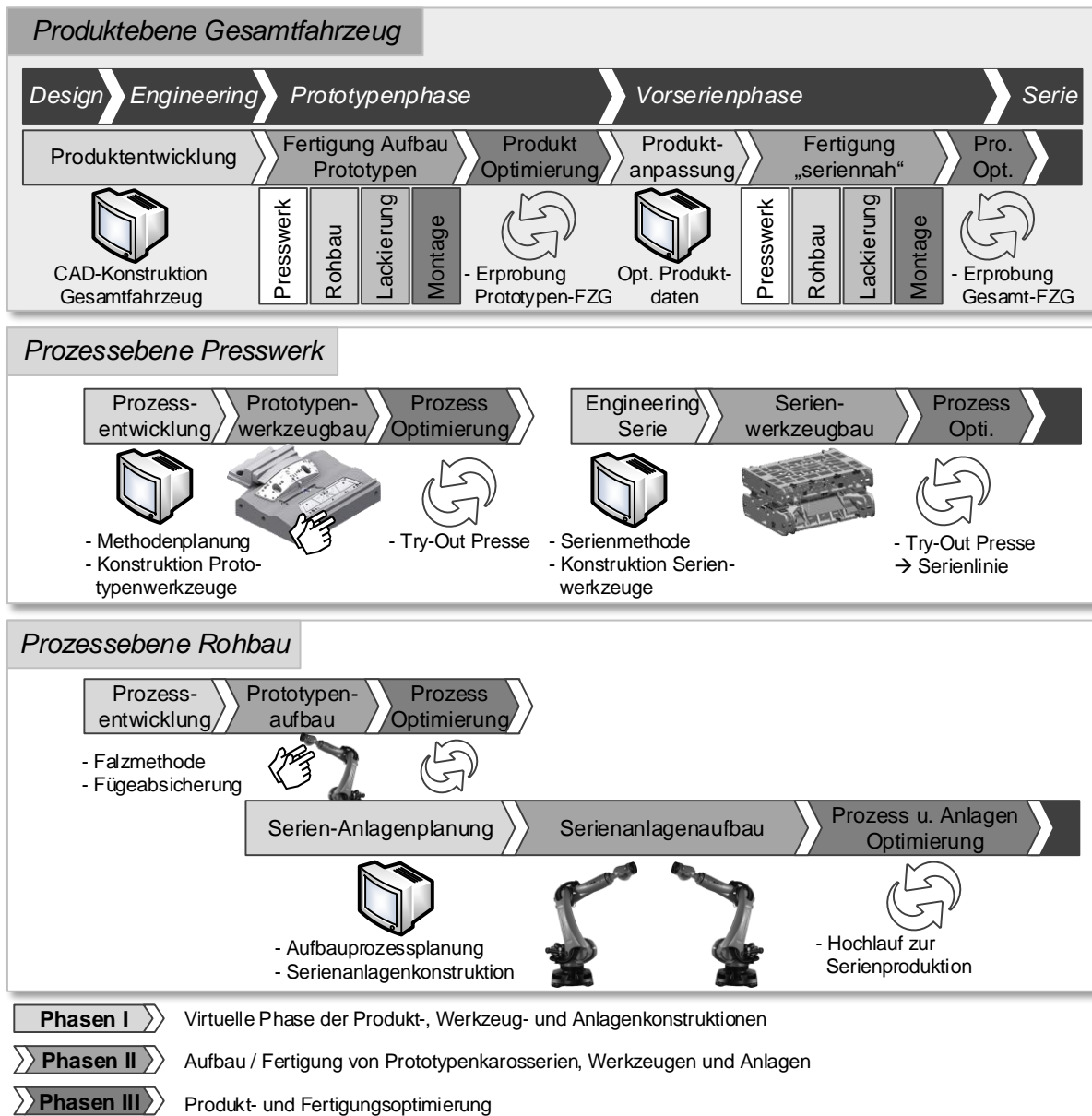
## 2.1.2 Gesamtprozess Karosseriebau

Der Produktentstehungsprozess der Karosserie lässt sich, ausgehend vom Design bis hin zur unter Serienbedingungen fertig lackierten und maßhaltig optimierten Karosserie, in drei wesentliche Phasen einteilen [Hei14] (vgl. Abbildung 3). Beginnend mit der virtuellen Produktentstehung, welche das Design, die Entwicklung und Konstruktion sowie die digitale Absicherungen beinhaltet, werden CAD-Daten des zu fertigenden Produktes generiert (Phase I).

Der Produktentwicklungsprozess wird heutzutage von einer Vielzahl unterschiedlicher Simulationsmethoden begleitet. Dieser hohe Berechnungseinsatz dient dazu, dass der sogenannte Reifegrad des Produkts hinsichtlich der Fertigung bereits in der frühen Entwicklungsphase erhöht wird und die Anforderungen an die Karosserie für den späteren Gebrauch im Vorfeld digital abgesichert werden. Auf die einzelnen Simulationsmethoden zur Berechnung der einzelnen Produktionsprozesse im Karosseriebau wird in Kapitel 2.6 näher eingegangen.

Auf Grundlage der im virtuellen Produktentstehungsprozess erstellten CAD-Daten werden in der Fertigung (Phase II) die entsprechenden Werkzeuge für den späteren Serienbetrieb im Presswerk und die Anlagen für den Rohbau konzipiert und konstruiert. Im Presswerk werden

die Einzelteile produziert, die anschließend im Rohbau zur fertigen Karosserie zusammengefügt, in der Oberflächenbehandlung lackiert und final an die Montage übergeben werden. Aufgrund der hohen typspezifischen Investitionen werden in einer vorgelagerten Phase im Zeitraum von 3 - 3,5 Jahre vor dem eigentlichen Produktionsstart der Hauptserie mit Hilfe von Prototypenwerkzeugen und seriennahen Anlagen Rohbauprototypenfahrzeuge mit einem sehr geringen Automatisierungsgrad aufgebaut. Diese Prototypenfahrzeuge dienen sowohl der Absicherung der späteren Serienproduktion aus Sicht der Fertigung als auch der Absicherung für den späteren Gebrauch bzw. Einsatz der Fahrzeuge (Gesamtfahrzeugerprobung, Crash-Test, Steifigkeitsanalysen etc.). Je nach Fahrzeugtyp, ob Grundmodell oder Derivat, können Dauer und Umfang dieser Prototypenphase mehr oder weniger stark ausgeprägt sein.



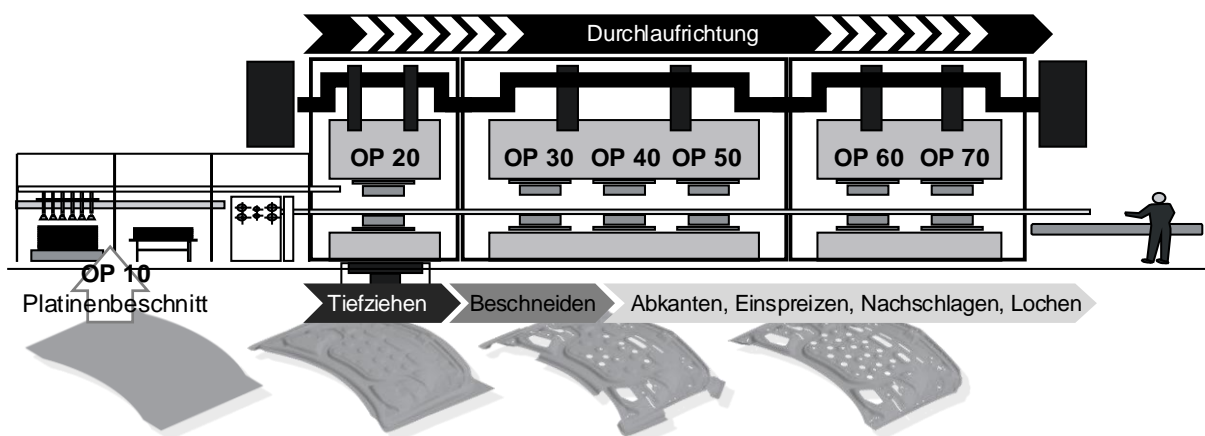
**Abbildung 3:** Karosserieentstehungsprozess vom Design bis zur ersten Serienkarosserie

Nach dem ersten produzierten Einzelteil bzw. dem im Anschluss daran aufgebauten Fahrzeug schließt sich sowohl in der Prototypenphase als auch dem späteren Serienhochlauf mit Serienwerkzeugen und –anlagen die Phase III der Optimierung an. Diese Phase beinhaltet dabei sowohl die Produkt- als auch die Prozessoptimierung. Bei der Produktoptimierung stehen Qualitätsthemen, wie beispielsweise die Verbesserung der Maßhaltigkeit im Vordergrund, bei der Prozessoptimierung werden ungeplante Stillstandzeiten der Anlagen reduziert. Ziel dieser Optimierungen ist ein robuster Serienfertigungsprozess mit einer möglichst geringen Ausschussquote und einer hohen Verfügbarkeit der Werkzeuge und Anlagen in der Produktion.

Werden die Produktionsbereiche Presswerk und Rohbau einzeln betrachtet, so lassen sich auch hier jeweils drei Phasen definieren, die der Serienproduktion zeitlich vorgelagert sind. Der Schwerpunkt liegt dabei jedoch auf der Konstruktion, dem Aufbau und der Optimierung der Werkzeuge und Anlagen, die zur Herstellung der Einzelteile, bzw. dem Zusammenbau bis hin zur fertigen Karosserie, benötigt werden. Für die Presswerkzeuge und die Rohbauanlagen erfolgen die virtuelle Auslegung der Werkzeuge und Anlagen, dann die physische Fertigung und die anschließende Optimierung durch den Betriebsmittel- und Anlagenbau. Sind die Presswerkzeuge und Anlagen für eine robuste Fertigung optimiert, können diese für den Serienbetrieb an das Presswerk bzw. den Rohbau übergeben werden.

### 2.1.3 Pressteilherstellung

Bei der Einzelteilerzeugung im Presswerk werden aus einem ebenen Blech (Platine) in einer sogenannten Operationsfolge komplexe Pressteile hergestellt. Ausgehend vom Coil werden zunächst die Platinen auf einer Platinenschneidanlage oder direkt vom Coil in der ersten Pressstufe erzeugt. In der nachfolgenden Formoperation (OP20) wird als erster Schritt die Bauteilform tiefgezogen (auf das Verfahren des Tiefziehens wird näher in Kapitel 2.2.1 eingegangen), bevor im Anschluss daran in den sogenannten Folgeoperationen (OP30-OP60) der Bauteilbeschnitt und eventuell diverse Nachformoperationen (beispielsweise Abkantungen, Nachformen von Hinterschnittbereichen) folgen. In Abbildung 4 ist eine solche Operationsfolge beispielhaft für ein Motorhauben-Innenteil dargestellt.



**Abbildung 4:** Pressteilfertigung in einer Pressenstraße; Operationsfolge von der Platine bis zum Pressteil für das Bauteil Motorhaube innen

Die Fertigung der Pressteile erfolgt je nach Größe und Komplexität der Bauteile auf unterschiedlichen Pressentypen. Durch einen Werkzeugwechsel lassen sich so auf einer Pressenstraße unterschiedliche Teile eines bestimmten Bauteilspektrums produzieren. Die Umformpressen unterscheiden sich dabei im Wesentlichen nach der Art ihres Antriebs, nach dem Wirkprinzip (einfach- / doppelt wirkend), der Anzahl der Stößel, der Hubzahl sowie nach ihrer Mechanisierung für den Teiletransport zwischen den einzelnen Operationen. Auf die unterschiedlichen Bauformen und Transferarten soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

### ***Der Werkzeugherstellungsprozess***

Basis für die Werkzeugherstellung ist der sogenannte Methodenplan. Dieser definiert die Operationsfolge für den Fertigungsprozess vom ebenen Blech bis hin zum fertigen Pressteil. Der Fokus bei der Erstellung des Methodenplans liegt dabei auf der prozesssicheren Herstellbarkeit der Bauteile unter Serienbedingungen und unter Berücksichtigung der geforderten Toleranzen. Grundlagen bilden dabei die Erfahrung des Methodenplaners sowie Finite-Elemente-Simulationstools (vgl. Kapitel 2.6.2).

Trotz Anwendung unterschiedlichster CAE-Tools im Engineering von Fahrzeugkarosserien werden ca. zwei bis zweieinhalb Jahre vor Konstruktionsbeginn der Serienwerkzeuge sehr häufig Prototypenwerkzeuge aufgebaut. Diese dienen zum einen der Verifizierung und dem Abgleich der im CAE-Prozess gewonnenen Berechnungsergebnisse und zum anderen dem Aufbau von Prototypenfahrzeugen für Gesamtfahrzeugtests. Der Umfang dieser Prototypenwerkzeuge ist im Vergleich zu den Serienwerkzeugen deutlich geringer, da auf Beschnittwerkzeuge verzichtet wird und zahlreiche andere Vereinfachungen getroffen werden. In dieser Phase kommt ein Laserbeschnitt der 3D-Kontur der Blechbauteile zum Einsatz. Folgeoperationen, wie beispielsweise Abkant- und Nachformoperationen, werden entweder durch stark vereinfachte Werkzeuge oder durch manuelle Nacharbeit abgebildet.

Die Maßhaltigkeit der Pressteile wird weitestgehend durch das elastische Materialverhalten beeinflusst. Die Teile „springen“ nach dem Öffnen der Werkzeuge mehr oder wenig stark zurück. Neben der Bestimmung der geometriespezifischen Rückfederung fließen weitere Erkenntnisse hinsichtlich der Herstellbarkeit der Pressteile aus den Prototypenwerkzeugen in die spätere Konstruktion der Serienwerkzeuge ein. Je nach Entwicklungsstand und Umfang der Prototypenphase wird das Prototypenwerkzeug dabei u. U. mehrmals überfräst. Jede Überarbeitung der Werkzeuge bietet wiederum die Möglichkeit, alternative Rückfederungskompensationsmaßnahmen einzubringen, bevor mit der Konstruktion und dem Aufbau der Serienwerkzeuge begonnen wird.

Die komplexeren Serienwerkzeuge werden nach der mechanischen Bearbeitung und ihrem Aufbau zunächst in sogenannten Try-Out Maschinen eingearbeitet. Im Fokus stehen das Erreichen einer möglichst hohen Pressteilqualität und das Einarbeiten von Maßnahmen zur Sicherstellung einer späteren störungsfreien Serienproduktion. Mit sehr hohen Kosten und zeitlichem

Aufwand sind dabei Maßkorrekturen der Form verbunden, da nach dem Überfräsen der Werkzeuge diese wieder neu eingearbeitet und tuschiert werden müssen. Von besonderer Bedeutung ist deshalb die korrekte Analyse der Abweichung zwischen CAD-Datensatz und produziertem Pressteil. Grundvoraussetzungen hierfür sind nach [Bir13]:

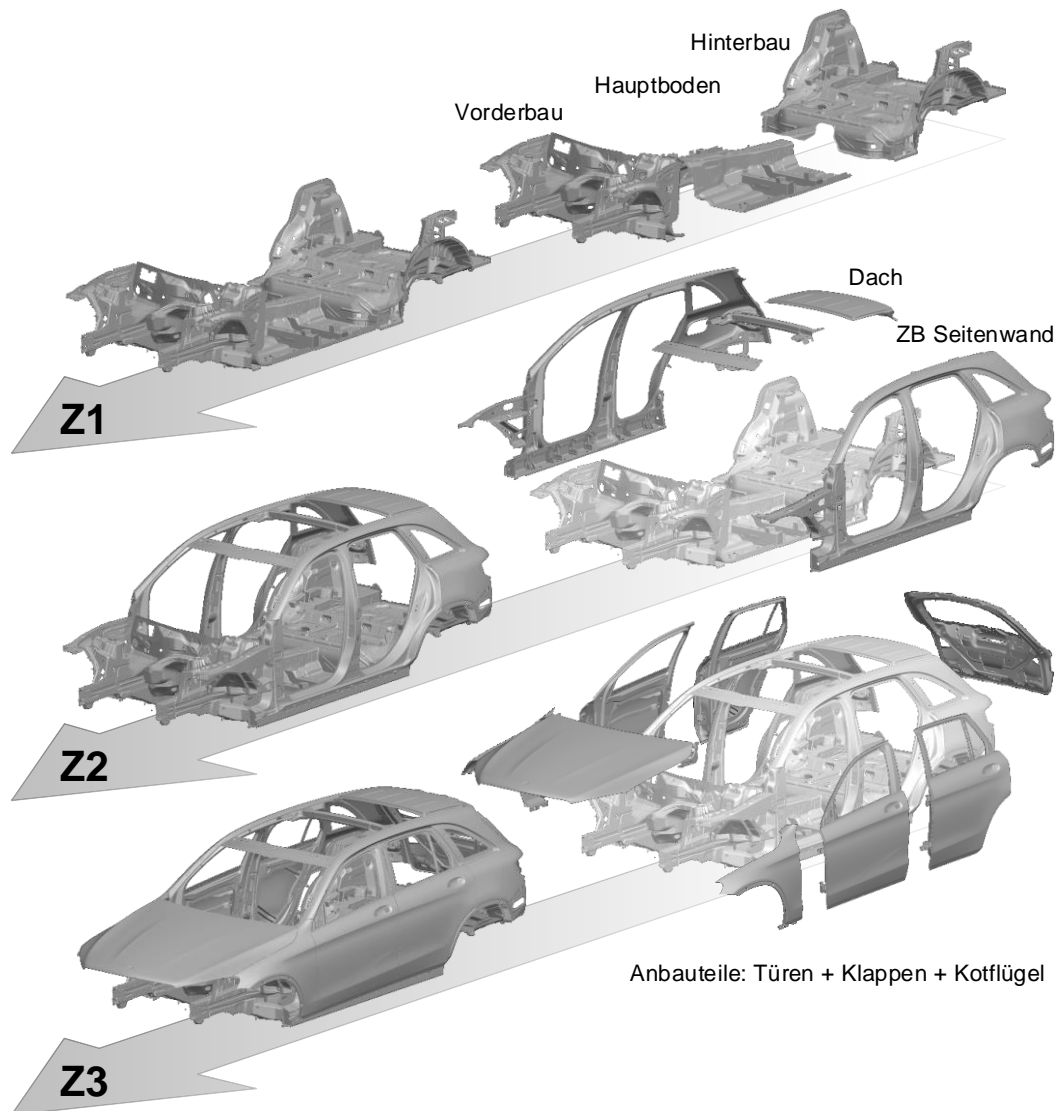
- Ein fertig eingearbeiteter Werkzeugsatz und ein damit produziertes Pressteil,
- Messbericht mit einer definierten Messaufnahme des Pressteils,
- Analyse und Interpretation der Messergebnisse und die
- Ursachen für die Maßabweichung aus Werkstoff, Werkzeug und Fertigungsfolge sind verstanden.

Sind diese Punkte erfüllt, lassen sich daraus entsprechende Korrekturmaßnahmen für einen Werkzeugsatz ableiten. Je nach Komplexität des Pressteils sowie korrekter Analyse und Umfang der CAE-Unterstützung muss dieser Prozess unter Umständen mehrmals durchlaufen werden. Auf Maßnahmen zur Reduktion der Rückfederungseffekte wird im Kapitel 2.5.1 näher eingegangen.

#### **2.1.4 Fertigungsreihenfolge in der Karosserieproduktion**

Der schrittweise Aufbau der Karosserie erfolgt im sogenannten Rohbau. Dabei werden ausgehend von den Einzelteilen unter Verwendung unterschiedlichster Füge- und Montagetechniken Unterbaugruppen (Zusammenbau - ZB) aufgebaut. Fügeverfahren, die derzeit zur Anwendung kommen, sind in Kapitel 2.2.2 näher erläutert. Die Unterbaugruppen werden im Nachgang zur Gesamtkarosserie zusammengefügt. Abbildung 5 zeigt die typische Aufbaufolge einer Karosserie, wie sie von den meisten OEMs heute ausgelegt wird [Kie07].

Die Anlagen des Rohbaus verfügen in der Regel über einen relativ hohen Automatisierungsgrad. Dabei kommen insbesondere Industrieroboter für das Teilehandling und das Fügen sowie pneumatische Spann- und Fixiersysteme zur Teilefixierung zum Einsatz [Mel12]. Die konstruktiven Herausforderungen bei der Konzeption aller Schweiß- und Fügeanlagen bestehen darin, die Komplexität und den damit verbundenen Investitionsaufwand, unter Berücksichtigung der aus Stückzahlreichung resultierenden Taktzeit, möglichst gering zu halten. Aus diesem Grund wird das Fügen der Einzelteile auf mehrere Stationen innerhalb einer Anlage aufgeteilt. In den sogenannten Geometriestationen [Bay05] werden Einzelteile oder Baugruppen zunächst zueinander positioniert und maß- und lagegenau gespannt sowie mit einzelnen, speziell ausgewählten Fügepunkten zu einer ausreichend stabilen Struktur gefügt [Bra11]. In den nachfolgenden Fügestationen werden die für die Gesamtsteifigkeit notwendigen Fügepunkte gesetzt. Diese Stationen besitzen daher wesentlich weniger Spann- und Fixiersysteme, da die Lage der Einzelteile zueinander bereits fixiert ist.



**Abbildung 5:** Aufbaustufen einer Karosserie bei der Daimler AG; von der Fahrzeugstruktur bis zur Montage von Anbauteilen

Die Spann- und Aufnahmepunkte der Einzelteile und der Baugruppen werden in der Produktentwicklung klar definiert und entsprechen auch weitestgehend den Ausrichtpunkten der Messaufnahme in der Qualitätskontrolle. Die Spann- und Aufnahmepunkte sollten daher so ausgelegt sein, dass die Pressteile prozesssicher aufgenommen werden können und die maßlichen Schwankungen der Einzelteile aufgrund der Rückfederungseffekte möglichst geringe Auswirkungen auf die maßliche Qualität der Baugruppe besitzen.

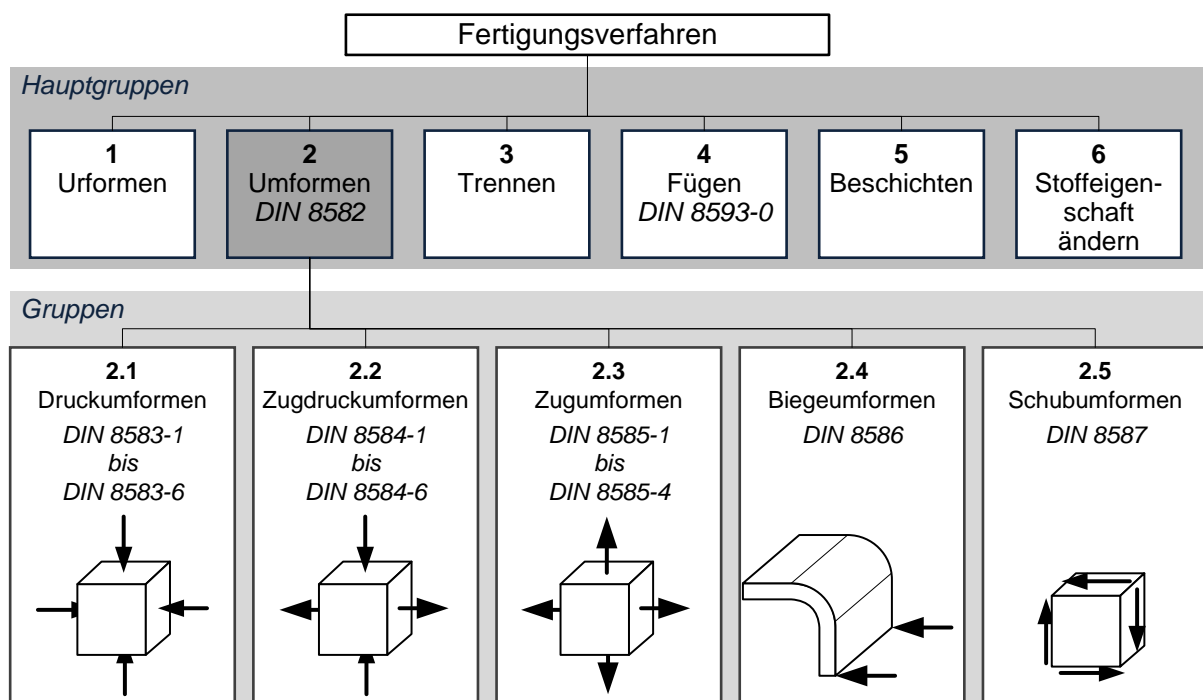
Auf das Zusammenwirken der Toleranzen von Einzelteilen auf die Baugruppen wird in Kapitel 2.3.2 näher eingegangen. Die Fertigungsverfahren, die im Presswerk und im Rohbau zum Einsatz kommen, werden in den Kapiteln 2.2.1 bzw. 2.2.2 erläutert.

## 2.2 Verfahrenstechnische Grundlagen des Karosseriebaus

### 2.2.1 Umformtechnische Grundlagen bei der Pressteilherstellung

Für die Herstellung von Blechteilen im Karosseriebau kommen Fertigungsverfahren aus der Umformtechnik zum Einsatz [DIN8580]. In der [DIN8582] werden die einzelnen Verfahren nach dem herrschenden Spannungszustand während des Umformvorgangs eingeteilt. Diese Einteilung nach DIN zeigt Abbildung 6.

Bei der Fertigung von Blecheinzelteilen, insbesondere den formgebenden Operationen, kommen die Verfahren der Gruppe Zugdruckumformen bzw. Zugumformung zum Einsatz. Für Folgeoperationen sind es die in Gruppe 2.4 beschriebenen Biegeumformungen sowie das in der Hauptgruppe „Trennen“ definierte Scherschneiden (vgl. Abbildung 6).



**Abbildung 6:** Einteilung der Umformverfahren nach [DIN8582]

Das Verfahren des Tiefziehens definiert die Formgebung einer Platine unter Beibehaltung der Blechdicke. Bei den meisten Blechteilen der Karosserie wird jedoch, aufgrund der damit verbundenen Verfestigung des Materials, in gewissen Grenzen eine Reduktion der Blechdicke zugelassen. Um diesen sogenannten „Auszug“ des Materials zu erzeugen, wird während des Ziehvorgangs das Nachfließen des Platinenrandes über den Blechhalter oder den vorhandenen Zieh-sicken gezielt gesteuert. Dadurch ergeben sich Spannungszustände im Blech, die eher dem Streckziehen zugeordnet werden [Lan02].

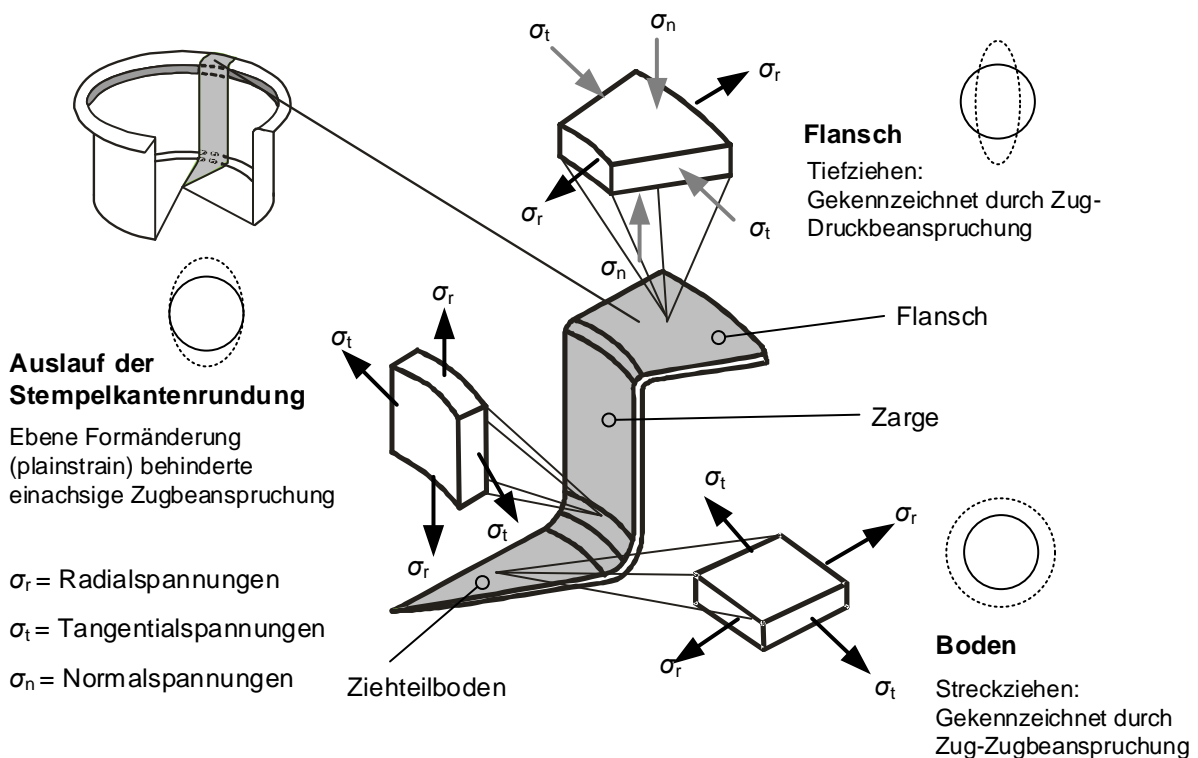
Je nach betrachtetem Bauteilbereich herrschen während des Ziehvorgangs von Blechteilen unterschiedlich stark ausgeprägte Beanspruchungen des Tief- bzw. Streckziehens. Aus diesem Grund wird die Kombination aus beiden Verfahren sehr häufig als „Karosserieziehen“ bezeichnet. Im Folgenden werden die beiden Verfahren des Tief- und Streckziehens näher erläutert.

### Tiefziehen

Die Werkzeuge beim Tiefziehen bestehen in der Regel aus Matrize, Stempel und Blechhalter. Der Prozessablauf lässt sich in drei Einzelschritte gliedern (vgl. Abbildung 7):

- Klemmen der Platine zwischen Blechhalter und Matrize im Flanschbereich der Platine.
- Aufbringen der Blechhalterkraft zur Vermeidung von Faltenbildung 1. Art im Flansch.
- Umformen durch die Relativbewegung zwischen Stempel und Blechhalter mit Matrize und Nachfließen vom Platinenbereich aus der Blechhaltung.

Bei der Umformung herrschen für den Fall eines zylindrischen Napfes in den Bereichen Zieheteilboden, Zarge und Flansch unterschiedliche Spannungszustände. Die eigentliche Umformung erfolgt im Flanschbereich, dort herrscht bis zum Einlaufen der Platine am Matrizenradius ein Zug-Druckspannungszustand. Die für die Umformung benötigte Krafteinleitung erfolgt dabei indirekt über den Stempel sowie den Zieheteilboden und den Zargenbereich (vgl. Abbildung 7).



**Abbildung 7:** Spannungsverhältnisse beim Tiefziehen eines Napfes im Bauteilboden, in der Zarge und im Flanschbereich [Doe07]

### Streckziehen

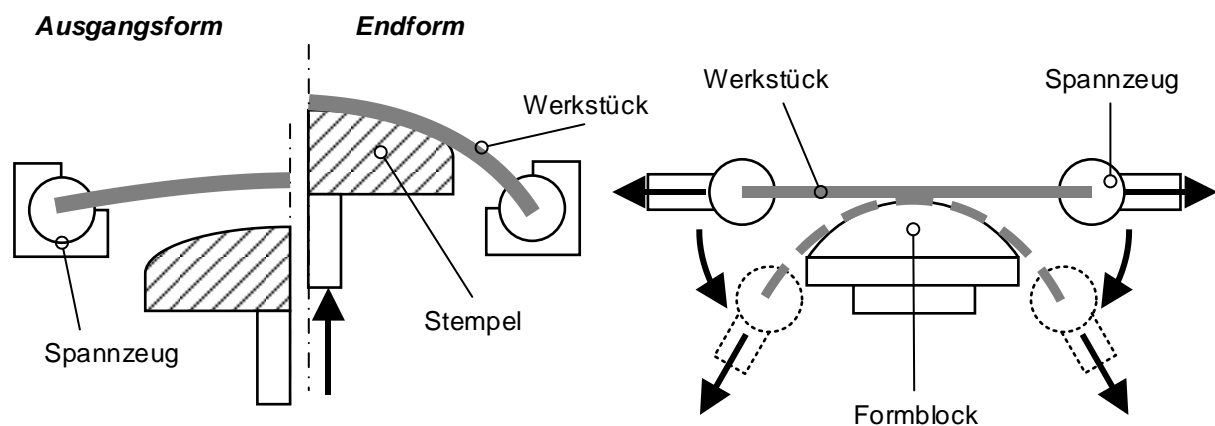
Das Streckziehen ist ein Verfahren aus der Gruppe „Zugumformen“. Die Oberflächenvergrößerung wird beim Streckziehen durch eine Verringerung der Blechdicke erreicht. Dabei werden beim Streckziehen die meist rechteckigen Blechzuschnitte mit Greifern über eine in der Regel zweiseitige Einspannung und einen Formstempel zu einer relativ flachen, konvex gekrümmten Blechform umgeformt (vgl. Abbildung 8).



Man unterscheidet zwischen Streckziehen mit feststehenden Greifern und einem verfahrbaren Streckzieh-Formstempel, dem sogenannten einfachen Streckziehen und dem Streckziehen, bei dem sowohl Greifer als auch Formstempel verfahrbar sind, dem „Tangential-Streckziehen“.

Beim einfachen Streckziehen legt sich zunächst die zweiseitig fest eingespannte Platine an den verfahrbaren Formstempel an. Durch weiteres Vordringen des Formstempels wird die Platine über den Formstempel gereckt. Aufgrund der Reibung zwischen Formstempel und Platine wird der Werkstofffluss aus dem Werkstückmittenbereich behindert, weshalb dieser Bereich nur geringfügig plastisch verformt wird. Dies wiederum führt wegen der unzureichenden Kaltverfestigung zu einer geringen Bauteilfestigkeit und Bauteilsteifigkeit. Die plastische Formänderung ist folglich beim einfachen Streckziehen in jenen Bereichen am größten, an denen keine Reibung zwischen Blech und Formstempel (am Platinenrand) zu verzeichnen ist. Aufgrund der zweiseitigen Einspannung ist das einfache Streckziehen nur für ein begrenztes Formenspektrum geeignet, wie beispielsweise für große, wenig gekrümmte, konvexe Blechformteile in einer Kleinserienfertigung (Busseitenverkleidung, Flugzeugrumpf-Außenhaut) [Lan02].

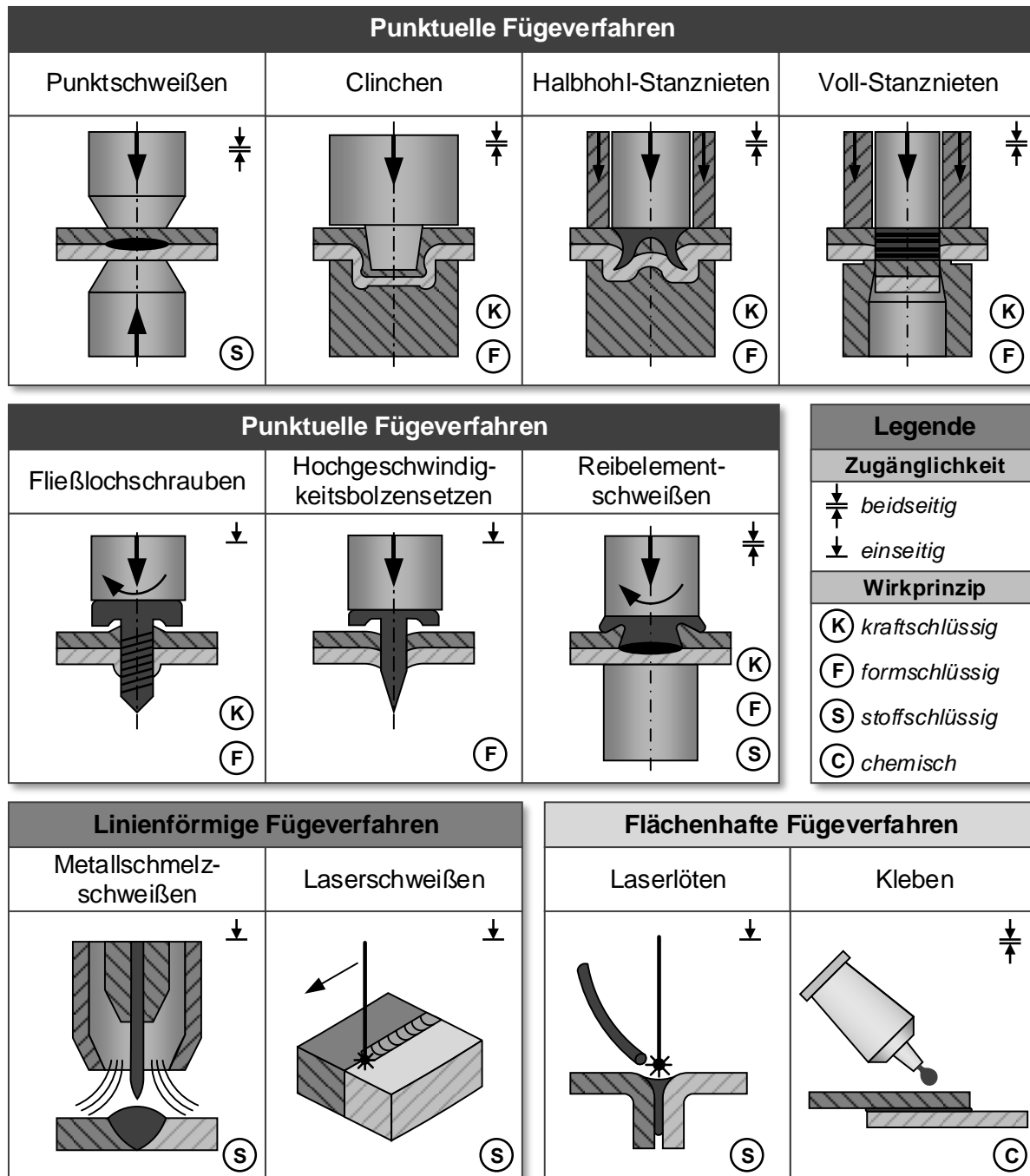
Beim Tangentialstreckziehen hingegen können die Greifer während des Umformprozesses verfahren werden, dadurch lässt sich die Platine durch Auseinanderfahren der Spannanzgen vorrecken. Anschließend wird, wie beim einfachen Streckziehen, der Formstempel vertikal aufwärts gefahren, wobei die schwenkbar angeordneten Spannanzgen dabei immer tangential an den Formstempel angelegt werden. Dies ermöglicht insbesondere im Werkstückmittenbereich eine höhere Kaltverfestigung, jedoch ist auch beim Tangential-Streckziehen das Formenspektrum stark eingeschränkt.



**Abbildung 8:** Verfahren für das Streckziehen flacher Bauteile aus Blech: Einfaches Streckziehen mit feststehenden Greifern und verfahrbarem Streckzieh-Formstempel (li.); Tangentialstreckziehen“ mit verfahrbarem Formstempel und verfahrbaren Greifern (re.) [Lan02]

## 2.2.2 Fügeverfahren im Karosseriebau

Fügen bezeichnet nach [DIN8593] in der Fertigungstechnik [DIN 8580] das dauerhafte Verbinden von mindestens zwei Bauteilen. Abhängig vom konstruktiven Konzept der Karosserie und unterschiedlichen Materialpaarungen, kommen im Karosseriebau verschiedene Fügeverfahren zum Einsatz. Die einzelnen Fügeverfahren lassen sich nach unterschiedlichen Kriterien klassifizieren. Generell wird zunächst unterschieden, ob für die Fügeverbindung ein weiteres Zusatzfügeelement benötigt wird, oder ob die Fügeverbindung durch Umformen (kraft- und formschlüssig) oder Aufschmelzen der Grundwerkstoffe (stoffschlüssig) erfolgt.



**Abbildung 9:** Übersicht und Einteilung gängiger Fügeverfahren im Karosseriebau [Bac00], [Fri04], [Bud03] u. [Fel14]

Als eine weitere Einteilung lassen sich die Fügeverbindungen nach thermischen oder mechanischen Verfahren strukturieren. Bei den thermischen Fügeverfahren entsteht ein Wärmeeintrag, durch Schmelzen des Grund- oder Zusatzwerkstoffs wird wiederum eine intermetallische Fügeverbindung erzeugt. Bei den mechanischen Fügeverbindungen wird hingegen eine formschlüssige Verbindung der überlappenden Bauteilbereiche oder Bauteilflansche meist durch Umformen der Verbindungspartner oder eines zusätzlichen Fügeelementes bewerkstelligt. Eine Sonderform stellt in dieser Einteilung das Kleben dar, welches meist in Verbindung mit einem weiteren thermischen oder mechanischen Fügeverfahren angewendet wird (hybride Verfahren).

Eine weitere Möglichkeit, die unterschiedlichen Fügeverbindungen einzuteilen, stellt die geometrische Dimension der Fügeverbindung dar. Die einzelnen Verfahren lassen sich hierbei in punktuelle, linienförmige und flächenhafte Fügeverfahren differenzieren. In Abbildung 9 sind die derzeit im modernen Karosseriebau eingesetzten Fügeverfahren des Großserienkarosseriebaus und ihre Einteilung schematisch dargestellt.

Welches Verfahren letzten Endes zum Einsatz kommt, kann von sehr unterschiedlichen Faktoren der Produktion, des Korrosionsschutzes des Fahrzeuges oder der Betriebsfestigkeitsanforderungen an die Fügeverbindung abhängen. Diese Faktoren können beispielsweise die Materialpaarung, die Materialdicken der Fügepartner, die Reihenfolge bzw. welcher Fügepartner oben oder unten liegt, die Zugänglichkeit, die Mehrlagigkeit (2- oder 3-lagige Fügeverbindungen) sowie die Anforderungen an die Dichtheit der Fügeverbindung sein. Im Folgenden wird kurz auf die einzelnen Fügeverfahren eingegangen.

### ***Widerstands-Punktschweißen***

Das bei Stahlkarosserien in Schalenbauweise am weitesten verbreitete Fügeverfahren ist das Widerstands-Punktschweißen. Die Fügepartner werden bei diesem Verfahren über die Schweißelektroden aneinandergespresst, beim Anlegen der Spannung an die Elektroden kommt es dann zu einem Stromfluss in dem zu fügenden Bauteilbereich. Der höhere Kontaktwiderstand zwischen den Fügepartnern führt zum Erwärmen und schließlich zum Aufschmelzen des Grundwerkstoffes in der sogenannten Schweißlinse zwischen den Blechteilen. Der wesentliche Vorteil des Widerstands-Punktschweißens ist die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens, da kein zusätzliches Fügeelement benötigt wird und die Prozesszeiten für einen Fügepunkt gering sind. Als Nachteil kann die beidseitig benötigte Zugänglichkeit der Schweißzange genannt werden.

Das Widerstands-Punktschweißen lässt sich auch bei Aluminiumwerkstoffen einsetzen. Da dabei jedoch der Grundwerkstoff mit dem Elektrodenmaterial in Verbindung tritt, kommt es zu Ablagerungen an der Elektrode, was nach bereits wenigen Fügepunkten zu Verschlechterungen der Fügequalität führt. Aus diesem Grund kommt das Widerstands-Punktschweißen bei Aluminiumwerkstoffen nur selten zum Einsatz.

Für Karosserien in Aluminium- oder Mischbauweise sind daher die im Folgenden genannten punktuellen Fügeverfahren vermehrt im Serieneinsatz zu finden:

### ***Clinchen***

Beim Clinchen wird kein zusätzliches Fügeelement zum Verbinden zweier Blechteile benötigt. Die formschlüssige Verbindung wird durch geeignete Kombinationen aus Stempel und Matrize und das Verpressen der beiden zu fügenden Bleche erzielt. Für jede Material- und Blechdickenpaarung werden unterschiedliche Matrizen–Stempel-Kombinationen benötigt, damit sich der Hinterschnitt, welcher beim Pressen der beiden Fügepartner entsteht, vollständig ausbildet. Das Clinchen wird meist in Kombination mit dem Kleben eingesetzt, da die erreichbaren Verbindungsfestigkeiten im Vergleich zu Widerstands-Punktschweißverbindungen deutlich tiefer liegen [Rei07].

### ***Stanznieten (Hohlstanznieten und Vollstanznieten)***

Wie beim Clinchen wird auch beim Stanznieten (sowohl Halbhohl- als auch Vollstanznieten) eine beidseitige Zugänglichkeit beim Fügen benötigt, um die hohen Prozesskräfte aufbringen zu können. Zusätzlich wird beim Halbhohl- als auch Vollstanznieten ein Fügeelement benötigt, mit dem die kraft- und formschlüssige Verbindung hergestellt werden kann. Dies erhöht den Aufwand der Anlagentechnik im Rohbau. Die mechanischen Eigenschaften der Fügeverbindung liegen jedoch über denen eines Clinchpunktes. Aufgrund der besseren mechanischen Eigenschaften werden Halbhohl- und Vollstanznieten meist bei crashrelevanten Bauteilen (Materialpaarungen „hochfest“ – „weich“) angewendet, wie beispielsweise der Fügeverbindung zwischen Seitenaufprallträger und Türinnenteil.

### ***Fließblochschauben***

Ein im Karosserie-Mischbau heute sehr häufig eingesetztes Verfahren zum Verbinden artungeicher Bauteile ist das Fließblochschauben. Dabei wird das Fügeelement (in Form einer Gewindeschraube) in Rotation versetzt und durch zunehmenden Druck auf den Schraubenkopf durchdringt die konische Schraubenspitze die zu fügenden Fügepartner. Durch die Reibung zwischen Schraube und den Fügepartnern werden die Fügepartner erwärmt und spanlos ein Gewinde geformt / gefurcht. Das Fließblochschauben lässt sich sowohl bei Blechwerkstoffen als auch bei Strangpressprofilen oder Gusswerkstoffen anwenden. Entscheidender Vorteil ist dabei die einseitige Zugänglichkeit, beispielsweise bei der Fügepaarung Blech- Hohlkammer Strangpressprofil. Als Nachteile sind die sehr hohen Prozesszeiten der Fügeverbindung, das hohe Gewicht sowie das speziell auf die entsprechende Fügeverbindung abzustimmende Fügeelement zu nennen.

### ***Hochgeschwindigkeits-Bolzensetzen***

Beim Hochgeschwindigkeits-Bolzensetzen wird der Fügebolzen (ohne sich zu drehen) mit sehr hoher Geschwindigkeit durch die zu fügenden Bauteile „geschossen“. Daraus resultieren geringe Prozesszeiten, die mechanischen Eigenschaften der Fügeverbindung sind im Vergleich zu anderen Fügeverbindungen wie beispielsweise dem Fließblochschauben jedoch geringer. Durch die hohe Geschwindigkeit des Fügebolzens kann es unter dem Bolzenkopf zu

willkürlichen plastischen Deformationen der zu fügenden Bleche kommen, weshalb die Fügeverbindung nur in für Kunden nicht sichtbaren Karosseriebereichen in Frage kommt. Aufgrund der hohen Lärmentwicklung beim Fügen muss das Hochgeschwindigkeits-Bolzensetzen zusätzlich in schalldicht gekapselten Zellen erfolgen [Hen11].

### ***Reibelementschweißen***

Eine eher selten eingesetzte Fügeverbindung ist das Reibelementschweißen. Ein zusätzliches Fügeelement wird in Rotation versetzt und unter Ausübung von Druck auf den Kopf des Fügeelementes mit dem unteren Fügepartner durch Reibschweißen verbunden. Dadurch bildet sich eine form- als auch kraftschlüssige Verbindung mit dem oben liegenden Fügepartner aus. Entscheidender Nachteil bei dieser Fügeverbindung ist, dass der obere Fügepartner vorgelocht und das Fügeelement zu diesem Loch positioniert werden muss. Um die Toleranzen und Prozessschwankungen auszugleichen, ist somit in die Anlage eine optische Lochlageerkennung zu integrieren. Sowohl die genaue Positionierung als auch der eigentliche Fügeprozess sind mit vergleichsweise hohen Gesamtprozesszeiten verbunden.

### ***Metallschmelzschweißen (Metall-Inertgas-Schweißen und Metall-Aktivgas-Schweißen)***

Vor allem bei Verbindungen von Aluminiumbauteilen miteinander kommen im Karosseriebau Metallschmelzschweißverfahren zum Einsatz. Wegen der hohen Prozesstemperatur und dem damit verbundenen hohen Wärmeeintrag kann dies zu einem starken thermischen Verzug der gefügten Baugruppe führen. Durch den Zusatzwerkstoff können Abweichungen der Einzelteile und der daraus resultierende Fügspalt in gewissen Maßen überbrückt werden.

### ***Laserschweißen***

Beim Laserschweißen ist der Wärmeeintrag in beide Fügepartner deutlich geringer als beim Metallschmelzschweißen. Durch den Laserschweißprozess können optisch als auch funktional hochwertige Stahl- und Aluminiumschweißverbindungen hergestellt werden. Da beim Laserschweißen das Grundmaterial selbst aufgeschmolzen und kein Zusatzwerkstoff verwendet wird, sind die Anforderungen an Form und Genauigkeit der Fügeflächen sehr hoch. Um definierte, gleich breit bleibende Spalte zwischen den Fügepartnern sicher zu stellen, kommen beim Laserschweißen sehr massive und aufwändige Spannvorrichtungen zum Einsatz. Dies kann aufgrund der gespannten Zwangsbedingung zu merklichen elastischen oder sogar plastischen Deformationen der Einzelteile führen.

### ***Laserlöten***

Der Wärmeeintrag ist beim Laserlöten geringer als beim Laserschweißen. Die intermetallische Verbindung zwischen den Fügepartnern wird über das Lot, welches im Prozess aufgeschmolzen wird, aufgebaut. Aufgrund des vergleichsweise geringeren thermischen Verzugs und der damit verbundenen geringeren Wellenbildung entlang der Fügenaht kommt das Laserlöten hauptsächlich im Bereich der Außenhaut zur Anwendung. Die Lötnaht wird dabei gezielt als

Designelement eingesetzt (beispielsweise an der Dachnaht oder beim Zusammenbau von Heckdeckelbeplankungen). Die qualitativen Anforderungen an die Einzelteile sind mit denen beim Laserschweißen vergleichbar. Nur ein prozesssicher definierter Fügespalt kann die Funktionalität der intermetallischen Fügeverbindung gewährleisten. Deshalb kommen im Karosseriebau auch beim Laserlöten massive und aufwändige Spannvorrichtungen zum Einsatz.

### ***Kleben***

Das Kleben stellt ein chemisches Fügeverfahren dar. Dabei lassen sich zwei Arten von Klebstoffen unterscheiden: zum einen der Strukturklebstoff und zum anderen ein sogenannter Stützklebstoff. Der Stützklebstoff hat keine versteifende Funktion und dient in der Regel dazu, dass sich Bauteile im späteren Betrieb des Fahrzeuges nicht berühren können und stets ein definierter Abstand gewährleistet ist. Beispielsweise werden Beplankungsteile oft über Stützklebstoffe am Innenteil „getragen“. Die Elastizität bleibt bei diesen Klebstoffen auch nach dem eigentlichen Aushärtvorgang bei der Lacktrocknung vollständig erhalten. Strukturklebstoffe hingegen werden dazu verwendet unterschiedliche Materialien effektiv zu verbinden und mechanische Belastungen und Schwingungskräfte optimal zu verteilen. Sie werden häufig in Verbindung mit anderen punktförmigen Fügeverbindungen eingesetzt (hybride Fügeverfahren). Die zusätzlichen punktförmigen Fügeverbindungen dienen dabei hauptsächlich dazu, die Bauteile in ihrer Form und Lage zueinander zu fixieren bis der Klebstoff im Lacktrockner vollständig ausgehärtet ist und seine vollständige Festigkeit erreicht hat. Entscheidender Vorteil des Klebstoffs gegenüber thermischen Fügeverfahren ist der geringe Verzug der Fügepartner. Ein weiterer Vorteil des Klebens ist die zusätzliche Dichtfunktion, wodurch sich das Eindringen von Feuchtigkeit verhindern lässt und Bauteile gegen Korrosion geschützt werden können (beispielsweise beim Falzkleben mit Strukturklebstoff im Falz) [Neu12].

Da der Falzprozess in der vorliegenden Arbeit einen höheren Stellenwert besitzt als die anderen hier kurz vorgestellten Fügeverbindungen wird im folgenden Kapitel detaillierter darauf eingegangen.

### **2.2.3 Fügen durch Falzen**

Das formschlüssige Verbinden zweier Bauteile entlang einer Fügelinie wird im Karosseriebau als „Falzen“ bezeichnet. Nach [DIN8593] wird Falzen folgendermaßen definiert:

*„Fügen durch Umformen derart, dass an ihren Rändern vorbereitete Blechteile ineinander gelegt oder ineinander geschoben werden und durch Umlegen der Ränder einen Formschluss erhalten“* [DIN8593].

Die Fügeverbindung erfolgt ohne ein zusätzliches Fügeelement oder einen Zusatzwerkstoff. Im Karosseriebau wird das Fügen durch Falzen in der Regel jedoch mit einer Klebeverbindung kombiniert. Die durch Umformen formschlüssig gefügten Komponenten lassen sich später nur durch eine Zerstörung der Fügezonen voneinander lösen.

### **Falzen im Karosseriebau**

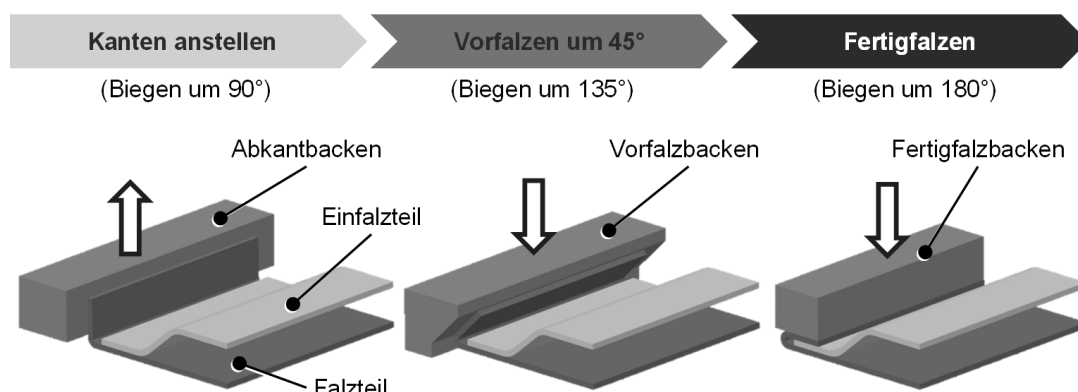
Das Falzen im Karosseriebau stellt in der Regel die Fügeverbindung von einer Außenhaut (meist als Beplankung bezeichnet) und einem Innenteil dar. Die durch Umformen erzeugte Fügeverbindung bietet im Wesentlichen folgende Vorteile:

- geringes Gewicht (weder Zusatzfügeelement noch -werkstoff werden benötigt)
- Erhöhung der Steifigkeit der gefügten Komponenten
- reduziertes Verletzungsrisiko durch außenliegende Falzschlaufe
- keine bzw. nur geringe lokale Deformationen an der Außenseite durch den Fügeprozess

Im Wesentlichen finden Falzverbindungen bei Außenhautbauteilen, wie beispielsweise Türen, Kotflügel oder Heckdeckel ihre Anwendung und in den seltensten Fällen kommt keine zusätzliche Klebeverbindung im Falz zum Einsatz. Die industriell verwendeten Falzverfahren lassen sich grundlegend in zwei unterschiedliche Verfahren einteilen. Dies sind zum einen das konventionelle Backenfalzen und zum anderen das Rollfalzen. Im Folgenden werden beide Verfahren vor- und einander gegenübergestellt.

#### **Konventionelles Backenfalzen mit starren Werkzeugen**

Beim sogenannten konventionellen Falzprozess wird das Biegemoment über starre Werkzeugbacken (Falzbacken) in das Bauteil eingeleitet. Der Falzbacken befindet sich dabei über die gesamte Falzflanschlänge im Eingriff bzw. Kontakt mit dem Werkstück [Sve01] u. [Sve98]. In [Doe07] wird der gesamte Falzprozess in drei einzelne Prozessschritte eingeteilt: „Kanten anstellen“ (Abkantenden), „Vorfalzen“ und „Fertigfalzen“ (vgl. Abbildung 10).



**Abbildung 10:** Verfahrensschritte beim Backenfalzen vom Abkanten bis zum fertiggefalzten Zustand [Hoe13a]

#### **I Abkanten:**

Entgegen Abbildung 10 erfolgt das „Kanten anstellen“ stets nach dem Karosserieziehen und dem anschließenden Beschneiden als Operation im Presswerk. Die Außenhautteile werden dort in der Regel, je nach verwendetem Blechwerkstoff und der Blechdicke, mit einem Abkantinnenradius von 0,3 bis 1,5 mm abgekantet. Je nach Bauteilgeometrie weist der abgekantete Falz-

flansch unterschiedliche Falzöffnungswinkel auf. Die Restöffnungswinkel bei einer Türbeplankung können dabei beispielsweise ca.  $90^\circ$  und bei einer Motorhaube (Bereich Übergang zum Kotflügel)  $140^\circ$  betragen. Das Einlegen des Innenteils (Einfalzteil) in das abgekantete Falzteil erfolgt dann erst im Rohbau.

## **II Vorfalzen:**

In diesem Prozessschritt wird der Restöffnungswinkel des abgekanteten Falzteiles weiter reduziert, was bei sehr großen Restöffnungswinkeln schrittweise erfolgen muss. Ein Weiterbiegen um  $45^\circ$  je Falzschrift hat sich dabei etabliert [Sve00], [Mur02], [Sie93] u. [Atz98].

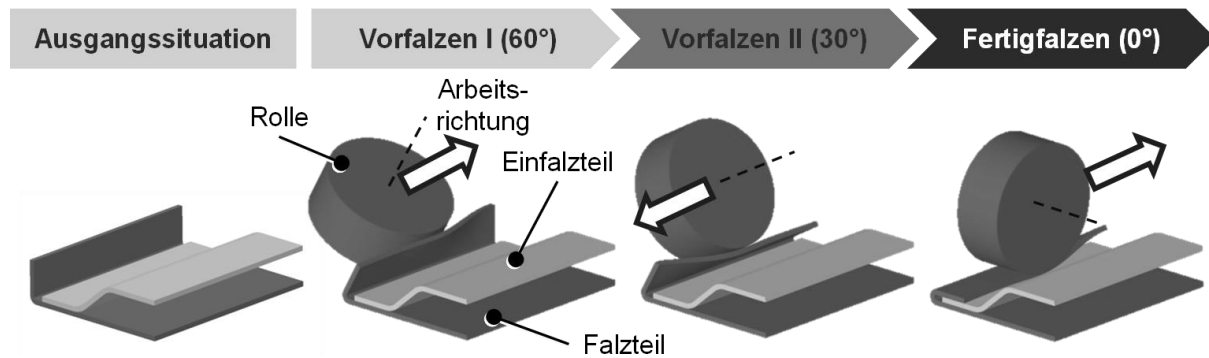
## **III Fertigfalzen:**

Beim Fertigfalzen, dem letzten Prozessschritt des Falzens, wird der verbleibende Restöffnungswinkel vollständig geschlossen, sodass der Falzflansch insgesamt um  $180^\circ$  umgelegt wird. Der sogenannte Fertigfalzbacken ist dabei in Bezug auf die Kontur und den Umriss an die Werkstückgeometrie angepasst.

### ***Robotergeführtes Rollfalzen***

In den vergangenen Dekaden sind insbesondere die Formen der Außenhautbauteile komplexer geworden und damit verbunden auch deren Herstellprozesse. Insbesondere beim Backenfalzen entlang des Umrisses der Klappenteile führt dies zu einer komplexeren Anlagenkonstruktion. In einer Serienproduktion lässt sich dies nur durch eine Vielzahl von Falzbackengeometrien und Schieberelementen realisieren. Insbesondere bei kleinen Stückzahlen können die Investitionskosten für solche konventionellen Backenfalzprozesse beinahe nicht mehr gedeckt werden. Da bei der Vielzahl unterschiedlicher Derivate, die sich hinsichtlich ihres Außenhautdesigns unterscheiden, viele dieser konventionellen Falzstation benötigt würden, wurden in den 80er Jahren die Verfahren zur Herstellung von Falzverbindungen durch das Rollfalzen erweitert. Der Begriff des „Rollfalzens“ wurde zum ersten Mal in einer japanischen Patentschrift [Pat85] aus dem Jahr 1985 angeführt. Dabei wird eine Rolle beschrieben, die am Kopf eines Industrieroboters angebracht ist. Diese Rolle wird entlang des Werkstücks geführt und biegt dabei den Falzflansch inkrementell um. Analog zu dem beschriebenen konventionellen Backenfalzen wird dieser Falzflansch in mehreren Schritten umgefaltet. In jedem Falzschrift wird dabei der Anstellwinkel der Rolle relativ zur Bauteilgeometrie verändert. In der genannten Patentschrift [Pat85] wird von zwei sogenannten Falzbahnen ausgegangen. Im Allgemeinen können jedoch, je nach Restöffnungswinkel und gewünschter Falzgeometrie, durchaus mehr als zwei Falzbahnen realisiert werden. Abbildung 11 unterteilt das Vorfalzen in zwei Schritte, bevor im letzten Falzschrift, dem Fertigfalzen, die Rollenachse dann parallel zur Bauteilflanschgeometrie geführt wird. Nach dem ersten Vorfalzen weist das Falzteil noch einen Restöffnungswinkel von beispielsweise  $60^\circ$  und anschließend, nach der zweiten Vorfalzbahn, einen Restöffnungswinkel von  $30^\circ$  auf. Erst nach dem Fertigfalzen ist eine umformtechnisch hergestellte Fügeverbindung realisiert.



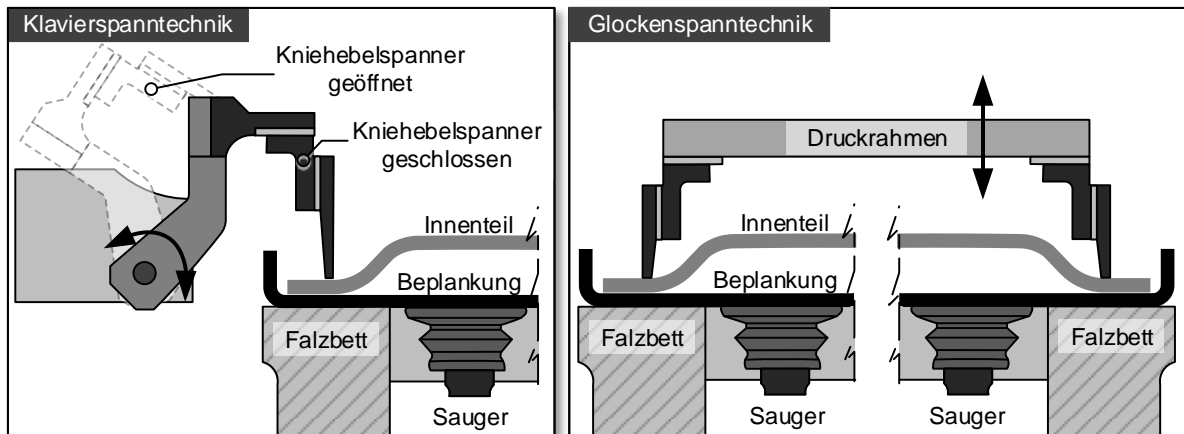


**Abbildung 11:** Rollfalzprozessschritte vom Vor- bis zum Fertigfalzen [Eis09]

Während des Vorfalzens wirken im Prozess, je nach Werkstoff und Blechdicke, relativ geringe Reaktionskräfte von 300 bis 600 N auf den Roboter. Beim Fertigfalzen hingegen können diese Kräfte im Bereich von 1200 bis 1500 N liegen [Sch04].

### Anlagen für Rollfalzprozesse

Das Layout einer Rollfalzanlage wird im Wesentlichen durch die Bauteilgeometrie, die damit verbundene Zugänglichkeit und die Taktzeit im Serienbetrieb bestimmt. Neben den Rollfalzrobotern beinhaltet eine Rollfalzzelle ein Falzbett, Spanntechnik bzw. Spannvorrichtungen zur Bauteilfixierung und Handlingsgeräte für den Teiletransport. In der Regel werden zunächst die im Presswerk bereits abgekanteten Außenhautteile zusammen mit dem ZB-Innenteil, welches selbst wiederum einige Verstärkungsteile enthalten kann, in das Falzbett eingelegt, bevor dann beide Teile zusammen verspannt werden. Durch das Verspannen der Bauteile können die Prozesskräfte, welche über den Roboter ins Werkstück gelangen, durch die Spanntechnik aufgenommen werden, sodass ein Verrutschen der Bauteile verhindert wird. Aufgrund der Zugänglichkeit können die Bauteile meist nicht umlaufend und großflächig gespannt werden. Deshalb werden vielfach unterschiedliche Konzepte entwickelt, bei denen auch zeitlich gesteuerte Spanner zum Einsatz kommen, um eine möglichst hohe Zugänglichkeit für den Falzroboter zu gewährleisten. Hierbei wird auch zwischen der sogenannten „Klavierspanntechnik“ [Kuk14] und der „Glockenspanntechnik“ unterschieden (vgl. Abbildung 12). Bei der Klavierspanntechnik drücken Spannklammern von außen auf die Bauteile und können, wie die Hämmer eines Klaviers, einzeln bewegt werden. Dadurch lassen sich beispielsweise die Spanner sequentiell öffnen und schließen, damit die Zugänglichkeit für die Falzrolle bzw. für den Falzkopf gegeben ist. Bei der Glockenspanntechnik hingegen wird ein starrer, das ganze Bauteil umfassender Spannrahmen in Glockenform auf den Flansch des Innenblechs gedrückt, sodass die Falzrolle den Flansch des Außenblechs außen umlaufend umlegen kann. Zusätzlich zu den mechanischen Spannern wird die Beplankung meist über Vakuumsauger, welche im Falzbett integriert sind, an das Falzbett gesogen, um die Beplankung richtig im Falzbett zu positionieren und damit sich diese beim Einlegen des Innenteils nicht verschieben kann.



**Abbildung 12:** Unterschiedliche Spanntechniken beim Rollfalzen (schematisch): Klavierspanntechnik (li.); Glockenspanntechnik (re.)

In der Serienproduktion können insbesondere bei Baureihen mit größerer Stückzahl und den daraus resultierenden kürzeren Taktzeiten oftmals nicht alle Bauteilbereiche in einer Falzstation fertiggefalzt werden. Aus diesem Grund werden die einzelnen Falzschritte häufig auf mehrere Falzstationen aufgeteilt. Sobald in der ersten Station einzelne Bereiche oder Vorfalzbahnen durchlaufen wurden, werden die Bauteile in ein folgendes Falzbett transportiert und dort aus Taktzeitgründen weitergefalzt. Zeitgleich kann dann bereits mit einem neuen Bauteilverbund in der ersten Station begonnen werden. Durch dieses Verteilen auf mehrere einzelne Stationen kann zum einen die Taktzeit reduziert werden, zum anderen lassen sich einfache Spanntechniken realisieren und die Zugänglichkeit der Falzrolle gewährleisten. Ein entscheidender Nachteil dieses aufgeteilten Produktionsprozesses stellen ein höheres Investitionsvolumen und der höhere Flächenbedarf für die zusätzlichen Falzstationen sowie die entsprechenden Schutzeinrichtungen dar.

### **Häufig verwendete Falzgeometrien**

Neben dem Restöffnungswinkel bestimmt auch die gewünschte Falzgeometrie über die Anzahl der Falzbahnen bzw. Umläufe der Falzrolle. Im Karosseriebau werden im Wesentlichen drei unterschiedliche Falzgeometrien unterschieden (vgl. Abbildung 13). Die drei unterschiedlichen Geometrien Flachfalz, Keilfalz und Tropfenfalz unterscheiden sich dabei durch ihren Außenradius entlang des Bauteilumrisses.



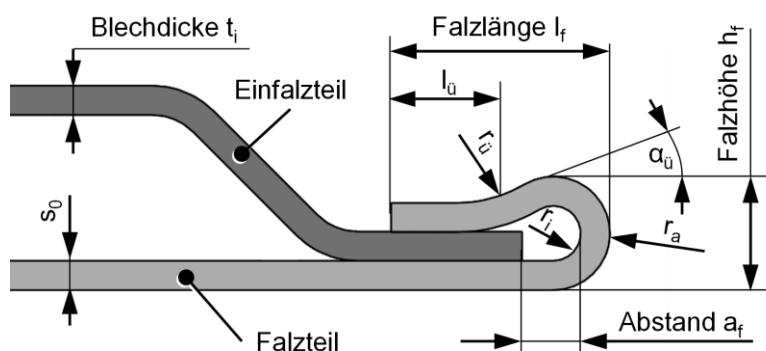
**Abbildung 13:** Häufig verwendete Falzgeometrien bei Anbauteilen im Karosseriebau [Kri07]

Am häufigsten findet im Karosseriebau der durch eine zylindrische Rolle beim Fertigfalzen hergestellte **Flachfalz** Anwendung. Die Dicke der gefalzten Komponente, das sogenannte Packmaß, setzt sich dabei aus der doppelten Außenblechdicke und der Blechdicke des Innenteils zusammen.

Beim **Keilfalz** ist der Außenradius „schärfer“ bzw. kleiner ausgeführt, was beim Fertigfalzen meist durch eine zusätzliche Falzbahn mit einer abgesetzten Falzrolle realisiert wird. Dadurch bildet sich am Falzflansch im Bereich des Übergangs zum Innenteil ein zusätzlicher Radius aus. Durch den kleineren Radius an der Außenseite kann es, bedingt durch die höheren plastischen Dehnungen des Materials im Vergleich zum Flachfalz, insbesondere bei Aluminiumaußenteilen, zu einem erhöhten Risiko von Anrissen der Radiusaußenseite kommen [Lie15b].

Beim **Tropfenfalz** ist das Packmaß deutlich größer als die Summe der doppelten Außenblechdicke und der Innenteilblechdicke. Der Außenradius wird hierbei deutlich größer ausgeführt, wodurch die plastischen Dehnungen der Außenfaser deutlich geringer sind. Bei Werkstoffen, die bei erhöhter Dehnung zu Rissen neigen, wird aus diesem Grund oft ein Tropfenfalz verwendet. Die Geometrie des Tropfenfalzes lässt sich beim Fertigfalzen durch eine Aussparung in der Falzrolle erzeugen. Zusätzlich wird durch das höhere Packmaß die Steifigkeit der gefalzten Bauteile erhöht, was beispielsweise heutzutage bei Motorhauben für die passive Sicherheit (Fußgängerschutz) relevant ist. Insbesondere der Falz zur angrenzenden Windschutzscheibe wird meist als Tropfenfalz ausgeführt, da dieser keinen Fugenspalt bildet und somit der bedingt größere Falzradius durch den Tropfenfalz für die Qualitätsanmutung eine untergeordnete Rolle spielt.

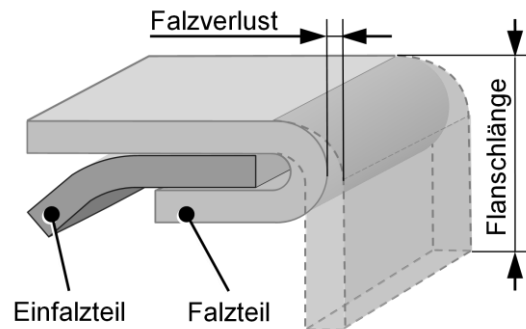
Die wesentlichen geometrischen Größen einer Falzverbindung sind beispielhaft am Schnitt eines Tropfenfalzes in Abbildung 14 dargestellt. Im Wesentlichen sind dies der Falzaußenradius ( $r_a$ ), der Falzinnenradius ( $r_i$ ), die Falzhöhe ( $h_f$ ), die Überlappungslänge ( $l_{ü}$ ) und die Übergangsneigung ( $\alpha_{ü}$ ).



**Abbildung 14:** Geometrische Größen am Beispiel eines Tropfenfalzes [Lem99]

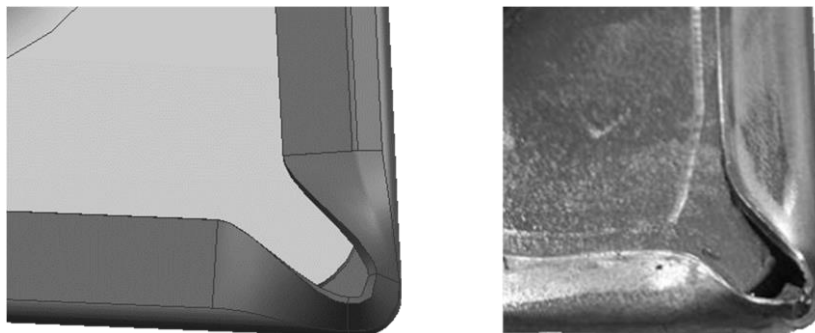
Des Weiteren lassen sich zusätzlich geometrische Größen definieren, die zum einen den Falzprozess sowie zum anderen die fertige Falzverbindung wesentlich dimensionell bestimmen. Dies sind einerseits die Flanschlänge im abgekanteten Zustand und andererseits die

Verkleinerung des Umrisses durch den Falzprozess. Bei der Verkleinerung des Umrisses wird von einem sogenannten „Falzverlust“ gesprochen (vgl. Abbildung 15). Sowohl der Falzverlust wie auch die Flanschlängen sind entscheidende Größen, die in der Serienproduktion bei Beschnitt- und Abkantwerkzeugen im Presswerk berücksichtigt werden müssen.



**Abbildung 15:** Definition der Flanschlänge am abgekanteten Pressteil und des Falzverlustes

In Bauteilbereichen, in denen aufgrund der geometrischen Form nicht gefalzt werden kann, insbesondere in Eckbereichen von Klappenteilen, geht der Falzbereich meist in einen sogenannten „Stehflanschbereich“ über. In diesen Bereichen wird das abgekantete Bauteil häufig auf eine minimale Flanschlänge zurückgeschnitten und der Stehflanschbereich nach innen (Öffnungswinkel  $< 90^\circ$ ) gekippt.



**Abbildung 16:** Übergang zwischen geschlossenem Falzflansch und Stehflansch im Eckbereich eines Klappenteils; CAD-Sollgeometrie (links) Eckbereich am realen Bauteil (rechts)

### ***Falzkleben***

Falzen wird im Karosseriebau meist in Kombination mit Kleben, dem sogenannten Falzkleben, als Hybridfügeverfahren eingesetzt. Der vor dem Falzen aufgebraute Kleber verteilt sich dabei während der Umformung zwischen den Fügepartnern. Die Benetzung erfolgt in jedem Fall über dem Falzgrund und kann, je nach konstruktiver Vorgabe, gesteuert über die volumen- und lagegeregelte Klebstoffapplizierung, von der Falzwurzel bis zur vollständigen Benetzung des Flanschbereiches reichen. Es kommen sowohl ein- als auch zweikomponentige Klebstoffe unterschiedlicher Viskosität zum Einsatz. Die Vorteile durch den zusätzlichen Klebstoffauftrag sind eine höhere Steifigkeit von Türen und Klappen im Falle eines Unfalls durch eine höhere Biege- und Torsionssteifigkeit der Fügeverbindung, ein verbesserter Korrosionsschutz sowie eine zusätzliche Schwingungsdämpfung [Neu12].

## 2.3 Qualitätskriterien für die Karosseriefertigung

Von elementarer Bedeutung für die Erfüllung von Kundenanforderungen hinsichtlich einer hochwertigen Anmutung der Karosserie sind laut [Gra12] folgende beiden Merkmale:

- Strakverlauf und Oberflächenqualität
- Funktionsmaße der Karosserie (insbesondere Spaltmaße der Außenhaut)

Im Folgenden sollen zunächst diese beiden Qualitätsmerkmale erläutert werden:

### *Strakverlauf und Oberflächenqualität*

Unter dem Begriff des „Strakverlaufs“ wird die geometrische Darstellung aller kundensichtbaren Oberflächen der Karosserie verstanden. Er beschreibt die Bündigkeit und den Übergang von Anschlusskonturen benachbarter Teile z. B. Fahrer / Fondtür oder Heckdeckel / Seitenwand. Erwünscht sind eine saubere Fluchtung und Stimmigkeit der Charakterlinien sowie eine stetige Umgebungslichtreflektion auf der Oberfläche. Welligkeiten in der Reflexion der Außenhaut aufgrund von Beulen und Dellen sind unerwünscht und werden als störend wahrgenommen. Als Beispiel für einen Strakverlauf sind der Übergang von Vorderkotflügel, über Fahrer-, Fondtür und Seitenwand zu nennen. Geprüft wird der Strakverlauf bereits in der Designphase, bei der Freiformflächenerzeugung höchster Güte (Class A) anhand von krümmungsstetigen Flächenbeschreibungen und computergenerierten Umgebungslichtreflektionen [Ver05].

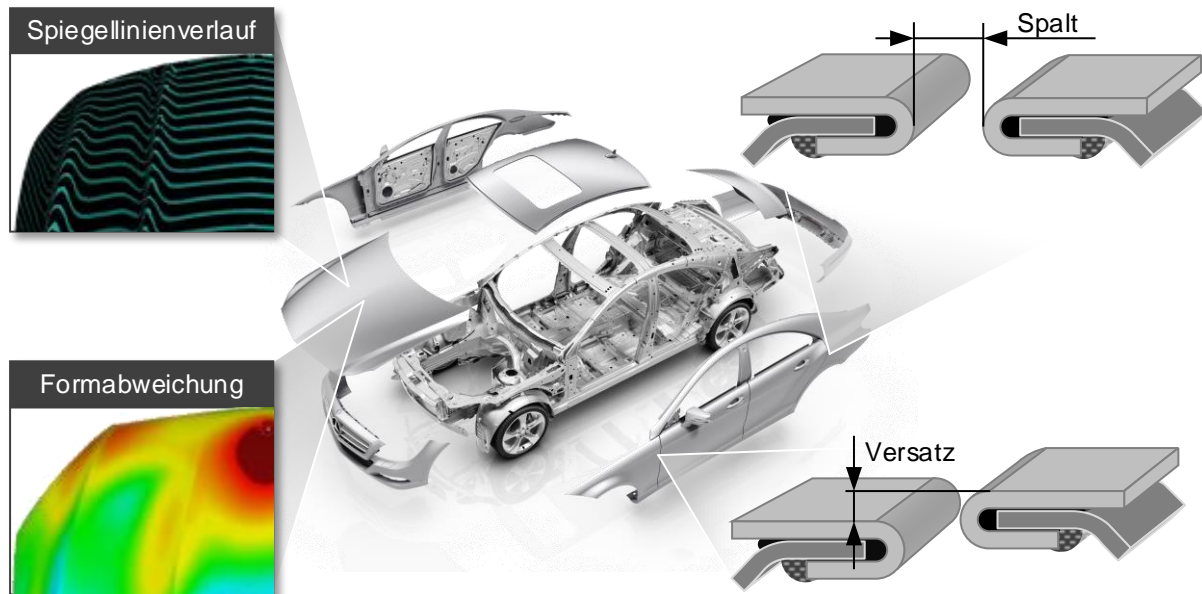
In der Produktion sind leichte Defekte der Außenhaut, die zu Unstetigkeit der Umgebungslichtreflektion führen können, unter normalen Umgebungsbedingungen oft nicht oder mit bloßem Auge nur schlecht erkennbar. Auch messtechnisch lassen sich sogenannte „Unruhen“ (leichte Welligkeiten der Oberfläche), wie beispielsweise lokale Einfallstellen kaum erfassen. Die Oberflächenprüfung erfolgt sowohl im Presswerk als auch im Rohbau derzeit in der Regel mit folgenden drei Methoden:

- Sichtprüfung unter spezieller Beleuchtung (sogenannte Lichtsegel) am Ende der Pressenstraße, Rohbau Klappenmontage und Lackierung
- Abziehen mit feinen Schleifsteinen
- optische Oberflächeninspektionssysteme mit Hilfe digitaler Kamerasysteme und nachgeschalteter Datenverarbeitung und -abgleich (beispielsweise System Steinbichler ABIS II [Ste16])

### *Funktionsmaße der Karosserie*

Unter dem Begriff „Funktionsmaße“ der Karosserie werden kundenrelevante Maße eines Bauteils oder mehrerer Bauteile zueinander verstanden, die messtechnisch erfasst werden können. Die Qualitätsbeurteilung von Funktionsmaßen kann somit mittels definierter Toleranzen objek-

tiv erfolgen. Von besonderer Bedeutung sind dabei Maße, die die Optik und zugleich die Funktion betreffen. Zu den Funktionsmaßen zählen beispielsweise Anschlussmaße von Montagebauteilen der Außen- und Innenverkleidung oder auch Spaltmaße, was für die Wirkung von Dichtungen und für Übergänge an der Außenhaut zwischen einzelnen Zusammenbauten der Karosserie relevant ist. Zur Beurteilung der Spaltmaße der Karosserie wird der Fugenverlauf herangezogen. Entscheidend sind dabei der Abstand der angrenzenden Bauteile, die Konstanz der Fugenbreite entlang ihres Verlaufs sowie die Bündigkeit bzw. der Versatz im Schnitt. In Abbildung 17 sind exemplarisch einige Qualitätsmerkmale der Karosserie dargestellt.



**Abbildung 17:** Qualitätsmerkmale von Anbauteilen der Karosserie: Form, Spalt, Versatz und Oberflächenqualität [Kae13a]

Während sich an der fertigen Karosserie Qualitätsmerkmale definieren lassen, mit denen die Kundenanforderungen erfüllt werden, stellt die Ableitung dieser Qualitätsziele auf die Einzelteile eine größere technologische Herausforderung dar. Streng genommen könnten die Qualitätsziele der Gesamtkarosserie direkt auf sämtliche Einzelteile übertragen werden. Dies würde zum einen jedoch bei der Pressteilfertigung aufgrund von Schwankungen im Fertigungsprozess zu hohen Kosten führen und zum anderen blieben Qualitätseinflüsse, resultierend aus Fertigungsprozessen des Rohbaus und der Lackierung, unberücksichtigt. Aus diesem Grund werden die Qualitätsziele der Gesamtkarosserie nicht ganzheitlich auf die Einzelteile übertragen. Je nach Einzelteil oder Baugruppe führt dies zu sehr unterschiedlichen Qualitätsanforderungen. So differieren beispielsweise die Anforderungen für Strukturteile deutlich gegenüber denen der Außenhaut. Bei Außenhautteilen stehen primär der Strakverlauf und die Oberflächenqualität im Vordergrund, bei Strukturteilen hingegen sind die Funktionsmaße tendenziell enger toleriert.

Um die Funktionsmaße hinsichtlich ihrer Qualität beurteilen zu können, sind folgende beiden Fragestellungen von essentieller Bedeutung:

- Wie kann der produzierte Ist-Zustand, insbesondere Funktionsmaße eines Bauteils oder einer Baugruppe reproduzierbar messtechnisch erfasst werden? (Frage der Ausrichtung und Messtechnik)
- Welche Abweichungen vom Soll-Funktionsmaß sind für eine robuste Produktion zulässig um die Qualitätsanforderungen der Karosserie zu erfüllen? (Frage der Toleranz)

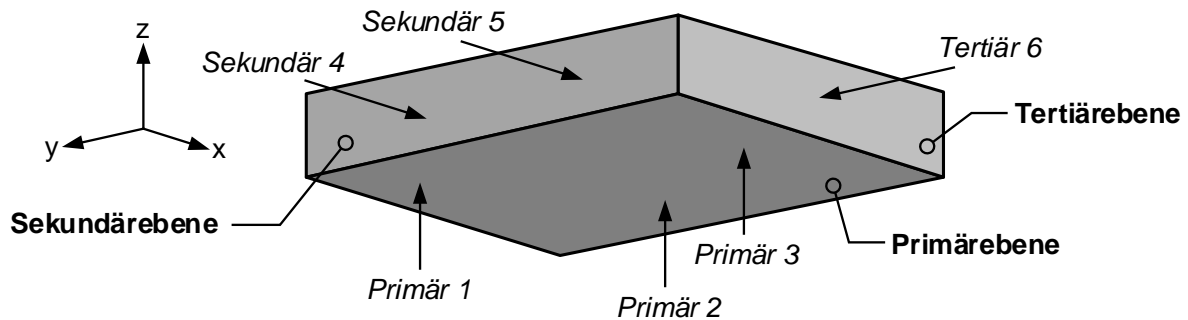
Diesbezüglich werden im Folgenden zunächst die Ausrichtung und Tolerierung der Einzelteile und der Baugruppen bei der Qualitätsbeurteilung von Form und Lage dargestellt, bevor anschließend die derzeitigen Möglichkeiten zur messtechnischen Erfassung von Einzelteilen und Baugruppen der Karosserie ausgeführt werden.

### **2.3.1 Ausrichtstrategie und Maßbezugsystem von Pressteilen und Baugruppen**

Die CAD-Konstruktion einzelner Bauteile oder Baugruppen im Raum erfolgt in der Automobilindustrie stets anhand des Fahrzeugkoordinatensystems. Der Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems liegt mittig, auf Höhe der Vorderachse. Jedes einzelne Bauteil und jede Unterbaugruppe hat wiederum ein definiertes Ausrichtkonzept, das sich auf das Fahrzeugkoordinatensystem bezieht. Unter Ausrichtkonzept ist zum einen die physikalische Aufnahme des Bauteils bzw. der Baugruppe in der Messvorrichtung, aber auch die in der Fügevorrichtung zu verstehen. Für die Qualitätssicherung des gesamten Fahrzeuges, die Festlegung von Toleranzen als auch für eine prozesssichere Gestaltung der Verfahrensabläufe im Rohbau bedarf es einer über die einzelnen Fertigungsschritte durchgängigen und reproduzierbaren Positionierungs- und Bezugsmethodik. Nur so lassen sich Bauteiltoleranzen zueinander abstimmen und Zusammenhänge zwischen der Maßhaltigkeit der Einzelteile und der Baugruppe richtig interpretieren. Für die Ausrichtung der Bauteile sollen zunächst die in der Automobilindustrie gängige 3-2-1 Methode sowie das damit verbundene Bezugssystem beschrieben werden, bevor im Anschluss daran auf die Best-Fit Methode eingegangen wird.

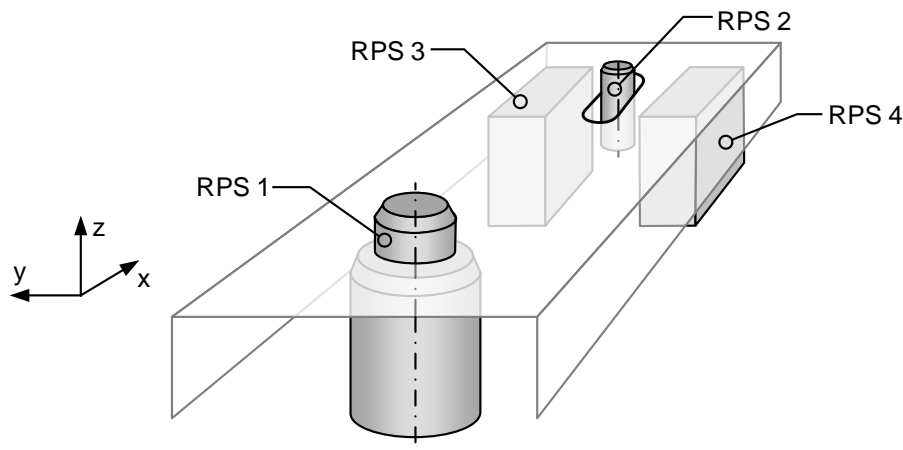
#### ***3-2-1 Methode (RPS-Ausrichtung) am Einzelteil***

Um die sechs Freiheitsgrade eines starren Körpers statisch bestimmt einzuschränken, werden sechs Ausrichtpunkte benötigt. Nach der sogenannten 3-2-1 Regel spannen die ersten drei Punkte die Primärachse auf. Die nächsten zwei Punkte bilden die Sekundärachse, die normal auf der Primärachse steht. Durch den letzten Punkt ist die Tertiärebene definiert, die normal zu den beiden anderen Ebenen liegt (vgl. Abbildung 18) [Boh98].



**Abbildung 18:** Exemplarisches 3-2-1 Verfahren zur Bauteilorientierung eines Quaders [Boh98]

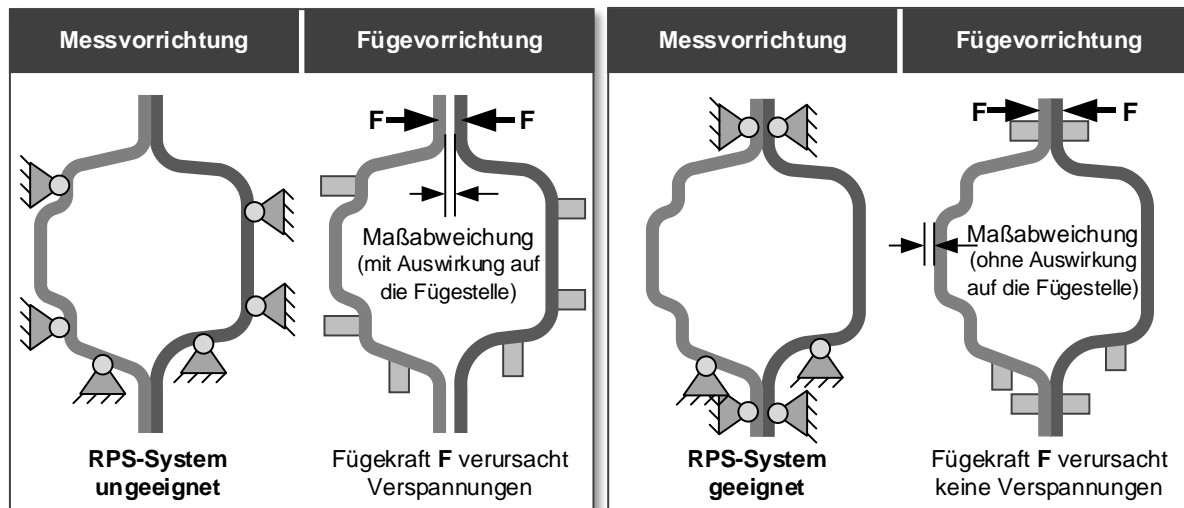
Eine Anwendungsart der 3-2-1 Regel zur Bauteilorientierung stellt das Loch-Langloch Prinzip dar. Dabei werden über einen Stift in einem Loch drei Freiheitsgrade gesperrt, dies bildet die sekundäre und tertiäre Ausrichtung. Ein zweiter Stift, der in einem Langloch liegt, bildet die zweite sekundäre Ausrichtung. Das Langloch gleicht dabei eine Positionstoleranz zu anderen Referenzen aus (vgl. Abbildung 19). Diese Ausrichtungsmethode lässt sich sehr gut bei Struktur- und Verstärkungsteilen im Karosseriebau anwenden.



**Abbildung 19:** Ausrichtung über Loch-Langloch Prinzip zur definierten und reproduzierbaren Bauteilorientierung in einer Messvorrichtung oder einer Fügestation

Um jedoch mit dieser Methodik die relative Lage der Einzelteile zum Fahrzeugkoordinatensystem zu berücksichtigen, müssen Systembezugspunkte definiert werden. Erfolgt die Ausrichtung der Einzelteile anhand dieser Systembezugspunkte, so wird die 3-2-1 Methode als RPS-Ausrichtung (Referenz-Punkt-System) bezeichnet [Jor14]. Bei der Definition der Systembezugspunkte müssen sowohl Anforderungen aus dem Herstellungsprozess und den Folgeprozessen des Bauteils aus Blech als auch bezüglich der Qualitätssicherung berücksichtigt werden (vgl. Abbildung 20).





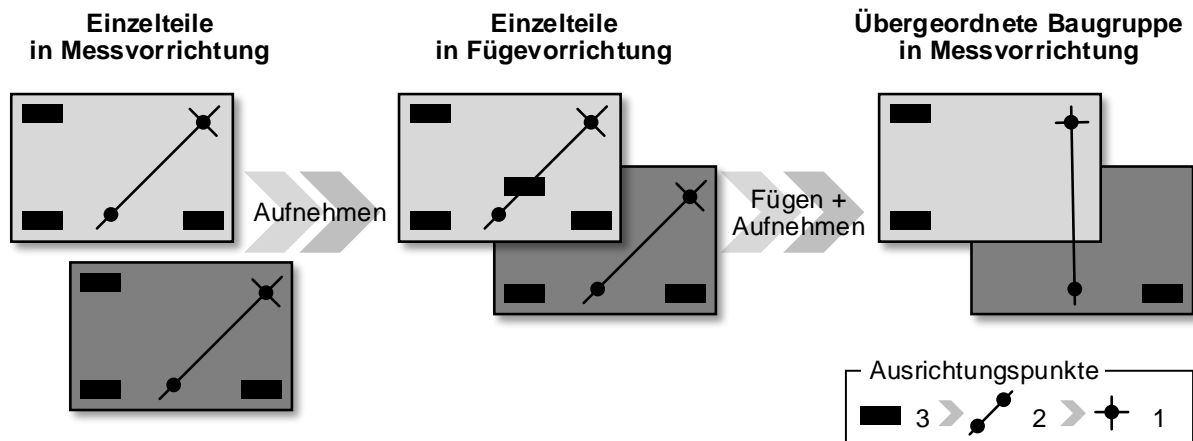
**Abbildung 20:** Auswirkungen des RPS-Bezugssystems auf den Fügeprozess: Ungeeignet gewähltes RPS-System (li.); geeignetes RPS-System, das sich an den Fügeflanschflächen orientiert (re.) [Boh98]

Die Systembezugspunkte bilden auch das Bezugssystem für die Toleranzfestlegung im Fahrzeugkoordinatensystem. Generell können nach [ISO5459] für das Bezugssystem flächige, linienförmige als auch punktförmige Bezugsstellen definiert werden. Bei Pressteilen, bei denen eine gesamte Bezugsfläche im Vergleich zu den sonstigen Geometrietoleranzen relativ große Formabweichungen aufweisen könnten, werden jedoch hauptsächlich punktförmige Bezugsstellen herangezogen. Insbesondere bei Messvorrichtungen sind die physikalischen Aufnahme- punkte (sogenannte Spannungspunkte oder Loch- bzw. Langlochzentrierungen) in der Regel mit den Bezugspunkten identisch. Für diesen Fall resultiert eine Bauteilabweichung, die an den Aufnahme- punkten per Definition „Null“ beträgt. Entgegen der Norm [ISO5459] (dort A, B und C) werden in der Praxis die Bezugsstellen, wenn ihre Wirkrichtung ungefähr in Koordinatenrichtung des Fahrzeugkoordinatensystems liegt, entsprechend mit X, Y oder Z bezeichnet. Durch die zusätzliche Nummerierung der Bezugsstellen werden die Primär- (Nr. 1 bis Nr. 3), die Sekundär- (Nr. 4 und Nr. 5) und die Tertiärebene (Nr. 6) definiert.

Bei großflächigen, labilen Bauteilen, beispielsweise einer Motorhaube oder Seitenwand, kann es notwendig sein, mehr als die genannten sechs Aufnahme- punkte zur Freiheitsgradeinschränkung zu wählen. Dies führt zu einer überbestimmten Bauteillagerung, die notwendig ist, um Verformungen durch die Schwerkraft zu verhindern und diese somit nicht fälschlicherweise als prozessrelevante Einflussgrößen zu interpretieren und zu identifizieren. Bei der überbestimmten Bauteillagerung durch zusätzliche Aufnahme- punkte ist darauf zu achten, dass die Spannkraft innerhalb definierter Grenzen liegt, um die Bauteile durch äußere Kräfte nur minimal zu deformieren. Bei der Daimler AG liegt die aufgebrachte Spannkraft für Karosserieziehteile bei 40 N. Durch diese äußere Zwangsbedingung können weitere Einflüsse, wie beispielsweise die Spannreihenfolge, zu unterschiedlichen Messergebnissen führen. Aus diesem Grund werden alle zusätzlichen Spannungspunkte im bauteilspezifischen Spannplan sowie die Reihenfolge für das Schließen von Spannern vermerkt.

### 3-2-1 Methode (RPS-Ausrichtung) für eine Baugruppe

Bevor die Einzelteile im Rohbau zur Baugruppe gefügt werden, werden diese in der Regel an den jeweiligen RPS-Punkten aufgenommen und zueinander positioniert. Für den gefügten Zusammenbau muss wiederum eine neue Ausrichtung gefunden werden, um die sechs Freiheitsgrade des Zusammenbaus zu sperren. Würden nun sämtliche RPS-Punkte der Einzelteile als Aufnahmestellen berücksichtigt, so hätte dies eine mehrfache Überbestimmtheit zur Folge.



**Abbildung 21:** 3-2-1 Ausrichtungsmethode ausgehend von den Einzelteilen zur übergeordneten Baugruppe

Für die Qualitätsbeurteilung des Zusammenbaus in der Messvorrichtung und für die Aufnahme in der folgenden Fügestation muss jedoch eine statisch bestimmte Lagerung erfolgen. Aus diesem Grund werden nur ausgewählte RPS-Punkte auf den gefügten Zusammenbau übertragen, damit die Ausrichtung erneut dem 3-2-1 Prinzip folgen kann. Dieses Prinzip der Ausrichtstrategie soll gewährleisten, dass die für einen Folgeprozess relevanten Qualitätsanforderungen eingehalten werden können (vgl. Abbildung 21).

Zur Interpretation der Messergebnisse kann die Ausrichtung über das RPS-System in Einzelfällen jedoch ungeeignet sein, da Abweichungen teilweise nicht eindeutig ihrer Ursache zugeordnet werden können. Insbesondere bei Korrekturen von Werkzeugen und Anlageneinstellungen in der Vorserie müssen problemspezifische Aufnahmepunkte gefunden werden, um zielführende Maßnahmen ableiten zu können.

### Best-Fit-Ausrichtung für Einzelteile oder Baugruppen

Bei der Best-Fit-Ausrichtung gibt es keine definierten Ausrichtpunkte, in denen Ist- und Soll-Geometrie übereinstimmen. Die Ausrichtung erfolgt vielmehr über einen iterativen Algorithmus nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate. Nach der Best-Fit-Ausrichtung sind Soll- und Ist-Geometrie so zueinander positioniert, dass die Summe der quadrierten Abstände aller betrachteten Messpunkte ein Minimum annimmt. Die Best-Fit Methode kommt dann zum Einsatz, wenn das Justieren der Bauteile möglich ist und eine für die betrachteten Messpunkte oder Bereiche optimierte Teillage gefunden werden muss. Typische Anwendungen im Werk-

zeugbau sind beispielsweise die qualitative Bewertung von Rückfederungskompensationsmaßnahmen oder die Ermittlung der Teillage in Folgestufen, um gegebenenfalls Werkzeugkorrekturmaßnahmen daraus abzuleiten.

Im Rohbau wird die Best-Fit-Methode hauptsächlich dazu verwendet, Klappen- und Anbauteile am Fahrzeug auszurichten und zu montieren. Dabei werden der Fugenspalt sowie der Versatz zu den angrenzenden Bauteilen mittels entsprechender Lasermesstechnik an definierten Messstellen am Umriss der Klappen- und Anbauteile vermessen, um anschließend die „optimale“ Position für die Montage zu berechnen. Neben der perfekten Verteilung der Spaltmaße und einem optimalen Versatz des Anbauteils kann das manuelle Nachjustieren dadurch deutlich reduziert werden.

### 2.3.2 Tolerierung von Pressteilen und Baugruppen

Abweichungen vom gewünschten Nennmaß, welches die gewünschte Zielgröße eines Bauteilmaßes beschreibt, können aufgrund von Fertigungsschwankungen nicht vollständig unterbunden werden. Bei den Grenzen einer zulässigen Abweichung vom Normalmaß wird zwischen „oberem Abmaß  $A_o$ “ und „unterem Abmaß  $A_u$ “ unterschieden (Auswertegrößen in Messberichten). Das größte zulässige gemessene Ist-Maß wird als „Höchstmaß  $G_o$ “ und das kleinste zulässige Ist-Maß als „Mindestmaß  $G_u$ “ bezeichnet. Die Differenz beider Maße bildet dabei das sogenannte Toleranzband [Kle02] u. [Kle06], welches zur Bewertung der Einzelteile oder Baugruppen herangezogen wird. Das Toleranzband bezieht sich daher stets auf eine der drei Toleranztypen, bestehend aus Form, Richtung oder Lage [ISO5458]. Für Richtungs- und Lagetoleranzen muss ein Bezugssystem angegeben werden, dieses kann entweder das über die 3-2-1 Methode aufgespannte Fahrzeugkoordinatensystem darstellen oder durch einen zusätzlichen Bezug definiert werden (beispielsweise Stufenmaße mit dem Bezug auf Nachbarflächen).

Im Folgenden werden zunächst für die Pressteile typische Toleranzen dargestellt, bevor im Anschluss daran auf die Tolerierung der Baugruppen eingegangen wird.

#### *Toleranzklassen für Pressteile*

Maß- und Formanforderungen an Pressteile resultieren im Wesentlichen aus funktionalen Anforderungen der Gesamtkarosserie oder aus Anforderungen aus den im Fertigungsprozess nachfolgenden Produktionsprozessen, beispielsweise aus der Fügetechnik im Rohbau. Von besonderer Bedeutung sind dabei Umriss- und Lochtoleranzen, Funktions-, Anschluss- und Sichtflächen sowie fugenbildende Abkantungen für folgende Falz- oder Fügeoperationen.

Der Beschnittumriss sowie Löcher werden in der Regel mit Lagetoleranzen von  $\pm 0,5$  mm toleriert. Besitzen diese jedoch keine Relevanz für die Fertigung oder die Funktion des Bauteils, können diese auch entsprechend großzügiger toleriert sein ( $\pm 1,0$  mm) [Boh13]. Dadurch können kostspielige Korrekturen der Schneidwerkzeuge zur Einhaltung der Lagetoleranz vermieden werden. Eine besonders enge Lagetoleranz besitzen hingegen Aufnahmelöcher (Loch-Langloch Kombinationen bei der RPS-Aufnahme von Strukturteilen), da sie sowohl

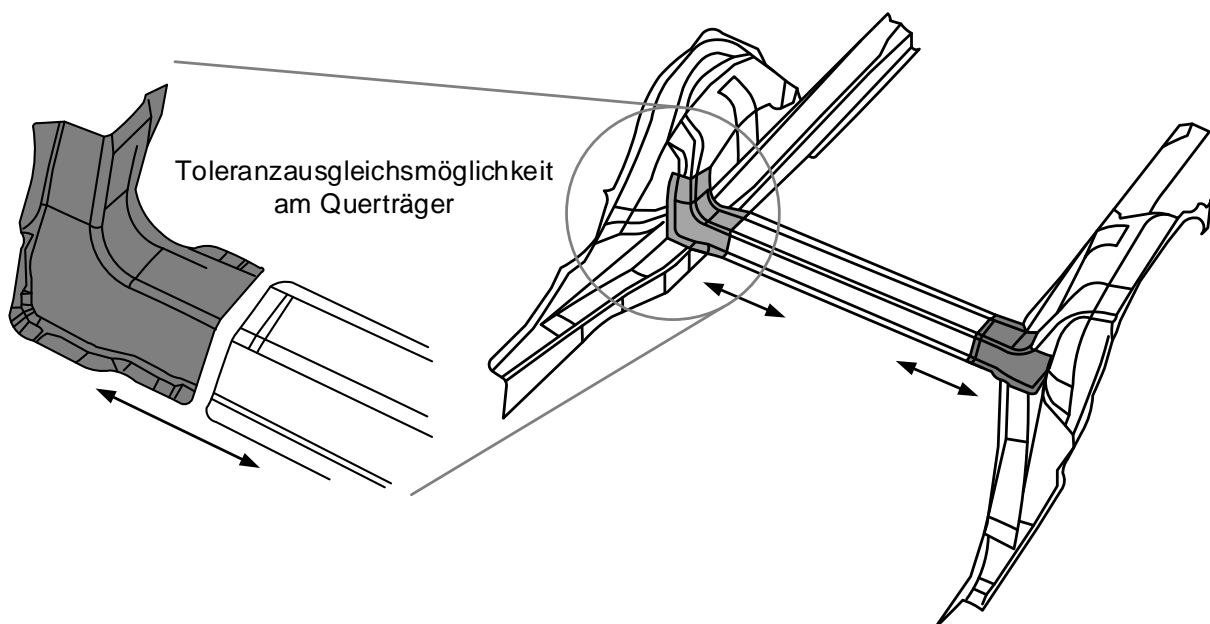
maßgebend für die Teillage bei der Qualitätskontrolle in der Messvorrichtung als auch bei der Weiterverarbeitung im Rohbau sind. Die RPS-Aufnahmelöcher sind aus diesem Grund mit  $\pm 0,1$  mm toleriert.

Für Pressteilflächen werden sowohl Form- als auch Lagetoleranzen definiert. Um die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus sicherzustellen, werden Fügeflansche insbesondere bei Strukturteilen oftmals mit Lagetoleranzen von  $\pm 0,5$  mm versehen. Formtoleranzen, beispielsweise die Ebenheit eines Fügeflansches, ergeben sich meist durch die unterschiedlichen Fügeverfahren (beispielsweise Kontaktflächen beim Laserlöten).

Bei Teilen der Außenhaut ist der Abkantumriss des Falzflansches von besonderer Bedeutung, da dieser für den späteren Fugenverlauf zwischen den angrenzenden Bauteilen maßgeblich ist. Die Lagetoleranz für den Abkantumriss beträgt deshalb meistens nur  $\pm 0,25$  mm.

### ***Toleranzklassen für Baugruppen und die Karosserie***

Die Qualitätsanforderungen der Baugruppe sind mit denen der Einzelteile vergleichbar. Für eine wirtschaftliche Produktion dürfen jedoch die Einzelteile unter den gegebenen Materialchargen und Prozessschwankungen nicht unnötig eng toleriert werden. Dieser Konflikt wird im Karosseriebau in sehr vielen Fällen durch eine Unterbrechung der sogenannten Toleranzketten gelöst (Beispiel: Toleranzausgleich über Schiebeflansche in Flächenrichtung vgl. Abbildung 22). Nicht an allen Stellen der Karosserie lässt sich ein konstruktiver Toleranzausgleich realisieren. Ist dies der Fall, kann die Aneinanderkettung der ungünstigsten Extremtoleranzen jedoch dazu führen, dass die Qualitätsanforderungen der Baugruppe nicht erfüllt werden [Boh98] u. [Von02].



**Abbildung 22:** Konstruktiver Toleranzausgleich in y-Achsenrichtung des Fahrzeugkoordinatensystems am Beispiel eines Querträgers [Bir13]

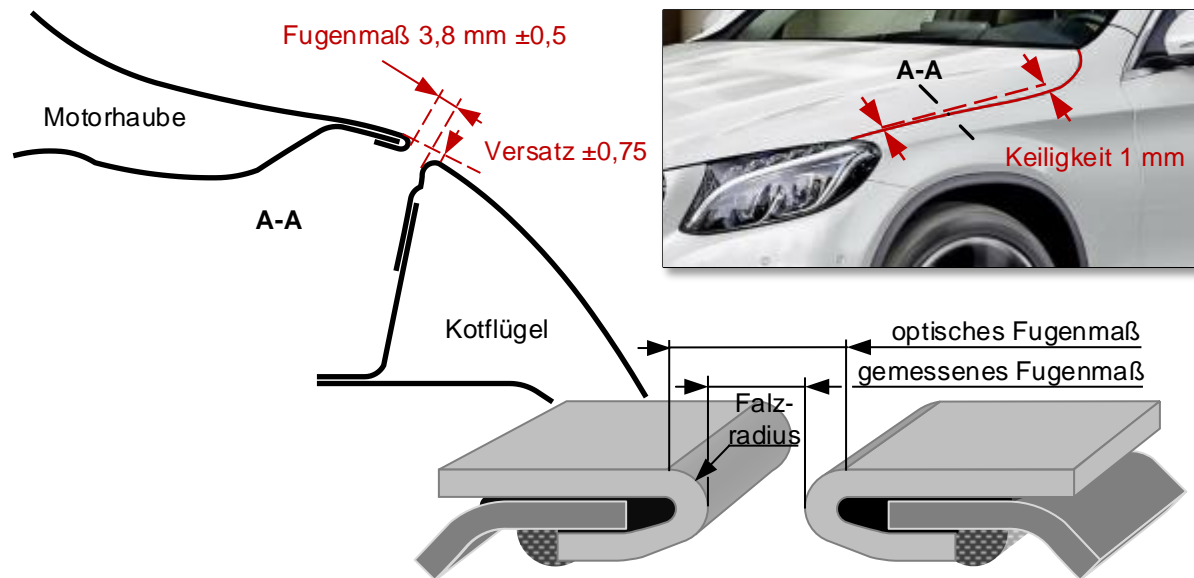
Mit Hilfe sogenannter Toleranzrechnungen werden auf Basis der zunächst definierten Einzelteiltoleranzen Analysen durchgeführt, die deren Auswirkungen auf die Baugruppe zeigen sollen. Diese Analysen werden mit sogenannten Digital Mock-Ups (DMU) simuliert [Tie13], dem virtuellen Aufbau der Baugruppe oder Gesamtkarosserie auf Basis der CAD-Daten. Der durch Produktionsschwankungen verursachte Maßhaltigkeitseinfluss der Einzelteile wird dabei mittels einer angenommenen statistischen Häufigkeitsverteilung innerhalb der Form- und Lagetoleranzen berücksichtigt [Leu10]. Als Ergebnis dieser Toleranzanalyse ergibt sich eine Häufigkeitsverteilung über die Maßhaltigkeit der Baugruppe. Für einen robusten Serienprozess sollten 90 bis 98 % der Simulationsläufe innerhalb der Form- und Lagetoleranzen der Baugruppe liegen. Ist dies nicht der Fall, so werden in der Regel Änderungen der Einzelteiltoleranzen, Änderungen im Aufnahmekonzept oder in Bezug auf den konstruktiven Toleranzausgleich vorgenommen.

Die Analyse auf Basis von DMUs mit starren CAD-Daten lässt jedoch komplexe Zusammenhänge unberücksichtigt wie beispielsweise Bauteilsteifigkeiten der Einzelteile und von Baugruppen, Rückfederungseffekte, das Verspannen von Bauteilen in Vorrichtungen oder das Materialverhalten des Bauteils selbst.

An keiner Stelle der Karosserie werden die Toleranzen von Baugruppen und deren Auswirkung vom Kunden optisch deutlicher wahrgenommen als am Übergang zwischen zwei benachbarten Türen, Vorderkotflügel zu Motorhaube, Heckklappe usw. Im sogenannten Fugen- und Radienplan werden deshalb für definierte Schnittstellen die Fugen-, Radien- und Übergangsmaße inklusive Toleranzen und die Audit-Messschnitte für das Gesamtfahrzeug beschrieben. Von besonderer Bedeutung sind dabei folgende Maße [Boh13]:

- Fugenradius am Falz
- das Fugenmaß, auch Spaltmaß genannt
- der Fugenversatz
- die Veränderung entlang des Verlaufs der Fuge (Keiligkeit)

Abbildung 23 fasst die genannten Maße exemplarisch für den Übergang Motorhaube Kotflügel zusammen und verdeutlicht durch die genannten Toleranzen die hohen Anforderungen an die Maßhaltigkeit der Klappenteile. Insbesondere durch das gemessene Fugenmaß und durch den Falzradius wird versucht, das vom Kunden wahrgenommene, optische Spaltmaß auf ein Minimum zu reduzieren.



**Abbildung 23:** Tolerierung der Fugenmaße, Versatz und Keiligkeit bei Anbauteilen der Karosserie; Vergleich von optischem und gemessenem Fugenmaß

### 2.3.3 Messtechnik für die Qualitätsbeurteilung

Zur Beurteilung der Maßhaltigkeit von Bauteilen werden in der Automobilindustrie hauptsächlich Systeme der taktilen und optischen Koordinatenmesstechnik eingesetzt. Insbesondere die Systeme der optischen Koordinatenmesstechnik haben in der vergangen Dekade stark an Bedeutung gewonnen. Sie bieten gegenüber den taktilen Systemen aufgrund der schnelleren Oberflächenerfassung (Oberflächen-Scan) einige Vorteile bei der Analyse und der damit verbundenen Festlegung von Korrekturmaßnahmen im Rahmen der Qualitätsoptimierung von Zusammenbauten, Baugruppen und der Karosserie.

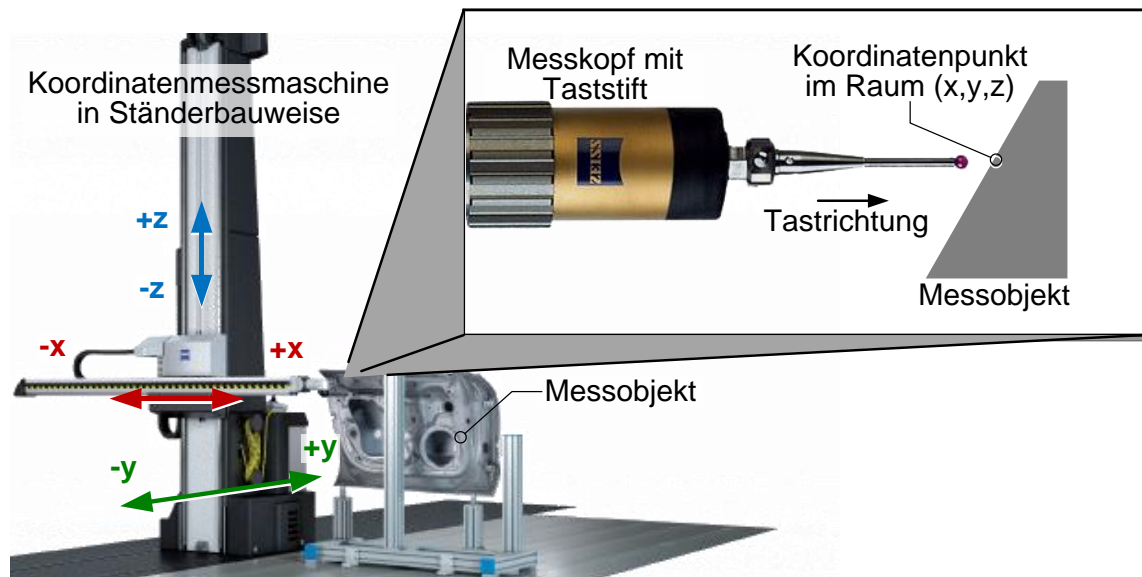
Im Folgenden werden die Grundlagen der Koordinatenmesstechnik und die derzeitigen Analysemöglichkeiten der Maßhaltigkeit von Einzelteilen und Karosseriebaugruppen vorgestellt.

#### *Taktile Koordinatenmesstechnik*

Bei der Koordinatenmesstechnik werden die kartesischen Koordinaten eines Punktes auf dem Messobjekt ermittelt (DIN EN ISO 10360-1). Bei taktilen Messsystemen erfolgt dies durch An-tasten einer definierten Raumkoordinate entlang einer definierten Richtung mit Hilfe eines geeigneten Messtasters.

Zur Erfassung der Raumkoordinaten wird dabei zwischen schaltenden und messenden Systemen unterschieden. Bei beiden Systemen wird der Taststift nach dem Bauteilkontakt ausge-lenkt. Bei schaltenden Systemen wird jedoch die Raumkoordinate des Tasters im Moment der Auslenkung festgestellt. Bei messenden Systemen hingegen befindet sich eine zusätzliche Messensorik im Messkopf, welche die Auslenkung des Taststiftes misst. Messende Systeme sind im Vergleich zu schaltenden Systemen für sogenannte Scanning Aufgaben besser geeignet, da der Taststift im Bauteilkontakt bleiben kann und nicht für jeden neuen Messpunkt der Taster erneut vom Bauteil weggefahren werden muss [Wec12]. Grundvoraussetzung für die taktile

Messtechnik ist dabei stets eine strukturstabile Werkstoffoberfläche, die sich beim Antasten möglichst wenig verformt (vgl. Abbildung 24).



**Abbildung 24:** Koordinatenmessmaschine in Ständerbauweise nach dem Prinzip der taktilen Koordinatenmesstechnik [Zei16]

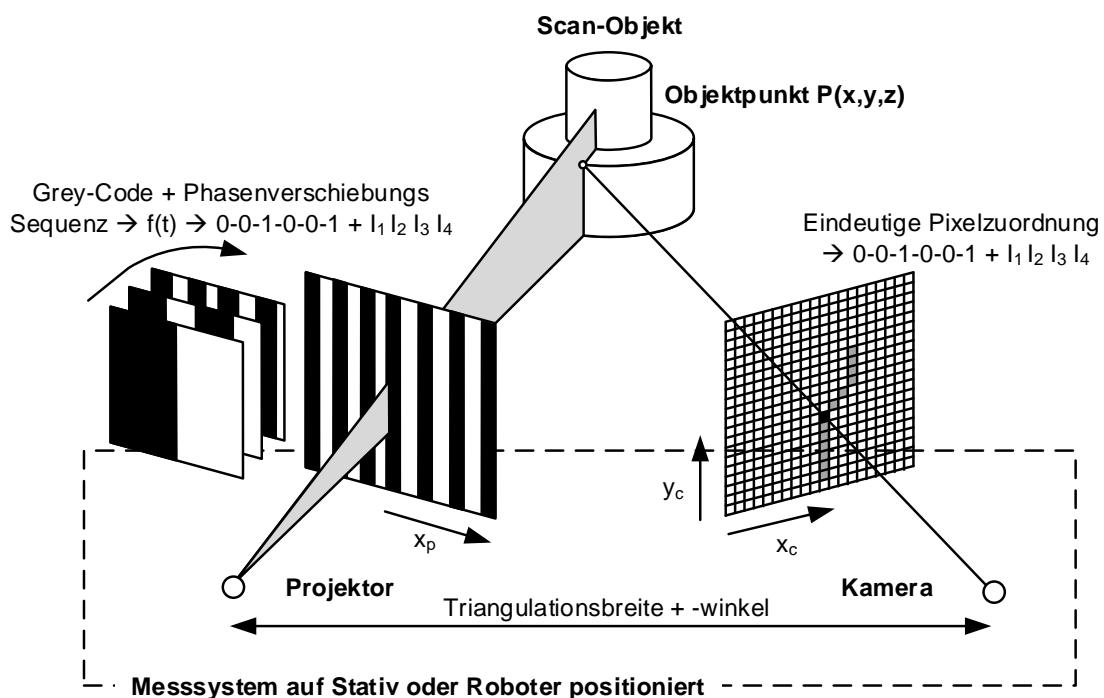
Die Tastsysteme werden entweder relativ zu den Werkstücken (Portal verfährt) oder die Werkstücke relativ zu den Tastsystemen (Werkstück verfährt) bewegt. Bei der erst genannten Variante von Messmaschinen sind die drei zueinander rechtwinklig beweglichen Führungen meist in Portal-, Ständer- oder Brückenbauweisen ausgeführt.

Trotz der teilweise sehr großen Messbereiche von mehreren Metern kann bei der taktilen Messtechnik eine Messgenauigkeit von  $5\ \mu\text{m}$  erzielt werden. Verbunden mit der hohen Wiederholgenauigkeit stellt deshalb die taktile Messtechnik derzeit die Standardmethode für Qualitäts- und Fertigungskontrollen in der Serienproduktion im Presswerk und Rohbau dar. Die Erfassung einer großen Anzahl an Flächenstützpunkten, wie sie für die farbliche Markierung der Formabweichung auf Bauteilplots notwendig sind, nimmt hingegen bei taktilen Systemen verhältnismäßig viel Zeit in Anspruch. Die Fehlercharakterisierung und Interpretation von Messergebnissen unterstützen diese farblichen Bauteilplots jedoch in hohem Maße, weshalb die im Folgenden beschriebene optische Messtechnik an Bedeutung gewonnen hat.

### ***Optische Messsysteme - Streifenprojektionsverfahren***

Je nach Anwendungsgebiet gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher optischer Messsysteme [Güh02]. In der optischen 3D-Messtechnik zur vollflächigen Bauteilmessung kommen in der Automobilindustrie Systeme unterschiedlicher Hersteller zur 3D-Digitalisierung zum Einsatz, wobei alle auf dem Triangulationsprinzip mittels Streifenprojektion beruhen [Wec06]. Als weit verbreitete Systeme sind zum einen das System Atos der Firma GOM sowie das System COMET L3D aus dem Hause Carl Zeiss Optotechnik zu nennen.

Bei beiden Systemen wird mittels eines Projektors ein Streifenmuster auf das zu messende Objekt projiziert und das auf dem Messobjekt verzerrte Muster durch eine in definiertem Winkel zum Projektor positionierte Kamera erfasst (vgl. Abbildung 25). Das schmalbandige blaue Licht des Projektors wird dabei in geringem Maße auf der Oberfläche des Messobjektes reflektiert, sodass heutzutage auf eine Vorbehandlung der Oberfläche des Messobjektes weitestgehend verzichtet werden kann. Die Blaulicht-LED-Projektoren mit ihrer verhältnismäßig geringen Wärmeentwicklung sowie die Kamera(s) (GOM mit Stereo-Kamerasystem) sind in ein kompaktes Gehäuse integriert, das auf einem Stativ oder an einem Roboter in einer Messzelle montiert werden kann.



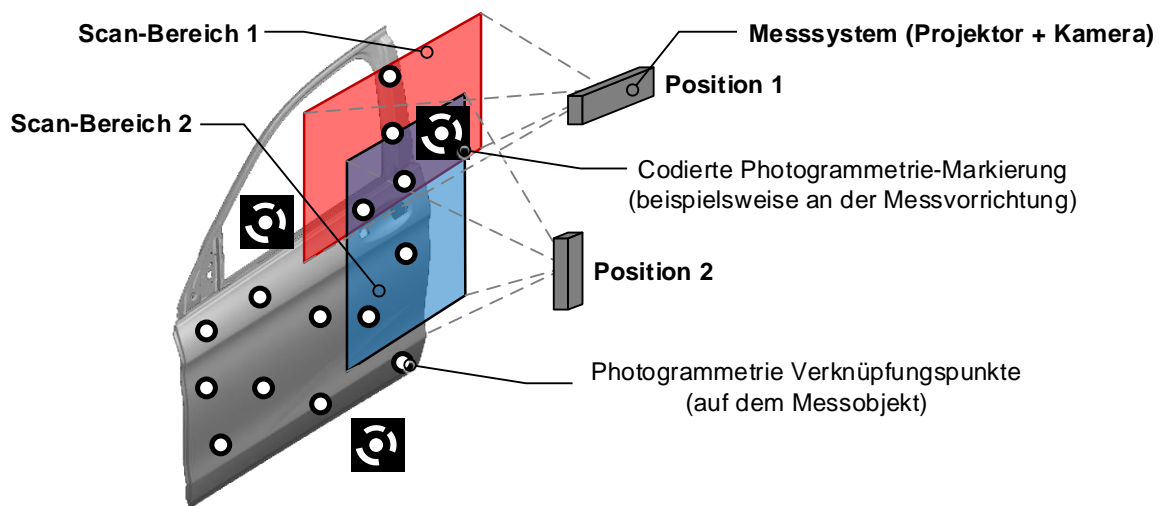
**Abbildung 25:** Prinzip des Streifenprojektionsverfahrens nach dem Triangulationsprinzip sowie der eindeutigen Zuordnung von projiziertem und erfasstem Bildpunkt über die Grey-Code Codierung [Wec06]

Über eine Sequenz mehrerer Projektionen (Gray-Code in Verbindung mit Phasenverschiebungsverfahren) mit unterschiedlicher Streifenbreite und den von der Kamera dazu aufgenommenen Bildern ergibt sich eine eindeutige Zuordnung von Projektion und Bildpixelpunkt. Über den Triangulationswinkel werden nun vom System für jedes Bildpixel Raumpunkte berechnet [Wei10]. Alle ermittelten Punkte bilden somit eine Punktwolke, die durch Polygonisieren zu einem Flächennetz transferiert werden. Das Flächennetz wiederum lässt sich softwareseitig zu den Soll-Daten (CAD-Daten) ausrichten und somit kann der Abstand zwischen Ist- und Soll-Geometrie eines Werkstücks gemessen werden.

Die Größe des sogenannten Flächenscans ist dabei auf einen Bereich beschränkt, der von der Kamera vollständig erfasst und durch den Projektor beleuchtet wird. Je nach Abstand der Messeinheit zum Messobjekt ergeben sich Scan-Flächen von 30 mm x 20 mm bis hin zu 2000 mm x 1500 mm. Für die großflächigen Bauteile im Automobilbau ist dies jedoch nicht



ausreichend. Durch die Photogrammetrie lassen sich jedoch auch einzelne Flächenscans zusammenfügen, die aus unterschiedlichen Kamerapositionen ermittelt wurden. Das zu messende Objekt oder die Messvorrichtung wird dabei mit Objektmerkmalen bzw. Referenzpunkten versehen, die auf den einzelnen Bildern wiederum direkt zugeordnet werden können (vgl. Abbildung 26). In den derzeit am Markt erhältlichen Systemen für große Messbereiche sind Photogrammetrie und Referenzpunkterfassung bereits vollständig im Messsystem integriert [GOM14].



**Abbildung 26:** Anwendung der Photogrammetrie zur Erweiterung des Flächenscanbereichs; schematisch am Beispiel einer optischen Vermessung einer Tür

Die Vor- und Nachteile der taktilen sowie optischen Messtechnik sind in Tabelle 2 einander gegenübergestellt.

	Taktile Messtechnik	Optische Messtechnik nach dem Prinzip der Streifenprojektion
<b>Anforderungen Bauteilsteifigkeit</b>	Messung berührt Bauteil, bei labilen Bauteilen problematisch	berührungslos
<b>Genauigkeit</b>	sehr hoch bis in den $\mu\text{m}$ Bereich	je nach Einstellung bis zu 0,01 mm
<b>Anforderungen an die Bauteiloberfläche</b>	unabhängig	problematisch bei Transparenz, Absorption, Glanz
<b>Messumfang</b>	punktuell, Erfassung von Einzelmerkmalen	„digitale Kopie“ des Messobjektes
<b>Darstellung der Messergebnisse</b>	einzelne Raumkoordinaten	flächige Falschfarbenbilder
<b>Auswertemöglichkeiten</b>	Solange sich das Messobjekt auf der Koordinatenmessmaschine befindet, können zusätzliche Umfänge betrachtet werden	nachträgliche Auswertung lässt sich durch „digitale Kopie“ ausführen
<b>Messaufbau</b>	stationäre Koordinatenmessmaschinen	mobile Systeme, Stativaufbau, Messzelle
<b>Messvolumen</b>	durch Koordinatenmessmaschine eingeschränkt	variables Volumen durch Photogrammetrie

**Tabelle 2:** Gegenüberstellung Vor- und Nachteile der optischen und taktilen Messtechnik

### ***Messlehren - Prüfvorrichtungen***

Zur schnellen und einfachen Prüfung in der Serienproduktion ohne der Verwendung von Messmaschinen werden oftmals auch spezielle Lehren hergestellt. Damit lassen sich gezielt bestimmte Maße, Konturen oder Übergänge rasch optisch bzw. durch Tasten prüfen. Die zu prüfenden Einzelteile oder Baugruppen müssen einfach in die Prüflehre gelegt bzw. eingespannt werden. Anhand der in die Prüflehre integrierten Anschlussgeometrie lässt sich auf einfache Weise über die „Lehrenluft“ der umlaufende Spalt sowie ein möglicher Versatz ermitteln (vgl. Abbildung 27).



**Abbildung 27:** Prüflehre zur produktionsbegleiteten Bauteilbegutachtung (Übergang- und Spaltmaße) nach dem Falzen für einen Motorhauben-Zusammenbau

## 2.4 Rückfederungsbedingte Form- und Maßabweichung an Bauteilen aus Blech

Unter dem Begriff der „Rückfederung“ versteht man die reversible Formänderung eines Bauteils oder einer Baugruppe durch das Entlasten von äußeren Kräften nach dem Umformen. Grundsätzlich tritt bei allen Verfahren der umformtechnischen Herstellung von Karosserieteilen die Rückfederung mehr oder weniger stark auf und stellt in der Regel die Hauptursache für Abweichungen von der Soll-Geometrie dar. Jegliche Korrektur der Maßabweichung durch Maßnahmen, beispielsweise durch Werkzeugänderungen, wird als Rückfederungskompensation bezeichnet und bindet, insbesondere während des Try-Out, in der Zeitphase des Typenlaufs erhebliche Ressourcen sowohl von Presswerkzeugen als auch von Produktionsanlagen des Rohbaus.

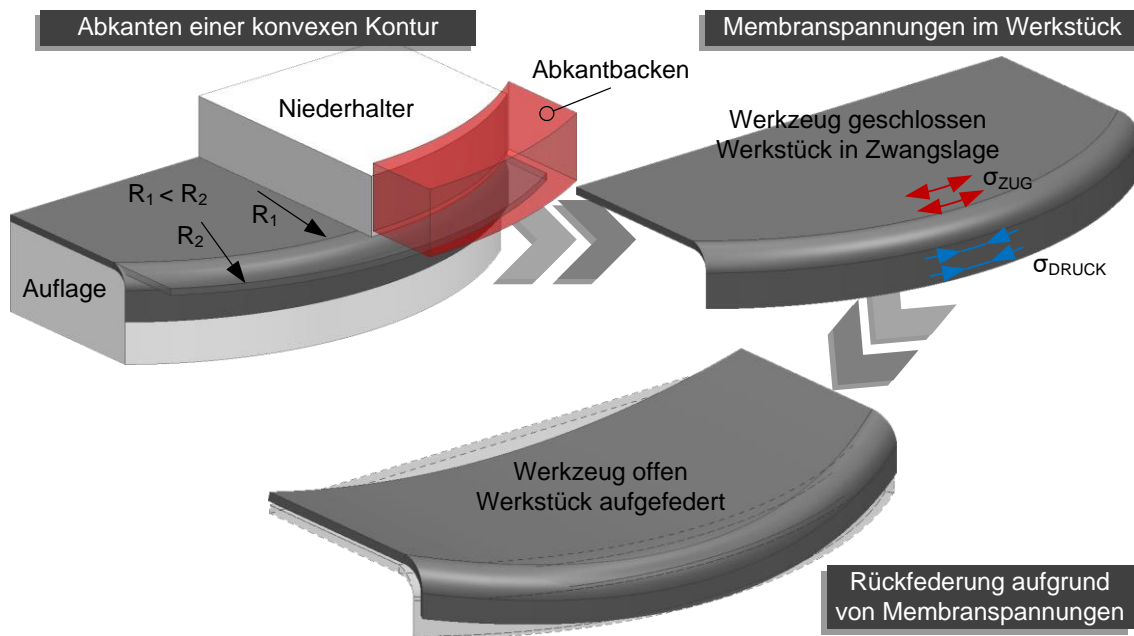
Bevor jedoch Maßnahmen zur Kompensation abgeleitet werden können, müssen die unterschiedlichen Rückfederungsmechanismen und die damit verbundenen Ursachen für Formabweichungen erkannt werden. Beispielsweise sind die Zusammenhänge bei einer geradlinigen Flanschbiegung deutlich einfacher zu verstehen, als eine komplexe im Raum tordierte Geometrie eines Türrahmens.

Aufgrund von äußeren Prozesskräften entstehen in der betrachteten Struktur (Pressteil oder Baugruppe) Spannungszustände, die mit den äußeren Lasten im Gleichgewicht stehen. Daraus resultiert ein elastischer Dehnungsanteil und bei Verformungen oberhalb der Streckgrenze auch ein plastischer Dehnungsanteil. Die elastischen Dehnungsanteile können als eine in der „Struktur gespeicherte“ und lokal sehr unterschiedlich verteilte elastische Energie (Federenergie) betrachtet werden. Nach dem Entfernen der äußeren Lasten von der Struktur (Öffnen der Werkzeuge) stellt sich ein neues makroskopisches Spannungsgleichgewicht in der Struktur ein. Die Spannungsumlagerung bewirkt die Rückfederung des Werkstücks, der Betrag der Rückfederung ist dabei eine Funktion vom Ausgangsspannungszustand (d. h. die Höhe der elastischen Energie und deren Verteilung in der Struktur), dem Werkstoffverhalten und der Geometrie der Struktur. Nach dem Öffnen der Werkzeuge sind jedoch noch Restspannungen im Bauteil vorhanden. Diese sogenannten Eigenspannungen werden besonders deutlich, wenn beispielsweise bei der Pressteilfertigung nach der Beschnittoperation die Wirkung der Eigenspannung verlagert wird und erneut eine makroskopische Formänderung auftritt.

Generell gilt, je geringer die elastische Energie in der Struktur, desto geringer ist die resultierende Formabweichung. Bei Pressteilen resultiert die elastische Energie aus Spannungszuständen, die durch die Umformung entstehen. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Membran- und Biegespannungen, die ein sehr unterschiedliches Rückfederungsverhalten des Ziehteils bewirken können.

### 2.4.1 Rückfederung resultierend aus Membranspannungen

Bei einer homogenen Spannungsverteilung durch den Umformvorgang über die Blechdicke, wird von der sogenannten Membranspannung gesprochen. Je nach herrschenden Zug- oder Druckspannungen kann sich der räumlich ausgebildete Werkstückbereich nach der Entlastung zusammenziehen oder ausdehnen. In Abhängigkeit von der Geometrie können bei der Entlastung aus den Membranspannungen Biegemomente resultieren, die zu komplexeren Verformungen des Gesamtbauteils führen. Dies sei am Beispiel einer einfach konvex abkanteten Geometrie veranschaulicht (vgl. Abbildung 28). Durch das Abkanten entlang der konvexen Biegelinie entstehen beim Abkanten im Flanschbereich Druckspannungen (bis hin zur Faltenbildung) und auf der Bauteiloberfläche im geschlossenen Werkzeugzustand Membranzugspannungen. Bei der Entlastung würde dies zum Zusammenziehen der Oberseite und zum Ausdehnen der Abkantung führen. Folglich würde sich die Struktur in der Mitte „durchbiegen“.

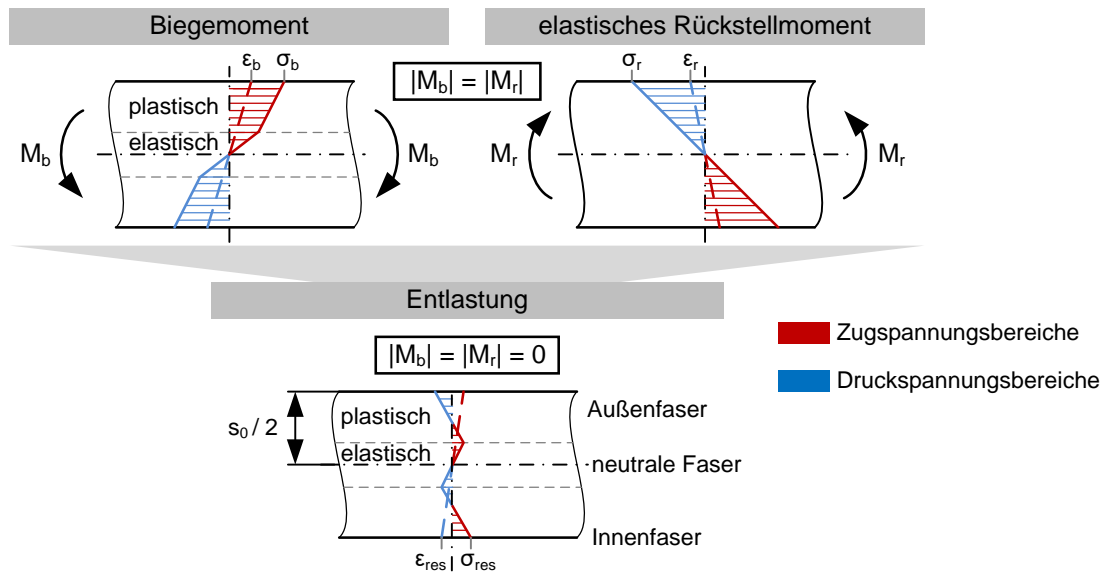


**Abbildung 28:** Prinzipielle Darstellung der Rückfederung aufgrund von Membranspannungen resultierend aus einer konvexen Abkantkontur

### 2.4.2 Rückfederung resultierend aus Biegespannungen

Die ungleichmäßige Spannungsverteilung über die Blechdicke wird als Biegespannung bezeichnet. Der Spannungsunterschied zwischen Blechaußen- und -innenseite resultiert aus der Biegelast. Dabei werden die äußeren Fasern gedehnt, sie besitzen neben dem elastischen auch einen plastischen Dehnungsanteil. Weiter innen liegende Fasern werden hingegen nur elastisch gedehnt. Die Spannungs- und Dehnungsverteilung über die Blechdicke, aufgrund einer Belastung durch ein äußeres Biegemoment zeigt Abbildung 29. Eine Entlastung kann dabei anschaulich nach dem Superpositionsprinzip mit dem Hinzufügen eines Rückbiegemoments aus der Abkantung gleichgesetzt werden. Vereinfachend soll dieses als elastisches Biegemoment angenommen werden, was betragsmäßig der elastisch-plastischen Belastung entspricht, jedoch ent-

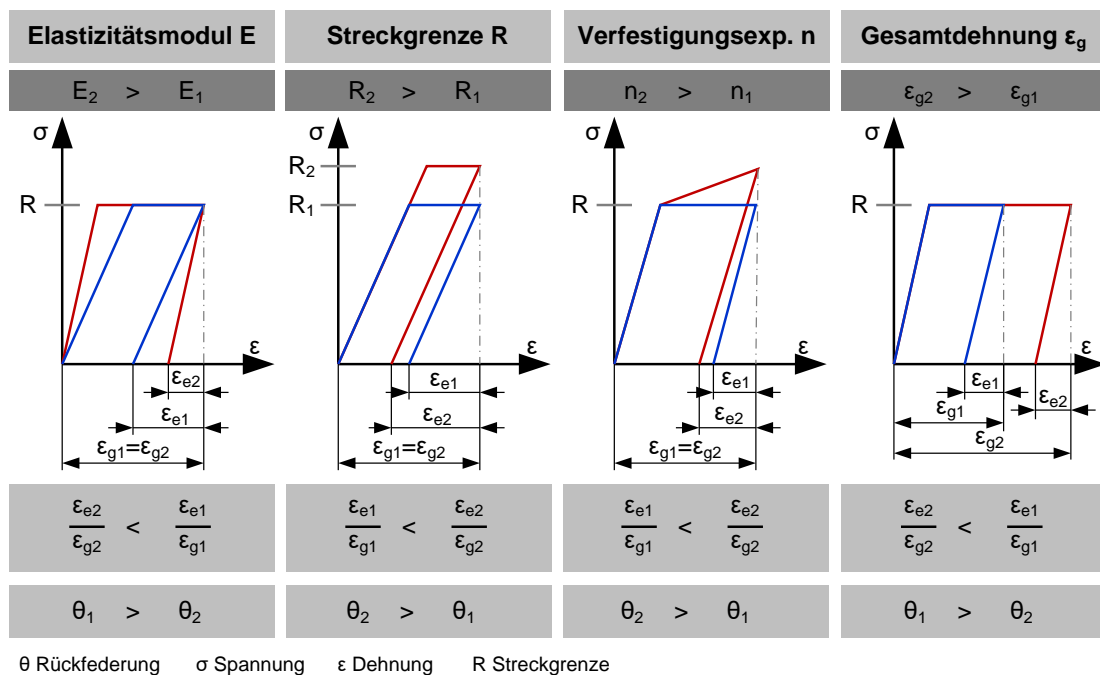
gegengerichtet ist. Das Rückbiegemoment führt aufgrund der Dehnungsverteilung zum Zusammenziehen der äußeren Faser und zu einer Längung der inneren Faser. Das Blech federt folglich soweit zurück, bis sich über die Blechdicke ein Spannungsgleichgewicht eingestellt hat.



**Abbildung 29:** Spannungs- und Dehnungsverteilung vor dem Biegeumformen und nach der Rückfederung resultierend aus dem elastischen Rückstellmoment [Lan75]

### 2.4.3 Einflussgrößen auf die Rückfederung aufgrund des Werkstoffverhaltens

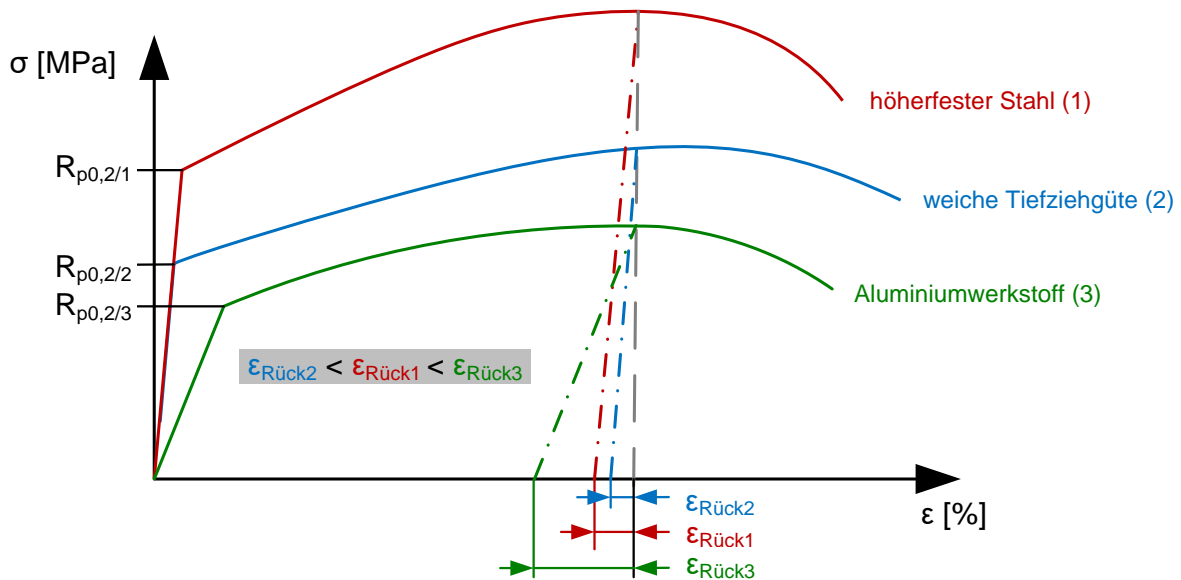
Die wesentlichen Einflussgrößen auf die Rückfederung bilden neben der Geometrie der Press- teile auch die Werkstoffeigenschaften. Abbildung 30 fasst schematisch den Einfluss einiger Werkstoffkennwerte auf die Rückfederung  $\theta$  zusammen.



**Abbildung 30:** Einfluss einiger Werkstoffkennwerte auf die Rückfederung schematisch für zwei verschiedenen Werkstoffe (blaue bzw. rote Kurven) [Kah86]

Mit steigendem  $E$ -Modul und zunehmender Gesamtdehnung  $\varepsilon_g$  verringert sich die Rückfederung, da der Anteil der elastischen Dehnung  $\varepsilon_e$  an der Gesamtdehnung sinkt. Eine Erhöhung der Streckgrenze  $R_p$  und des Verfestigungsexponenten  $n$  führt jedoch zur Vergrößerung der Rückfederung, da der Anteil der elastischen Dehnung an der Gesamtdehnung steigt.

Ein Vergleich der Spannungs-Dehnungsdiagramme unterschiedlicher Werkstoffe zeigt diesen Einfluss auf die Rückfederung. In Abbildung 31 sind dazu exemplarisch ein höherfester Stahl (1), ein Stahl mit weicher Tiefziehgüte (2) und ein Aluminiumwerkstoff (3) dargestellt. Bei identischer Gesamtdehnung  $\varepsilon_{ges}$  ist der elastische Anteil der weichen Tiefziehgüte am geringsten. Den höchsten elastischen Anteil besitzt der Aluminiumwerkstoff aufgrund seines geringeren  $E$ -Moduls. Durch die in den letzten Jahren zunehmende Verwendung von höherfesten Stählen und Aluminiumlegierungen im Karosseriebau hat die Problematik der Anwendung geeigneter Kompensationsstrategien der Rückfederung von Pressteilen im modernen Karosseriebau sehr an Bedeutung gewonnen.



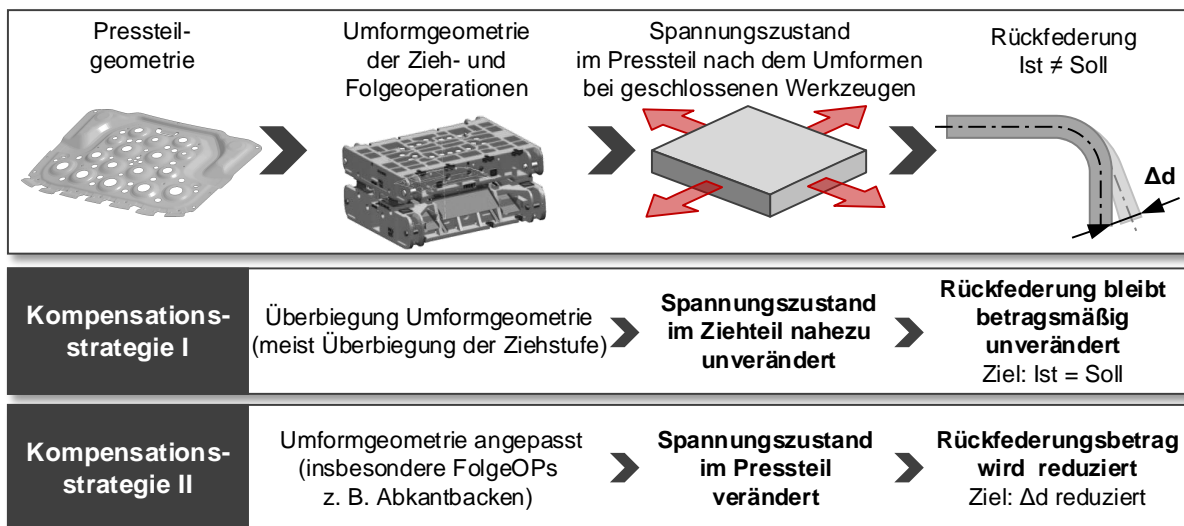
**Abbildung 31:** Abhängigkeit von der Lage der Spannungs-Dehnungskurve und dem  $E$ -Modul auf den Betrag der Rückfederung

## 2.5 Maßnahmen zur Maßhaltigkeitsoptimierung – Kompensation der Rückfederung

Zur Verbesserung der Maßhaltigkeit von einzelnen Pressteilen werden unterschiedliche Maßnahmen bei der Werkzeug- und Rohbauanlagenauslegung unternommen, um die Rückfederungseffekte in Bezug auf ganze Baugruppen bzw. die Gesamtkarosserie zu kompensieren. Sowohl bei der Einzelteilmontage im Presswerk als auch dem Zusammenbau im Rohbau bieten sich dabei unterschiedliche Kompensationsmöglichkeiten an, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

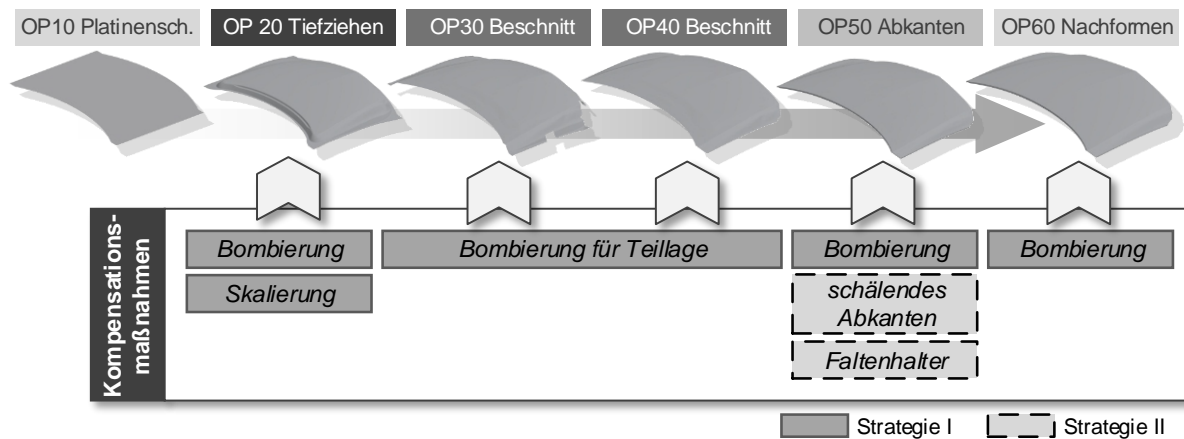
### 2.5.1 Maßnahmen am Pressteil

Die Kompensationsmaßnahmen für die Einzelteile aus Blech werden in der Regel von Fachleuten in der Umformmethodenplanung festgelegt und basieren heutzutage auf Umformsimulationen sowie auf Erfahrungen aus vorangegangenen Pressteilen mit ähnlicher Geometrie. Die Strategie der Rückfederungskompensation kann, je nach Pressteilgeometrie, Werkstoff und Blechdicke, sehr unterschiedlich festgelegt werden. Eine allgemeingültige Vorgehensweise lässt sich daher nicht nennen [Gös10a]. Beginnend von der Ziehstufe lassen sich über die Folgeoperationen sehr unterschiedliche Maßnahmen einbringen. Als Ursache für die Rückfederung wurden in Kapitel 2.4.1 und 2.4.2 Spannungszustände beschrieben, die nach einer Entlastung und einer Spannungsumlagerung zu einem unerwünschten Gleichgewichtszustand und dabei zu Deformationen im Bauteil führen. Bei der Rückfederungskompensation bieten sich nun zwei Möglichkeiten an, auf diese unerwünschten Deformationen Einfluss zu nehmen (vgl. Abbildung 32). Dies ist zum einen eine der Rückfederungsrichtung entgegen gerichtete Formänderung der Werkzeugwirkflächen (Kompensationsstrategie I), zum anderen kann die gezielte Einflussnahme auf den Spannungszustand erfolgen, um einen Rückfederungseffekt zu reduzieren (Änderung des Spannungszustandes, oft Rückfederungsvermeidung genannt – Kompensationsstrategie II). Insbesondere bei Folgeoperationen (Abkant- und Nachformoperationen) lässt sich bei geschlossenen Umformwerkzeugen der Spannungszustand im Bauteil durch Änderungen der Umformgeometrie beeinflussen und somit der aus der Rückfederung resultierende Betrag der Formabweichung verringern.



**Abbildung 32:** Kompensationsmöglichkeiten: Variante I: Einfaches Überbiegen der Umformgeometrie; Variante II: Verändern des Spannungszustandes im Pressteil

Abbildung 33 bietet eine Übersicht der im Folgenden näher beschriebenen Kompensationsstrategien I und II. Die Zuordnung der jeweiligen Kompensationsmaßnahmen auf die einzelnen Operationsstufen ist dabei beispielhaft für eine Beplankung einer Motorhaube.



**Abbildung 33:** Mögliche Kompensationsmaßnahmen entlang der Operationsfolge einer Beplankung für eine Motorhaube

### **Werkzeugskalierung (Kompensationsstrategie I)**

Insbesondere bei großen Bauteilen mit hohen Streckziehanteilen und geringem  $E$ -Modul (beispielsweise Aluminium) kommt es in der Ziehstufe zu hohen Membranspannungen, die im entlasteten Zustand (öffnen der Werkzeuge) zu einer deutlichen Verkleinerung der lateralen Abmessung der Ziehteile führen (ca. 1-2 mm). Die in die Ziehwerkzeuge eingebrachte Werkzeugskalierung soll dabei dem „Schrumpfen“ des Ziehteils entgegenwirken. In der Praxis werden häufig Skalierungswerte von 1,0007 bis 1,0012 angewendet; die Skalierung erfolgt in der Regel in allen drei Raumrichtungen. Sollen die Einflüsse des Materials berücksichtigt werden, so kann beispielsweise auch folgende Näherungsformel angewendet werden (entspricht der AutoForm-Solver<sup>®plus</sup> Einstellung „automatische Skalierung“).

$$F_{scale} = 1 + \frac{\sigma_{biax}}{E} \quad \text{Gl. 1}$$

Der auf dem Hooke'schen Gesetz basierende Näherungsansatz berücksichtigt dabei den E-Modul  $E$  sowie die biaxiale Fließspannung  $\sigma_{biax}$  des Materials.

### **Werkzeugkompensation durch Überwölbung (Kompensationsstrategie I)**

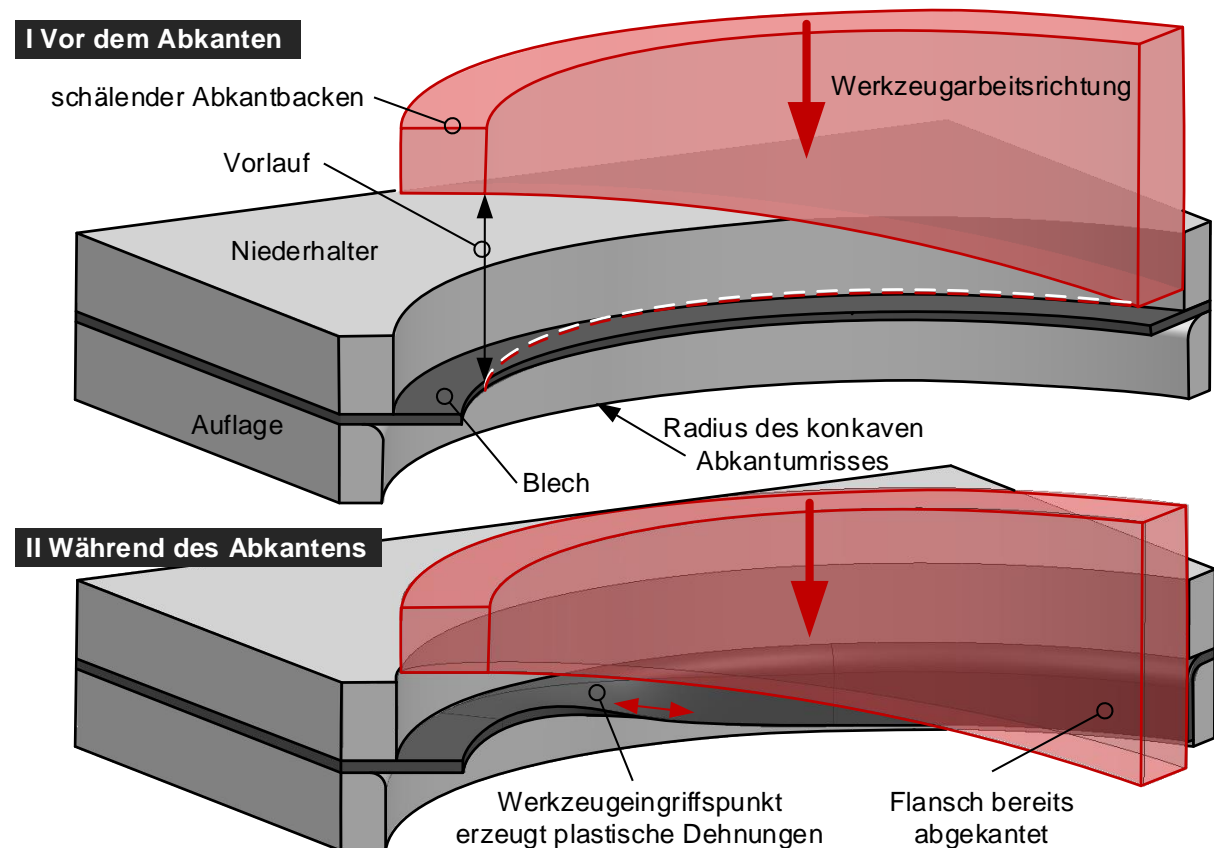
Unter dem Begriff des Überwölbens wird an dieser Stelle die gezielte Formänderung der Umformgeometrie (meist Formbereiche der Ziehstufe) zur Kompensation der Rückfederung verstanden. Synonym wird oft auch der Begriff des „Bombierens“ verwendet. Insbesondere bei sehr flachen Bauteilen der Außenhaut wird durch das Überwölben der Bauteilgeometrie einem Einfallen der Bauteilform nach der Entlastung (Öffnen der Werkzeuge) entgegengewirkt. Die Überwölbung kann sowohl auf lokale als auch globale Formbereiche der Ziehstufe oder auch auf Bereiche der Nachformoperationen angewendet werden. Die Richtung der Überwölbung wird dabei meist entgegen der durch die Rückfederung bedingten Formabweichung gewählt. Mit der Simulationssoftware AutoForm-Compensator<sup>®plus</sup> [Aut15] lässt sich beispielsweise das Vektorfeld der Rückfederungsverschiebung mit entsprechender Skalierung und Richtungsumkehr auf die Geometrie der Zieh- und Formoperationen anwenden.



Die größte Herausforderung beim Überwölben von Formflächen, insbesondere bei Pressteilen der Karosserieaußenhaut, stellt die CAD-Aufbereitung der Umformwirkflächen dar, welche zur Fräsbearbeitung der Werkzeuge benötigt wird. In der Regel werden mit Hilfe von im CAD-Programm integrierter Funktionen (beispielsweise CATIA, Shape Morphing bzw. Siemens NX Global Shaping) komplette Oberflächenbeschreibungen durch Abbildungsvorschriften überbogen. Die Algorithmen der Flächenberechnung bewirken jedoch häufig, dass insbesondere bei großen Deformationen das überbogene Oberflächenmodell nicht mehr stetig und tangential ist. Das heißt, durch das Überbiegen entstehen Lücken und Knicke in der Oberflächenbeschreibung, diese Unstetigkeit zeichnet sich im Spiegellinienverlauf der Pressteile deutlich ab

### *Schälendes Abkanten (Kompensationsstrategie II)*

Wie bereits erwähnt, kann durch eine Modifikation der formgebenden Geometrie (in diesem Fall durch den Abkantbacken) der Spannungszustand im Pressteil gezielt beeinflusst werden. Insbesondere bei einer konkav gekrümmten Abkantkontur würden sich mit geschlossenen Werkzeugen, beim Abkanten mit einem gleichmäßigen Backenangriff, aufgrund der Abwicklung nach der Abkantung, Membranzugspannungen tangential zum Abkantflansch ergeben, die vom Abkantradius zur Flanschekante hin ansteigen.

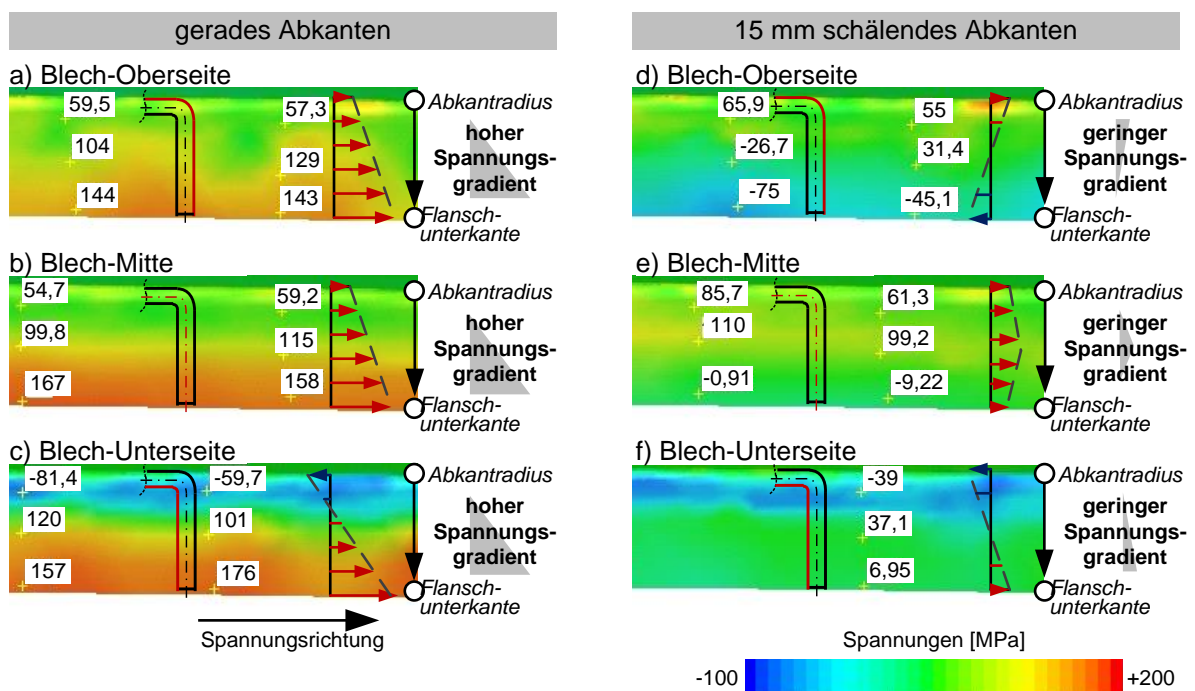


**Abbildung 34:** Prinzipdarstellung des schälenden Abkantens an einer konkav gekrümmten Abkantkontur; vor dem Abkanten (oben), während des Abkantens (unten)

Diese Membranzugspannungen bewirken beim Entlasten (Öffnen der Werkzeuge), wie bereits erwähnt, eine Rückfederung des abkanteten Bauteils. Durch den schälenden Backenangriff und die damit verbundene nicht gleichmäßig angreifende Bauteilberührung (vgl. Abbildung 34) wird die Dehnung im Abkantflansch tangential zur Biegekante und somit auch der Spannungszustand im fertigen Bauteil geändert.

Während des Abkantens entsteht zwischen den beiden Bereichen – „bereits abkantet“ und „noch nicht abkantet“ – ein „Übergang“. Dies wiederum führt zu einer plastischen Dehnung tangential zur Flanschkante, die vom Abkantradius hin zur Schnittkante des Abkantflansches zunimmt. Zugspannungen tangential zur Biegekante, die sich im geschlossenen Werkzeugzustand und bei einem geraden Abkantbackenangriff im Abkantflansch ergeben würden, lassen sich so reduzieren bzw. vollständig abbauen.

Abbildung 35 stellt exemplarisch die Spannungen tangential zur Flanschkante für die drei Ebenen Blech-Oberseite, Blech-Mitte und Blech-Unterseite dar. Dabei zeigen die linken Falschfarbenbilder den Spannungsverlauf im Flansch einer konkaven Abkantkontur (Konturradius 1500 mm) bei geradem Abkanten und die rechten Bilder den für einen schälenden Backenangriff bei nur 15 mm Vorlauf.



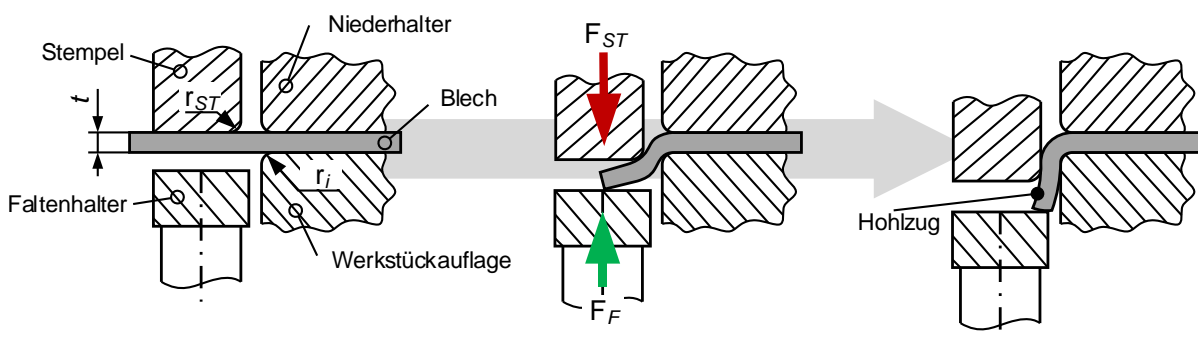
**Abbildung 35:** Spannungen im Abkantflansch tangential zur Flanschkante einer konkaven Abkantkontur ( $R=1500$  mm) bei geschlossenen Werkzeugen:  
a), b) und c) gerades Abkanten – hoher Spannungsgradient;  
d), e) und f) schälendes Abkanten mit 15 mm Vorlauf - geringer Spannungsgradient

Die Verwendung eines schälenden Abkantbackens ist in jenen Bereichen sinnvoll, in denen bei einem gleichmäßigen Backenangriff Zugspannungen (bei geschlossenen Werkzeugen) im Falzflansch tangential zur Biegekante entstehen würden. Entscheidend hierfür sind zum einen der

Beschnittumriss und zum anderen die Krümmung der Biegekante im Raum. Typische Flanschbereiche, in denen in der Praxis schälende Abkantbacken zur Rückfederungsreduktion sinnvoll sind, werden in Abbildung 37 dargestellt.

### **Faltenhalter (Kompensationsstrategie II)**

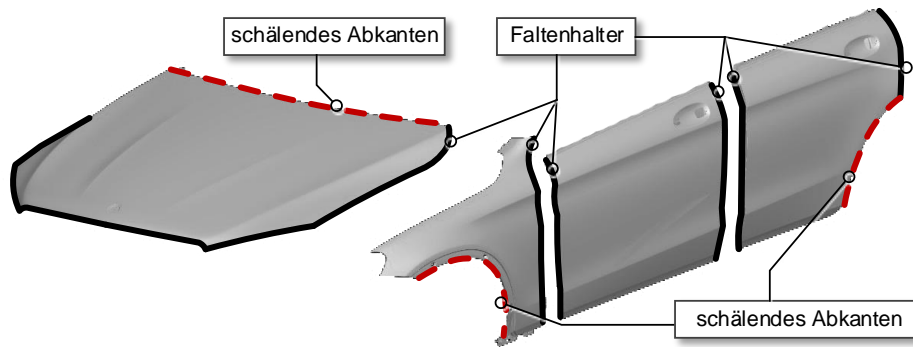
Eine weitere Möglichkeit, um auf Rückfederungen gezielt Einfluss zu nehmen, die aus Abkantungvorgängen resultieren, ist die Verwendung eines Faltenhalters (vgl. Abbildung 36). Bei einer stark bombierten Biegekante oder im Falle eines konvexen Konturumrisses würden sich im Flansch, bedingt durch die Geometrie des Abkantumrisses, senkrecht zur Biegekante Falten bilden. Die Mechanismen zur Faltenbildung sind dabei mit jenen vergleichbar, die bei Falten erster Art beim Tiefziehen im Ziehflansch auftreten (das Material wird von einer größeren Krümmung auf eine kleinere umgeformt). Daraus resultieren folglich Druckspannungen tangential zur Abkantlinie, die zu Falten im Flansch führen. Durch den Faltenhalter wird beim Abkanten senkrecht zur Biegekante ein Blechzug erzeugt, der wiederum die im Flansch wirkenden Druckspannungen parallel zur Biegekante reduziert.



**Abbildung 36:** Prinzipdarstellung des Abkantens mit Faltenhalter und der dabei üblicherweise entstehende Hohlzug im Flansch

Als nachteilig, insbesondere bei Falzflanschen, wirkt sich ein Hohlzug im Flansch aus, der sich durch das Abkanten mit dem Faltenhalter bzw. mit der überlagerten Biegung ergibt. Diesem Hohlzug kann durch eine geeignete Distanzierung zwischen Abkantbacken und Faltenhalter in vielen Fällen entgegengewirkt werden. Die Distanzierung sollte jedoch nicht zu groß gewählt werden, um den Effekt des Faltenhalters nicht zu stark zu reduzieren.

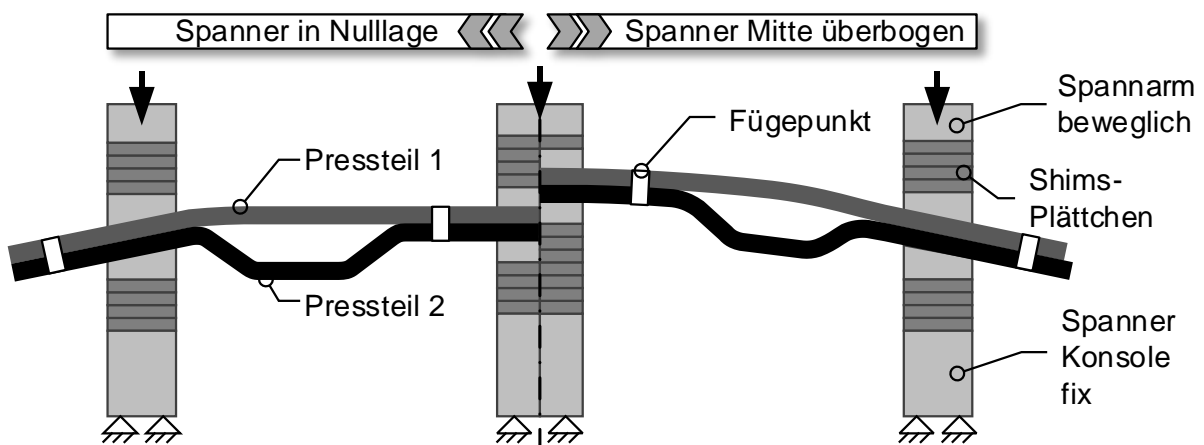
Die konstruktive Werkzeugkomplexität und die damit verbundenen erhöhten Werkzeugkosten nehmen durch die Verwendung eines Faltenhalters erheblich zu (Einstell- und Abstimm Aufwand, Instandhaltung etc.). Jene Abschnitte des Umfangs von Türen und Klappen, in denen beim Abkanten der Falzflansche von Beplankungsteilen ein Faltenhalter sinnvoll eingesetzt werden kann, zeigt Abbildung 37.



**Abbildung 37:** Bauteilbereiche der Außenhaut für einen Einsatz von schälend wirkenden Abkantbacken oder Faltenhalter für das Abkanten des Falzflansches

## 2.5.2 Maßnahmen an der Baugruppe

Maßnahmen zur Optimierung der Maßhaltigkeit sind im Rohbau hauptsächlich über das Einstellen der Anlagen gegeben. Die Spannvorrichtungen der Anlage bieten die Möglichkeit, die Lage der Spannerposition zu verschieben. Abbildung 38 veranschaulicht dies systematisch für ein Beispiel, bei dem zwei Pressteile gefügt werden. Die linke Konfiguration zeigt die Nominaleinstellung der Anlage. Auf der rechten Seite der Abbildung ist die Lage des Spanners in der Mitte in Spannrichtung durch sogenannte Shims-Abstimmplättchen in z-Richtung verschoben. Durch die „überbogen“ gespannte Bauteillage der Pressteile zueinander, kann die Maßhaltigkeit der gefügten Baugruppe beeinflusst werden. Bei dieser Methode werden jedoch Spannungen erzeugt, die auch nach dem Fügen in der Baugruppe verbleiben und in späteren Fertigungsprozessen, z. B. bei der KTL-Trocknung unter höheren Temperaturen, zu unerwünschten Verformungen führen können.



**Abbildung 38:** Rückfederungskompensation im Karosserierohbau durch Verschieben der Spannerposition („überbiegen“) beim Fügen mehrerer Einzelteile: Ausgangszustand, Spanner in Nominalposition (li.); Spannposition (Mitte) über Shims-Plättchen aus seiner Nominalposition verschoben (re.)

## 2.6 Simulation des Karosserieentstehungsprozesses

Um die Entwicklungszeit und den Erprobungsaufwand von neuen Fahrzeugkarosserien bis zum Serienanlauf zu verkürzen, kommen seit der Jahrtausendwende verstärkt Simulationstools zum Einsatz. Bei den Simulationstools wird zunächst unterschieden, ob diese zur Optimierung der Fahrzeugkarosserie als ein technisches Produkt (Produktsimulation) oder für die Produktion und die damit verbundenen Fertigungsprozesse (Prozesssimulation) angewendet werden [Awi10]. Zunächst wird dargestellt, welche Simulationen im Entwicklungsprozess der Karosserie sowohl produkt- als auch prozessseitig im Einsatz sind, bevor im folgenden Abschnitt dieses Kapitels auf die für diese Arbeit wesentlichen Simulationstools von Fertigungsprozessen im Presswerk und Rohbau detaillierter eingegangen wird.

### *Simulationstoolunterstützung zur Produktverbesserung*

Bei der Produktsimulation liegt der Schwerpunkt auf der Optimierung der Einzelteile und der Zusammenbauten in ihrem späteren Gebrauch. Hierbei kommen vor allem Simulationstools zum Einsatz, die auf der Finite-Elemente-Methode basieren [Pin14].

Im Entwicklungsprozess der Fahrzeugkarosserie sind diese Steifigkeitsanalysen der Einzelteile, der Unterbaugruppen und der Gesamtkarosserie auf Betriebslastfälle fokussiert [Gös01]. Zu dieser Gruppe der Simulationstooluntersuchungen zählt auch die Analyse der Deformationen von Anbauteilen (Türen, Motorhauben oder Heckdeckeln) durch Dichtungskräfte und Schließkräfte, die aus montierten Gasdruckdämpfern oder beispielsweise Schlossschließkräften resultieren. Um solchen Deformationen entgegenzuwirken, werden auf Grundlage dieser Simulationen zu einem sehr frühen Stadium der Produktentwicklung Vorgaben in Form gezielter Abweichungen von der Soll-Geometrie festgelegt (beispielsweise Vorspannung bei Türen).

Auch die Crashsimulation stellt heute einen wesentlichen Teil der digitalen Produktabsicherung dar und hat einen sehr großen Einfluss auf den konstruktiven Aufbau der Einzelteile und der Gesamtkarosserie. Nicht nur bei der Steifigkeitsanalyse, sondern auch bei der Crashsimulation bleiben häufig die Einflüsse aus dem Produktionsprozess unberücksichtigt. Dies ist hauptsächlich der zeitlichen Einordnung in der Produktentwicklung geschuldet, da in dieser frühen Phase noch keine genauen Erkenntnisse über die späteren Fertigungsprozesse vorliegen [Bey03]. Für Einzelteile wird heute teilweise versucht, Ergebnisse aus der Umformsimulation, insbesondere die Blechdickenreduktion und die plastische Verfestigung auf die Crashsimulationstools zu mappen, um die Qualität der Crashsimulation zu verbessern [Wie10].

### *Simulationstoolunterstützung zur Prozessverbesserung*

Zur digitalen Absicherung der Fertigungsprozesse von der Einzelteilherstellung bis hin zur fertig lackierten Karosserie kommen heutzutage vielzählige Simulationstoolabsicherungen zum Einsatz. Generell lassen sich diese in zwei Kategorien einteilen. In der ersten werden die physikalischen Eigenschaften von Produkt und Prozess berücksichtigt [Bay13], in der anderen hin-

gegen ausschließlich Starrkörperbewegungen simuliert [Küh06], welche hauptsächlich der Kollisions- und Bauraumuntersuchung dienen [Sch03b] u. [Mey07].

Prozesssimulationen, die physikalische und mechanische Eigenschaften des betrachteten Produkts und des Produktionsprozesses berücksichtigen, basieren entweder auf der numerischen Finite-Elemente-Methode oder auf der, insbesondere bei CFD-Anwendungen (computational fluid dynamics) dominierenden, Finite-Volumen-Methode.

Für die Pressteilherstellung wird der Umformprozess mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode digital abgesichert, der Schwerpunkt liegt dabei auf der vorherigen Überprüfung der Herstellbarkeit der Einzelteile und auf der Maßhaltigkeit zur Rückfederungsbetrachtung [Rol93], [Rol02] u. [Rol11]. Die Inhalte und der aktuelle Stand der Simulation werden in Kapitel 2.6.2 beschrieben. Bei den Rohbauprozessen, insbesondere den Fügeprozessen, wird eine Vielzahl unterschiedlicher Simulationsmethoden angewendet. Der Fokus der Betrachtung liegt dabei vielmehr auf dem einzelnen punktuellen Fügepunkt und der Qualität der einzelnen Fügeverbindung, als auf dem Gesamtverbund der Einzelteile. Mit Hilfe von Simulationstools, wie sie beispielsweise in der Massivumformung zur Anwendung kommen, werden so beispielsweise mechanische Fügeverbindungen (Clinch-, Vollstanzniet- und Halbhohlstanznietpunkte) im Detail simuliert. In [Eck11a] u. [Eck11b] wird erstmals beschrieben, wie sich einzelne Fügepunkte in Form von Clinch- und Nietverbindungen auf den Gesamtverbund mehrerer Einzelteile auswirken. Bei den thermischen Fügeverfahren werden in [Neu13] Bestrebungen genannt, den thermischen Verzug und somit eine Aussage über die Maßhaltigkeit mehrerer Bauteile im Zusammenbau mittels FEM-Simulation zu bestimmen.

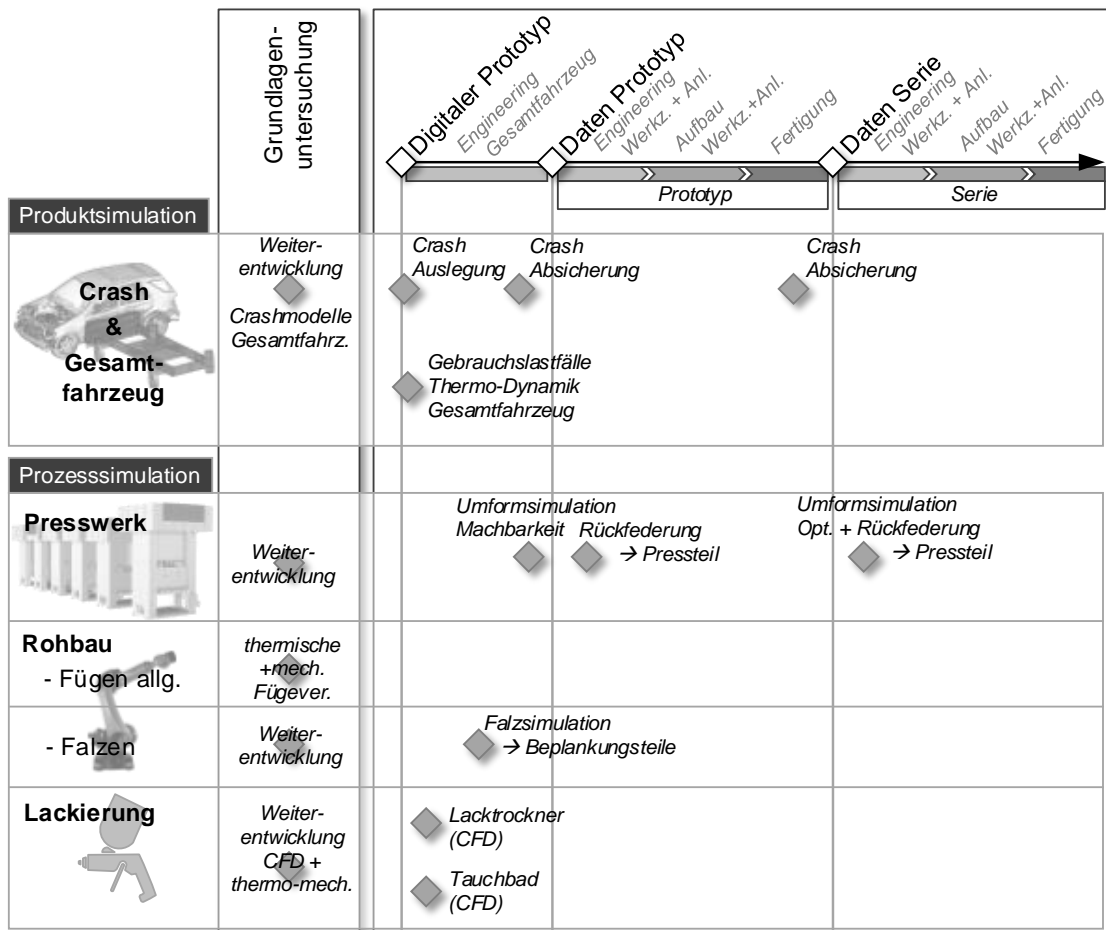
Im Bereich der Falztechnik wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche Anstrengungen unternommen, sowohl den Backen- als auch den Rollfalzprozess im Vorfeld der Produktionsplanung digital abzusichern [Eis12], [Den11a], [Den11b], [Den14], [Hoe13a] und [Hoe13b]. Schwerpunkt bildet dabei die geometrische Festlegung von Falzflanschlängen, Falzzugaben sowie die Bewertung einer möglichen Kantenrissgefahr. Da der Falzprozess an sich einen Umformprozess darstellt, basiert die Simulationsmethodik im Wesentlichen auf der Vorgehensweise einer klassischen Umformsimulation. Obwohl der Falzprozess einen Fügeprozess mehrerer Einzelteile darstellt, beschränkt sich die Falzsimulation der Einfachheit halber derzeit auf das zu falzende Pressteil (vgl. Kapitel 2.6.3), die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Innenteile bleiben somit bis heute meist unberücksichtigt.

Die Prozesssimulationen im Bereich Karosseriebau sind, im Gegensatz zu den Umformsimulationen, meist noch nicht im Produktionsplanungsprozess der Praxis der Großserie verankert und finden heute fast nur in Einzelfällen Anwendung.

Auf dem Gebiet der Lackierung werden die Tauch-, Strömungs- und Trockenprozesse mittels CFD-Simulationen abgesichert [Rol12]. Diese Untersuchungen dienen der Optimierung von Lackablauföchern, der Anpassung von Düseneinstellungen bei der Lacktrocknung für ein

gleichmäßiges Aufheizen der Karosserie und der Ermittlung von thermischen Deformationen [Alb10], [Alb11] u. [Alb12].

Für den Gesamtprozess, beginnend vom Engineering der Einzelteile bis hin zur lackierten Karosserie, sind die derzeitigen Simulationen in Abbildung 39 zusammengefasst. Die einzelnen Simulationsbausteine sind in die Kategorien Produkt- und Prozesssimulation eingeteilt. Derzeit fehlt jedoch eine gesamtheitliche Betrachtung, insbesondere im Bereich der Prozesssimulation, weswegen an dieser Stelle von Insellösungen gesprochen wird [Wah11].



**Abbildung 39:** Einsatz von Simulationen zur Produkt- und Prozessabsicherung moderner Fahrzeugkarossen [Kae12]

### 2.6.1 Grundlagen der Finite-Elemente-Methode in der Umformtechnik

Komplexe Fertigungsprozesse, wie beispielsweise die Blechteilherstellung, lassen sich nicht durch analytische Modelle beschreiben. Aus diesem Grund kommt der numerischen Modellbildung in der Prozesssimulation von Blechumformprozessen eine besondere Bedeutung zu. Ein sehr verbreitetes Verfahren stellt dabei die Finite-Elemente-Methode dar. Der wesentliche Grundgedanke ist dabei die Diskretisierung eines mathematischen bzw. physikalischen Grundproblems in endliche Lösungsräume. Die Lösungsräume werden dabei meist durch Polynome geringer Ordnung beschrieben (Ansatzfunktionen), das Differentialgleichungsproblem des Gesamtsystems lässt sich dadurch numerisch lösen. Von einer Beschreibung der theoretischen

Grundlagen wird an dieser Stelle abgesehen und stattdessen auf die zahlreich vorhandene einschlägige Literatur verwiesen: [Bra07], [Zie05], [Bat02] u. [Wri01].

Für den Anwender gliedert sich der Simulationsaufbau mit Hilfe der FE-Methode in drei wesentliche Schritte, die in Tabelle 3 zusammengefasst sind.

<b>Schritt I PreProcessing:</b>
Im PreProcessing werden im Wesentlichen die meist als CAD-Daten vorliegenden Eingangsdaten in Finite-Elemente unterteilt bzw. vernetzt, die Elementtypen festgelegt und Randbedingungen sowie Materialverhalten definiert. Ergebnis des PreProcessing ist die textuelle Problembeschreibung.
<b>Schritt II Solver / Processing:</b>
Aus dem mathematischen Modell und den Vernetzungsinformationen wird die Differentialgleichung aufgestellt. Randbedingungen schränken einzelne Freiheitsgrade der Knoten ein, Lasten werden als äußere Kräfte in das Gleichungssystem eingefügt. Anschließend führt ein Löser (Solver) dann die eigentliche FEM-Berechnung durch.
<b>Schritt III PostProcessing:</b>
Die vom Solver berechneten Daten, wie Kräfte und Verschiebungen, werden im PostProcessing ausgewertet und visuell dargestellt. Typische Berechnungsergebnisse sind beispielsweise Spannungs- Dehnungsverteilungen oder Verschiebungsfelder, die wiederum zur Beurteilung von Versagensfällen oder Formabweichungen herangezogen werden.

**Tabelle 3:** Die wesentlichen Schritte einer FE-Berechnung: Der Simulationsaufbau dem PreProcessing (I), der Berechnung (II) und der Simulationsauswertung dem PostProcessing (III)

Insbesondere der Diskretisierung der Geometrie und der zeitlichen Integration kommt beim Lösen der nichtlinearen Problemstellung im PreProcessing sowie bei der Wahl des Solvers eine besondere Bedeutung zu. Aus diesem Grund werden diese beiden Aspekte im Folgenden kurz näher erläutert.

### ***Diskretisierung der Geometrie***

Für die Beschreibung der Geometrie stehen bei der Finite-Elemente-Berechnung unterschiedliche Elementtypen zur Verfügung. Prinzipiell lassen sich diese Elementtypen zunächst durch ihre räumliche Definition unterscheiden.

- 1D-Linienelemente: Stab, Rohr, Balken, Feder und Dämpfer
- 2D-Flächenelemente: Membran oder Schalenelemente
- 3D-Volumenelemente: Solid-Elemente meist als Hexaeder oder Tetraeder



Je nach Simulationssoftware stehen dem Anwender jeweils unterschiedliche Elementtypen zur Verfügung. Auswahlkriterien sind neben der vorhandenen Rechenleistung, vor allem die Belastungsart sowie die Modellierung und der damit verbundene Aufwand bei der sogenannten Vernetzung. Beispiele für die Verwendung von Kontinuums- bzw. Volumenelementen in der Prozesssimulation sind Anwendungen in der Massivumformung und die Simulation von Fügeprozessen, fokussiert auf einen einzelnen Fügepunkt. Bei der Simulation im Bereich der Blechumformung hingegen kommen bei Realbauteilen, aufgrund der verfügbaren Rechenleistung derzeit ausschließlich 2D-Flächenelemente zum Einsatz. Dabei können Membranelemente Spannungsunterschiede über die Blechdicke nicht berücksichtigen, sie werden als konstant angenommen. Insbesondere in Bereichen mit starker Biegeumformung sind diese Elementtypen ungeeignet [Har04]. Schalenelementformulierungen hingegen ermöglichen es, je nach gewählter Integrationspunktanzahl über die Blechdicke einen beliebigen Spannungsverlauf in Blechdickenrichtung abzubilden [Cha11]. Mit den Schalenelementen lässt sich jedoch kein dreiaxialer Spannungszustand abbilden. Die Annahme eines ebenen Spannungszustandes wird somit bei der Verwendung von Standard Schalenelementformulierungen immer getroffen. Mit den sogenannten „dicken-Schalen“, (wobei diese einen zusätzlichen Freiheitsgrad für die Dickenänderung besitzen) lassen sich Belastungen senkrecht zur Schalenebene berücksichtigen [Raq14], ihre Anwendung ist derzeit jedoch noch nicht verbreitet und ausreichend validiert.

### ***Vergleich expliziter und impliziter Zeitintegration***

Für die Lösung nichtlinearer Probleme kommen in der Finite-Elemente-Berechnung, je nach Problemstellung und Solver, explizite oder implizite Zeitintegrationsverfahren zum Einsatz. Im Folgenden soll kurz auf die wesentlichen Unterschiede beider Verfahren eingegangen werden.

Bei der transienten Simulation (Simulation, die zeitabhängige Einflüsse berücksichtigt) ist folgende Differentialgleichung für die Bewegung zu lösen [Kle10]:

$$M \cdot \ddot{u}(t) + C \cdot \dot{u}(t) + K \cdot u(t) = p(t) \quad \text{Gl. 2}$$

Die Bewegungsgleichung stellt das Kräftegleichgewicht für die Knotenverschiebung  $u$  zum Zeitpunkt  $t$  dar.  $M$ ,  $C$  und  $K$  stehen für die Massenmatrix, die Dämpfungsmatrix und die Steifigkeitsmatrix des Gesamtsystems, während der Vektor  $p$  die von außen auf das System wirkenden Kräfte beschreibt. Bei einer zeitabhängigen, nichtlinearen Problemstellung ist folglich eine Integration über die Zeit notwendig. Bei der impliziten Lösung ergibt Gleichung (2) für den Zeitpunkt  $n + 1$  folgendes Gleichungssystem:

$$M_{n+1} \cdot \ddot{u}_{n+1} + C_{n+1} \cdot \dot{u}_{n+1} + K_{n+1} \cdot u_{n+1} = p_{n+1} \quad \text{Gl. 3}$$

Das Grundprinzip der impliziten Lösung ist, dass die kontinuierliche Zeitfunktion schrittweise zu bestimmten Zeitpunkten berechnet wird. Bei der impliziten Lösung werden für den neuen Zeitschritt  $n + 1$  die neue Steifigkeitsmatrix und der neue Verschiebungsvektor zugrunde gelegt und die Lösung per Gleichgewichtsiteration bestimmt. Daraus ergibt sich bei der impliziten Lösung für  $u_{n+1}$  folgendes Gleichungssystem:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{6}{\Delta t^2} M_{n+1} + \frac{3}{\Delta t} C_{n+1} + K_{n+1} \right) \cdot u_{n+1} \\ & = p_{n+1} + M_n \left( \frac{6}{\Delta t^2} u_n + \frac{6}{\Delta t} \dot{u}_n + 2\ddot{u}_n \right) + C_n \left( \frac{3}{\Delta t} u_n + 2\dot{u}_n + \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_n \right) \\ & \text{mit } K_{n+1} = K_{n+1}(u_{n+1}) \end{aligned} \quad \text{Gl. 4}$$

Bei der expliziten Lösung hingegen werden für den neuen Zeitschritt  $n + 1$  die Bedingungen des aktuellen Zeitschrittes  $n$  zugrunde gelegt und auf dieser Basis die neue Verschiebung  $u_{n+1}$  berechnet. Somit kann bei der explizit Lösung für Gleichung (2) geschrieben werden:

$$M_n \cdot \ddot{u}_n + C_n \cdot \dot{u}_n + K_n \cdot u_n = p_n \quad \text{Gl. 5}$$

Für den Zeitpunkt  $n + 1$  gilt folglich, wenn man die Bedingungen des Zeitschrittes  $n$  zugrunde legt:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{1}{\Delta t^2} M_n + \frac{1}{2\Delta t} C_n \right) \cdot u_{n+1} \\ & = p_n - \left( K_n - \frac{2}{\Delta t^2} M_n \right) \cdot u_n - \left( \frac{1}{\Delta t^2} M_n + \frac{1}{2\Delta t} C_n \right) \cdot u_{n-1} \end{aligned} \quad \text{Gl. 6}$$

Vergleicht man die beiden Gleichungen (4) und (6) miteinander, so wird deutlich, dass für eine Lösung von  $u_{n+1}$  bei der impliziten Lösung die Gesamt-Steifigkeitsmatrix  $K_{n+1}$  invertiert werden muss. Insbesondere bei Nichtlinearitäten können hierbei viele Iterationen notwendig werden. Der Vorteil der impliziten Lösung ist, im Vergleich zur expliziten Lösung, dass bei der Simulation des Zeitverlaufes an jedem Zeitpunkt das Gleichgewicht berechnet wird. Für eine stabile Lösung muss bei der expliziten Zeitintegration hingegen ein bestimmter, kritischer Zeitschritt berücksichtigt werden [Bel08] (vgl. Gl. 7):

$$\Delta t_{\text{stabil}} \leq \Delta t_{\text{krit}} = l_e \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad \text{Gl. 7}$$

Dabei ist  $l_e$  die charakteristische Länge des betrachteten Systems und ergibt sich für die betrachteten Elemente aus dem kleinsten Abstand zweier Knoten.  $\rho$  stellt die Dichte und  $E$  den Elastizitätsmodul des Werkstoffes dar.

Im Vergleich zum expliziten Verfahren können beim impliziten Verfahren wesentlich größere Zeit- und Lastschritte gewählt werden, da die Lösung iterativ durch die Suche eines statischen Gleichgewichts ermittelt wird. Die Größe der stabilen Schrittweite ist jedoch auch bei der impliziten Lösung vom Lösungspfad abhängig und muss bei Nichtlinearitäten (beispielsweise bei Kontaktproblemen) klein genug gewählt werden, um eine Konvergenz des Gleichungssystems zu erzielen [Rus11].

Je nach Struktur des Solvers, stehen dem Anwender in der Regel implizite oder explizite Verfahren zur Gleichungslösung zur Verfügung. In LS-Dyna hat sich das explizite Verfahren insbesondere für Umformprozesse etabliert. Für die Berechnung des Rückfederungsverhaltens

sowie der Einlegesimulation von Blechplatinen oder Pressteilen kommt jedoch das implizite Verfahren zum Einsatz. In AutoForm<sup>®</sup> wird ausschließlich das implizite Zeitintegrationsverfahren verwendet. Wird dabei die Annahme einer quasi-statischen Belastung zugrunde gelegt, so ergibt sich aus Gleichung (3) vereinfacht folgende Grundgleichung:

$$K_{n+1} \cdot u_{n+1} = p_{n+1} \quad \text{Gl. 8}$$

Da die Steifigkeitsmatrix für den neuen Zeitschritt  $n + 1$  unbekannt ist und von der noch unbekanntem Verschiebung  $u_{n+1}$  abhängig ist, werden diese durch Gleichgewichtsiteration ermittelt. Aufgrund des stark nicht linearen Verhaltens beim Umformen kann dies jedoch auch bei der impliziten Integration über der Zeit zu einer hohen Anzahl an Iterationen und somit zu einem hohen Berechnungsaufwand führen.

## 2.6.2 Simulation des Tief- und Streckziehvorgangs

Heutzutage gehört in der Methodenplanung die FE-Umformsimulation zum Stand der Technik und hat sich als unverzichtbares Werkzeug etabliert. Mit kommerziell verfügbaren Softwaretools, die auf die Fertigungsprozesse des Umformens zugeschnitten sind, kann die spätere Serienproduktion digital abgesichert werden. Fertigungsrisiken, wie beispielsweise Materialversagen in Form von Rissen, Qualitätsprobleme durch Falten oder Einfallstellen, lassen sich sehr früh prüfen und gegebenenfalls korrigieren [Ban10]. Durch die virtuelle Prozessplanung können somit Durchlaufzeiten der Werkzeugherstellung und -einarbeitung verkürzt und somit Herstellkosten gesenkt werden [Sch99].

Im Rahmen der Produktentwicklung der Karosserie wird auf Basis des ersten Konstruktionsentwurfs der Einzelteile mit Hilfe der FE-Umformsimulation die Herstellbarkeit der Pressteile geprüft. Neben der Beurteilung von Riss- und Faltengefahr bei der Umformung hat die digitale Bewertung der Pressteile hinsichtlich ihrer Maßhaltigkeit in den vergangenen Jahren stark an Bedeutung gewonnen [Roh01] u. [Vol09]. Durch die gestiegene Rechenleistung sowie Weiterentwicklungen anwenderfreundlicher Programme, die insbesondere für einen raschen Simulationsaufbau sorgen, konnte die Umformsimulation von der anfangs betrachteten Ziehstufe auf Folgeoperationen (insbesondere Abkant- und Nachformoperationen) erweitert werden [Sch07a] u. [Fle09]. Wesentliche Arbeiten, die sich mit dem Thema Rückfederung von Pressteilen beschäftigt haben wie beispielsweise [Roh01], [Sch03a], [Hoc04], [Kra05], [Mut05], [Bur08], [Fle09], [FOS09] u. [Wei09] haben dazu beigetragen, dass die Prognosequalität der Umformsimulation verbessert wurde. Dies hat dazu geführt, dass durch die Umformsimulation Rückfederungskompensationsmaßnahmen bereits in der digitalen Phase der Produktentwicklung der Pressteile untersucht und definiert werden können [Jer03], [Gös10a] u. [Gös10b]. Dennoch sind Weiterentwicklungen insbesondere in der Materialmodellierungen wie beispielsweise nach [Bar03] u. [Ban04] oder der Berücksichtigung der kinematischen Verfestigung [Ros15] u. [Kes07] und der damit verbundenen Materialcharakterisierungen Gegenstand aktueller Forschungen, um die Qualität der Berechnungsergebnisse weiter zu verbessern.

Als weiteren aktuellen Forschungsschwerpunkt in der Umformsimulation von Pressteilen ist die Robustheitsanalyse zu sehen [Lie09], [Emr13], [Ann11] u. [Gro07]. Ziel ist dabei, durch die Umformsimulation Erkenntnisse für die Produktion bei schwankenden Eingangsgrößen (wie beispielsweise Materialparametern, Temperaturverläufen, Reibungsänderungen, etc.) zu gewinnen, um daraus Stellgrößen für einen robusten Umformprozess mit möglichst geringem Ausschuss und geringen Stillstandzeiten zu identifizieren.

### 2.6.3 Simulation von Fügeprozessen

Für die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Fügeverfahren wurden in der Vergangenheit Simulationsmethoden entwickelt, um diese Verfahren numerisch abbilden zu können. Im Bereich der mechanischen Fügechnik sind die Betrachtungen jedoch meist ausschließlich auf den einzelnen Fügepunkt bzw. die Fügeverbindung reduziert. Fokussiert werden dabei die Schädigungen des Fügeelements oder der Fügeverbindung, die unter Belastung auftreten. Eine Betrachtung der Maßhaltigkeit von gefügten Baugruppen erfolgt ausschließlich in den Arbeiten von [Cai05], [Alb10], [Alb11] u. [Eck12a]. Bei den thermischen Fügeverfahren wurden in der Vergangenheit Simulationsmethoden für die vielzähligen Anwendungsfälle entwickelt. Anwendungen, die sich auf die Simulation des Schweißverzugs von Karosseriebaugruppen übertragen lassen, finden sich in [Sch07b], [Pap08] u. [Per13]. In der Schweißverzugssimulation erfolgt die Diskretisierung der Geometrie hauptsächlich in Form von Volumenelementen. Für eine durchgängige Prozesssimulation der Bereiche „Presswerk“ und „Rohbau“ sind diese Modelle derzeit noch unbrauchbar, da die Umformsimulation in der Regel auf Schalenelementformulierungen basiert. Für die thermisch-mechanisch gekoppelte Simulation kommen heute vielzählige Programme zum Einsatz, neben den FE-Solvern LS-Dyna und Abaqus werden auch speziell auf die Schweißprozesssimulation zugeschnittene Produkte angeboten (ESI Welding & Assembly Suite und Simufact.welding).

#### *Simulation des Falzprozesses*

Auch die Entwicklung von Simulationsmethoden zur virtuellen Überprüfung von Falzprozessen hat in den vergangenen Jahren an Bedeutung gewonnen. Basierend auf der Finite-Elemente-Methode wurden Methoden entwickelt, um die im Rohbau verbreiteten Fügeprozesse zur Verbindung von Beplankung und Innenteilen durch Roll- und Backenfalzen zu modellieren und zu berechnen. [Neu14] fasst den derzeitigen Stand der Falzsimulation in einer Übersicht zusammen.

Das Hauptaugenmerk lag zunächst in der simulativen Absicherung einzelner Prozessparameter wie beispielsweise der Rollenzustellung sowie einer Vorhersagemöglichkeit von geometrischen Größen, wie beispielsweise dem Falzverlust und den Falzflanschlängen. Wesentliche Arbeiten auf diesem Gebiet wurden von [Bau05], [Jon06], [Yoo07], [Cer07], [LeM06b], [Eis10b] u. [Buc11] veröffentlicht. Eine Verkettung der klassischen Tiefziehsimulation (inklusive sämtlicher Nachformoperationen) mit einer folgenden Fugesimulation war bislang aus Gründen der Rechenleistung sowie der Rechengenauigkeit nicht möglich. Die Prognose des

Falzverlustes und der Falzflanschlängen durch die Simulation bietet jedoch derzeit bereits deutliche Einsparpotenziale im Hinblick auf Kosten- und Zeitaufwand beim Einarbeitungsprozess von Presswerkzeugen. Insbesondere bei den komplexen Schneid- und Abkantwerkzeugen der Folgeoperationen lassen sich dadurch Änderungsschleifen einsparen.

Auf dem Gebiet der Falzsimulation sind derzeit drei kommerzielle Software Tools von unterschiedlichen Herstellern und mit entsprechenden Solvern im Einsatz. Dies ist zum einen der von AutoForm<sup>®</sup> entwickelte und vertriebene AutoForm-HemPlanner<sup>®plus</sup>, des Weiteren der Finite-Elemente Code LS-Dyna und schließlich die Simulationssoftware Pam-Stamp. Bei allen drei Simulationssolvern wurde, basierend auf den bestehenden Erfahrungen aus der Umformsimulation, der Anwendungsbereich auf das Fügeverfahren Falzen angepasst.

Der AutoForm-HemPlanner<sup>plus</sup> wird hauptsächlich zur Bestimmung der korrekten Falzflanschlängen sowie des Falzverlustes eingesetzt. Des Weiteren kann im sogenannten „advanced hemming“, aufbauend auf einer vorgelagerten Umformsimulation des Pressteils und unter Berücksichtigung bestimmter Kriterien, die Schädigung beim Falzen, beispielsweise in Form von Rissen, beurteilt werden. Die Falzsimulation AutoForm-HemPlanner<sup>plus</sup> kann sowohl für Backen- als auch Rollfalzprozesse aufgebaut werden. Eine benutzerfreundliche GUI hilft dem Anwender beim schnellen Simulationsaufbau der Falzmethode. Die Simulation des Falzprozesses beschränkt sich beim AutoForm-HemPlanner<sup>plus</sup> derzeit auf ein deformierbares Pressteil. Innenteile werden während des Falzprozesses idealisiert als starr angenommen. Durch diese Vereinfachung lässt sich der Rechenaufwand erheblich reduzieren, jedoch können durch die Simulation Deformationen bei denen sowohl die Beplankung als auch das Innenteil verformt werden (beispielsweise in Eckbereichen) nicht abgebildet werden.

Bei den beiden FE-Solvern LS-Dyna und Pam-Stamp stehen dem Anwender mehr Simulationseinstellmöglichkeiten zur Verfügung. Mit einer anwenderfreundlichen GUI können derzeit aber beide Solver nicht dienen. Aus diesem Grund kommen diese Simulationssolver hauptsächlich im wissenschaftlichen Umfeld zum Einsatz. Für den praktischen Gebrauch in Serienanwendungen finden sie jedoch kaum Verwendung. Für die Simulation in LS-Dyna wurden in Untersuchungen nach [Eis12] Simulationsparameter zur Durchführung von Rollfalzsimulationen ermittelt.

## **2.7 Zusammenfassung und Diskussion des Standes der Technik**

Im Stand der Technik wurde zunächst die Karosserietechnik erläutert, dies beinhaltet die Bauweisen eines modernen Karosseriebaus, die dabei verwendeten Materialien sowie die Fertigung der Einzelteile im Presswerk und dem anschließenden Zusammenbau im Rohbau. Anschließend wurden die gängigen Fertigungsverfahren, wie sie heutzutage im Presswerk und dem Rohbau zum Einsatz kommen vorgestellt. In der Einzelteilfertigung des Presswerks ist dies hauptsächlich das Tief- und Streckziehen der Blechwerkstoffe. Im folgenden Rohbau erfolgt der Aufbau der Karosserie durch eine Vielzahl unterschiedlicher Fügeverfahren, auf die in einem kurzen Überblick eingegangen wurde. Eine bedeutende Rolle für die Beurteilung der Maßhaltigkeit

stellt die Ausrichtstrategie und das Maßbezugsystem der Pressteile sowie der Baugruppen dar. Dieses wurde zusammen mit den messtechnischen Möglichkeiten, wie sie zur Qualitätsbeurteilung insbesondere für Formabweichungen zum Einsatz kommen, dargestellt.

Ursache für die Formabweichung ist im Wesentlichen immer die elastische Rückfederung der Blechbauteile. Die elastischen Spannungsanteile der Biege- und Membranspannungen können dabei unterschiedliche Formabweichungen zur Folge haben. In der Praxis wird durch unterschiedliche Kompensationsmaßnahmen insbesondere bei der Pressteilfertigung versucht, auf die aus der elastischen Rückfederung resultierende Formabweichung Einfluss zu nehmen. Heutzutage ist die Definition einer erfolgreichen Kompensationsstrategie durch die Umformsimulation in erheblichem Maße erleichtert worden. Diese auf der Finite-Elemente-Methode basierende Prozesssimulation gehört bereits seit Jahren zum Stand der Technik. Aktuelle Forschungsschwerpunkte auf dem Gebiet der Umformsimulation finden sich jedoch noch auf dem Gebiet der Materialmodellierung, der Materialkennwertermittlung sowie der Weiterentwicklung von stochastischen Analysen. Ziel ist dabei die Prognosefähigkeit der derzeitigen Finite-Elemente Simulationsprogramme weiter zu verbessern.

Die aktuellen Forschungsgebiete bei der Simulation von Fügeprozessen dienen in den meisten Fällen dazu (abgesehen von der Schweißverzugssimulation) die Fügeverfahren auf mikroskopischer Betrachtungsebene näher zu untersuchen. Für den Falzprozess stehen beispielsweise Simulationsmethoden zur Verfügung, die eine genaue Prozessbetrachtung ermöglichen. Die Auswirkungen auf die Maßhaltigkeit der gefügten Komponente durch den Fügeprozess sowie durch die Maßhaltigkeit der Einzelteile bleiben bislang unberücksichtigt. Erst seit den vergangenen Jahren rückt die Simulation der Maßhaltigkeit von gefügten Baugruppen vermehrt in den Fokus der Betrachtung. Die Kopplung einzelner, bereits vorhandener Simulationsbausteine zu einer gesamtheitlichen und durchgängigen Simulationsmethodik der Fertigungsprozesse im Presswerk und Rohbau ist an dieser Stelle für eine spätere industrielle Anwendung von besonderer Bedeutung. Insbesondere beim Entfall von Prototypen, mit denen derzeit Produktionsprozesse abgesichert werden, sowie der Verkürzung von Produktentwicklungsprozessen müssen solche Simulationsmethoden entwickelt werden. Nur dadurch lassen sich die geforderten Qualitätsziele der Fahrzeugkarosserie mit einem möglichst geringen und somit wirtschaftlichen Änderungsaufwand im Produktionsanlauf der Vorserienfahrzeuge schnellstmöglich realisieren. Aus dem vorgestellten Stand der Technik auf dem Gebiet der Prozesssimulation des Karosseriebaus wird im folgenden Kapitel die Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit abgeleitet.

## 3 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

### 3.1 Vorliegende Erkenntnisse der Rückfederungsberechnung von Pressteilen im Zusammenbau

In der Vergangenheit wurden in Arbeiten von [Roh01], [Fle09] u. [Gös10a] Methoden entwickelt, um die Pressteilmaßhaltigkeit durch numerische Umformsimulationen beurteilen zu können. Der Fokus der Betrachtung hat sich dabei ausgehend von der Ziehteilsimulation auf die Folgeoperationen der Pressteilherstellung erweitert. Neben der Versagensprognose und den Robustheitsuntersuchungen wird die Umformsimulation hauptsächlich zur Rückfederungsberechnung der Pressteile verwendet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind heutzutage ein wichtiger Bestandteil für die Definition der Rückfederungskompensation. Maßnahmen zur Verbesserung der Maßhaltigkeit in Form von Werkzeugüberbiegungen oder anderer Modifikationen der Wirkflächen von Umformwerkzeugen werden mit Hilfe der Umformsimulation festgelegt [Rol04], [Haa11] u. [Sch12].

Aktuelle Forschungsschwerpunkte zur Verbesserung der Simulationsgenauigkeit von Umformprozessen und der Rückfederungsberechnung sind die Materialmodellierung insbesondere die Beschreibung des Verfestigungsverhaltens. Die neu entwickelten Modelle können beispielsweise den Bauschinger-Effekt (richtungsbestimmte Änderung der Elastizitätsgrenze nach einer primären plastischen Verformung) und die kombinierte isotrop-kinematische Verfestigung bei der zyklischen Belastung modellieren [Cha08], [Bar11], [Yos15] u. [Wag13]. Durch die komplizierten Werkstoffmodelle kann das Rückfederungsverhalten der Pressteile in den meisten Fällen besser prognostiziert werden, die größte Schwierigkeit ist jedoch die hohe Anzahl an notwendigen Versuchen zur Bestimmung der werkstoffspezifischen Modellparameter und die komplexe Datenaufbereitung [Sut14]. Versuchsdaten liegen meist nur sporadisch vor und sind in keiner Weise statistisch abgesichert. Zusätzlich kann ein Werkstoff meist in unterschiedlicher Software erst mit unterschiedlichen Materialmodellen (je nach Implementierung in der Software) optimal beschrieben werden [Kes07].

Der Fokus der Umformsimulation beschränkt sich derzeit jedoch auf die Qualitätsverbesserung der Einzelteilerfertigung im Presswerk. Zusammenhänge, die sich aus der Maßhaltigkeit der Einzelteile sowie den folgenden Fügeprozessen im Rohbau ergeben, werden bislang nicht berücksichtigt. [Fle09] stellt im Ausblick seiner Arbeit das Ergebnis einer Rückfederungsberechnung einer aus drei Pressteilen bestehenden Baugruppe vor. Die Simulationsergebnisse wurden in der Arbeit jedoch nicht validiert. In der Veröffentlichung von [Gal03] wurde bereits die Rück-

federungsberechnung einer Motorhaube aus insgesamt fünf Einzelteilen vorgestellt. Die Simulationsschritte beim Zusammenbau mussten aufgrund der damals vorhandenen Rechenleistung und der Modellgröße jedoch stark vereinfacht werden, Einlege- und Spannprozessschritte in Fügevorrichtungen sowie der Falzprozess konnten deshalb nicht berücksichtigt werden. Die vorgestellte Simulationsmethodik konnte zum damaligen Zeitpunkt nicht mit realen Messergebnissen validiert werden. In weiteren Veröffentlichungen von [Gov12] u. [Gov13] werden Simulationsuntersuchungen sowie experimentelle Ergebnisse einer stark vereinfachten, S-Rail ähnlichen Geometrie vorgestellt. Die beiden nicht maßhaltigen Versuchsbauteile aus hochfesten Stahlwerkstoffen werden darin über Widerstandspunktschweißen zu einem Zusammenbau gefügt. In der Simulation wird der Schweißpunkt durch ein einfaches Volumenelement zwischen den beiden Pressteilen dargestellt. Die Simulationsergebnisse weisen jedoch trotz der Vereinfachung bei idealisierter Geometrie eine sehr gute Übereinstimmung mit den korrespondierenden Experimenten auf. Die Arbeit von [Eck12a] fokussiert ebenfalls die Maßhaltigkeitsbetrachtung von Pressteilen, die über punktförmige Fügeelemente verbunden sind. Der Zusammenbau wird dabei durch zwei serienähnliche Pressteile, die mit der Simulationssoftware PAM-Stamp und einem darin entwickelten Ersatzmodell virtuell verbunden werden, idealisiert. Als Fügeverfahren wurden das Voll-, das Halbhohlstanzen sowie das Clinchen experimentell untersucht und das Simulationsersatzmodell den Ergebnissen angepasst. Einflüsse auf die Maßhaltigkeit von Baugruppen durch den Falzprozess wurden nicht untersucht. Da in der Regel bei allen Anbauteilen Falzen als Füge-technik zum Einsatz kommt, müssen Simulationsmethoden entwickelt werden, die auch die Auswirkungen und Zusammenhänge dieser Füge-technik auf die Maßhaltigkeit der Baugruppe abbilden. Mit der derzeitigen Umformsimulationssoftware AutoForm-Solver<sup>®plus</sup> R6 lässt sich heute nach einer Pressteilsimulation der anschließende Falzprozess recht realistisch abbilden. Jedoch ist während der Falzsimulation das Innenteil als idealisiertes, starres Bauteil abgebildet und eine anschließende Rückfederungsberechnung kann derzeit ausschließlich ein elastisches Innenteil berücksichtigen [Aut15].

### **3.2 Motivation und wissenschaftliche Zielsetzung der Arbeit**

Mit den derzeitigen Simulationsmethoden für die Fertigungsschritte im Presswerk und dem anschließenden Karosseriebau ist es nicht möglich, für gefügte Baugruppen, wie beispielsweise Klappen- und Anbauteile, Maßabweichungen aufgrund von in der Produktion verursachten Rückfederungseffekten zu berechnen. Eine durchgehende Simulationsmethode zur Berechnung der Maßhaltigkeit von gefalzten Baugruppen steht bislang noch nicht zur Verfügung. Insbesondere für die Optimierung von Werkzeugen, Anlagen und Produktionsprozessen in der digitalen Phase der Produktentwicklung ist dies von besonderer Bedeutung, da sich derzeit der Fokus zur Verbesserung der Maßhaltigkeit in dieser Phase auf die Einzelteile beschränkt.



Bislang wird als Optimierungsziel für die Einzelteile eine möglichst geringe Maßabweichung zum Konstruktionsdatensatz gefordert, obwohl sich durch die folgenden Produktionsprozesse im Karosseriebau Maßabweichungen ergeben können oder der Einfluss bestimmter Einzelteile auf die Gesamtmaßhaltigkeit des Zusammenbaus überschätzt wird. Für eine Verbesserung der Maßhaltigkeit des Zusammenbaus ist es somit durchaus möglich, dass eine mit hohen Kosten verbundene Presswerkzeugoptimierung nicht zwingend notwendig ist. Die fertigungstechnischen Strategien zur Verbesserung der Form- und Maßgenauigkeit der einzelnen Pressteile können folglich im Hinblick auf die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus bislang nicht eindeutig definiert werden.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, die heute kommerziell vorhandenen Simulationsmethoden zur Berechnung der Rückfederung von einem Pressteil auf den Zusammenbau aus mehreren Einzelteilen für Baugruppen wie etwa Türen und Klappen zu erweitern. Die Simulationsmethodik, die dabei entwickelt wird, soll somit in allgemeiner Form die Einzelteilerzeugung im Presswerk sowie die Fügeprozesse im Rohbau miteinander vereinen. Die Arbeit beschränkt sich dabei physisch auf Klappen- und Anbauteile, bei denen in der Regel zunächst ein Untereinbau aus mehreren Einzelteilen gefügt wird, bevor dieser im Anschluss daran durch den Falzprozess mit der Beplankung verbunden wird. Es wird eine Simulationsmethode auf virtueller Basis entwickelt, die sowohl das Zusammenwirken mehrerer Einzelteile im elastisch-plastischen Zustand berücksichtigt, als auch die betrachteten Fügeprozesse sowie Prozessrandbedingungen bis hin zum Prozessschritt „Lackieren und Trocken“ hinreichend genau abbildet.

Aus dem vorherigen Kapitel wird deutlich, dass bei dem breiten Spektrum von Fügeverfahren im modernen Karosseriebau sich keine direkte und allgemeingültige Simulationsmethodik für den Karosseriebau ableiten lässt. Dennoch soll der Simulationsaufbau im Rahmen dieser Arbeit so gestaltet werden, dass sich dieser auch auf Verfahren und Prozessrandbedingungen, die nicht Gegenstand dieser Arbeit sind, erweitern lässt (wie z. B. auf thermische Fügeverfahren).

Ein wesentlicher Vorteil der Erweiterung der virtuellen Prozesskette ist die Möglichkeit, Zusammenhänge zwischen der Maßhaltigkeit der einzelnen Pressteile und ihre Auswirkungen auf die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus virtuell untersuchen zu können. Durch die gekoppelte Simulation von Pressteilerzeugung und Karosseriebau lässt sich beispielsweise das Zusammenwirken von Außenhautteilen und Innenteilen numerisch betrachten. Aufwändige Prototypenanfertigungen und Prozessabsicherungen im realen Aufbau können somit eingespart werden. Des Weiteren lassen sich Kompensationsstrategien durch die ganzheitliche Betrachtung anpassen und Toleranzen von Einzelteilen auf ihre Funktion hin optimieren und festlegen.

### 3.3 Vorgehensweise

Bevor mit der Simulationsmethodenentwicklung begonnen werden kann, muss zunächst der Fertigungsprozess genau analysiert und definiert werden. Für eine Grundlagenuntersuchung wird in der Regel auf vereinfachte Versuchsbauteile zurückgegriffen. Soll jedoch die Prozesskette aus Pressteilfertigung und Karosseriebau abgebildet werden, würde dies bei einem Zusammenbau aus mehreren Einzelteilen zu einem zu sehr hohen Werkzeug- und Anlagenkosten für die Versuchsbauteile führen und zum anderen wäre die Übertragbarkeit auf Serienbauteile nur begrenzt gegeben. Insbesondere Faktoren, wie beispielsweise das Datenhandling sowie die derzeit verfügbare Rechenleistung für eine mögliche Serienanwendbarkeit spielen dabei eine entscheidende Rolle. Für die Bearbeitung des Themas dieser Arbeit wurde diesbezüglich ein Zusammenbau einer Serienmotorhaube gewählt. Der Zusammenbau ist jedoch aufgrund seiner vergleichsweise geringen Komplexität, die sich aus den verwendeten Fügeverfahren und Werkstoffpaarungen ergibt, durchaus für eine Grundlagenuntersuchung geeignet.

In Kapitel 4 wird zunächst der vollständige Fertigungsprozess von der Pressteilfertigung bis hin zum fertig lackierten Zusammenbau beschrieben. Die Maßhaltigkeit wird dabei schrittweise messtechnisch erfasst und ausgewertet. Dadurch lassen sich Maßabweichungen der Einzelteile bzw. der Baugruppen entlang der Prozesskette ihrem Ursprung direkt zuordnen. Aus dieser Messreihe können somit im darauffolgenden Kapitel notwendige Bausteine für eine durchgängige Simulationsmethode abgeleitet werden. Dies beinhaltet im Wesentlichen die für die numerische Prozesssimulation definierte Prozessbeschreibung, die verwendeten Randbedingungen und getroffenen Vereinfachungen. In Kapitel 6 wird die entwickelte Simulationsmethode auf den Zusammenbau übertragen und mit den Messungen validiert.

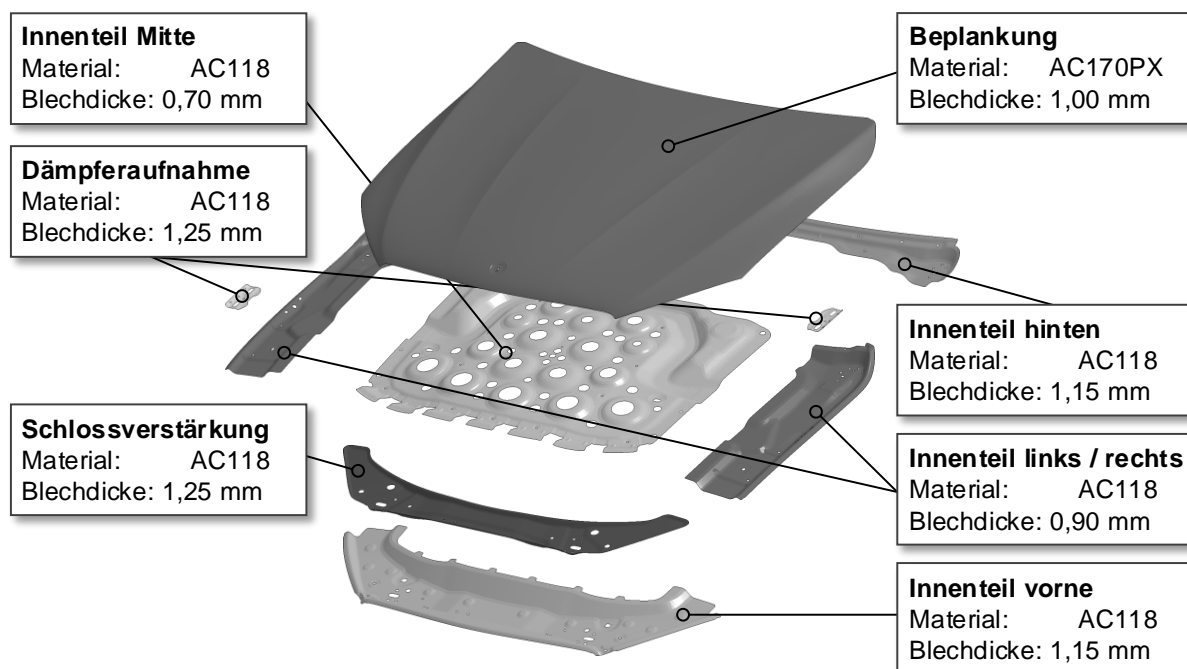
Die Anwendung der Simulationsmethode wird in Kapitel 7 ausgeführt. An dieser Stelle wird simulativ eine Einflussanalyse für die Zusammenhänge der Maßhaltigkeit aus den Einzelteilen und dem Zusammenbau dargestellt. Aus der Zusammenbausimulation werden Kompensationsmaßnahmen zur Optimierung der Maßhaltigkeit abgeleitet und simulativ untersucht. Die Ergebnisse aus Kapitel 7 stehen somit beispielhaft für eine spätere Simulationsanwendung in der digitalen Produktentwicklung. Durch die Anwendung soll aufgezeigt werden, dass durch die in dieser Arbeit definierte und beschriebene Simulationsmethodik in der frühen Phase der Produktentwicklung eine Verbesserung bei der Maßhaltigkeitsverbesserung von Türen und Klappen erreicht werden kann.

## 4 Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen der Prototypenphase wurde die Fertigung einer Zusammenbaugruppe einer Motorhaube von der Einzelteilerfertigung im Presswerk bis hin zur fertig lackierten und am Fahrzeug montierten Baugruppe, begleitet. Im folgenden Kapitel wird der Versuchsaufbau der experimentellen Untersuchungen beschrieben. Der wesentliche Fokus der Betrachtung lag dabei auf der Maßhaltigkeit der Einzelteile sowie der Baugruppe entlang dieser Fertigungsprozesskette. Zunächst wird im Unterkapitel 4.2 die Gesamtprozesskette bei der Fertigung einer Motorhaube beschrieben, bevor anschließend in Kapitel 4.4 auf die Auswertung der optisch erfassten Messergebnisse eingegangen wird. Die dargestellte Versuchsreihe der Prototypenphase ist mit wenigen Ausnahmen den Produktionsbedingungen eines Serienprozesses gleichzusetzen. Aus den in diesem Kapitel dargestellten Ergebnissen werden in Kapitel 5 verschiedene Simulationsmodelle entwickelt und Randbedingungen abgeleitet, um den Fertigungsprozess vom Einzelteil bis hin zur gefügten Baugruppe simulativ darzustellen.

### 4.1 Konstruktiver Aufbau der Baugruppe Motorhaube

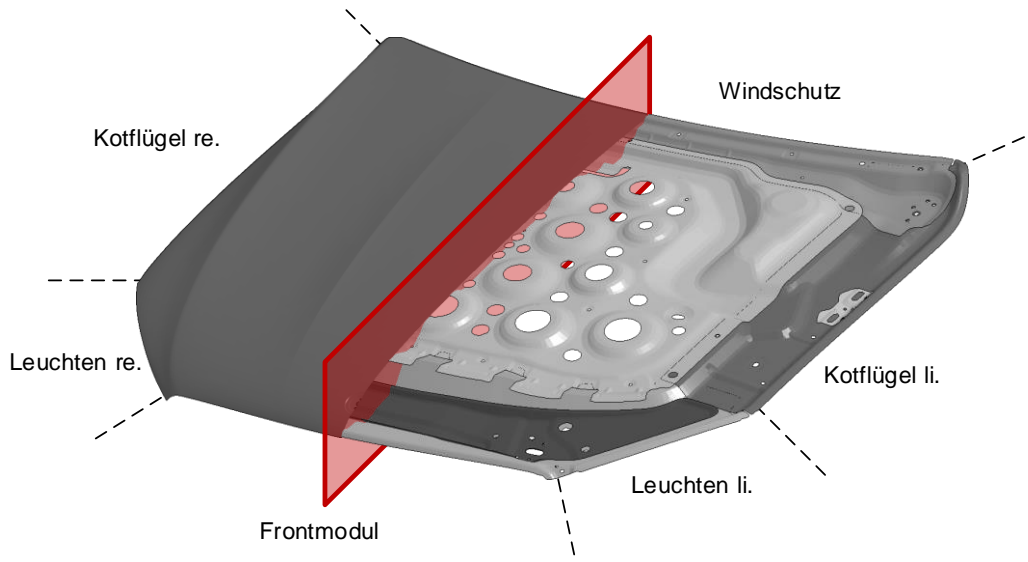
Der Zusammenbau der betrachteten PKW-Motorhaube besteht im Wesentlichen aus neun Blechformteilen, wobei sich die einzelnen Strukturteile zu einem Unterassemble in Patchbauweise zusammenfassen lassen. Die Einzelteile, die in Aluminiumbauweise gefertigt sind, sind in Abbildung 40 beschrieben.



**Abbildung 40:** Übersicht der einzelnen Pressteile des untersuchten Zusammenbaus Motorhaube

Der Zusammenbau der Motorhaube (vgl. Abbildung 41) eignet sich als Versuchsbauteil sehr gut, da beispielsweise, wie bei sämtlichen Klappenbauteilen im Karosseriebau, das Innenteil

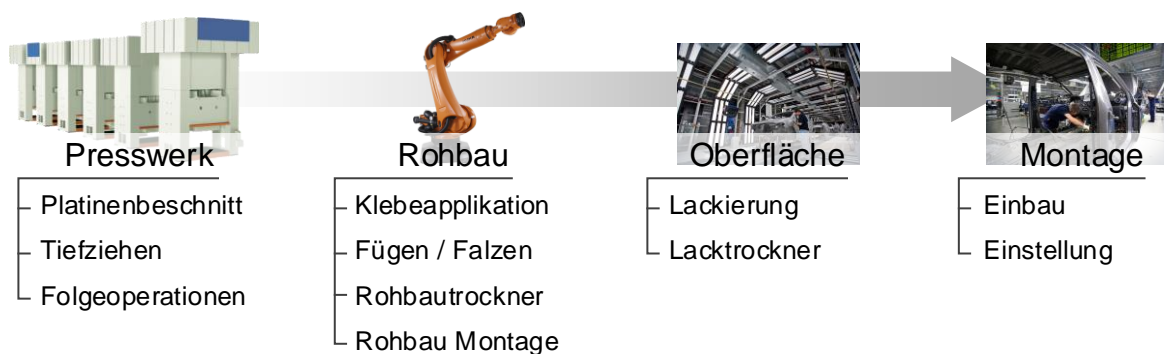
aus mehreren Einzelteilen mit unterschiedlichen Materialdicken aufgebaut ist. Dennoch ist die Komplexität des Zusammenbaus nicht all zu hoch, da sich die verwendete Fügetechnik im Wesentlichen auf drei Verfahren (Clinchen, Kleben und Falzen) beschränkt und die Einzelteile allesamt als Pressteile ausgeführt sind.



**Abbildung 41:** Versuchsbauteil Motorhaube im Zusammenbau sowie angrenzende Bereiche (Beplankung geschnitten dargestellt)

## 4.2 Fertigungsprozesskette der Baugruppe Motorhaube

Im Fokus der Betrachtung stand die gesamte Fertigungskette einer Motorhaube, beginnend bei der Einzelteilerzeugung im Presswerk, bis hin zum fertig am Fahrzeug verbauten und lackierten Zusammenbau. Die einzelnen Stationen dieser Gesamtprozesskette sind in Abbildung 42 dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Fertigungsschritte näher erläutert.

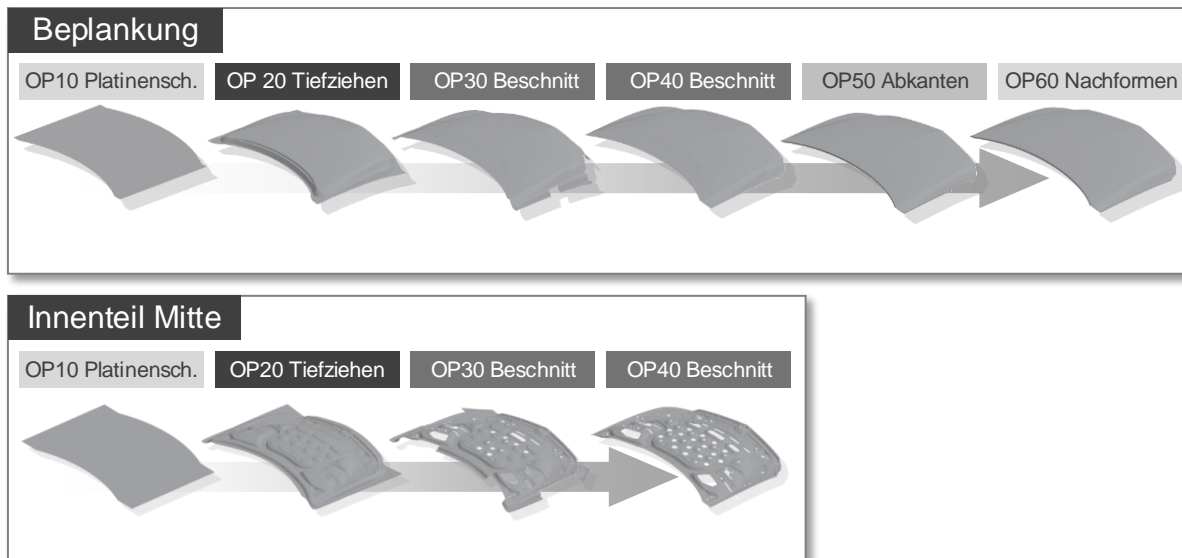


**Abbildung 42:** Prozesskette bei der Motorhauben Fertigung – vom Coil bis zum fertig verbauten Zustand am Fahrzeug [Lie14]

### 4.2.1 Presswerk – Fertigung der Pressteile

Die Herstellung der Einzelteile erfolgte auf Versuchspressen unter seriennahen Bedingungen wie dies in der Prototypenphase üblich ist. Dabei werden, ausgehend von der ebenen Platine, die komplexen Pressteile in mehrstufigen Umformschritten gefertigt. Die einzelnen Umformstufen werden im sogenannten Methodenplan definiert. Im Allgemeinen lassen sich dabei drei

wesentliche Prozessschritte charakterisieren. Begonnen wird mit der eigentlichen Formgebung, dem sogenannten Karosserieziehen, bevor im Anschluss daran eine oder zwei Beschnitt-Operationen folgen. Abschließend werden in Folgeoperationen beispielsweise Flansche abkantet oder Verprägungen nachgeformt. Für die beiden Pressformteile „Beplankung“ und „Innenteil Mitte“ sind die Operationsfolgen der Pressteilfertigung exemplarisch in Abbildung 43 dargestellt.



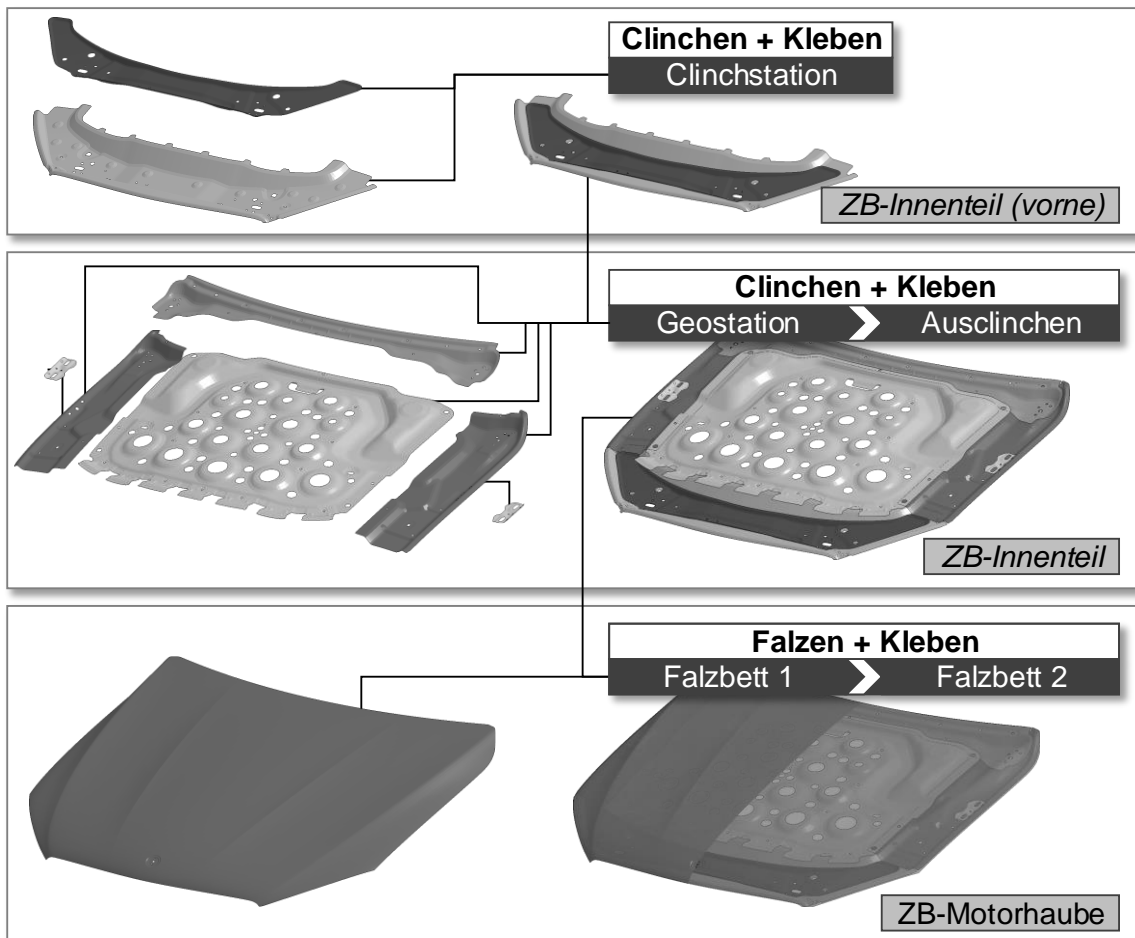
**Abbildung 43:** Operationsfolge bei der Pressteilfertigung für die beiden Pressteile Motorhauben-Beplankung (oben) und das Innenteil Mitte (unten)

Im Unterschied zum späteren Serienprozess sind die Werkzeuge in der Prototypenphase aus einer Zamak-Legierung gefertigt und die Beschnittoperation erfolgt nicht im Presswerkzeug, sondern aus Kostengründen in einer Laserzelle. Dennoch wurden bei den betrachteten Pressteilen sämtliche formgebenden Folgeoperationen, wie beispielsweise Abkantoperationen, durch Prototypenwerkzeuge aufgebaut und dabei nicht auf Klopffmodelle zurückgegriffen. Maßabweichungen der Pressteile aufgrund des vergleichsweise geringen Reifegrades der Werkzeuge sind jedoch für die Auswertung der Maßhaltigkeit entlang der Produktionskette nicht störend. Vielmehr lassen sich daraus Schlüsse ziehen, wie sich diese Maßabweichungen auf den späteren Zusammenbau auswirken.

#### 4.2.2 Rohbau - Fügen durch Clinchen, Kleben und Rollfalzen

Nach der Pressteilfertigung werden die Einzelteile im Rohbau mit Hilfe verschiedener Fügeverfahren zu einem Zusammenbau (ZB) gefügt. Am Beispiel der Motorhaube ist in Abbildung 44 die Fügereihenfolge dargestellt. Zunächst werden die vorderen beiden Pressteile, Innenteil vorne und die Schlossverstärkung, durch Clinch-Kleben zu einem Unterassemble gefügt, dem ZB-Innenteil vorne. Danach werden sämtliche Innenteile wiederum durch Clinchen-Kleben zu einer Unterbaugruppe, dem sogenannten ZB-Innenteil, gefügt. Anschließend werden Beplankung und ZB-Innenteil durch Rollfalzen und Falzkleben gefügt.

Der an den Fügeflächen applizierte Rohbaukleber dient zum einen der Abdichtung der Fügestellen (Korrosionsschutz) und zum anderen wird durch den im KTL-Trockner aushärtenden Kleber die Gesamtsteifigkeit des Zusammenbaus deutlich erhöht.



**Abbildung 44:** Fügereihenfolge der untersuchten Prototypenmotorhaube

Insbesondere das Fügen des ZB-Innenteils als Unterbaugruppe sowie der Falzprozess sind für die in Kapitel 5 entwickelte Simulationstechnik von besonderer Bedeutung. Um die wesentlichen Einflussgrößen auf die Maßhaltigkeit in der Simulation abzubilden, werden diese beiden Fertigungsschritte im Folgenden genauer betrachtet.

#### ***Fügen der Unterbaugruppe ZB-Innenteil***

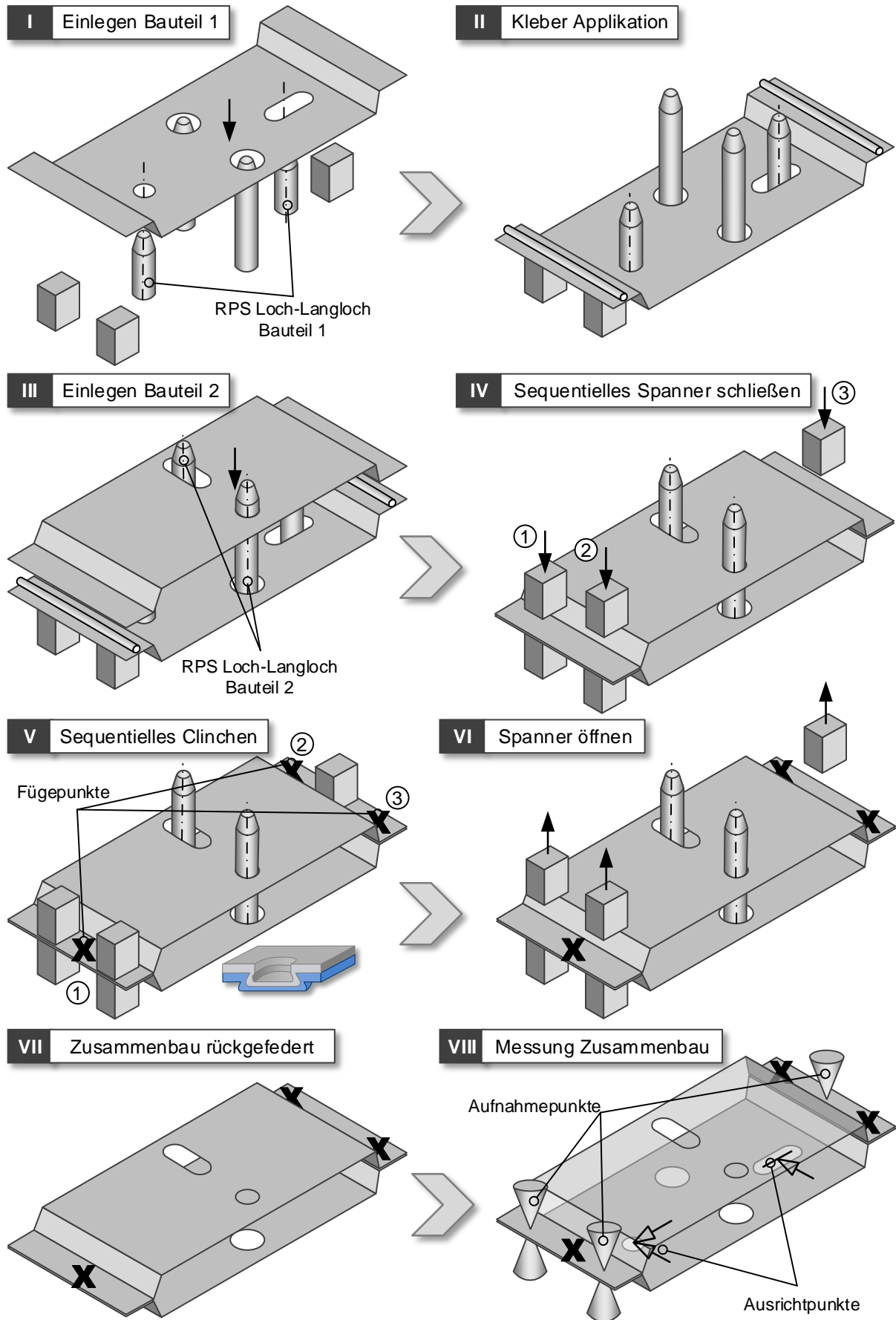
Beim Clinchprozess des ZB-Innenteils werden die Einzelteile zunächst in die Fügevorrichtung gelegt, die Spanner sequentiell geschlossen und die Pressteile somit an den Spannstellen auf die eingestellte Position „gedrückt“. Die Spannstellen der Fügevorrichtung zur Bauteilfixierung während des Fügevorgangs sind dabei nach den CAD-Vorgaben eingestellt, d. h. an den Spannpositionen entspricht die Lage im Raum den Soll-Vorgaben der CAD-Konstruktion. Weichen die Pressteile von der Soll-Geometrie ab, führt das Spannen der nicht maßhaltigen Einzelteile meist zu rein elastischen Verformungen (abhängig von Anzahl, Lage und Spannreihenfolge der Spannstellen sowie dem Betrag der Maßabweichung der Einzelteile).

Nach dem sequentiellen Spannen und Ausrichten (meist über Loch-Langloch Zentrierungen) der Einzelteile zueinander (vgl. Abbildung 45) ist es durchaus möglich, dass die zu fügenden Einzelteile sich an den Fügstellen nicht berühren (abhängig von der Anzahl und Lage der Spannungspunkte relativ zur Fügstelle). Durch den Niederhalter und die Matrize der Clinchzange werden die beiden zu fügenden Pressteile zunächst jedoch zusammengedrückt und durch das Durchsetzen und Einsenken, mit Hilfe des Stempels in diesem Zustand zusammengehalten. Das Spannen der Einzelteile in der Fügevorrichtung als auch der sequentielle Fügeprozess verursacht Spannungen in den zu fügenden Bauteilen, die nach dem Öffnen der Spanner und der Bauteilentnahme zum Rückfedern der Baugruppe führen.

Aus Taktzeit- und Zugänglichkeitsgründen können im Serienprozess nicht alle Fügepunkte in derselben Fügestation gefügt werden. Aus diesem Grund werden zunächst nur die sogenannten „Geopunkte“ gesetzt, bevor in einer folgenden Fügestation die restlichen Fügepunkte gesetzt werden. Bei den Geopunkten handelt es sich somit lediglich um eine erste Fixierung der Bauteile, damit diese sich in ihrer relativen Lage zueinander nicht mehr verschieben können. In der ersten Fügestation, in der die Geopunkte gefügt werden, sind folglich deutlich mehr Zentrier- und Spannvorrichtungen notwendig, um die relative Lage der jeweiligen Einzelteile zueinander sicherzustellen. Nachdem in dieser ersten Station sämtliche Einzelteile zueinander fixiert sind, kann in der zweiten Station auf den Großteil der Zentrier- und Spanntechnik verzichtet werden, sodass in dieser Station eine bessere Zugänglichkeit für die Fügezange gegeben ist (vgl. RPS-Punkt Reduzierung einer gefügten Baugruppe Kapitel 2.3.1).

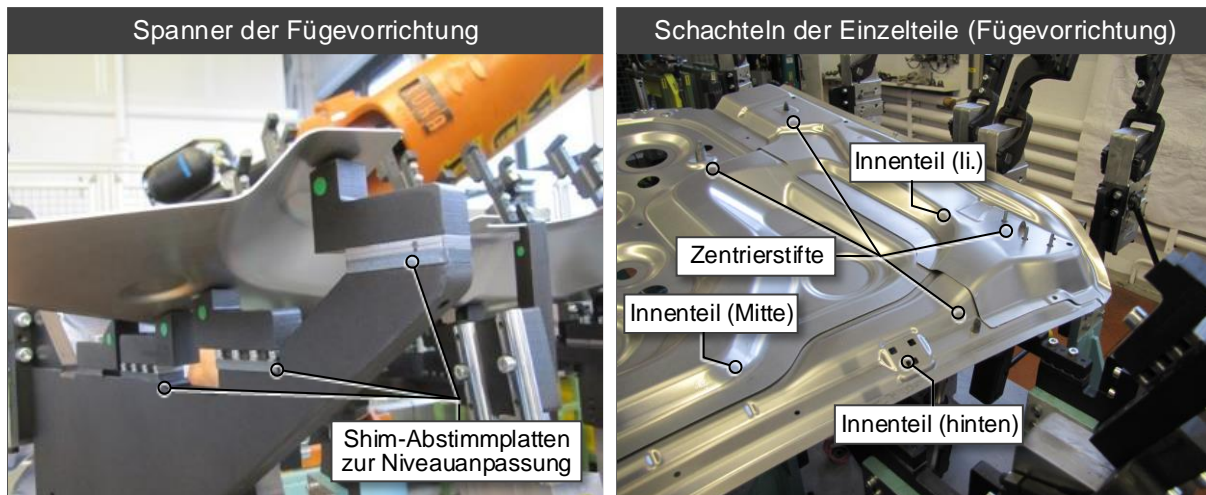
Die Vorrichtung der betrachteten Fügestation, insbesondere die Anzahl und Lage der Spannungspunkte im Prototypenbau, entspricht dabei der des späteren Serienprozesses. Sämtliche Spannstellen wurden entsprechend den CAD-Daten aufgebaut und nicht aus ihrer Soll-Lage verschoben, das heißt, es waren keine Kompensationsmaßnahmen durch Überbiegen der Einzelteile in der Vorrichtung vorgesehen.

Die prinzipielle Vorgehensweise beim Clinch-Kleben fasst Abbildung 45 zusammen. In Abbildung 46 und Abbildung 47 sind Einzelheiten für das Fügen des ZB-Innenteils in der Fügstation dargestellt.

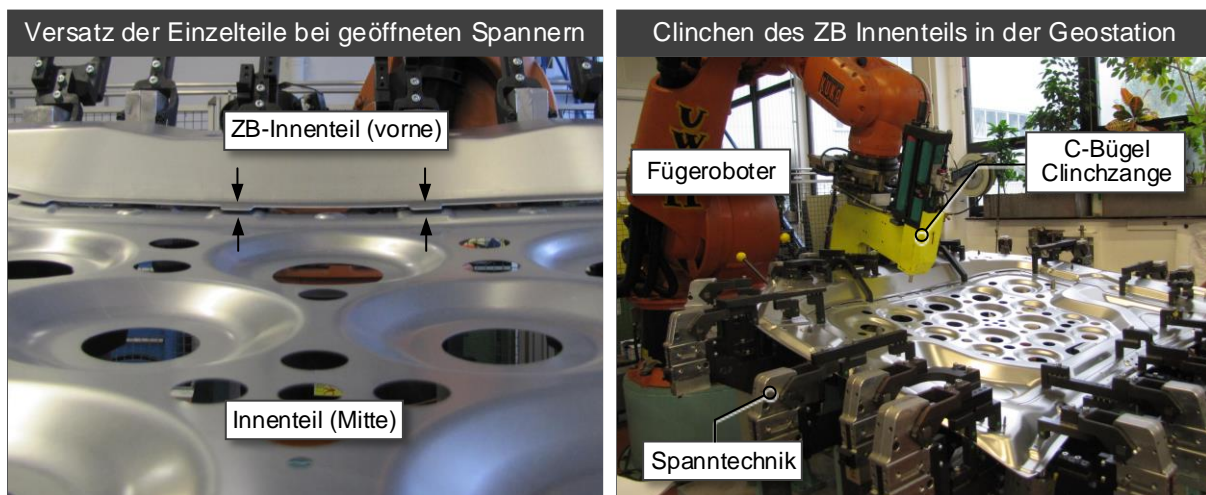


**Abbildung 45:** Schematische Prozessfolge beim Fügen durch Clinch-Kleben, insbesondere Pressteilaufnahme (Loch-Langloch Kombination) und anschließendes Messen der Baugruppe in der Messaufnahme





**Abbildung 46:** Fügevorrichtung für die Fertigung des ZB-Innenteils: Einlegen der Pressteile in die Fügevorrichtung (li.); Schachteln der Pressteile in der Fügevorrichtung mit noch geöffneten Spannern (re.)



**Abbildung 47:** Fügevorrichtung für die Fertigung des ZB-Innenteils: Versatz der Pressteile an den Fügepunkten aufgrund Maßabweichungen (li.); Clinchen des ZB-Innenteils im gespannten Zustand (re.)

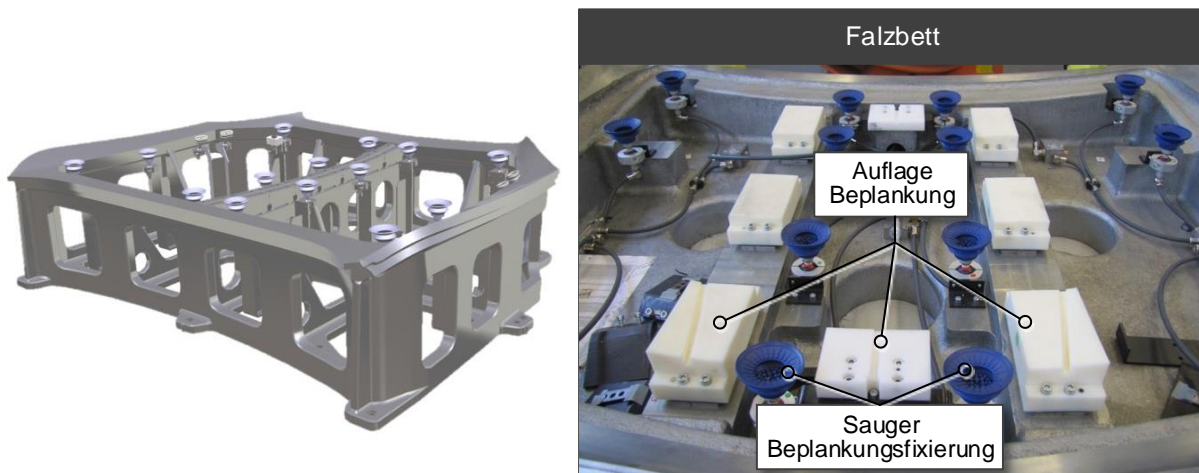
Der zusätzlich applizierte Strukturklebstoff der sogenannten Hybridfügeverbindung soll im ausgehärteten Zustand nach dem Lackrockner die Versteifung der Struktur übernehmen. Die Clinchpunkte dienen folglich ausschließlich der Bauteilfixierung unter Fabriklastfällen, bis der Kleber nach dem KTL-Ofen vollständig ausgehärtet ist. Ein Vorteil dieser Verbindung ist der vergleichsweise geringe Verzug der Pressteile beim Fügen. Im Bereich der Clinchpunkte kann es, je nach Abstimmung der Clinchzange (Blechdickenpaarung, Niederhalterdruck und Stempelkraft), zu sehr lokal ausgeprägten Deformationen kommen. Diese Deformationen spielen jedoch aufgrund der vergleichsweise hohen Steifigkeit der Pressteile für den globalen Bauteilverzug eine untergeordnete Rolle. Dies konnte durch den Vergleich zweier Messungen eines ZB-Innenteils in den beiden Fertigungszuständen „teilweise durch Geopunkte gefügt“ und „vollständig gefügt“ bestätigt werden. Trotz der deutlich höheren Anzahl an Clinchpunkten am

fertig gefügten Bauteil konnten im Vergleich zum teilweise gefügten Zustand keine Auswirkungen auf die globale Bauteilmaßhaltigkeit beobachtet werden.

Im Serienprozess erfolgen das Einlegen der Bauteile, das Spannen, das Fügen und die Bauteilentnahme vollautomatisiert mit Hilfe von Industrierobotern und pneumatischer Spanntechnik. Die Bauteillage kann sich, je nach Komplexität des Zusammenbaus, zwischen den einzelnen Fügestationen mehrmals ändern. Aus diesem Grund müssen Positionsänderungen in den Fügevorrichtungen, die sich auf die globale Maßhaltigkeit der Baugruppe auswirken, berücksichtigt werden. Im Fall der Motorhaube wird die erste Unterbaugruppe des ZB-Innenteils vorne in Fahrzeuglage, der Gesamtzusammenbau des Innenteils hingegen in Überkopflage (d. h. um 180° gewendet zur Fahrzeuglage) gefügt.

### *Falzen der Baugruppe zum ZB-Motorhaube*

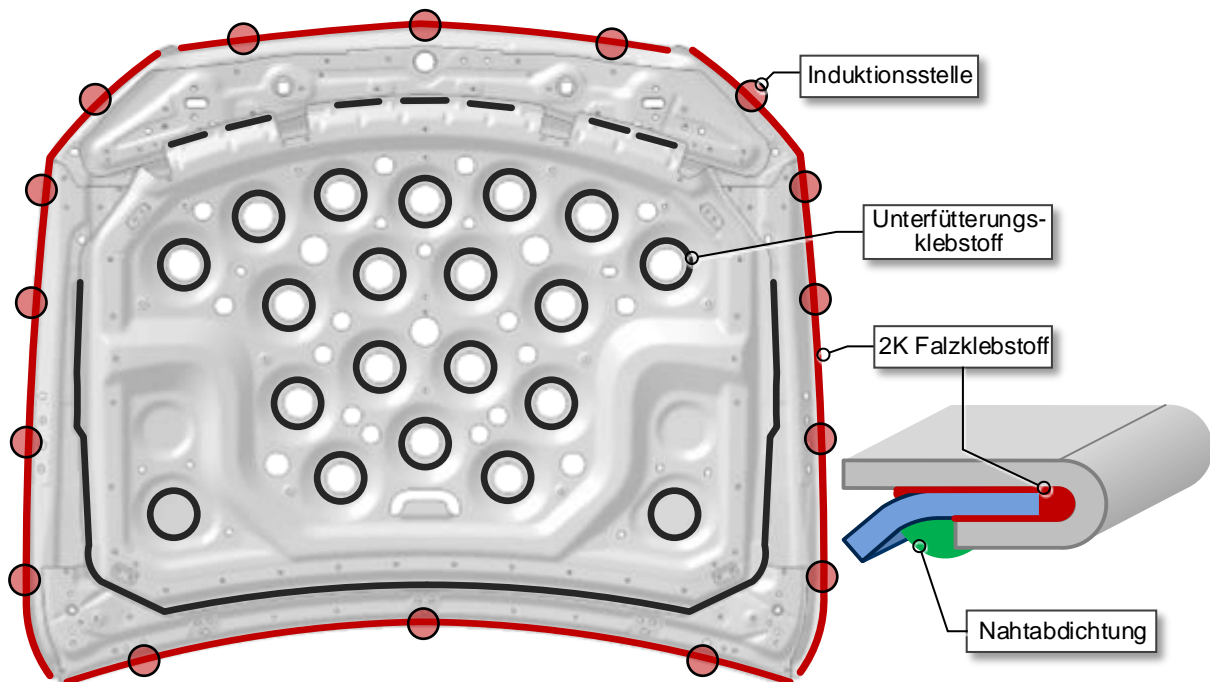
Nachdem der Unterezusammenbau Innenteil vollständig gefügt ist, wird dieser zusammen mit der Beplankung in der Falzstation durch Rollfalzen formschlüssig verbunden. Der Rollfalzprozess findet dabei in Überkopflage (180° gewendet zur Fahrzeuglage) statt. Die einzelnen Prozessschritte beim Rollfalzen erfolgen dabei analog zum Fügen durch Clinchen. Zunächst wird die Beplankung ins Falzbett gelegt, wo sie umlaufend im Falzbereich flächig aufliegt und mit Vakuumsaugern zusätzlich an das Falzbett gedrückt wird.



**Abbildung 48:** CAD-Darstellung des Falzbettes (li.); Sauger zur Fixierung der Motorhaubenbeplankung im Falzbett (re.)

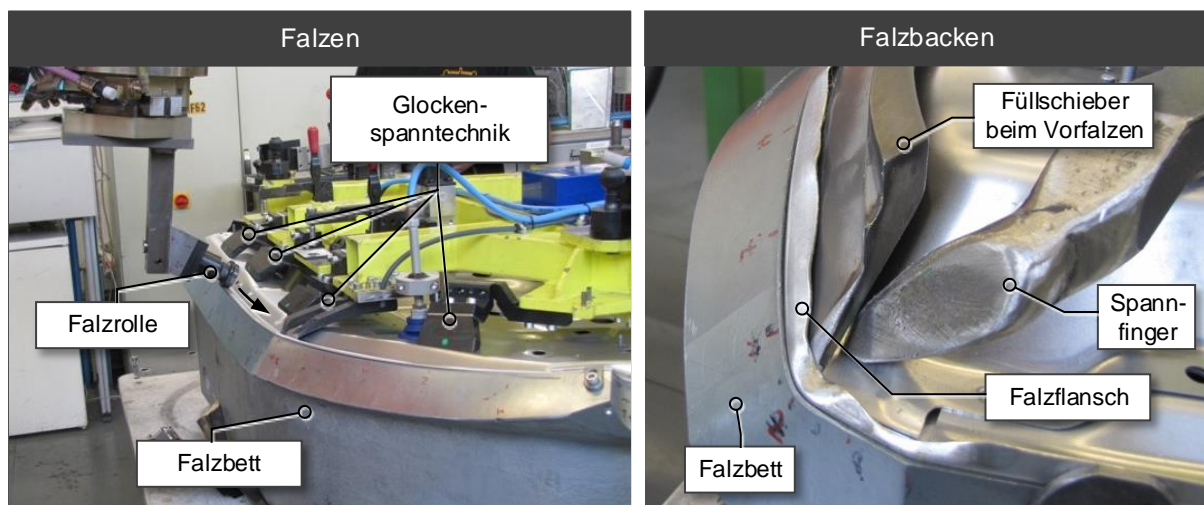
Die Klebstoffapplikation auf die Beplankungsinnenseite erfolgt in diesem Fall im Falzbett. Im Bereich des Falzes wird ein spezieller Strukturklebstoff und in der Mitte der Beplankung ein Stützklebstoff aufgetragen (vgl. Abbildung 49). Der Strukturklebstoff im Falz soll im ausgehärteten Zustand die Steifigkeit der Baugruppe zusätzlich erhöhen und dient auch als Korrosionsschutz im Falzbereich. Im Idealfall ist der Klebstoffauftrag so dosiert, dass dieser nach dem Falzen nicht am Falzflanschende austritt. Das Innenteil, um das gefalzt wird, ist jedoch auf seiner Ober- und Unterseite vollständig mit Klebstoff benetzt. Bei einer ideal ausgeführten

Falzverbindung stehen Beplankung und Innenteil eigentlich lediglich nur über den Klebstoff in Kontakt zueinander (vgl. schematisches Schnittbild durch den Falz in Abbildung 49).



**Abbildung 49:** Applikationsstellen des 2K-Falzklebers und des Unterfütterungsklebers sowie lokale Angelierbereiche zur Falzkleberaushärtung im Rohbau; schematische Schnittdarstellung einer ideal ausgeführten Falzkleberapplikation mit zusätzlicher Nahtabdichtung nach dem Falzen

Nach der Rohbaukleberapplikation wird das ZB-Innenteil auf die Beplankungsinseite gelegt. Beplankung und Innenteil werden über eine Glockenspannvorrichtung, die auf das Innenteil drückt, gegen das Verrutschen gesichert (vgl. Abbildung 50). Der Spanntechnik beim Falzen kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie alle eingeleiteten Prozesskräfte zum Umformen des Falzflansches aufnehmen muss.



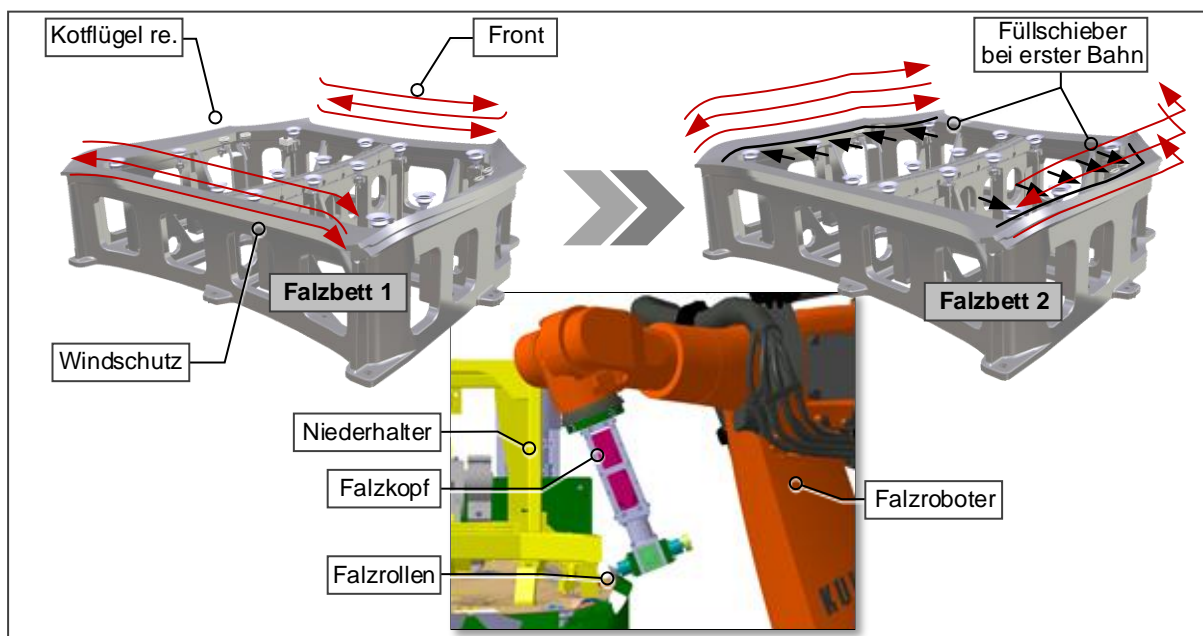
**Abbildung 50:** Falzbett der Motorhaube und Niederhalter in Glockenspanntechnikausführung (li.); Vorfalzen mit Hilfe eines Füllschiebers (re.)

In kritischen Bereichen, wie beispielsweise den Eckbereichen der Motorhaube, sind zusätzliche Spanner am Niederhalter angebracht, um lokale Deformationen bzw. ein Aufbiegen der Beplankung und des Innenteils durch die über die Falzrolle eingebrachte Prozesskraft zu verhindern.

Nachdem Beplankung und ZB-Innenteil über die Spanntechnik am Falzbett fixiert sind, erfolgt der sequentiell, robotergesteuerte Rollfalzprozess und der Falzflansch wird schrittweise umgefaltet. Die Einteilung der Falzbereiche ergibt sich zum einen aufgrund der Zugänglichkeit der Falzrolle bzw. des Falzroboters und zum anderen kann durch den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Falzroboter für den jeweiligen Falzbereich die Taktzeit reduziert werden.

Die einzelnen Roboterbahnen sind aus vielzähligen Koordinatenstützpunkten aufgebaut, die nacheinander vom Falzroboter abgefahren werden. An jedem Stützpunkt kann sowohl die Zustellung der Rolle (Abstand zum Falzflansch) als auch der Falzwinkel angepasst werden. Aufgrund der hohen Prozesskräfte (insbesondere beim Fertigfalzen), den daraus resultierenden Reaktionskräften auf den Roboter und der sich je nach Raumorientierung und Auslenkung des Roboterarmes ändernden Steifigkeit kann dies zu einer deutlichen Abweichung zwischen Ist- und Soll-Position des Roboters führen. Die Programmierung der Roboterfalzbahnen sowie das finale sogenannte „Roboter Teachen“ bei eingelegten Bauteilen sind also mit vergleichsweise hohem zeitlichen Aufwand verbunden.

Bei der dargestellten Motorhaube werden jeweils die Bereiche Windschutz, Anschluss Kotflügel links sowie rechts, Leuchten links sowie rechts und Anschluss Front im Serienprozess getrennt voneinander rollgefaltet (vgl. Abbildung 51). Insgesamt wurde der gesamte Rollfalzprozess für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Motorhaube auf zwei Stationen verteilt. In der ersten Station werden die Bereiche Windschutz (Tropfenfalz) und Anschluss Front (Keilfalz) komplett in drei Bahnen fertiggefaltet.



**Abbildung 51:** Aufteilung des Falzprozesses der Motorhaube auf zwei Falzstationen

Im Bereich der Kotflügel wird bei der ersten Bahn mit einem Füllschieber gefalzt, da der Flanschöffnungswinkel, bedingt durch die Abkantoperation im Presswerk, größer als 120° ist. Durch diesen zusätzlichen Backen, der auf die Blechinnenseite der Beplankung drückt, wird sichergestellt, dass beim Falzen ein scharfer Radius ausgeprägt ist sowie die Umrißkontur gehalten und die Beplankung im Sichtbereich nicht deformiert wird. Die einzelnen Prozessschritte beim Falzen sind nochmals in Abbildung 52 zusammengefasst.

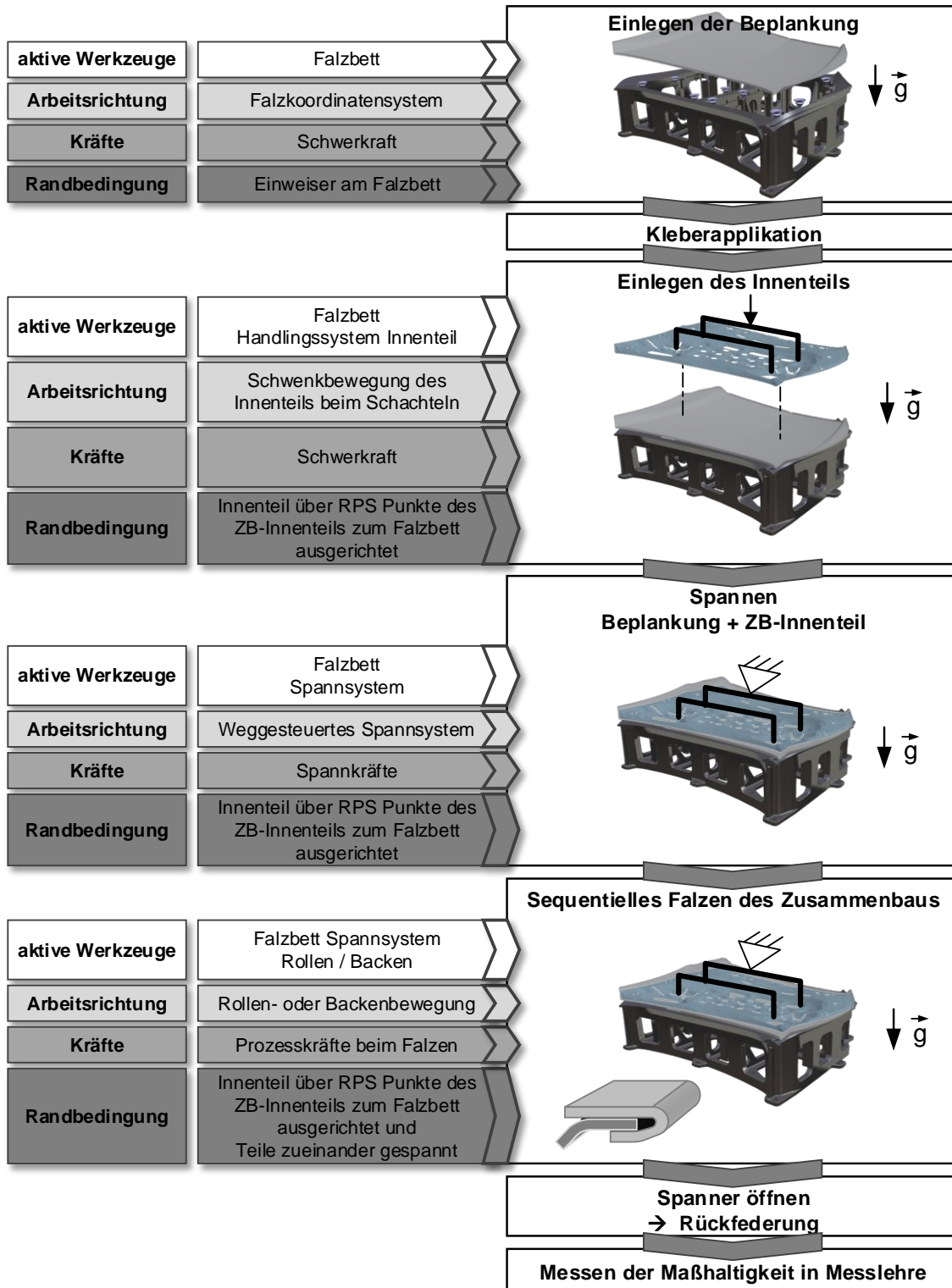
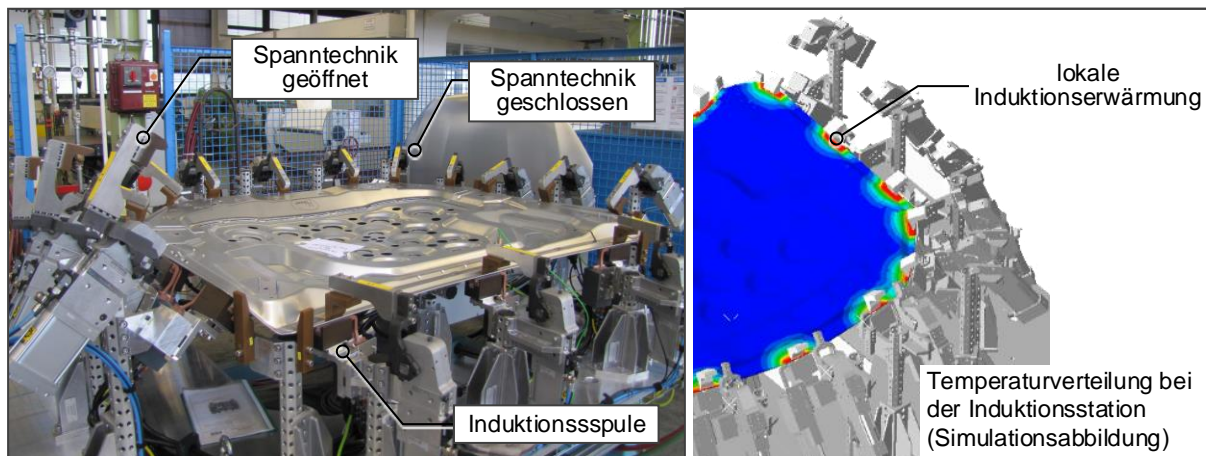


Abbildung 52: Sequentielle Prozessbeschreibung des Falzens der Motorhaube

### 4.2.3 Induktionsstation – Angelieren des Falzklebers

Im direkten Anschluss an die Falzstation erfolgt das Angelieren des Falzklebers in der sogenannten Induktionsstation. Da Beplankung und ZB-Innenteil ausschließlich über den bislang nicht ausgehärteten Klebstoff miteinander verbunden sind, könnte sich die Lage beider Bauteile zueinander aufgrund von Kräften aus Fabriklastfällen (beispielsweise Staplertransport im Ladungsträger zur Anbaulinie) verschieben. Aus diesem Grund wird im Bereich des Falzes lokal über Induktionsspulen der aus den zwei Komponenten Epoxidharz und Härter bestehende Falzkleber angelieert. Durch das Angelieren bei etwa 180° C und einer Haltedauer von ca. 40 Sekunden wird die Festigkeit des Klebstoffes lokal erhöht und die relative Lage von Beplankung zu ZB-Innenteil fixiert.



**Abbildung 53:** Induktionsstation (li.) und die lokale Wärmeverteilung beim Angelieren des Falzklebers - Simulationsdarstellung (re.)

Die Induktionsstation wird in der Praxis häufig dazu verwendet, Maßkorrekturen am Zusammenbau vorzunehmen. Dabei werden die Spanner aus ihrer Nulllage verstellt und der Zusammenbau im gespannten Zustand in eine Zwangslage versetzt. Elastische Verspannungen zwischen Beplankung und ZB-Innenteil werden folglich durch den angelieerten Kleber blockiert. Diese Maßnahmen sind jedoch nur bedingt zielführend, da in Folgeprozessschritten, insbesondere dem KTL-Trockner (bei hoher Temperatur 180°C und langer Haltedauer von 30 min), sich die Festigkeit des bereits angelieerten Falzklebers wieder verringert, wodurch die elastischen Spannungen relaxieren können und die Baugruppe wieder ihre ursprüngliche Formabweichung einnehmen kann.

Nicht immer ist eine Induktionsstation nach dem Falzprozess vorgesehen. Bei Klappen aus Stahlwerkstoffen findet man auch oft Lösungen, bei denen Beplankung und Innenteil an definierten Stellen an der Innenseite mit wenigen Schweißpunkten zueinander fixiert werden.

#### 4.2.4 Rohbauofen, KTL-Trocknerdurchlauf und Lackierung

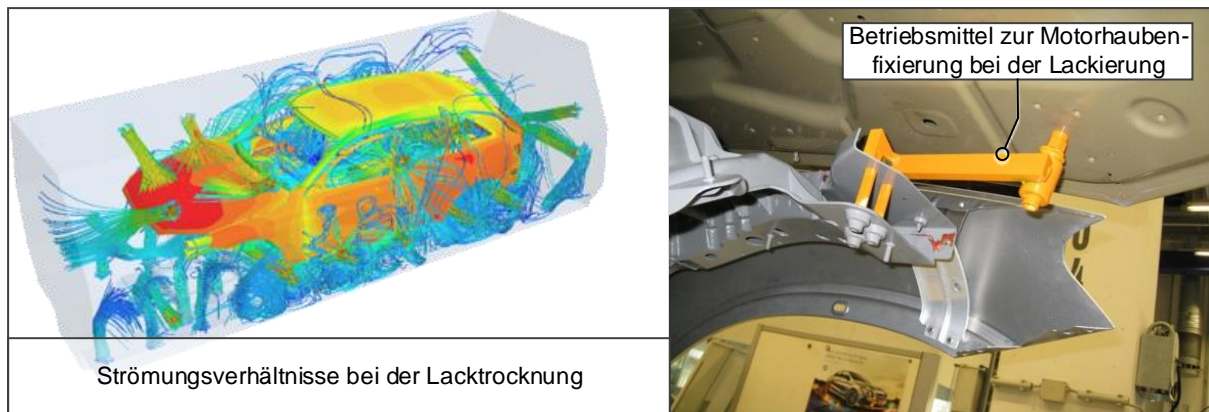
Die folgenden Prozessschritte der Oberflächenbehandlung werden bei der vorliegenden Arbeit nicht im Detail fokussiert. Für eine Maßhaltigkeitsbetrachtung über die gesamte Fertigungskette dürfen diese Schritte jedoch nicht außer Acht gelassen werden. Aus diesem Grund soll dieser Prozessdurchlauf nur kurz erläutert werden.

Für den Durchlauf der Oberflächenbehandlung wird die Motorhaube an der Rohkarosserie montiert und eingestellt. Für die nachfolgenden Prozesse bei der Lackierung müssen die beölten Bauteiloberflächen gereinigt werden, da andernfalls keine Lackhaftung möglich ist. Dies geschieht mittels wässriger Reiniger im Tauch- oder Spülverfahren. Um das Auswaschen, insbesondere der Unterfütterungsklebstoffe, zu verhindern, durchläuft die Karosserie vor der Reinigung durch Tauch- oder Spülverfahren den sogenannten Rohbau-Ofen. Dabei werden die Klebstoffe bei ca. 120 °C und einer Verweildauer von ca. 30 Minuten angeliert.

Nach dem Angelieren der Klebstoffe und dem Reinigen der Karosserie erfolgen die Kathodische-Tauchlackierung (KTL) sowie der anschließende KTL-Trocknerdurchlauf bei 180° C und einer Verweildauer von ca. 30 Minuten. Nach dem KTL-Trockner sind die Klebstoffe vollständig ausgehärtet. Die anschließenden Lackierprozesse von Füller, Basislack und Klarlack laufen im Vergleich zum KTL-Trockner bei niedrigeren Trocknungstemperaturen ab.

Bedingt durch Temperaturdifferenzen kann es insbesondere beim KTL-Trocknerdurchlauf (bei höchster Temperatur und aushärtendem Klebstoff) zum thermischen Verzug von Klappen, Anbauteile sowie der Gesamtkarosserie und somit zu Maßabweichungen kommen. Als Ursachen dafür sind Temperaturdifferenzen beim Aufheizen und Abkühlen (schnelle Erwärmung der Außenhautteile, da diese direkt durch die Düsen des KTL-Trockners angeströmt werden, gegenüber einer langsamen Erwärmung der Struktur der Karosserie) sowie unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten der verwendeten Werkstoffe (Mischbau aus Stahl – Aluminium) zu nennen. Neben dem thermischen Verzug kann das Eintauchen der Karosserie in das kathodische Tauchbad, insbesondere bei sehr großflächigen, geschlossenen Strukturen (z. B. Außenhautbeplankungen), zu unerwünschten Deformationen führen. Ein ungünstiger Eintauchwinkel der Karosserie ins Tauchbad kann zu einer Pegeldifferenz zwischen der Bauteilaußen- und Bauteilinnenseite führen, was wiederum auf die Struktur einwirkende Gewichtskräfte erzeugt.

Für den Prozessdurchlauf der Oberflächenbehandlung ist die Lagerung der Motorhaube von besonderer Bedeutung. Die Motorhaube ist über die Scharniere an der Karosserie angebunden, weitere Aufnahmen erfolgen im Bereich des Frontmoduls über zwei zusätzliche Hilfsbetriebsmittel. Die Lagerung dient hauptsächlich dazu, die wirkenden Prozesskräfte sowie das Eigengewicht der Motorhaube aufzunehmen und ein Durchhängen während des „Ro-Dip“-Durchlaufs (die Karosserie dreht sich dabei im Tauchbecken um die eigene Achse) durch alle KTL-Becken zu verhindern (vgl. Abbildung 54).



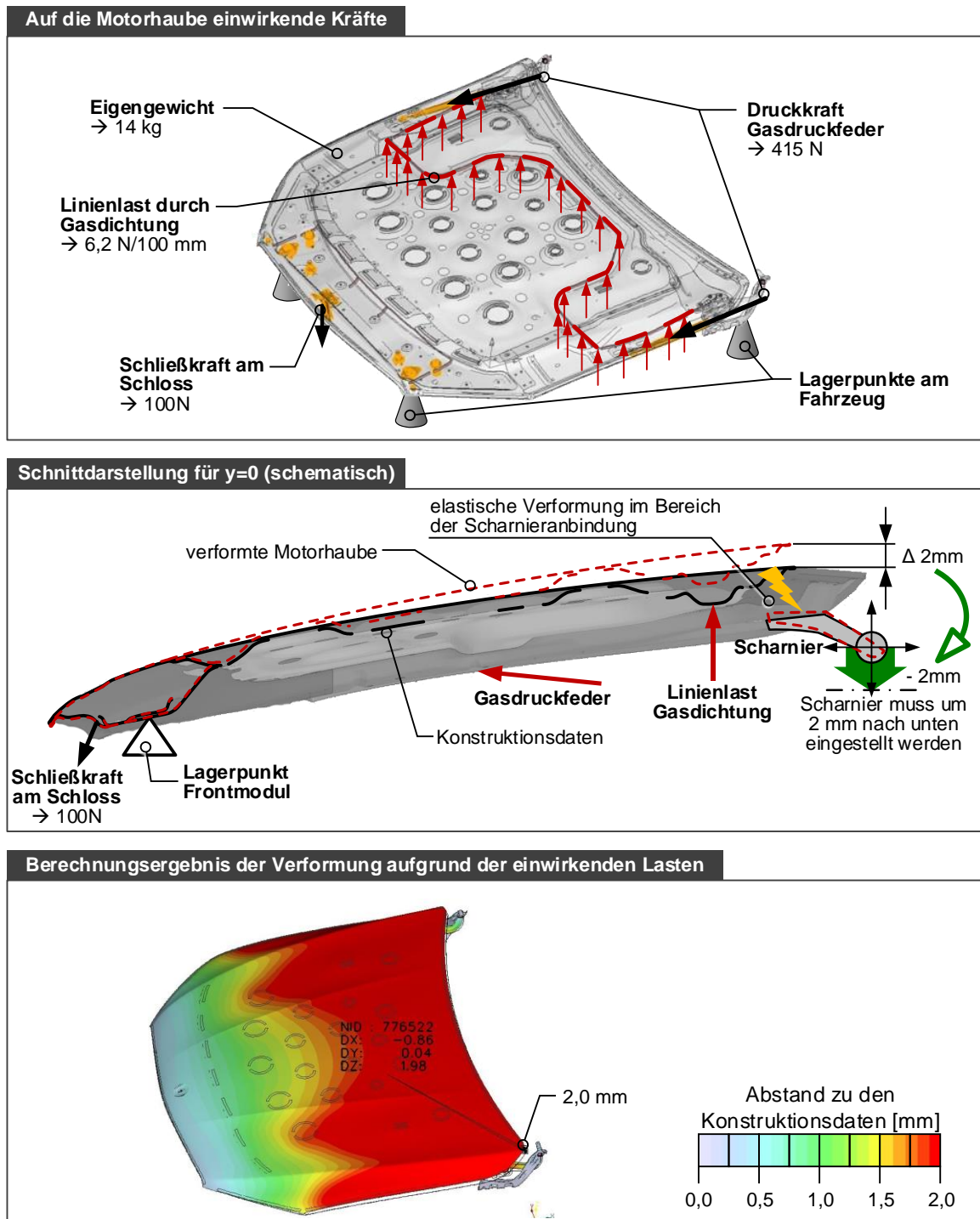
**Abbildung 54:** Durchlauf durch den Lackrocknerprozess: Strömungssimulation für den KTL-Trocknerprozess (li.), Hilfsbetriebsmittel zur Lagerung der Motorhaube im Bereich des Frontmoduls (re.)

#### 4.2.5 Montageapplikationen am Fahrzeug

Die Qualität des Fahrzeuges insbesondere der Karosserie wird vom Kunden ausschließlich am fertig montierten Fahrzeug wahrgenommen. Für eine ganzheitliche Qualitätsbetrachtung sind folglich auch die Fertigungsschritte in der Montage, in der die lackierte Karosserie um alle noch fehlende Teile ergänzt wird, von besonderer Bedeutung. Aus den Montageteilen können Kräfte resultieren, die insbesondere Klappen und Anbauteile verformen lassen. Hinzu kommt, dass sich die gestiegenen Leichtbauanforderungen und rechtlichen Randbedingungen der Crash-Lastfälle (beispielsweise eine vorgeschriebene Deformation beim Kopfaufprall) auf die Steifigkeit der Anbauteile auswirken und diese nicht beliebig erhöht werden kann.

Insbesondere Dichtungen, Innenverkleidungen oder Schließkräfte können zu einer sichtbaren Verformung der Anbauteile führen. Bei Türen wird aus diesem Grund heutzutage bereits das Türinnenteil im Bereich des Fensterrahmens nach Fahrzeug innen überbogen, um der Deformation aufgrund des Dichtungsdrucks beim Schließen der Tür entgegenzuwirken. Bei der untersuchten Motorhaube sind solche Vorhaltemaße derzeit noch nicht vorgesehen. Dennoch ergeben sich durch die Montageteile auf die Struktur der Haube wirkende Kräfte, die in Abbildung 55 veranschaulicht sind. Die Lagerung der Motorhaube am Fahrzeug erfolgt über insgesamt vier Lagerpunkte. Dies sind zum einen die beiden Scharniere im A-Säulenbereich sowie die Auflagepunkte am Frontmodul. Die Scharniere bilden dabei die Lagerpunkte in x-, y- und z-Achsenrichtung des Fahrzeugkoordinatensystems. Die Position der Haube lässt sich dabei über die Scharnieranbindung in alle drei Koordinatenrichtungen einstellen. Die Auflage am Frontmodul bildet ausschließlich eine Auflage und ist in z-Koordinatenrichtung ebenfalls einstellbar. Am Schloss der Motorhaube wird die Motorhaube mit einer Schließkraft von 100 N in negativer z-Richtung nach unten gedrückt, der Schließkraft entgegen wirkt die Gasdichtung, die dazu führt, dass die Motorhaube zwischen den Lagerpunkten Scharnier und Frontmodul in z-Koordinatenachsenrichtung verformt wird. Zusätzlich wirkt aufgrund der Gasdruckfeder eine Druckkraft in x-Koordinatenachsenrichtung auf die Motorhaube ein.





**Abbildung 55:** Darstellung von Kräften und Linienlasten auf die Passungsflächen, die aus der Montage der Motorhaube am fertigen Fahrzeug resultieren

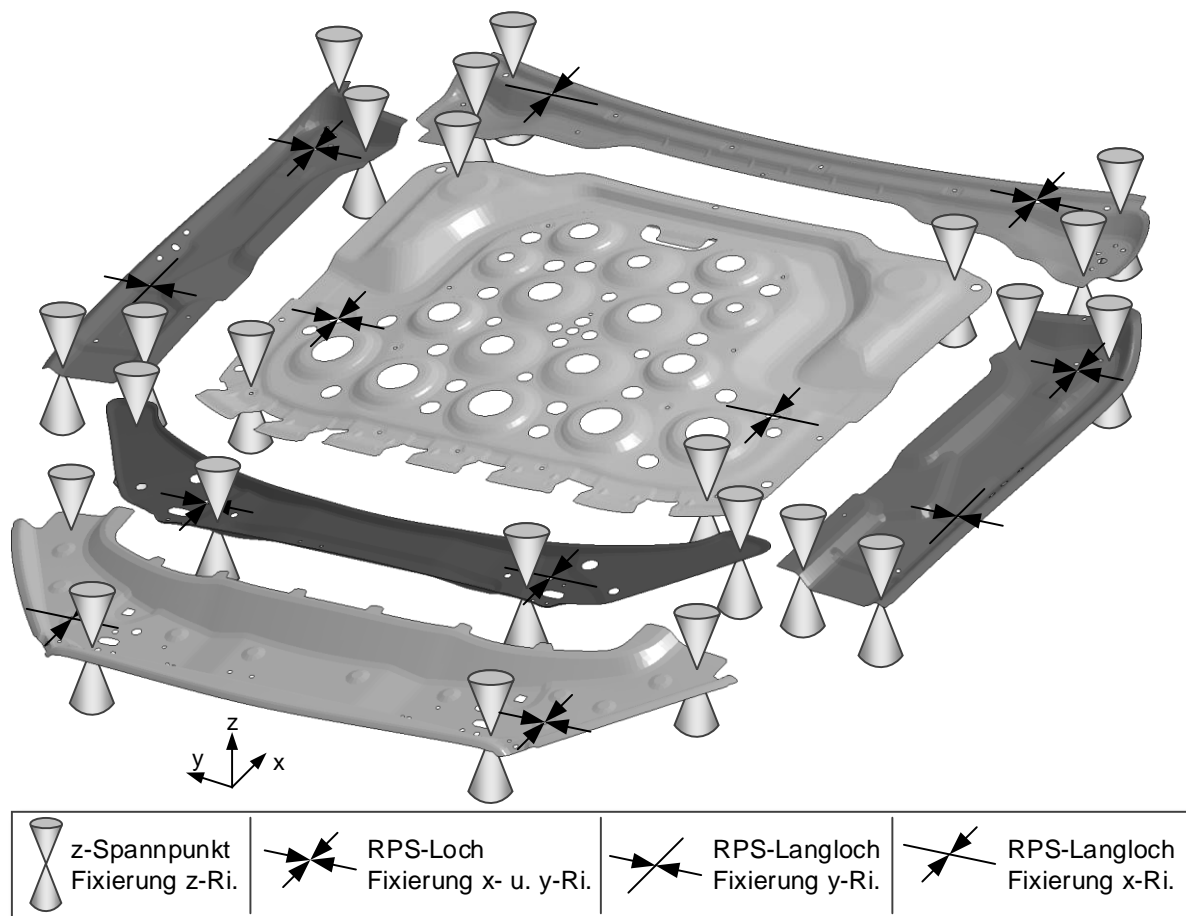
Für die Gesamtverformung aufgrund der wirkenden Lasten hat sich gezeigt, dass die Kombination aus Steifigkeit der Motorhaube, der Scharnieranbindung und die Steifigkeit der Scharniere von besonderer Bedeutung sind und Verformungen von mehreren Millimetern resultieren können. Bei der untersuchten Motorhaube konnten Verformungen von ca. 2 mm am Fahrzeug gemessen werden, diese resultierten im Wesentlichen durch die mangelnde Steifigkeit der Scharnieranbindung (vgl. Abbildung 55). Durch die Einstellmöglichkeit an den Scharnieren in z-Koordinatenachsenrichtung konnte dies jedoch kompensiert werden.

### 4.3 Spann- und Fixierkonzept / Toleranzkonzept der Einzelteile und der Zusammenbaugruppe

Im Folgenden wird das Spannkonzert der Einzelteile sowie der Baugruppen ZB-Innenteil sowie ZB-Motorhaube vorgestellt. Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, setzt ein Spann- und Fixierkonzept der Baugruppe auf dem seiner Einzelteile auf. Es wird aus diesem Grund zunächst auf die Spann- und Fixierkonzepte der Einzelteile der Motorhaube eingegangen, bevor im Anschluss daran jede einzelne Baugruppe vorgestellt wird. Das Spann- und Fixierkonzept bildet die Grundlage für die Maßhaltigkeitsbetrachtung der Prozesskette in Kapitel 4.4.

#### 4.3.1 Spann- und Fixierkonzept der Einzelteile

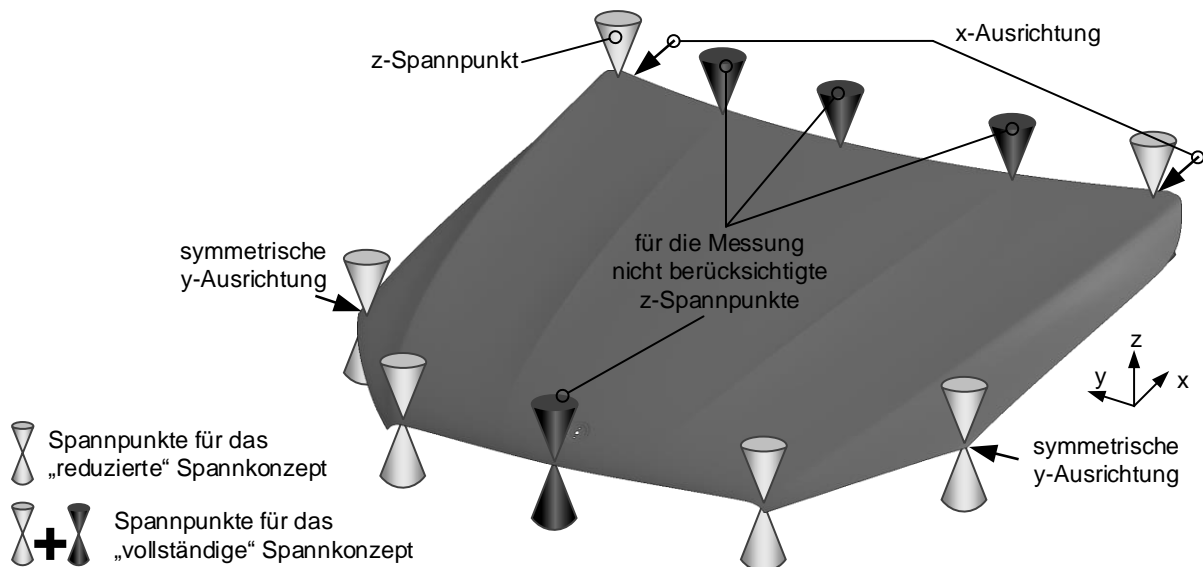
Bei den Einzelteilen unterscheiden sich die Spann- und Fixierkonzepte für die Innenteile bzw. für die Beplankung. Die Innenteile werden meist über die „3-2-1 Regel“ (vgl. Kapitel 2.3.1) aufgenommen und ausgerichtet. Dies gilt sowohl für die Messlehre, als auch für die Aufnahme- und Spannpunkte im späteren Serienrohbau. In Abbildung 56 sind für die Innenteile der Motorhaube die Spann- und Fixierpunkte sowohl der Messaufnahme als auch der Fügestation im Rohbau zusammengefasst.



**Abbildung 56:** Aufnahme und Spannpunkte für die Messaufnahme bzw. die Lagefixierung in der Fügestation im Rohbau (Loch-Langloch Kombinationen)

Die Hauptausrichtung erfolgt bei diesen Bauteilen immer über die Loch-Langloch Kombination in x- bzw. y-Hauptachsenrichtung sowie hinsichtlich weiterer Flächenpunkte in z-Richtung des Fahrzeugkoordinatensystems. Da die Innenteile durch zahlreiche Verprägungen eine relativ hohe Eigensteifigkeit besitzen, sind hierbei vier in z-Richtung wirkende Aufnahmepunkte für eine stabile Ausrichtung ausreichend.

Bei der Beplankung der Motorhaube kann nicht auf die Loch-Langloch Kombination zurückgegriffen werden, da sie keine Aufnahmelöcher besitzt. Die x-Achsenausrichtung erfolgt über Anschläge am Falzflansch im Bereich der A-Säule, die y-Ausrichtung wird über den Falzflansch im Bereich des Kotflügels gemittelt. Im vollständig gespannten Zustand der Haube sind insgesamt zehn Spannungspunkte vorgesehen. Um jedoch die Rückfederung der Beplankung nicht durch die Zwangsbedingungen der z-Spannpunkte zu verfälschen, wird bei der Beplankung mit einer reduzierten Anzahl an z-Spannpunkten gemessen (vgl. Abbildung 57). Eine weitere Reduktion der z-Spannpunkte hat sich in der Vergangenheit als ungeeignet erwiesen, weil der Schwerkrafteinfluss auf solche großflächigen, labilen Bauteile zu groß wäre.

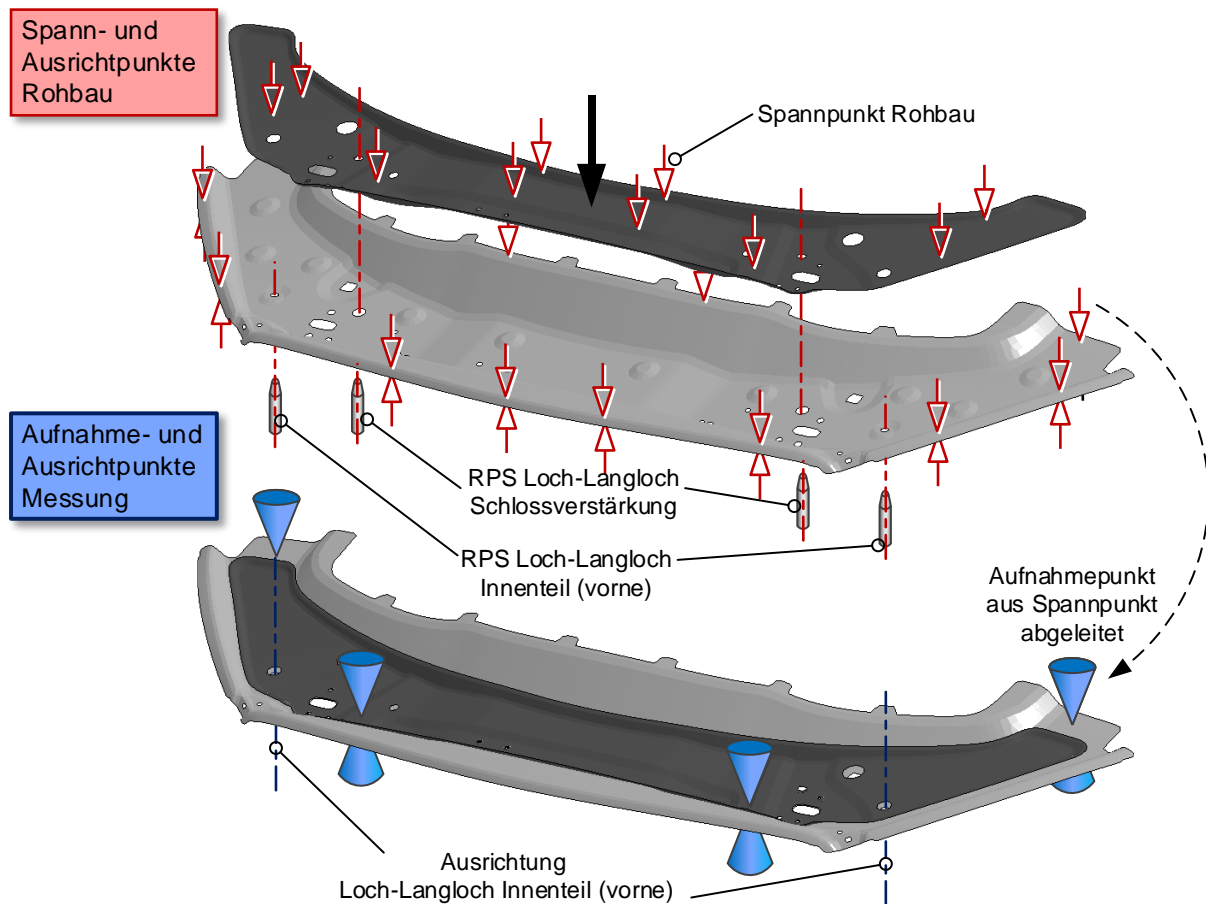


**Abbildung 57:** Spann- und Fixierkonzept für die Beplankung Motorhaube, vollständiges und reduziertes Spannkonzent

### 4.3.2 Spann- und Fixierkonzept der Baugruppen

Beim Spann- und Fixierkonzept der Baugruppen unterscheidet man zwischen der Ausrichtung der Einzelteile in der Fügestation und der Ausrichtung in der Messaufnahme. Dienen bei der Fügestation noch sämtliche Loch-Langloch Kombinationen als x- bzw. y-Ausrichtung der Bauteile zueinander, reduziert sich diese Ausrichtung in der Messlehre auf eine Loch-Langloch Kombination. Als Beispiel sei an dieser Stelle der Zusammenbau vorne aus Innenteil vorne und Schlossverstärkung dargestellt (vgl. Abbildung 58). Werden in der Fügestation beide Bauteile über die jeweiligen Loch-Langloch Kombinationen zueinander ausgerichtet, so entfällt bei der Messaufnahme die x- bzw. y-Ausrichtung für die Schlossverstärkung. Die z-Aufnahmepunkte

der Fügestation sind an die der Einzelteile angelehnt bzw. liegen beim Überlappen der Bauteile meist in der Nähe der Fügepunkte. Bei der Messaufnahme hingegen reduzieren sich die z-Aufnahmepunkte, da sich durch den Fügeprozess die Steifigkeit des Zusammenbaus erhöht und jeder zusätzliche Spannpunkt eine noch höhergradige Überbestimmtheit der Bauteilausrichtung zur Folge hätte.



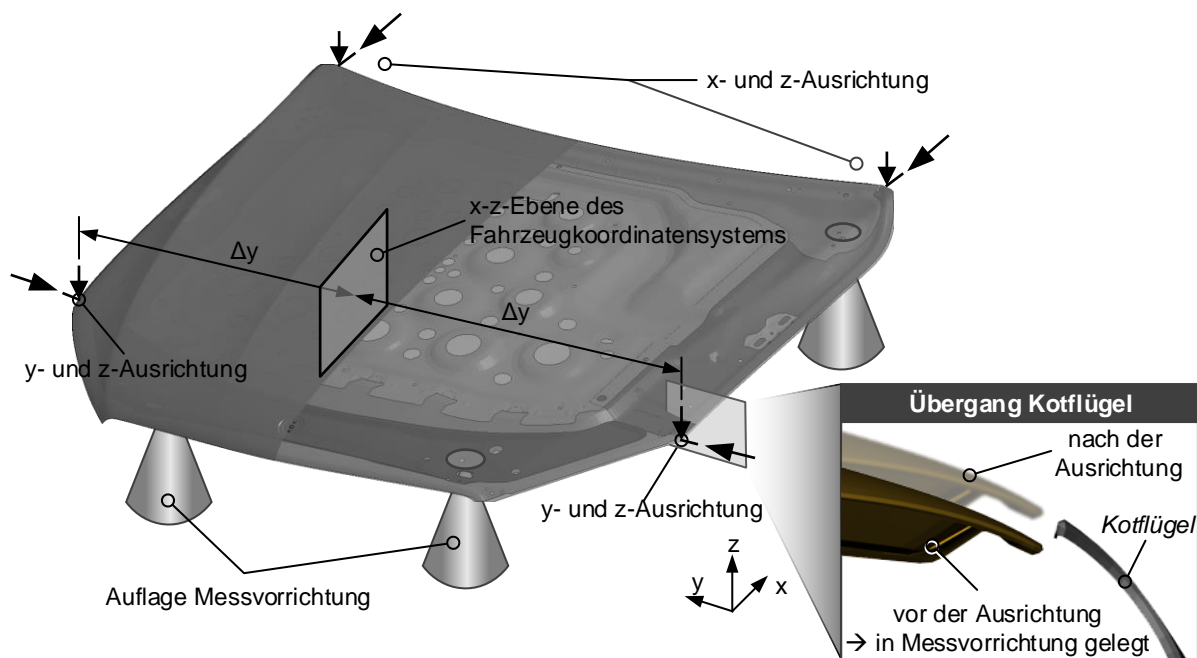
**Abbildung 58:** Aufnahmekonzept für den Zusammenbau vorne: Vergleich Aufnahme in der Fügestation (oben) - Aufnahme in der Messvorrichtung (unten)

Das Spann- und Fixierkonzept der Fügevorrichtungen und Messaufnahmen für das gesamte Innenteil entspricht dem in Abbildung 58 für den Unteresammenbau vorgestellten Prinzip, bestehend aus Innenteil vorne und Schlossverstärkung. Für die Innenteile sind Lagerpunkte in der Messvorrichtung und Ausrichtpunkte (Punkte, an denen per Definition keine Abweichung zur Soll-Geometrie bestehen darf) stets identisch.

Für den Zusammenbau der Motorhaube sind hingegen die Lagerpunkte der Messvorrichtung nicht mit den Ausrichtpunkten identisch (vgl. Abbildung 59). Die Lagerung der Motorhaube erfolgt entsprechend den späteren Aufnahmepunkten am Fahrzeug. Dies sind zum einen die Lagerstellen am Scharnier im Bereich der A-Säule, sowie zwei zusätzliche Aufnahmen im vorderen Bereich über den Radläufen und vorne am Schloss. Die Ausrichtung der Motorhaube erfolgt hingegen an definierten Flächenpunkten, die auf der Beplankung liegen. Dies sind zum einen zwei Ausrichtpunkte in x-Richtung an der Falzkante am Windschutz im Bereich der

A-Säule und zum anderen insgesamt vier Flächenpunkte in z-Richtung des Fahrzeugkoordinatensystems (zwei im Bereich der A-Säule und zwei im Bereich Kotflügel bzw. Leuchten). Die y-Ausrichtung erfolgt im Übergangsbereich der Leuchten zum Kotflügel. Dabei wird die Motorhaube so ausgerichtet, dass für die beiden Ausrichtpunkte die y-Achsenabstände von der x-z-Ebene des Fahrzeugkoordinatensystems aus gemessen betragsmäßig gleich groß sind.

Dieses Vorgehen entspricht genau dem späteren Einstellen der Motorhaube in der Serienproduktion am Fahrzeug und soll vor allem dazu dienen, dass am Übergang der seitlichen Zonen der Motorhaube zum Kotflügel kein Versatz entsteht (vgl. Abbildung 59). Bei der Interpretation der Messergebnisse ist jedoch besonders darauf zu achten, ob ermittelte Abweichungen scheinbar aus der Ausrichtung der Baugruppe resultieren oder ob es dafür andere Ursachen gibt.



**Abbildung 59:** Lager- bzw. Aufnahme der Messvorrichtung in Verbindung mit den Ausrichtpunkten der Motorhaube für die Beurteilung der Maßhaltigkeit

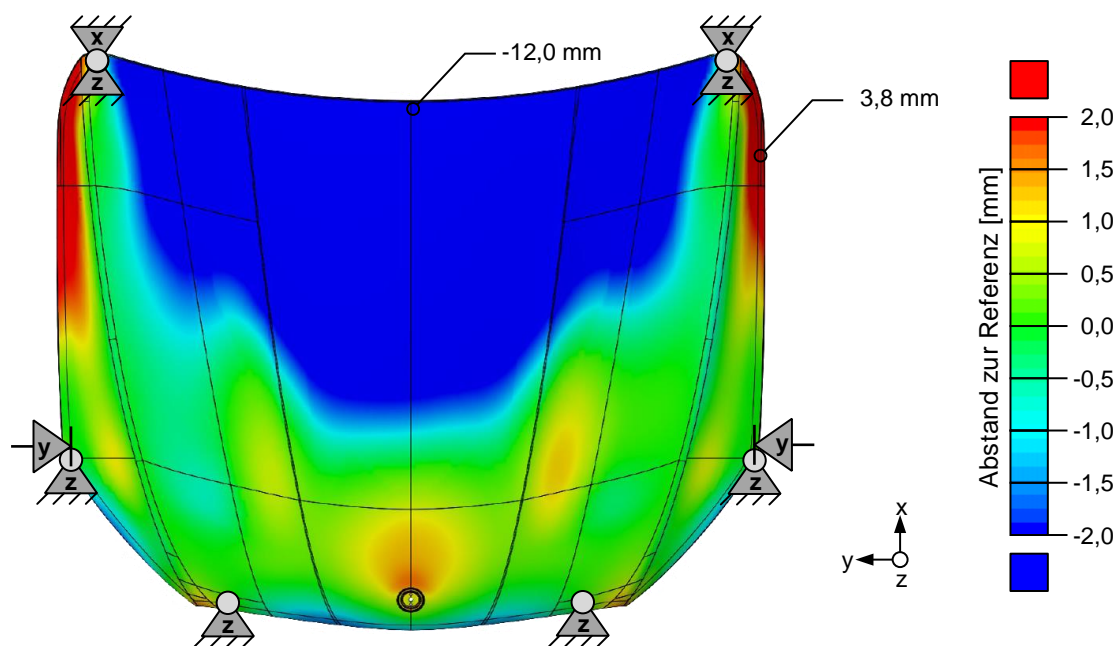
#### 4.4 Maßhaltigkeitshistorie entlang des Produktentstehungsprozesses vom Einzelteil bis zum lackierten Zusammenbau

Um den Einfluss der Maßhaltigkeit entlang der Prozesskette, vom Einzelteil bis hin zum fertig lackierten Zusammenbau, erfassen zu können, wurden nach jedem Fertigungsschritt die Einzelteile bzw. Baugruppen mittels optischer Messtechnik erfasst und mit der Soll-Geometrie abgeglichen. Die durchgeführten Messungen folgen der in Kapitel 4.2 beschriebenen Fertigungsfolge einer Motorhaube und entstanden beim Aufbau von Prototypenfahrzeugen. Insgesamt wurden jeweils drei Motorhauben gemessen, um Schwankungen im Prozess sowie innerhalb der durchgeführten Messungen auszuschließen. Die Durchgängigkeit der gemessenen Einzelteile und Baugruppen soll eine richtige Interpretation der Zusammenhänge zwischen Einzelteilmaßhaltigkeit und deren Auswirkungen auf die gefügte Baugruppe sicherstellen.

Sämtliche Messungen wurden mit einem optischen Messsystem der Firma GOM durchgeführt. Das Ergebnis dieser Messungen bildet ein stl-Netz, welches mit den CAD-Daten verglichen werden kann. Die im Folgenden dargestellten Falschfarbenbilder zeigen den Abstand der Ist-Daten vom Soll-Datensatz der erfassten Bauteilgeometrie.

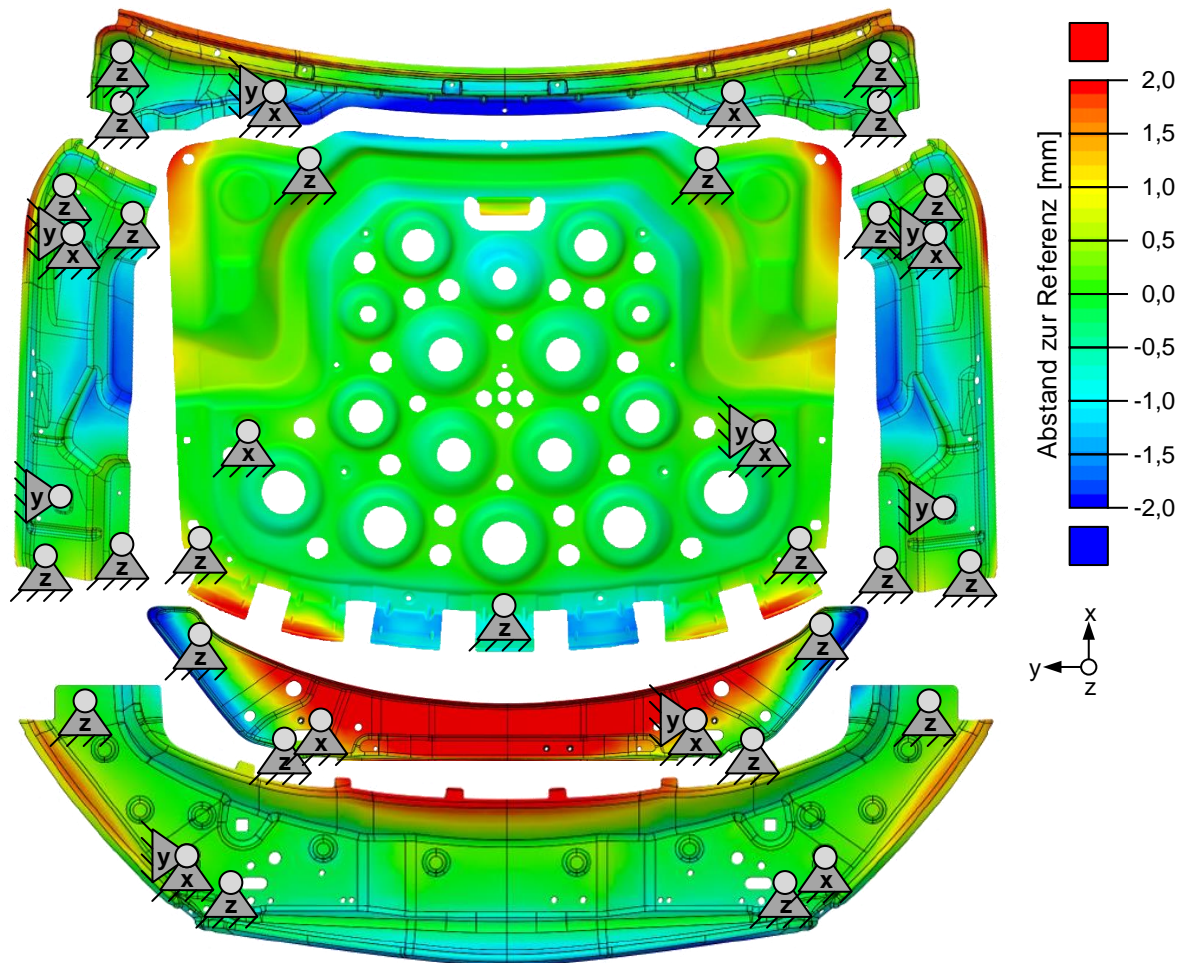
#### 4.4.1 Vermessungen der Einzelteile

Abbildung 60 illustriert für die Beplankung der Motorhaube die Abweichung zwischen Soll-Datensatz und den erfassten Ist-Daten. Die Spannpunkte der Messvorrichtung entsprechen dabei den in Kapitel 4.3.1 beschriebenen und bilden zugleich auch Ausrichtpunkte für den Vergleich von Ist- zur Soll-Geometrie. Im Bereich des Windschutzes liegt die Beplankung deutlich unterhalb der vorgegebenen Ist-Daten. In der Mitte der Beplankung befindet sich mit -12 mm das Maximum der Abweichung. Neben dem Schwerkrafteinfluss sind es vor allem die Spannungen aus dem Abkantvorgang der OP50 im Falzflansch, welche die Beplankung flacher werden lassen. Im Übergangsbereich zum Kotflügel werden Maßabweichungen von bis zu 3,8 mm nach außen gemessen.



**Abbildung 60:** Messung der Beplankung (Pressteil); die Beplankung wurde dabei nach der in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Methode aufgenommen (reduziertes Spannkonzert mit sechs z-Aufnahmepunkten) und ausgerichtet

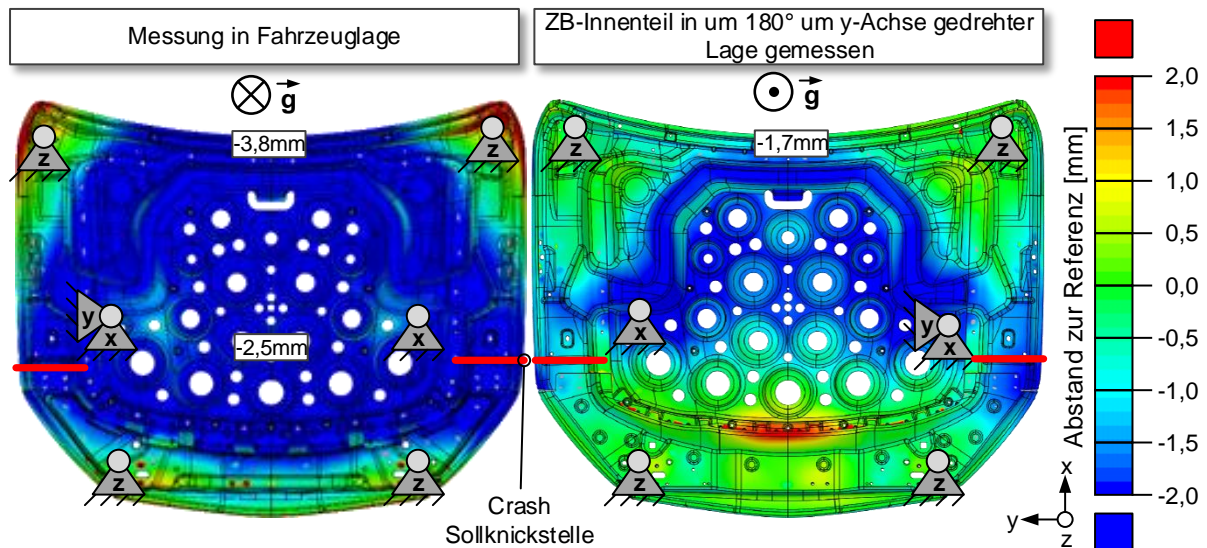
Die Falschfarbenbilder der Pressteile, die später den Zusammenbau des Innenteils bilden werden, sind in Abbildung 61 zusammengefasst. Die größte Abweichung zu den Soll-Daten zeigen die Schlossverstärkung und das Innenteil hinten. Das Innenteil hinten fällt in Pressteilmitte um ca. 2 mm ein und ist aufgrund seines Querschnitts leicht tordiert. Bei der Schlossverstärkung sei angemerkt, dass dieses Bauteil aus dem Prototypenwerkzeug einer Fluid-Cell-Pressen stammt. In der späteren ZB-Fertigung wird sich jedoch zeigen, wie groß der Einfluss dieses Pressteils, das deutlich außerhalb der geforderten Toleranz liegt, auf die Gesamtbaugruppe ist.



**Abbildung 61:** Zusammenfassung der Messungen für die einzelnen Innenteile (Pressteile); die Pressteile wurden dabei nach der in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Methode aufgenommen

#### 4.4.2 Vermessung der gefügten Unterbaugruppe ZB-Innenteil

Nach dem Fügen der Innenteile durch Clinchen wurde die Baugruppe des ZB-Innenteils ebenfalls vermessen. Die linke Seite der Abbildung 62 zeigt entsprechende Messergebnisse. Die Baugruppe fällt in der Mitte deutlich ein. Ursache dafür ist die mangelnde Steifigkeit der Baugruppe im Bereich des Innenteils hinten. In x-Richtung fällt die Baugruppe aufgrund der Schwerkraft und einer Crash-Sollknickstelle deutlich ein, wodurch sich am Übergang zum Kotflügel erhebliche Abweichungen ergeben. Den Einfluss der Schwerkraft auf die relativ labile Baugruppe verdeutlicht die Messung des Innenteils (rechtes Bild in Abbildung 62) in einer um  $180^\circ$  gedrehten Lage (Überkopflage). In dieser Messung wirkt die Schwerkraft entgegen der in Fahrzeuglage gemessenen Richtung. Der Unterschied zwischen den beiden Messungen beträgt lokal etwas mehr als zwei Millimeter, d. h. der Schwerkrafteinfluss ist bei der gefügten Baugruppe trotz der Versteifungen der Innenteile deutlich erkennbar. Um den Einfluss der Gewichtskraft zu minimieren müsste folglich die Steifigkeit der einzelnen Innenteile (insbesondere des Innenteils hinten) deutlich erhöht werden. Jedoch ist dies aufgrund von funktionalen Rahmenbedingungen aus Crashlastfällen, wie beispielsweise dem Kopfaufprall, nur bedingt möglich.



**Abbildung 62:** Messung der gefügten Baugruppe ZB-Innenteil in der 4-Punkt Messaufnahme; Messung in Fahrzeuglage (li.) und in um 180° gedrehter Lage (re.), um den Einfluss der Schwerkraft auf die Baugruppe zu erfassen

#### 4.4.3 Vermessung der gefalzten Baugruppe ZB-Motorhaube

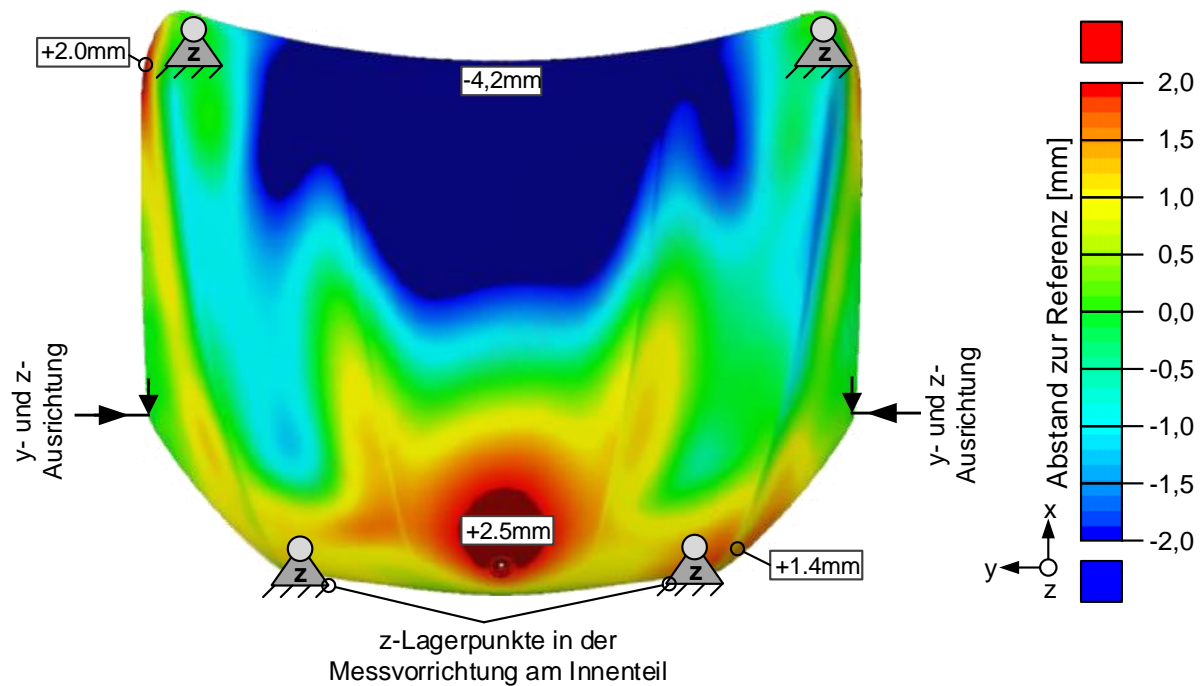
Die Baugruppe ZB-Motorhaube wird entgegen den vorangegangenen Messungen, wie bereits in Kapitel 4.3.2 beschrieben, nicht an ihren Lagerpunkten ausgerichtet. Stattdessen erfolgt die Ausrichtung am Übergang zum Kotflügel. Messtechnisch wird die Ausrichtung folgendermaßen umgesetzt:

- Das ZB-Motorhaube wird in die Messvorrichtung gelegt und mittels optischer Messtechnik als Flächennetz erfasst (gescannt).
- Die Ausrichtung an den Übergangspunkten zum Kotflügel und der A-Säule erfolgt dann softwareseitig mittels eines „best-fit Algorithmus“ des gescannten Flächennetzes zur Soll-Geometrie anhand der Ausrichtpunkte des Zusammenbaus.

Abbildung 63 stellt den Vergleich der fertig gefalzten und ausgerichteten Motorhaube mit den Soll-Daten dar. Im vorderen Bereich liegen die gemessenen Daten scheinbar oberhalb der Soll-Daten. Dafür können zwei Ursachen genannt werden. Zum einen liegt das Pressteil der Beplankung bereits oberhalb der Soll-Daten (vgl. Abbildung 60) und zum anderen wird die Motorhaube durch das Ausrichten am Kotflügel im gesamten vorderen Bereich scheinbar „angehoben“.

Im Bereich des Windschutzes fällt die Motorhaube um bis zu 4,2 mm ein. Diese Abweichung konnte in gewissem Maße bereits am ZB-Innenteil beobachtet werden (vgl. Abbildung 63). Hinzu kommt ein Eigengewichtsanteil der Beplankung, der in diesem Bereich zusätzlich vom ZB-Innenteil aufgenommen werden muss und die Motorhaube lokal weiter absenkt.

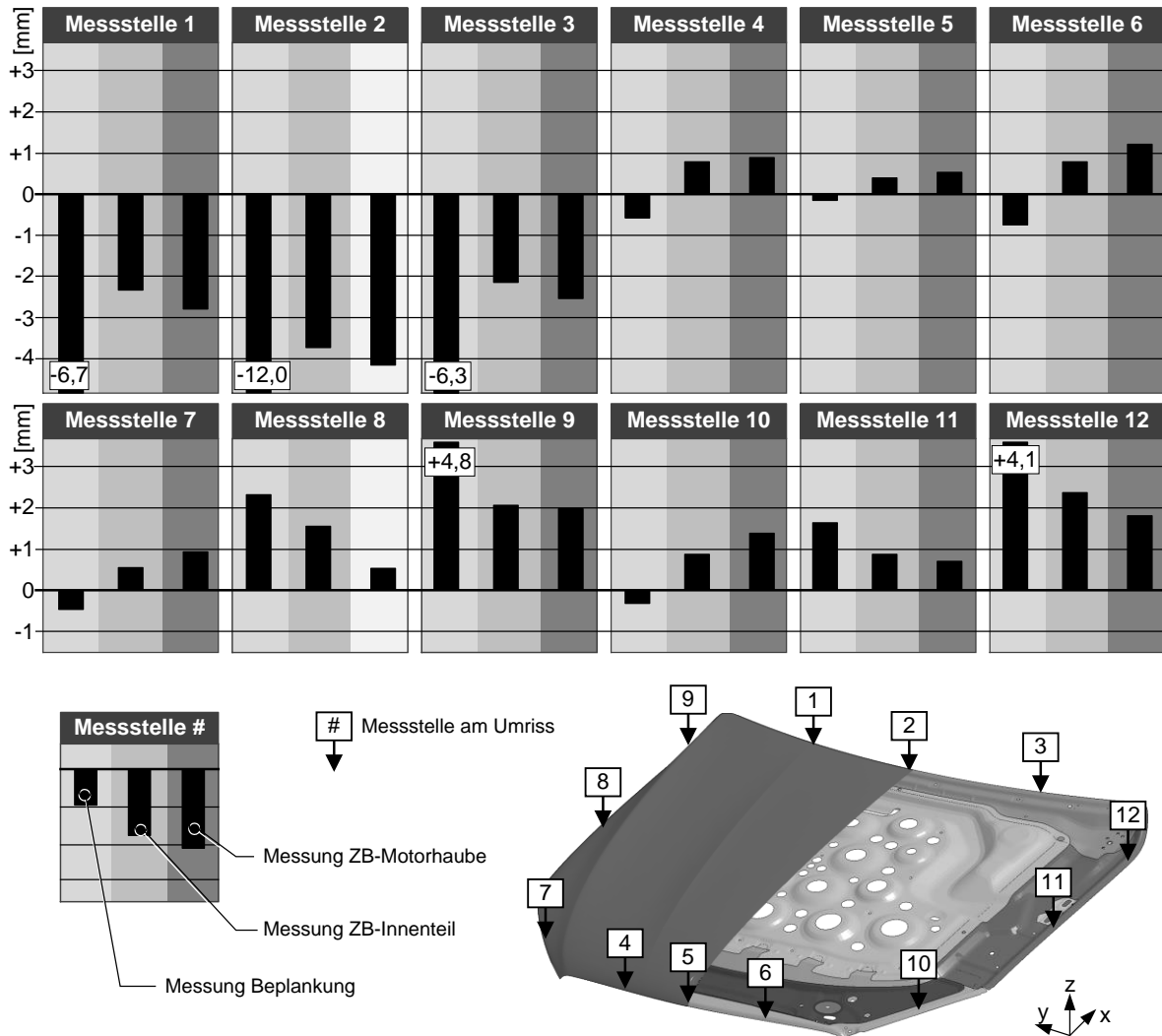




**Abbildung 63:** Messung ZB-Motorhaube nach dem Falzen; 4-Punktaufnahme nach Kapitel 4.3.2

Um den Einfluss des ZB-Innenteils auf die Maßhaltigkeit des ZB-Motorhaube zu verdeutlichen, wurden in Abbildung 64 die Messergebnisse der Beplankung (als Pressteil), des ZB-Innenteils (als gefügte Baugruppe) und der gefalzten Motorhaube einander gegenübergestellt. Der Vergleich erfolgt dabei anhand von einzelnen am Umriss der Bauteile gewählter Messpunkte bei identischer Ausrichtung der gescannten Flächennetze zu der entsprechenden Soll-Geometrie.

An den Messstellen 1 bis 3 (Windschutzbereich) weicht die Beplankung um bis zu 12 mm von der Soll-Geometrie ab. Das ZB-Innenteil und die gefalzte Motorhaube hingegen besitzen an diesen Messstellen nahezu identische Abweichungen zur entsprechenden Soll-Geometrie. Für diese drei Messstellen zeigt sich, dass die großen Maßabweichungen der Beplankung nur einen relativ geringen Einfluss auf den ZB-Motorhaube besitzen. Auch im Bereich der Kotflügel li. und re. zeigt sich, dass die gemessenen Abweichungen an den Punkten 8, 9, 11 und 12 für die gefalzte Motorhaube im Bereich der erfassten Messwerte des ZB-Innenteils liegen. Im vorderen Bereich der Motorhaube sowie im Bereich der Leuchten sind die Abweichungen des ZB-Motorhaube zur Soll-Geometrie im Bereich von einem Millimeter (Messpunkte 4, 5, 6, 7 und 10). Tendenziell zeigen auch diese Messstellen den Einfluss des ZB-Innenteils auf die Maßhaltigkeit der gefalzten Baugruppe. Die Auswertung lässt folglich darauf schließen, dass die Maßhaltigkeit der gefalzten Motorhaube am Umriss sehr stark von der Maßhaltigkeit des ZB-Innenteils beeinflusst wird und die Krafteinwirkung der Beplankung eine eher untergeordnete Rolle spielt.



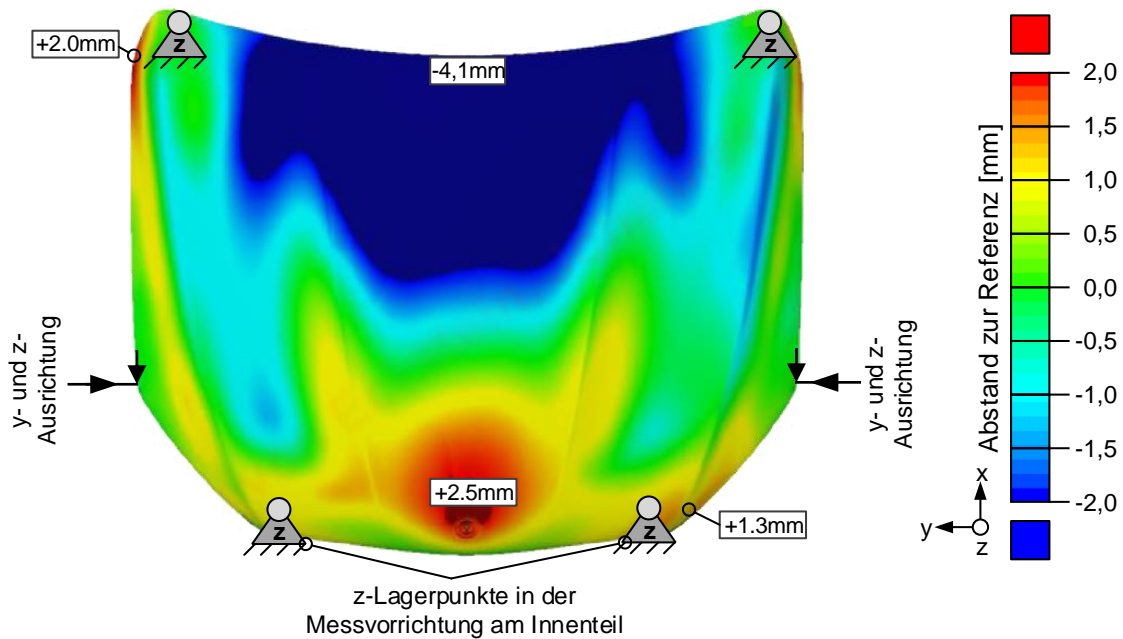
**Abbildung 64:** Gegenüberstellung der Messpunkte am Umriss für das Pressteil Beplankung, ZB-Innenteil und ZB-Motorhaube

#### 4.4.4 Vermessung nach der Induktionsstation ZB-Motorhaube

Theoretisch könnte sich nach dem Falzen unter hoher Kräfteinwirkung die relative Lage von Beplankung und ZB-Innenteil noch leicht verschieben, woraus globale Verformungen resultieren könnten. Um ein Verschieben beider Bauteile vor der vollständigen Kleberaushärtung im KTL-Trockner zu vermeiden, beispielsweise durch Betriebslastfälle wie Teiletransport etc., wird der Falzkleber bereits im Rohbau an definierten Stellen ausgehärtet. Während der Kleberaushärtung wird die Motorhaube an definierten Spannungspunkten in der Induktionsstation fixiert und entspricht somit in diesen Spannungspunkten in etwa der Soll-Geometrie.

Abbildung 65 zeigt das Falschfarbenbild der Messung nach der Induktionsstation. Die Aufnahme und Ausrichtung entsprechen der Auswertung nach dem Falzen. Der Vergleich zwischen der Messung aus Abbildung 63 (nach dem Falzen) und der aus Abbildung 65 (nach der Induktionsstation) zeigt nahezu keine Unterschiede. Obwohl die Motorhaube aufgrund ihrer Formabweichungen durch das Spannen in der Induktionsstation verformt wird, konnte nach der Induktionsstation keine nennenswerte maßliche Veränderung der Form festgestellt werden. Die

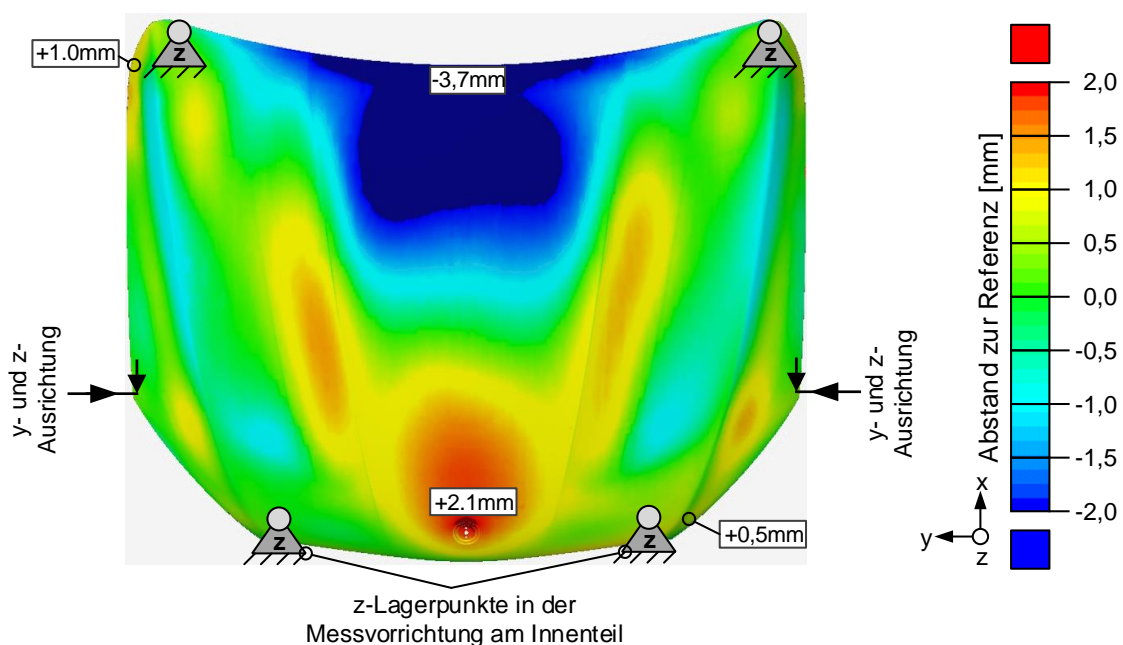
Messergebnisse lassen darauf schließen, dass durch das lokale Anglieren des Strukturklebstoffes im Falzflansch die Steifigkeit der Motorhaube sich nicht deutlich verändert hat.



**Abbildung 65:** Messung ZB-Motorhaube nach der Induktionsstation; 4-Punktaufnahme nach Kapitel 4.3.2

#### 4.4.5 Vermessung nach Rohbau und KTL-Trockner

Nach dem Rohbau- sowie dem KTL-Trockner sind die verwendeten Klebstoffe vollständig ausgehärtet. Der Prozessdurchlauf der Motorhaube erfolgte in einem Zustand, in welchem diese an der Karosserie montiert ist. Für die Messung wurde die Motorhaube jedoch wieder entfernt und analog zum Aufnahme- und Ausrichtkonzept der vorangegangenen beiden Fertigungsschritte nach Kapitel 4.3.2 optisch erfasst. Das Messergebnis zeigt Abbildung 66.

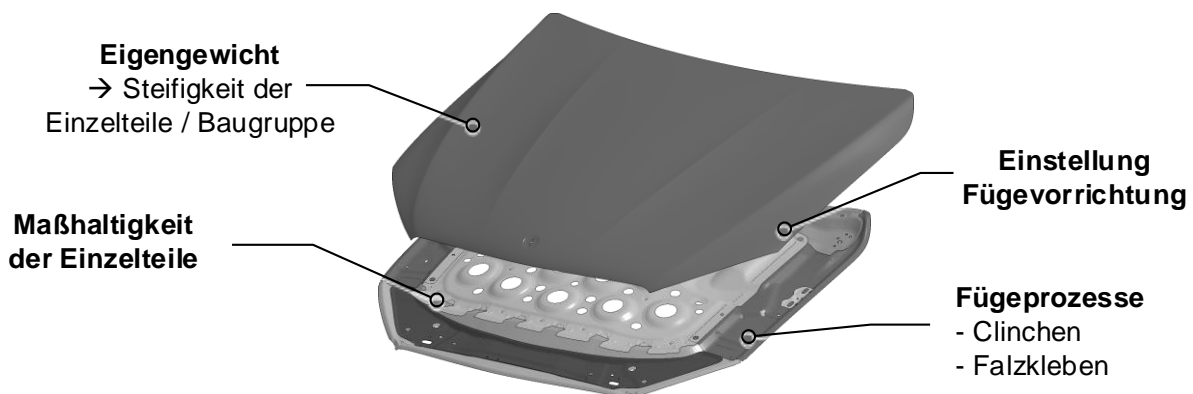


**Abbildung 66:** Messung ZB-Motorhaube nach dem Durchlauf durch Rohbau- und KTL-Trockner

Die Abweichungen unterscheiden sich im Vergleich zur Messung der gefalzten Motorhaube im vorderen Bereich lokal um ca. 0,8 mm. Da die Ursachen für diese Formänderungen nicht Gegenstand dieser Arbeit sind, wird an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen. An dieser Stelle wird auf Arbeiten von [Alb10], [Alb11] und [Alb12] verwiesen, darin werden Formabweichungen, welche durch thermische Oberflächenbehandlungen im Karosseriebau verursacht werden, näher erläutert.

## 4.5 Einflussgrößen auf die Maßhaltigkeit der gefügten Baugruppe

Aus den in Kapitel 4.4 dargestellten Messergebnissen können die Einflussgrößen auf die Maßhaltigkeit der Motorhaube noch nicht identifiziert werden. Es wird nicht deutlich, welchen Einfluss beispielsweise der Eigengewichtsanteil auf die Gesamtverformung der Motorhaube besitzt oder in wie weit sich die Maßhaltigkeit der Beplankung auf den Zusammenbau auswirkt. Im Folgenden sollen weitere im Rahmen dieser Arbeit aus Bauteilmessung gewonnene Erkenntnisse vorgestellt werden, um mögliche Einflussgrößen, wie sie in Abbildung 67 genannt werden, zu identifizieren. Von besonderer Bedeutung für die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus sind dabei der Einfluss des Eigengewichts sowie die Auswirkungen der Formabweichungen der Einzelteile.



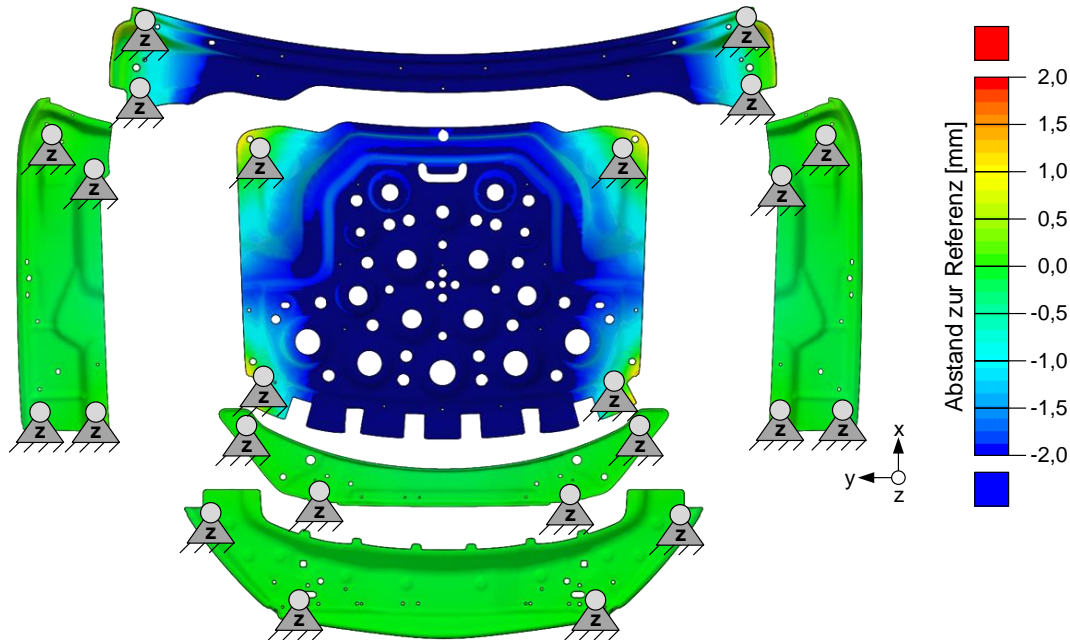
**Abbildung 67:** Einflussgrößen auf die Maßhaltigkeit bei der ZB-Motorhaubenfertigung [Kae13b]

### 4.5.1 Einfluss des Eigengewichts

#### *Einfluss des Eigengewichts auf die Einzelteile*

Die Konstruktion der Einzelteile, vor allem der Innenteile und der Baugruppen, muss so gestaltet sein, dass diese die Deformationen aufgrund des Eigengewichts aufnehmen können. Insbesondere dem Innenteil der hier betrachteten Motorhaube kommt hier eine besondere Bedeutung zu, da dieses den größten Anteil der Gesamtsteifigkeit der Baugruppe prägt. Um die Einzelteile im Hinblick auf ihre Deformation, bedingt durch das Eigengewicht, bewerten zu können, wurden die Einzelteile in einer einfachen elasto-statischen Berechnung jeweils mit ihrem Eigengewicht belastet. Die Lagerbedingungen entsprechen dabei denen der Messvorrichtung. Abbildung 68 fasst die Ergebnisse dieser Berechnung zusammen. Es wird deutlich, dass vor

allein das Innenteil hinten, aufgrund seines geringen Querschnitts durch sein Eigengewicht stark verformt wird. Das Innenteil Mitte wird dadurch ebenfalls stark deformiert. Diese Verformung resultiert im Wesentlichen aus der geringen Blechdicke von 0,7 mm und aufgrund geforderter Crasheigenschaften darf die Steifigkeit dieses Bauteils nicht gesteigert werden.

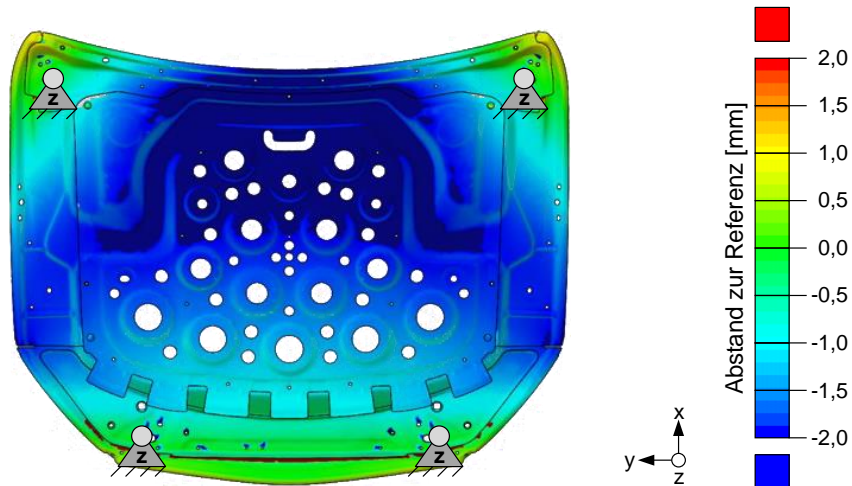


**Abbildung 68:** Berechnete Verformung der Innenteile (Pressteile) unter ihrem eigenen Schwereinfluss

### *Einfluss des Eigengewichts auf das ZB-Innenteil*

In gleicher Weise lässt sich die durchgeführte Berechnung auch auf die Baugruppe ZB-Innenteil übertragen. Diese Ergebnisse zeigt Abbildung 69. Wie bereits aus den Messungen in Abbildung 62 ersichtlich, zeigt eine solche Berechnung auch hierbei eine geringe Steifigkeit im Übergangsbereich zwischen Leuchten und Kotflügel aufgrund der Crash-Sollknickstelle. Das Einfallen von ca. 2,5 mm im Bereich des Windschutzes resultiert aus der mangelnden Steifigkeit des Innenteils hinten (vgl. Abbildung 68 Eigengewichtsanalyse für die Pressteile). Kommt das Bauteilgewicht der Beplankung hinzu, welches vom Innenteil getragen werden muss, führt dies zu der an der Motorhaube im Bereich des Windschutzes gemessenen Abweichung von 4,5 mm.

Durch Messungen der Prototypenteile in gewendeter Lage konnten die Absolutwerte der Schwerkraftberechnung (vgl. ZB-Innenteil Abbildung 62) bestätigt werden. Der doppelte Messaufwand (in normaler und gewendeter Messlage) ist somit nicht zwingend notwendig und es könnten auf Basis der elasto-statischen Berechnung bereits vor der Prototypenphase Optimierungen zur Verbesserung der Eigensteifigkeit solcher Bauteile eingeleitet werden.

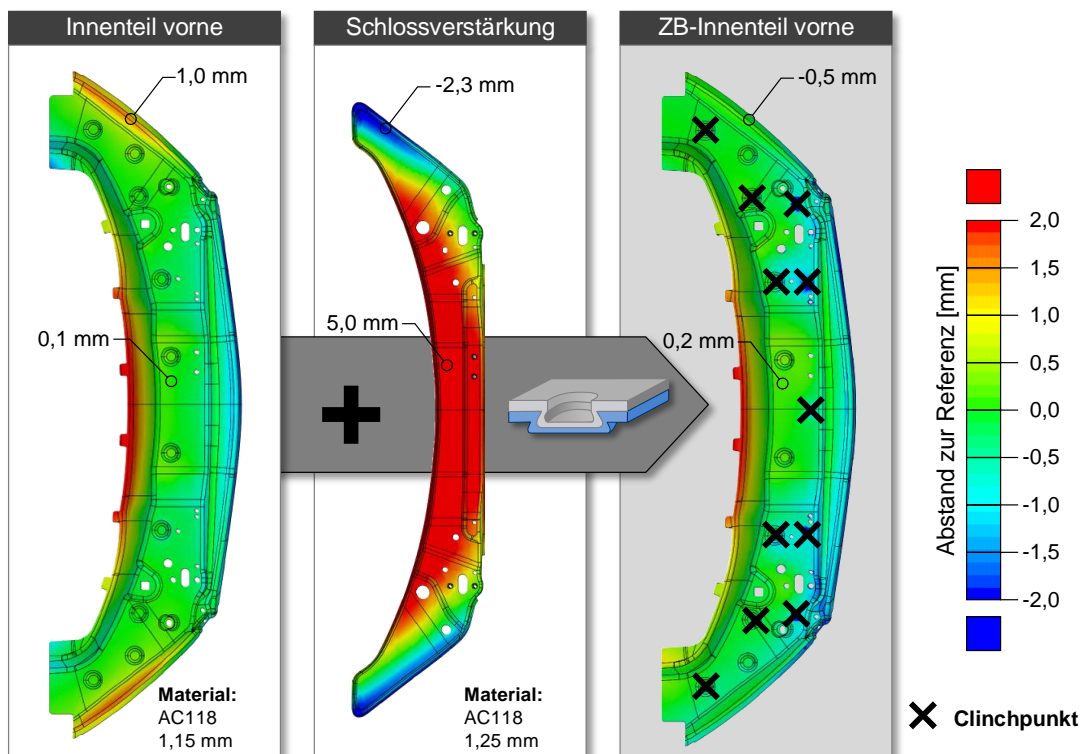


**Abbildung 69:** Berechnete Verformung des gefügten ZB-Innenteils unter ihrem eigenen Schwerkrafteinfluss

## 4.5.2 Einfluss der Einzelteile auf die Baugruppe

### *Einfluss der Pressteilmaßhaltigkeit auf den ZB-Innenteil vorne*

Der Einfluss der Einzelteile auf die Maßhaltigkeit der Baugruppe kann sehr komplex sein. Zudem lassen sich die Zusammenhänge zwischen der Maßhaltigkeit der Einzelteile und dem Zusammenbau teilweise sehr schwer aus Messberichten ableiten. Ein Beispiel hierfür ist die gefügte Unterbaugruppe aus Innenteil vorne und Schlossverstärkung (vgl. Abbildung 70).

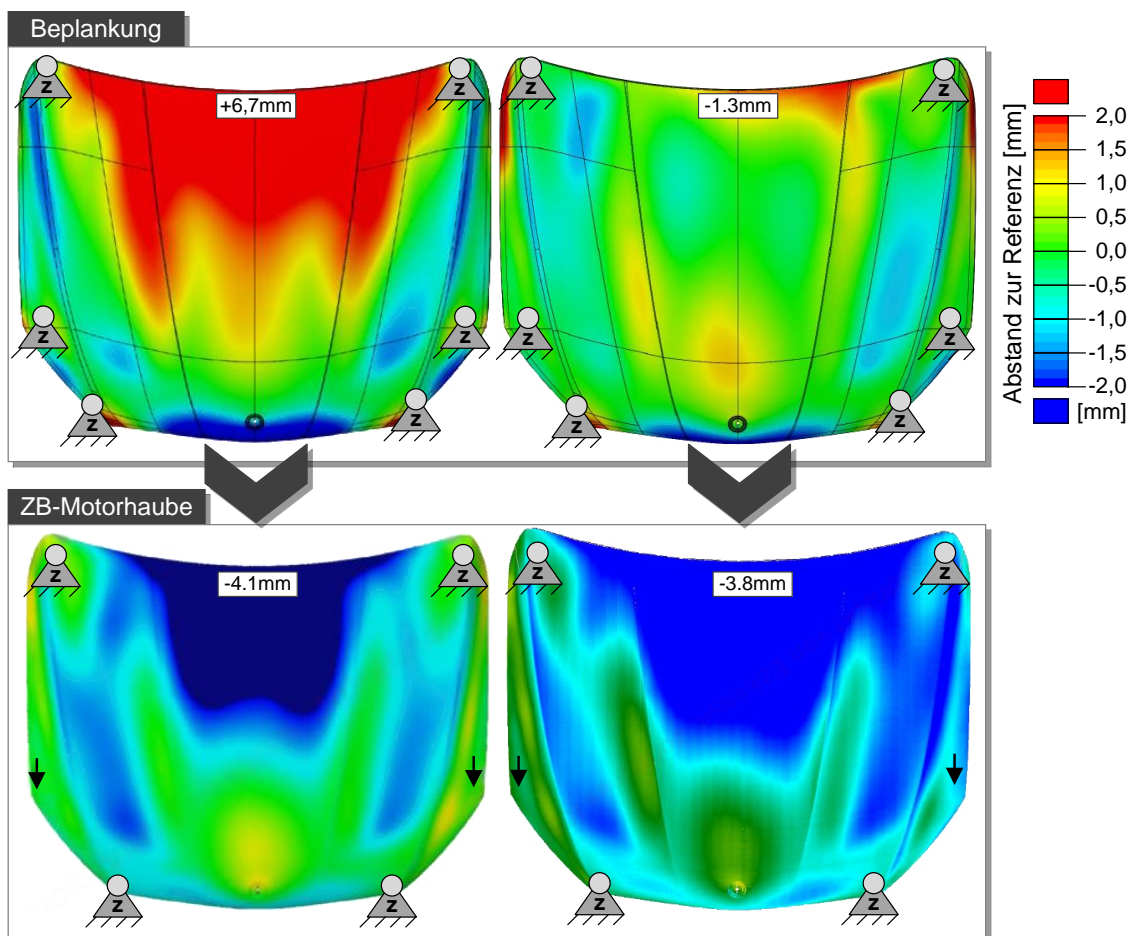


**Abbildung 70:** Einfluss der Maßhaltigkeit der Einzelteile Innenteil vorne (li.) und Schlossverstärkung (Mitte) auf die gefügte Baugruppe (re.); im gefügten Zustand ist die Schlossverstärkung durch das Innenteil vorne verdeckt dargestellt

Würde man vermuten, dass sich die Maßabweichungen der Einzelteile im Zusammenbau addieren, so kann dies in diesem Fall nur im Bereich der Leuchten beobachtet werden. Die starken Abweichungen der Fluid-Cell gefertigten Schlossverstärkung haben in anderen Bauteilbereichen nur relativ geringe Auswirkungen. Insbesondere für die Rückfederungskompensation der Einzelteile sind solche Erkenntnisse von besonderer Bedeutung, da zur Verbesserung der Maßhaltigkeit des ZB-Innenteils vorne eine Optimierung der Maßhaltigkeit der Schlossverstärkung nicht zielführend sein muss.

### ***Einfluss der Beplankung auf die Maßhaltigkeit der ZB-Motorhaube***

Die Maßhaltigkeit der Beplankung (vgl. Messung aus Abbildung 60) wurde während der Prototypenfertigung in einer ersten Optimierungsschleife verbessert. Dazu wurden insbesondere der schälende Abkantbacken im Bereich des Windschutzes sowie Korrekturen an der Faltenhaltereieneinstellung der Abkantoperation der Presswerkzeuge vorgenommen. Durch unterschiedliche Einstellungen des schälenden Abkantbackens und des Faltenhalters konnten im Bereich des Windschutzes Pressteile mit deutlich unterschiedlichen Formabweichungen abgepresst werden. Die Beplankungen wurden im Anschluss daran durch Rollfalzen mit Innenteilen aus derselben Charge gefügt. Der Zusammenhang aus Einzelteil, Beplankung und ZB-Motorhaube veranschaulichen die in Abbildung 71 zusammengefassten Messungen.



**Abbildung 71:** Einfluss der Maßhaltigkeit des Pressteils Beplankung (oben) auf die gefaltzte ZB-Motorhaube (unten) bei chargengleichem ZB-Innenteil

Der Einfluss der Beplankung auf den Zusammenbau, insbesondere im Bereich des Windschutzes (an dieser Stelle bestehen die größten maßlichen Differenzen zwischen den beiden dargestellten Pressteilen mit ca. 7 mm), ist sehr gering. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Maßhaltigkeit der Beplankung im Bereich des Windschutzes durch den Spannungszustand im Falzflansch beeinflusst wird. Durch den Falzprozess ändern sich sowohl die Geometrie als auch der Spannungszustand des Falzflansches. Zusätzlich wirkt sich die Steifigkeit des Innenteils aus und führt dazu, dass der ZB-Motorhaube am Umriss im Wesentlichen durch das ZB-Innenteil beeinflusst wird.



## 5 Modellentwicklung der FEM-Rückfederungsberechnung im Zusammenbau

### 5.1 Problemmodellierung – Simulation entlang der Prozesskette

In Kapitel 2.6 wurden bereits die derzeit verfügbaren Möglichkeiten zur Simulation von Produktionsprozessen im Karosseriebau dargestellt. Soll nun jedoch eine Prozessfolge, wie sie in Kapitel 4 beschrieben und anhand einer realen Motorhaube messtechnisch erfasst wurde, beschrieben werden, bedarf es der Entwicklung einer durchgängigen Prozesssimulation. Der Begriff der „durchgängigen Prozesssimulation“ bezieht sich an dieser Stelle ausschließlich auf die simulative Darstellung von Formabweichungen. Die Berechnung von Materialversagen oder auch Schädigung durch die einzelnen Prozessschritte ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Die Rückfederungssimulation von Pressteilen, welche sich nun seit einigen Jahren im Produktentstehungsprozess etabliert hat, soll mit dem derzeitigen Stand als gegeben erachtet werden. Die Verbesserung und Weiterentwicklung der Prognosegenauigkeit von Rückfederungseffekten für Pressteile durch die Umformsimulation wird jedoch auch in Zukunft notwendig sein, da sie die grundlegende Basis für eine durchgängige Prozesssimulation im Karosseriebau bildet.

Neben der Umformsimulation der Einzelteile bildet die Falzsimulation einen weiteren Baustein für die durchgängige digitale Prozesskette. Die derzeitigen Anwendungen, welche ausschließlich auf ein einzelnes Pressteil ausgelegt sind, reichen jedoch nicht aus, um den Fertigungsprozess einer mehrteiligen Baugruppe zu simulieren.

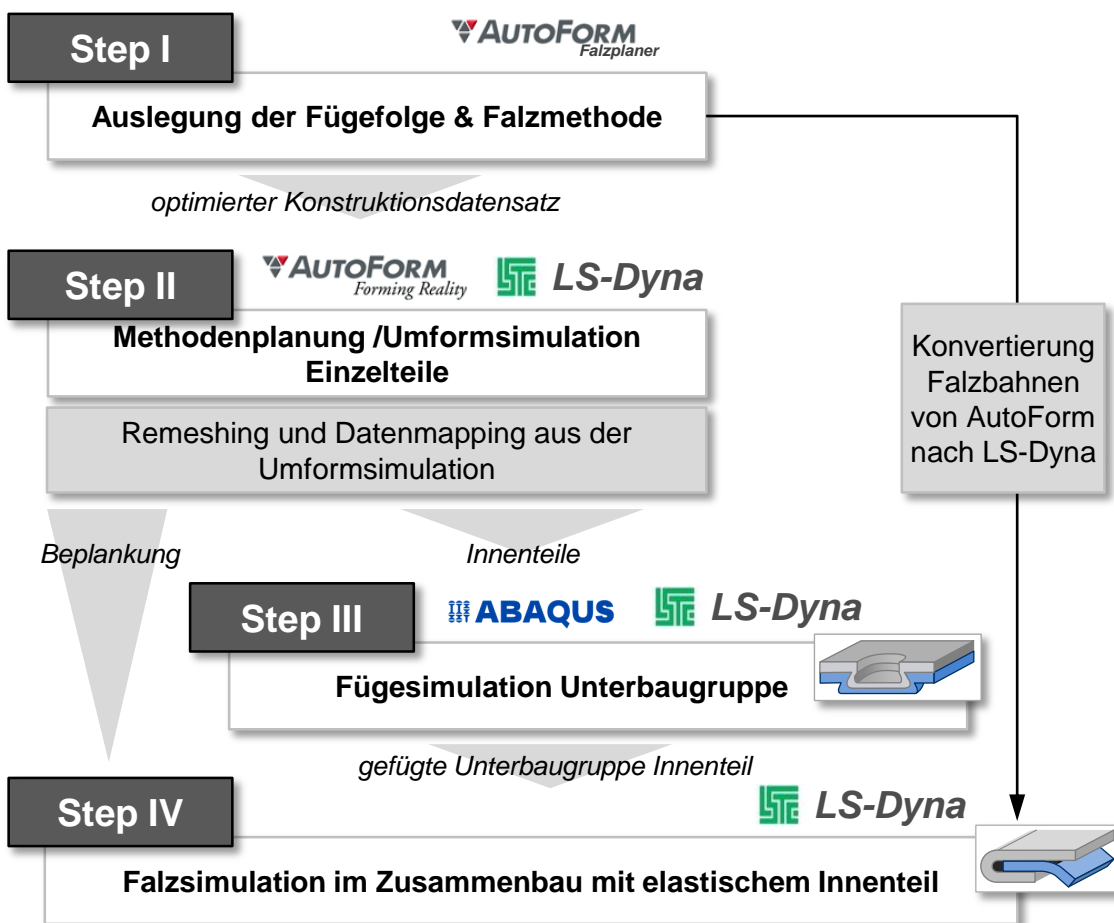
Die größten „Lücken“ in der Simulationskette zur Berechnung der Maßhaltigkeit von Baugruppen ergeben sich für die Modellierung des in Kapitel 4 beschriebenen Produktionsprozesses der Motorhaube für die Prozessschritte Clinchen und Rollfalzen. Insbesondere die Berücksichtigung des elastisch-plastischen Materialverhaltens mehrerer Pressteile während des Fügens stellt eine der größten Herausforderungen in Bezug auf Modellierung, Numerik und Modellidentifikation dar.

### 5.2 Anforderungen an die Simulationsmethodik

Eine wesentliche Fragestellung bei der Entwicklung einer Simulationsmethodik für die Berechnung gefügter Baugruppen ist dabei, welche Vereinfachung bei der Beschreibung von Geometrie, Prozess- und Materialverhalten getroffen werden können, ohne die wesentlichen Einflussgrößen des realen Produktionsprozesses außer Acht zu lassen. Schließlich zeigt sich die Qualität einer Simulationsmethodik darin, dass Veränderungen am Realprozess in gleicher Weise durch die Simulation erfasst werden können.

Zunächst muss jedoch die Frage geklärt werden, wie die zeitliche Abfolge einer Prozesssimulation erfolgen muss und mit welchen Simulationssystemen gearbeitet werden kann, um die

einzelnen Prozesse hinreichend genau zu modellieren. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, lassen sich je nach Karosserieaufbau sehr unterschiedliche Werkstoffe und Fertigungsverfahren zur Anwendung bringen. Nur durch einen erweiterbaren, modularen Simulationsaufbau mit einzelnen Simulationsschritten lässt sich dieses breite Spektrum in eine durchgängige Simulation integrieren. In der vorliegenden Arbeit sollen sich diese Simulationsschritte auf den in Kapitel 4 beschriebenen Versuchsaufbau fokussieren, eine Erweiterung mit anderen Fertigungsverfahren (z. B. Schweißen) und anderen Materialien (z. B. Druckgussbauteile) soll dennoch gewährleistet werden. Abbildung 72 fasst dazu bestehende Simulationsschritte und noch zu definierende Simulationmethoden für die in Kapitel 4 beschriebene Motorhaube exemplarisch in einem Ablaufdiagramm zusammen. Für das folgende Kapitel sollen die einzelnen Simulationsschritte als Step I-IV definiert werden.



**Abbildung 72:** Zeitliche Abfolge der einzelnen Simulationsschritte bei der durchgängigen Prozesssimulation Presswerk – Rohbau

Als Step I wird die Erstellung der Fügefolge und der Falzmethode aufgefasst. Im Fokus steht dabei die Aufteilung der Fügeoperationen auf die einzelnen Rohbaustationen. Ist diese Einteilung festgelegt, kann der Falzprozess in einer ersten FE-Falzsimulation digital abgesichert werden. Ergebnis dieser Untersuchung bilden Modifikationen der Falzzugabe, Flanschöffnungswinkel und Falzflanschlängen sowie geometrische Prozessinformationen, wie beispielsweise Backengeometrien oder Bahn- und Rollenbeschreibungen. Für diese Berechnung hat sich am

Markt der AutoForm-HemPlanner<sup>plus</sup> aufgrund seiner einfachen Bedienbarkeit und dem einfachen Modellaufbau durchgesetzt. Bei dieser Simulation werden die Innenteile vereinfacht als starre Bauteile angenommen. Im Fokus der Betrachtung stehen dabei der Falzverlust, die Definition von Falzflanschlängen und Flanschrückschnitte in Eck- sowie Konturbereichen, in denen geometriebedingt beim Falzen mit einer Faltenbildung zu rechnen ist. Die Ergebnisse dieser Falzsimulation führen zu einem höheren Reifegrad der Produktdaten für den späteren Falzprozess.

Die Umformsimulation der Pressteile (Step II) hat dabei den Fokus auf der Herstellbarkeit der Pressteile sowie der Beurteilung der Maßhaltigkeit. Dazu muss für jedes Pressteil eine Simulation über sämtliche Operationsfolgen vorliegen. Robustheitsanalysen stellen eine zusätzliche Absicherung hinsichtlich späterer Prozessschwankungen dar [Gro07], [Ann11] u. [Emr13]. Das Ergebnis dieses zweiten digitalen Prozessschritts muss die Herstellbarkeit der Pressteile sicherstellen sowie eine zuverlässige Aussage über die Rückfederung jedes einzelnen Pressteils liefern.

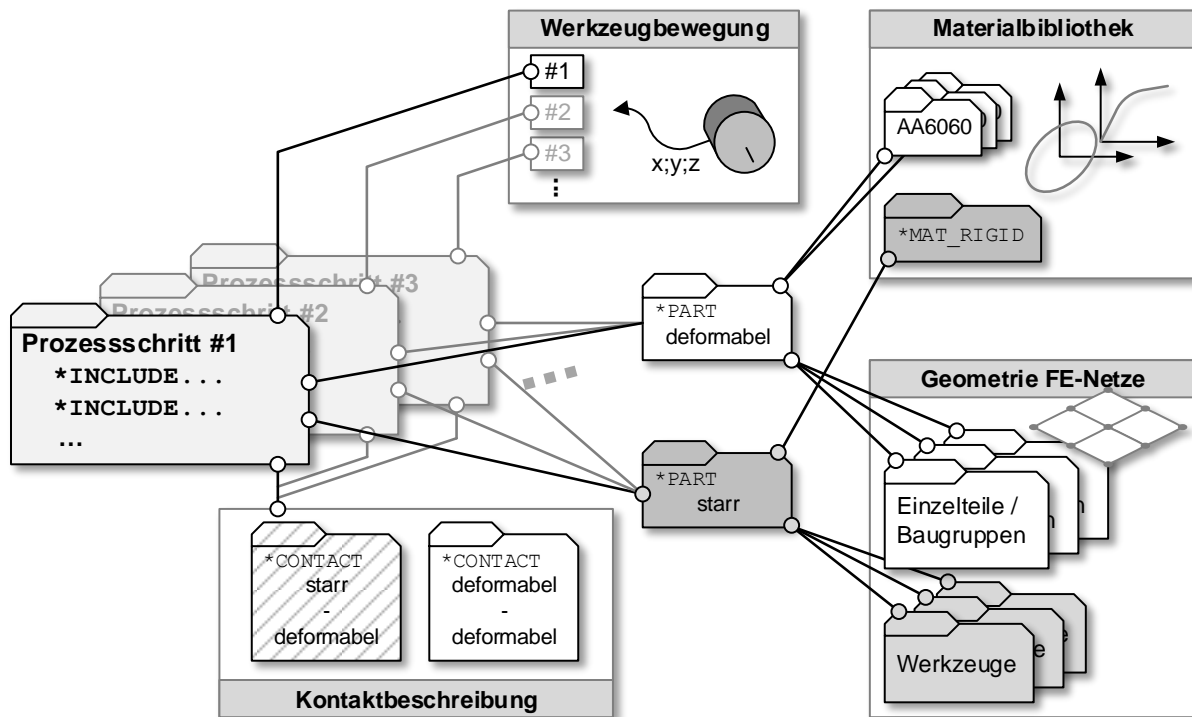
In einem dritten Schritt (Step III) wird auf Basis der Fügefolge und der Rückfederungsergebnisse der Pressteile das Fügen der Unterbaugruppe (im Fall der Motorhaube das Fügen des ZB-Innenteils) simuliert. Ergebnis dieses Simulationsschrittes ist die Rückfederung der Unterbaugruppe im Zusammenbau.

In einem letzten Simulationsschritt (Step IV) werden unter Verwendung der Prozessinformationen aus dem Simulationsschritt Step I die Unterbaugruppe aus Step III mit der Beplankung aus Step II durch Falzen gefügt. Die Falzsimulation muss in diesem Schritt, entgegen der Vorgehensweise in Step I, die elastisch-plastischen Eigenschaften des Innenteils berücksichtigen. Ergebnis des vierten Berechnungsschrittes stellt somit die Rückfederung der fertig gefalzten Baugruppe dar.

Während die Berechnungsschritte Step I und Step II in der speziell für diese Anwendung entwickelte Software AutoForm durchgeführt werden, muss für die Berechnung der Schritte III und IV der FE-Solver gewechselt werden. In AutoForm lassen sich bislang keine Kontakte zwischen mehreren elastisch-plastisch verformbaren Bauteilen untereinander realisieren. Des Weiteren können bei FE-Solvern wie beispielsweise Abaqus oder LS-Dyna bestimmte Einstellungen in Bezug auf die Kontaktmodellierung oder das Elementverhalten gewählt werden. Insbesondere für die beiden Berechnungsschritte III und IV ist dies von besonderer Bedeutung.

Die Simulationsschritte III und IV beinhalten, wie bereits aus der Prozessbeschreibung in Kapitel 4 hervorgeht, jeweils weitere Prozessschritte, die simulativ abgebildet werden müssen. Um den Aufwand dafür im PreProcessing möglichst gering zu halten, sollten zunächst Bausteine definiert werden, auf die im jeweiligen Simulationsschritt zurückgegriffen werden kann (vgl. Abbildung 73). Im Wesentlichen sind dies die Kontaktbeschreibung, die Geometriebeschreibung in Form von FE-Netzen, die Materialbeschreibung sowie die Beschreibung der

Werkzeugbewegung im jeweiligen Unterprozessschritt. Dabei ist darauf zu achten, dass insbesondere bei der Material- und Kontaktbeschreibungen allgemeingültige Einstellungen gewählt werden, auf die in jedem Prozessschritt gleichermaßen zurückgegriffen werden kann.



**Abbildung 73:** Bausteine für den Simulationsinput der einzelnen Prozessschritte

Auf die Vorgehensweise für die Simulationsschritte III und IV, die dabei verwendeten allgemeingültigen Einstellparameter sowie die Definition der Unterprozessschritte wird in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels näher eingegangen. Der Wechsel zwischen den einzelnen FE-Solvern und den einzelnen Berechnungsschritten zieht Methoden des Mappings, wie sie bereits teilweise in der Crashberechnung ihre Anwendung finden, nach sich und wird im Folgenden ebenfalls kurz beschrieben.

## 5.3 Allgemeine Simulationsparameter

Für die beiden Berechnungsschritte III und IV zur Berechnung der Maßhaltigkeit der Baugruppe lassen sich allgemeingültige Simulationsparameter definieren. Die im Folgenden vorgestellten Simulationsparameter beziehen sich dabei auf die in der Simulationsuntersuchung verwendeten Simulationssolver LS-Dyna. Die Simulationsparameter wurden dabei im Wesentlichen aus etablierten Parametern der Umformsimulation [Mak00], [Mak01], [Mak08] u. [Fle09] abgeleitet und für die hier vorliegende Problemstellung angepasst.

### 5.3.1 Geometrische Diskretisierung und Materialverhalten

Die Geometrien der Pressteile werden in FE-Berechnungen mittels verschiedener Elementformulierungen idealisiert. Die Wahl der Idealisierung (Elementtyp und Elementgröße) erfolgt

dabei nach Kriterien, wie beispielsweise der Funktion des Bauteils im Prozess, dem element-spezifisch formulierten Materialverhalten sowie der daraus resultierenden Rechenzeit. Für die Prozesssimulation erfolgt die geometrische Diskretisierung für die Werkstück- und Werkzeugkomponenten in unterschiedlicher Weise.

### ***Geometrie- und Materialmodellierung der Werkstücke***

Da Klappen und Anbauteile der Karosserie weitestgehend aus Pressteilen bestehen, haben sich aufgrund ihrer vergleichsweise dünnen Blechdicke in Bezug auf die großflächigen Abmessungen für die Diskretisierung der Geometrie in der Umformsimulation und der Crashberechnung Schalenelementformulierungen etabliert. Folglich ist es naheliegend, dass auch bei Simulationen der Fertigungskette auf Schalenelemente zurückgegriffen wird. Untersuchungen nach [Fle09] haben gezeigt, dass insbesondere für die Rückfederungsberechnung der Umformsimulation mit dem Elementtyp 16 (nach Bathe-Dvorkin-Element in LS-Dyna implementiert [Bat84], [Eng91] u. [Eng89]) sehr gute Berechnungsergebnisse erzielt werden konnten. Dies gilt sowohl für die explizite als auch die implizite Zeitintegration.

Für die Beschreibung des Materialverhaltens der Blechwerkstoffe werden elasto-plastische Werkstoffmodelle verwendet. Nach Überschreiten der Fließspannung kommt es dabei zu einem nicht-linearen plastischen Werkstoffverhalten. In der Umformsimulation stehen dazu verschiedene Werkstoffmodellierungen zur Verfügung. Die verfügbaren Werkstoffmodelle basieren im Wesentlichen auf der v. Mises Plastizitätstheorie [Sim98]. Die verfügbaren Materialbeschreibungen unterscheiden sich hauptsächlich in der Beschreibung des Fließortes, des Verfestigungsgesetzes und der Extrapolation der Fließkurven. In den folgenden Simulationsuntersuchungen wurde auf vorhandenen Materialkarten, wie sie in der Umformsimulation angewendet und validiert wurden, zurückgegriffen. Diese Vorgehensweise gleicht jener, die in [Eis12] für den Rollfalzprozess beschrieben wurde.

### ***Modellierung der Werkzeuggeometrie***

Im Vergleich zu den Werkstücken besitzen die Werkzeuge eine deutlich höhere Steifigkeit. Folglich ist die Verformung der Werkzeuge vergleichsweise gering. Durch die Idealisierung starrer Werkzeuge können in erster Näherung deren Verformungen vernachlässigt werden, was insbesondere Rechenzeit einspart. Die geometrische Modellierung der Werkzeuge bzw. der Kontaktflächen erfolgt ebenfalls mittels Schalenelementen. Für die Kontaktmodellierung werden geeignete Netze direkt aus den CAD-Daten erzeugt.

## **5.3.2 Zeitdiskretisierung**

In LS-Dyna lässt sich die Zeit sowohl implizit als auch explizit diskretisieren. Je nach Simulationslastfall ist zu unterscheiden, welche Zeitdiskretisierung verwendet werden soll [Stü09]. Aufgrund der sehr fein diskretisierten Blechteile eignen sich prinzipiell implizite Verfahren zur Zeitdiskretisierung [Erh05]. Aufgrund der hohen Elementanzahl ist dabei jedoch der Aufwand für die Gleichungslösung entsprechend hoch. Bei statischen Prozessen, wie beispielsweise beim

Einlegen der Pressteile und bei der Berechnung des Rückfederungsverhaltens, weist die implizite Zeitintegration in der Regel ein sehr gutes Konvergenzverhalten [Jen07] auf. Bei dynamischen Problemen hingegen kann in LS-Dyna die explizite Zeitintegration die bessere Lösung [Zha09] liefern. Der Rechenaufwand ist trotz der derzeit verfügbaren Rechenleistung für ein dynamisch implizites Verfahren bei der betrachteten Modellgröße jedoch deutlich zu groß.

Bei der expliziten Zeitintegration darf ein kritischer Zeitschritt nicht unterschritten werden. Da der kritische Zeitschritt insbesondere von der Elementkantenlänge abhängig ist, ergibt sich für die Falzsimulation durch die sehr fein vernetzten Falzflanschbereiche ein verhältnismäßig kleiner kritischer Zeitschritt. Für die Berechnung des Rollfalzprozesses werden folglich sehr viele inkrementelle Zeitschritte benötigt. Durch die Massenskalierung, welche sehr häufig in der Umformsimulation angewendet wird [Kün11], könnte der kritische Zeitschritt rein theoretisch künstlich erhöht werden, um die Gesamtberechnungsdauer zu reduzieren. Da die Massenskalierung insbesondere beim Rollfalzen zu unerwünschten dynamischen Effekten führen kann [Eis12], wurde im Rahmen dieser Arbeit die Massenskalierung nicht eingesetzt. Die Zeitschrittweite für die expliziten Berechnungen wurde folglich kleiner als die des kritischen Zeitschrittes des FE-Modells gewählt.

Insbesondere das Einlegen der Einzelteile in die Fügevorrichtungen oder der eigentliche Rückfederungsberechnungsschritt erfolgt in einer Berechnung nach der impliziten Zeitintegration. Folglich müssen die verwendeten LS-Dyna Keywords, beispielsweise zur Kontaktformulierung oder der Modellierung der Fügepunkte, sowohl für die explizite als auch die implizite Zeitintegration zur Verfügung stehen und für beide Integrationsverfahren das gleiche Berechnungsergebnis liefern.

## 5.4 Aufbereitung der Ergebnisse aus der Umformsimulation

Bevor die Pressteile aus Berechnungsschritt II als Input für Step III verwendet werden können, muss zunächst definiert werden, welche Geometrieinformation und welche Daten in welchem Format übergeben werden. Des Weiteren ist zu eruieren, wie diese Informationen für folgende Simulationen aufbereitet werden müssen.

### *Gleichgewichtszustand der Pressteile und Datenübergabe der Pressteile für die ZB-Simulation*

Bei der Umformsimulation besteht die Möglichkeit, die Geometrie des rückgefederten Bauteils im gespannten Zustand (entspricht der Messaufnahme des Einzelteils) und auch unter dem Einfluss der Schwerkraft zu berechnen. Zwangsbedingungen aus der Spannsituation sowie die Schwerkraft können jedoch bei der Datenübergabe in ein anderes FE-Programm zu veränderten Ergebnissen führen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Spannungszustand bei der Datenübertragung vom jeweiligen FE-Simulationsprogramm unterschiedlich interpretiert wird. Eine adäquate Übertragung des Spannungszustandes in ein anderes FE-Simulationsprogramm ist mit den derzeit erhältlichen Daten-Mappingtools nahezu unmöglich. Aus diesem Grund wurde bei

der Umformsimulation die freie Rückfederung gewählt. Bei der freien Rückfederung wird lediglich der Gleichgewichtszustand ohne jegliche Zwangsbedingungen und auch ohne Einfluss der Schwerkraft berechnet. Die Spannungen im simulierten Pressteil sind bei der freien Rückfederung in der Regel verhältnismäßig klein und oftmals nur lokal ausgeprägt, da dieser Zustand dem der geringsten inneren Energie entspricht. Auf die Übertragung der im Pressteil herrschenden Restspannungen wird daher für die folgenden Simulationsschritte verzichtet.

Insgesamt werden aus der Umformsimulation folgende Daten in die anschließenden Simulationsschritte übertragen:

- Frei rückgefederter Pressteilgeometrie mit maßlichen Abweichungen zur Soll-Geometrie
- Die Blechausdünnung als skalare Elementgröße (Schalenelement)
- Die plastische Vergleichsdehnung, ebenfalls als Elementgröße bzw. skalare Größe

### ***Remeshing auf der Netzgeometrie der freien Rückfederung***

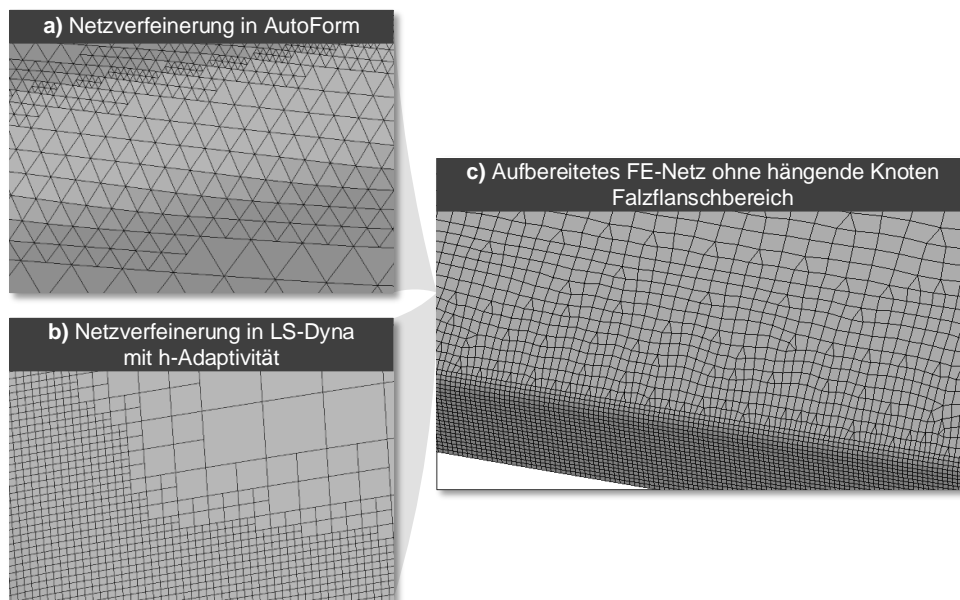
Die Diskretisierung der Geometrie von Körpern wie Werkzeugen oder Werkstücke erfolgt mit der Finite-Element-Methode über das Berechnungsnetz. Je nach Solver Typ werden dabei unterschiedliche Diskretisierungen gewählt. Im Programmsystem AutoForm erfolgt dies mit Dreiecks-Schalenelementen. Aufgrund der adaptiven Netzverfeinerung bei der Umformsimulation verändert sich die Elementgröße während der Berechnung des Umformvorgangs deutlich. Die Verfeinerung ist das Ergebnis von vorher definierten Schranken, wie etwa die benachbarte Element-Normale oder die Abweichung von der idealen CAD-Geometrie. Insbesondere bei Innenteilen und deren Verprägungen führen diese Schranken zu sehr fein vernetzten Bereichen im simulierten Pressteil. Die Geometriebeschreibung ist folglich ein Resultat des Umformprozesses und ist für die nachfolgenden Simulationsberechnungen nur bedingt geeignet. Durch die lokal sehr fein vernetzten Bereiche erhöht sich der numerische Rechenaufwand deutlich. Entlang der Fügefolge des Zusammenbaus würde sich der Rechenaufwand mit zunehmender Anzahl der Einzelteile in erheblichem Maße weiter steigern. Aus diesem Grund muss die Diskretisierung der Geometrie bei einer Prozesssimulation mit mehreren Bauteilen neu gewählt und der neuen Problemstellung im anderen FE-Programm angepasst werden. Diese Vorgehensweise ist vergleichbar mit den FE-Simulationen in der Crashberechnung [Rol07]. So erfolgt die Diskretisierung der Geometrie in der Gesamtfahrzeugsimulation mit weitaus größeren Netzen, als diese beispielsweise bei einer Einzelteiluntersuchung eingesetzt werden.

Hinzu kommt, dass die Verwendung von Dreiecks-Elementen in Verbindung mit den „hängenden“ Knoten bei Simulationssolvern, wie beispielsweise Abaqus und LS-Dyna, zu Problemen führen kann. Quadratische-Schalenelementtypen verhalten sich bei diesen FE-Solvern in der Anwendung stabiler und führen zu weniger Problemen bei der Berechnung.

In LS-Dyna wird im Bereich der Blechumformung zwar mit sogenannten h-adaptiven Knoten [Liv15] gerechnet, jedoch sollte auf diese Art der Netzverfeinerung verzichtet werden, da in

andere Simulationssolvern diese Modellformulierung meist nicht zur Verfügung stehen. Nur durch ein zusätzliches Remeshing und Mapping der Daten könnte auch in anschließenden Simulationen (beispielsweise Lackierprozesse, Betriebslastfälle etc.) auf den Ergebnissen aufgebaut werden.

Die Neuvernetzung (Remeshing) muss, um jegliche geometrischen Abweichungen der Körper in der Simulation zu berücksichtigen, anhand der frei rückgefederten Geometrie erfolgen. Die Möglichkeit der Neuvernetzung auf einem existierenden FE-Netz ist mit den meisten derzeitigen PreProcessoren gegeben. Allerdings ist, je nach Problemstellung, die Neuvernetzung mit enormem zeitlichem Aufwand verbunden. Mit dem PreProcessor ANSA [Ans16] werden dem Anwender teilautomatisierte Lösungen angeboten. Dennoch müssen bei lokalen Netzverfeinerungen sehr viele zusätzliche Netzparameter definiert werden und die Neuvernetzung kann dadurch, je nach Problemstellung, sehr zeitintensiv sein.



**Abbildung 74:** Neuvernetzung eines Pressteils in AutoForm (a) oder LS-Dyna (b) aus einer Umformsimulation mit hängenden Knoten und lokalen Netzverfeinerungen für die spätere Verwendung einer durchgängigen Prozesssimulation (c), mit Netzverfeinerungen im Falzflanschbereich

Abbildung 74 zeigt exemplarisch die Neuvernetzung für einen Flanschbereich, basierend auf einem AutoForm Netz für die spätere Verwendung in Folgesimulationen in LS-Dyna oder Abaqus. Bei der Neuvernetzung wurden sowohl die „hängenden“ Knoten entfernt als auch die Elementkantenlängen im Flanschbereich auf die Rollfalzsimulation angepasst. Bei der neu definierten Geometriebeschreibung müssen, insbesondere für den Folgeprozessschritt des Falzens, folgende Randbedingungen beachtet werden:

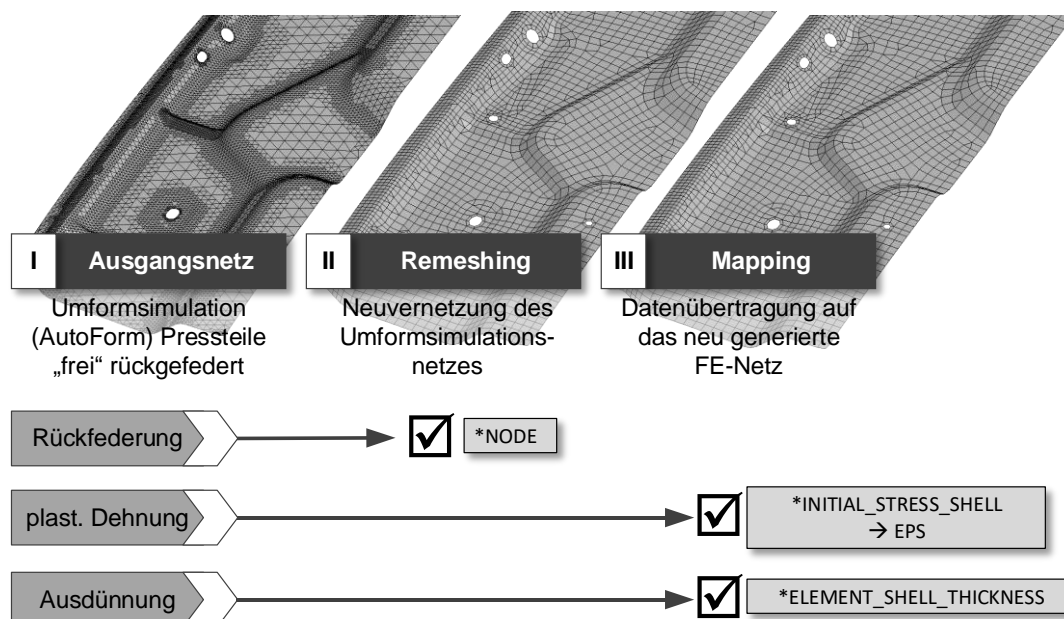
- Die Elementgröße im Bereich von Falzflanschen sollte hinreichend klein gewählt werden, um den Prozess und die plastischen Deformationen während des Falzens möglichst genau berechnen zu können. Für scharfe Abkantradien (1,0 bis 1,5 mm) empfiehlt sich eine Elementkantenlänge von max. 0,4 mm.



- Innenteile müssen im Bereich von Falzkanten ebenfalls feiner diskretisiert werden, um Kontaktprobleme bei der Falzsimulation zu vermeiden. Das Verhältnis von Innenteil zu Beplankung sollte in diesem Bereich den Faktor fünf nicht überschreiten.
- Um die Rechenzeit möglichst kurz zu halten, kann in jenen Bereichen, in denen kein Bauteilkontakt zu erwarten ist, die Elementkantenlänge im Vergleich zu Umformsimulationen deutlich vergrößert werden. Ein Sehnenfehler von 0,1 mm sowie Winkelfehler von  $10^\circ$  sollten dennoch nicht überschritten werden.
- Die Ausrichtung der Elementkanten im Falzbereich sollte parallel zur Biegelinie erfolgen (vgl. [Eis12]).

Ist das Remeshing abgeschlossen, können die Elementvariablen Blechausdünnung und plastische Dehnung mittels Datenmapping vom Ausgangsnetz auf das neu generierte Netz übertragen werden. Die Vorgehensweise des Remeshings und des Datenmappings fasst Abbildung 75 zusammen.

Nachteile bei dieser Vorgehensweise der Datenaufbereitung sind Datenverluste wie beispielsweise von Element- und Knotenvariablen (wie beispielsweise Restspannungen) und zum anderen der Geometrieabweichung durch das Remeshing. Durch die Generierung eines neuen FE-Netzes auf einem bestehenden FE-Netz addieren sich Sehnenfehler unausweichlich auf, die zu größeren Gesamtabweichungen zur eigentlichen CAD-Geometrie führen können. Darüber hinaus können durch das Mappen der Daten, beispielsweise lokale Spitzen von Ergebnisvariablen nur gemittelt übertragen werden, wenn ein Wechsel von einer feinen Vernetzung auf eine gröbere erfolgt. Des Weiteren ist beim Datenmapping darauf zu achten, dass bei einem Solverwechsel, die Daten möglicherweise vom folgenden Solver unterschiedlich interpretiert werden.



**Abbildung 75:** Vorgehensweise beim Remeshing (II) und anschließendem Datenmapping (III) der Umformsimulationsergebnisse (I) für die Verwendung einer durchgängigen Simulation

## 5.5 Fügen mehrerer Pressteile zu einer Unterbaugruppe

### 5.5.1 Prozessschritte für eine vereinfachte Clinch-Simulation

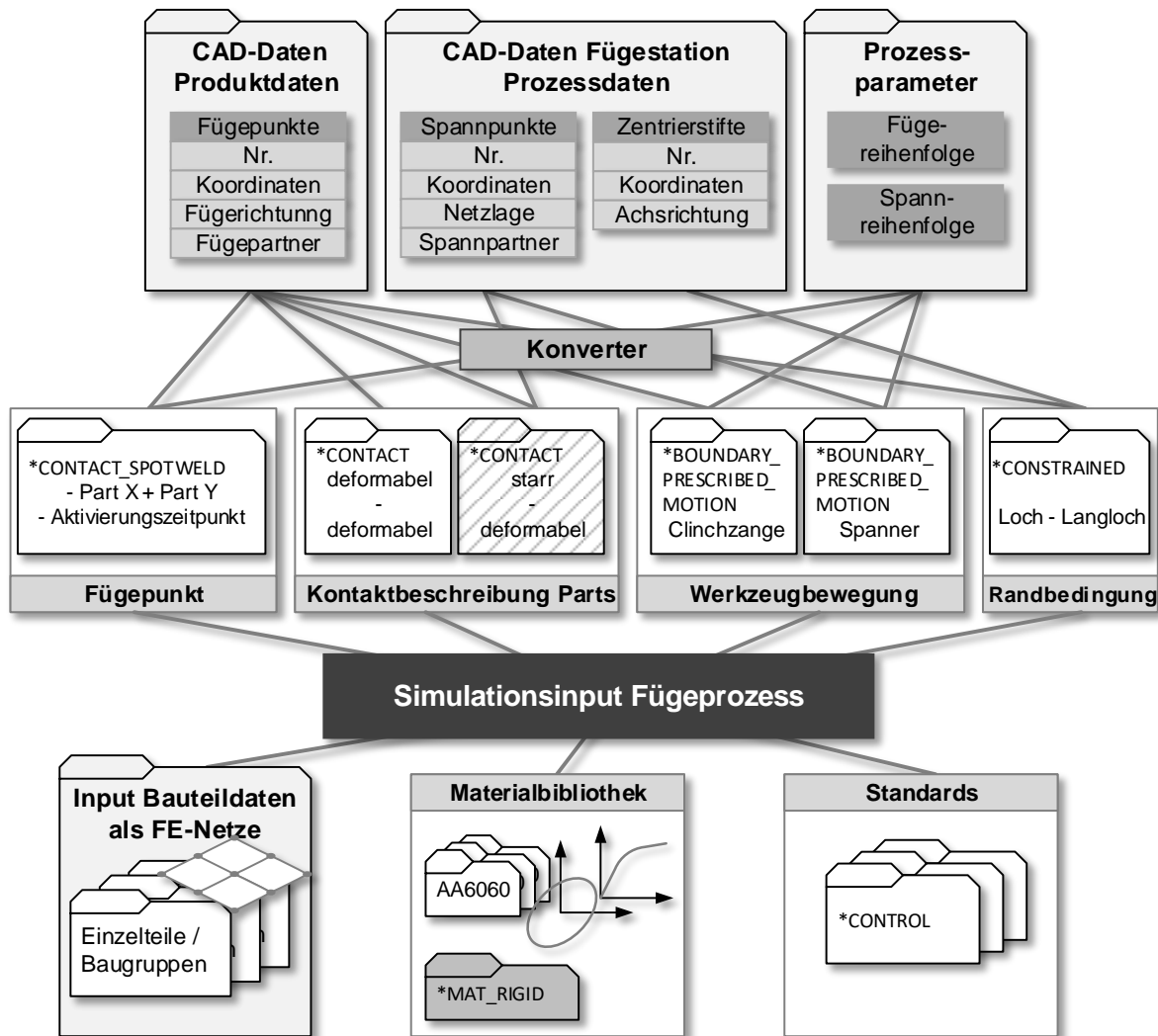
Der Fügeprozess des ZB-Innenteils besteht ausschließlich aus Clinch-Fügeverbindungen, entsprechend der in Abbildung 72 dargestellten Reihenfolge soll nun im Step III dieser Fügeprozess simuliert werden. Vergleichbar mit einer Umformsimulation lässt sich der Fügeprozess aus mehreren Einzelteilen zum ZB-Innenteils in die folgenden Prozessschritte unterteilen:

- Einlegen und Schachteln der Pressteile in die Vorrichtung unter Berücksichtigung der Schwerkraft sowie der Randbedingungen aus dem Spann- und Fixierkonzept.
- Das sequentielle Schließen der einzelnen Spanner.
- Das sequentielle Fügen der Pressteile zu einer Unterbaugruppe.
- Öffnen der Spanner.
- Rückfederung und anschließende Bestimmung der Maßhaltigkeit der Unterbaugruppe mit Hilfe der Messaufnahme.

Die genannten Prozessschritte wurden aus der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Fertigungsfolge abgeleitet. Die größten Herausforderungen bei der Prozessbeschreibung stellen dabei die folgenden beiden Fragen dar:

- Welche Produkt- und Prozessdaten müssen generiert bzw. aus vorhandenen CAD-Daten abgeleitet werden und wie müssen diese für den FE-Solver aufbereitet werden?
- Wie lässt sich eine Fügeverbindung vereinfacht in ein Gesamtmodell einer Baugruppe integrieren und welche Vereinfachungen können für eine hinreichend genaue Lösung getroffen werden?

Die Vorgehensweise bezüglich der ersten Frage veranschaulicht Abbildung 76, wie beispielsweise aus vorhandenen CAD-Produkt- und Prozessdaten im PreProcessing Eingangsdaten für die Simulation entsprechend aufbereitet werden können. Liegen beispielsweise Fügepunkte, beschrieben durch die Raumkoordinaten, die Fügepartner sowie die Fügereihenfolge in tabellarischer Form vor, so kann über eine Konvertierung der Daten ein automatisierter Simulationsablauf erstellt werden. In derselben Weise erfolgt dies für Spanner und deren Aktivierungsreihenfolge. Da für den gesamten Fügeprozess eine Vielzahl an Clinchpunkten gesetzt wird und dazu eine große Anzahl an Spannern zum Einsatz kommt, ist ein automatisierter Simulationsaufbau für diese Simulationsschritte zwingend erforderlich.



**Abbildung 76:** Datenaufbereitung für die FE-Fügesimulation aus den CAD-Produktdaten und Prozessdaten mittels Standardbibliotheken

Im Folgenden werden die verwendeten Simulationsparameter sowie das Fügeersatzmodell für das Erzeugen der Unterbaugruppe dargestellt.

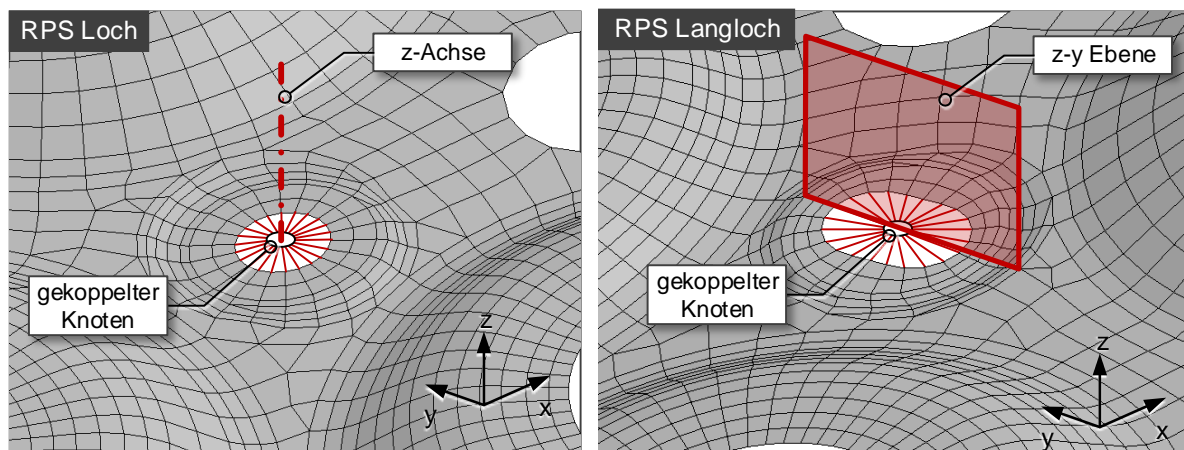
### 5.5.2 Simulationsparameter für die Berechnung des Fügevorgangs der Unterbaugruppe

Für die ersten beiden Prozessschritte, dem Einlegen der Pressteile und dem Schließen der Spanner, können vorhandene Methoden aus der Umformsimulation abgeleitet werden. Das Einlegen der Pressteile in die Vorrichtungen entspricht dabei dem Einlegen der Platine unter Schwerkraft in die geöffneten Ziehwerkzeuge. Das Schließen der Spanner der Rohbauanlage kann mit dem Schließen von Blechhalter und Matrize vor dem eigentlichen Ziehvorgang gleichgesetzt werden. Neu hinzu kommt jedoch der Kontakt zwischen mehreren elastisch-plastisch deformierbaren Körpern, in der Umformsimulation wird der Kontakt zwischen zwei elastisch-plastisch deformierbaren Körpern in der Regel nicht benötigt. Im Programmsystem LS-Dyna lässt sich der Kontakt zwischen den Schalenelementen der Pressteile mit einem einfachen automatischen Penalty-Flächenkontakt (\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE) darstellen.

Der Abgleich der Kontaktsteifigkeit stellt dabei eine Modellierungsschwierigkeit dar, sodass sich keine unerwünschten dynamischen Effekte bzw. Durchdringungen ergeben.

Die Kontaktbedingungen zwischen Bauteil und den Spannern der Vorrichtung hingegen können vereinfacht wie bei der Umformsimulation als Kontakt zu starren Werkzeugen angenommen werden. Diese Vereinfachung ist bei Betrachtung der Spannkkräfte und dem Verhältnis aus Anlagen- zu Bauteilsteifigkeit von geringer Auswirkung auf das Simulationsergebnis.

Randbedingungen, wie sie bei Vorrichtungen und Anlagen in Form von Zentrierstiften zur Bauteilpositionierung existieren, werden vereinfacht über Knotenrandbedingungen definiert. Die Definition der Randbedingungen für die einzelnen Pressteile folgt dabei dem Prinzip der RPS-Regel nach Kapitel 2.3.1 und sorgt für die stabile Lage der Bauteile zueinander. In frei orientierbaren Koordinatensystemen lassen sich so einzelne Freiheitsgrade unterbinden. Aus numerischer Sicht stellt dies eine sehr praktikable Lösung dar, um unnötigen Rechenaufwand in Form von senkrecht wirkenden Schalenelementkontakten an Bauteilrändern zu vermeiden.

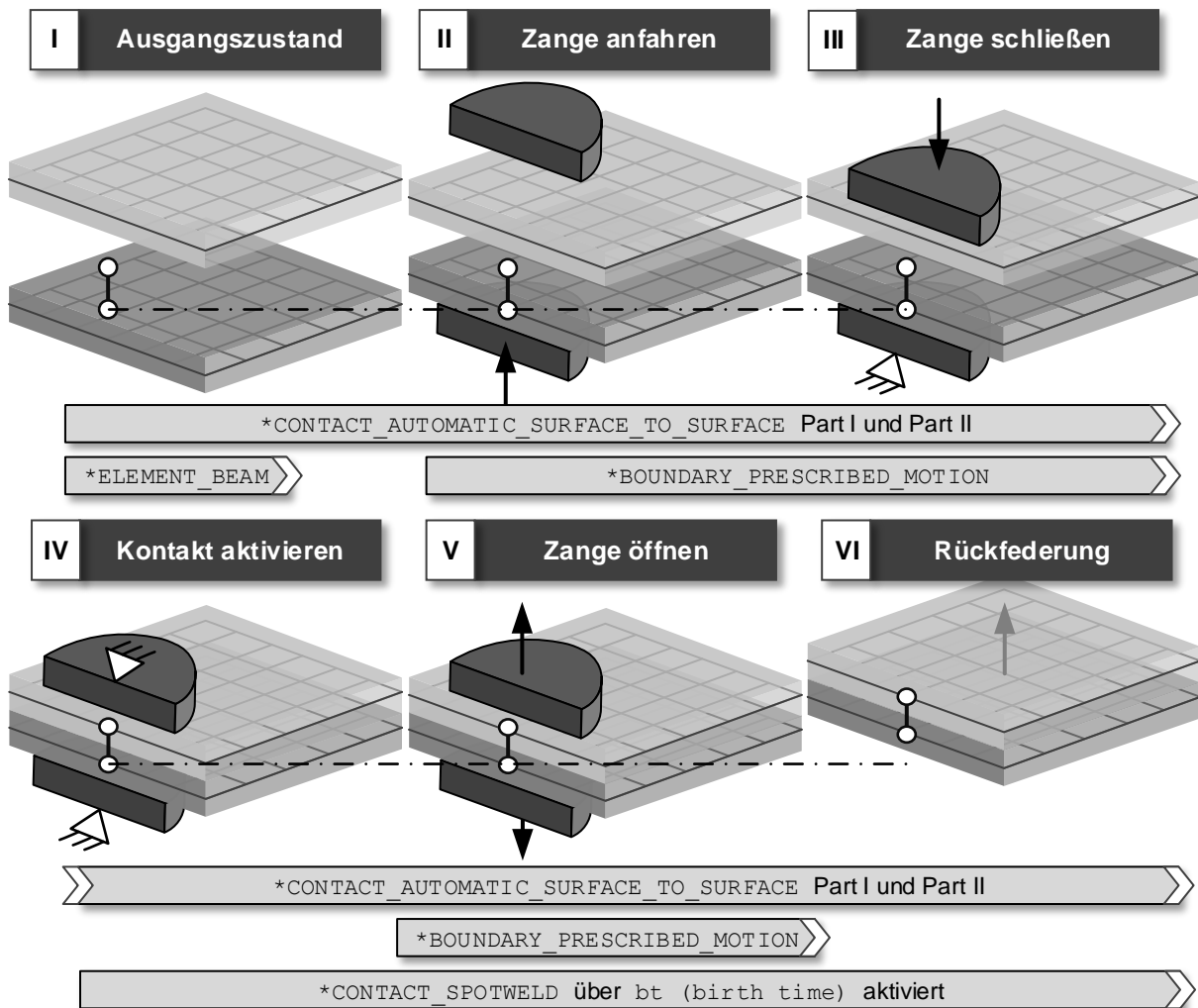


**Abbildung 77:** Beispiele für die Definition der Randbedingungen für die Fügésimulation nach der RPS-Regel: RPS-Loch (li.) und RPS-Langloch (re.)

### 5.5.3 Definition des Fügeersatzmodells

Der eigentliche Fügeprozessschritt beginnt, nachdem die Pressteile zueinander in der Anlage positioniert und gespannt sind. Im Fügepunkt kann es dennoch sein, dass die Pressteile aufgrund ihrer maßlichen Formabweichung und der Spannsituation nicht in direktem Kontakt zueinander stehen. Bei punktuellen Fügeverfahren wie dem Widerstandspunkt-Schweißen, dem Stanznieten oder dem Clinchen werden die Bauteile bis zu ihrem Kontakt zunächst zusammengedrückt und anschließend miteinander verbunden. Auch dieser Schritt muss von der Simulationsmethode möglichst realistisch abgebildet werden.

Um die beiden Pressteile im Bereich des Fügepunktes in Kontakt zu bringen, wird in der Simulation mit Hilfe von starren Werkzeugen die Bewegung der Fügezange nachgebildet. Berühren sich am Ende der Bewegung beide Pressteile, muss in diesem Moment ein Verbindungselement generiert werden. Dieses sichert die Verbindung der beiden Pressteile beim Öffnen der Fügewerkzeuge. Eine hierfür geeignete Vorgehensweise zeigt Abbildung 78.

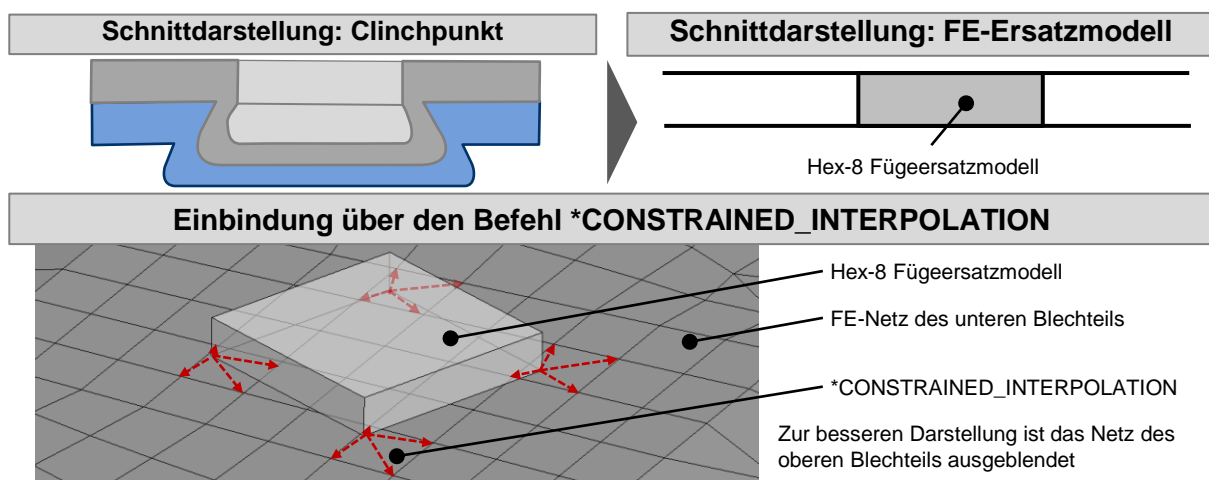


**Abbildung 78:** Modellierung des Fügeprozesses durch ein vereinfachtes Fügeersatzmodell: Sequenzielle Umsetzung in der FE-Fügesimulation mit den entsprechenden LS-Dyna Keywords

Die Fügeverbindung zwischen den Pressteilen kann aus einem Balkenelement (siehe Beispiel Abbildung 78) oder beispielsweise einem Hex-8 Volumenelement bestehen. Elemente, die zwischen zwei durch Schalenelemente beschriebene Körper eine Verbindung herstellen, sind aus der Crash-Simulation bekannt [Mem05], [Feu10] u. [Hau10b] und werden dort auf ähnliche Weise verwendet. Der Unterschied zwischen der Fügeprozesssimulation und der Crash-Simulation besteht darin, dass die Elemente bei der Füge-Prozesssimulation im Simulationsprozess entstehen, bei der Crash-Simulation hingegen diese bei bestimmten Belastungen und Deformationen ihre Wirkungsweise verlieren. Eigenschaften, wie beispielsweise eine stark vereinfachte Steifigkeit der Fügeverbindung, können jedoch in beiden Fällen definiert werden. Die Besonderheit dieser Vorgehensweise besteht darin, dass das Fügeelement selbst nicht direkt an Knoten der FE-Netze der Pressteile gekoppelt ist, sondern vielmehr eine Art Kontakt- bzw. Zwangsbedingung darstellt. Diese Randbedingung des Fügeelementes bezieht sich in diesem Fall stets auf die am nächsten liegenden Knoten. Dies ist von besonderer Bedeutung, da beim Remeshing

im Bereich der Fügepunkte keine besondere Elementanordnung bzw. Elementzuordnung notwendig ist. Aus der Lage des Fügepunktes, welcher durch die CAD-Daten definiert ist, lassen sich so recht schnell Fügesequenzen für mehrere Fügepunkte generieren, ohne auf Zuordnungen hinsichtlich der zu fügenden Pressteilnetze achten zu müssen.

Im Folgenden wurden für die Modellierung der Fügepunkte ausschließlich Hex-8 Elemente verwendet. Die Zuordnung jedes Knotens des Fügeelements erfolgte bei LS-Dyna über den `*CONSTRAINED_INTERPOLATION`-Befehl. Dieser gewichtet die Zwangsbedingung zwischen Fügeelement und Pressteil entsprechend dem Abstand vom Knoten des Fügeelements zu vier naheliegenden Knoten des Pressteils. Geometrisch ist das Hex-8 Element genau zwischen den beiden FE-Netzen der Fügepartner modelliert (vgl. Abbildung 79).



**Abbildung 79:** Hex-8 Element als Fügeersatzmodell und die Einbindung im Simulationsmodell über den Befehl `*CONSTRAINED_INTERPOLATION`

Das dargestellte Fügeersatzmodell stellt eine Vereinfachung der eigentlichen Fügeverbindung dar. Prozessbedingte Verformungen oder ein entsprechender Wärmeeintrag werden bei diesem Modell in der Simulation nicht berücksichtigt. Je nach Fügeverfahren muss beurteilt werden, ob dieses stark vereinfachte Ersatzmodell die Problemstellung ausreichend genau abbildet und relevante Einflussgrößen in der Simulation wiedergegeben werden. In [Eck12a] wird eine Methode beschrieben, wie sich ein solches ein Ersatzmodell bei dem FE-Solver Pam-Stamp erweitern lässt, damit auch Spannungseinträge, resultierend aus der Fügeverbindung, berücksichtigt werden können.

Im vorliegenden Fall der Motorhaube kommen bei der Fertigung der Unterbaugruppe ausschließlich Clinchverbindungen mit einer zusätzlichen Kleberapplikation zum Einsatz.

Versuche mit ebenen Blechen haben gezeigt, dass eine ungünstig eingestellte Clinchzange (Vorspannung des Niederhalters) zu leichten globalen Verformungen führen kann. Bei einer optimalen, der Materialpaarung entsprechenden Einstellung der Clinchzange, konnten jedoch selbst bei den ebenen Probeblechen keine relevanten globalen Verformungen festgestellt werden.

Aufgrund der vergleichsweise hohen Struktursteifigkeit der Innenteile soll folglich die Annahme getroffen werden, dass die lokalen Deformationen durch den Clinchprozess einen verschwindend geringen Einfluss auf das globale Verhalten der Unterbaugruppe besitzen. Die Validierung in Kapitel 6 wird diese Annahme bestätigen.

Bei anderen punktförmigen Fügeverbindungen wie beispielsweise dem Halbhohlstanznieten kann diese Annahme nicht zielführend sein. Daher muss jede Fügeverbindung entsprechend getrennt betrachtet werden. Erweiterungen der Ersatzmodelle, die die lokalen Deformationen durch einzelne Fügepunkte berücksichtigen, bilden Gegenstand derzeitiger Forschungsarbeiten [Neu11].

## 5.6 Falzprozesssimulation einer Baugruppe mit elastischem Innenteil

Step IV der in Abbildung 72 dargestellten Simulationskette stellt die Falzsimulation, d. h. die formschlüssige Verbindung zwischen Beplankung und Innenteil, dar. Bevor die verwendeten Simulationsparameter sowie die Vorgehensweise bei der Bestimmung der Falzrollenbahn vorgestellt werden, ist zunächst zu klären, welche korrespondierenden Einzelschritte in der Falzsimulation durchgeführt werden müssen.

### 5.6.1 Prozessschritte der Falzsimulation

Wie bereits in Kapitel 5.5 besitzt der Prozessschritt des Falzens auch mehrere Einzelschritte, die in der Simulation abgebildet werden müssen. Aus der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Abfolge von Prozessschritten aus der seriennahen Prototypenfertigung werden somit folgende wesentliche Simulationsschritte abgeleitet:

- Einlegen der Beplankung ins Falzbett unter dem Einfluss ihrer Schwerkraft. Die Ausrichtung erfolgt über Knotenrandbedingungen der Beplankung und das spezifische Koordinatensystem.
- Einlegen bzw. Verschachteln des Innenteils als Unterbaugruppe auf die Beplankung. Die Positionierung erfolgt über Knotenrandbedingungen am Innenteil, entsprechend der definierten RPS-Aufnahmen.
- Spannen und Anlegen von Innenteil und Beplankung an das Falzbett.
- Schrittweises Falzen der Falzflansche nach Strategie in Form von Backen- oder Rollfalzvorgängen oder Kombinationen aus beiden Verfahren.
- Rückfederung und anschließende Bestimmung der Maßhaltigkeit der gefalzten Baugruppe entsprechend dem Ausrichtkonzept der Messaufnahme.

Im Vergleich zum Serienprozess unterscheidet sich die hier vorgestellte Simulationsfolge hauptsächlich darin, dass die Applikation von Falz- und Stützkleber nicht als Prozessschritt berücksichtigt wird. Da der Kleber beim Falzen noch nicht ausgehärtet ist und dieser somit

seine endgültige Festigkeit sowie die damit verbundene Steifigkeitssteigerung noch nicht erreicht hat, sollen die mechanischen Eigenschaften des Klebers vernachlässigt werden. In der Simulation lässt sich der Falz- bzw. Stützkleber über einen entsprechenden Kontakt-Offset zwischen den Pressteilen zumindest geometrisch berücksichtigen (vgl. Kapitel 5.6.3).

Die ersten drei Prozessschritte, die im Wesentlichen das Einlegen und Spannen der Bauteile abbilden, lassen sich analog zu den ersten Prozessschritten des Fügens der Unterbaugruppe aufbauen. Beim vierten Berechnungsschritt, dem Falzen, steht die Umsetzung der Falzmethode durch entsprechende Werkzeugbewegungen im Vordergrund. Im Folgenden soll zunächst die Umsetzung dieser Werkzeugbewegung in der FE-Simulation erläutert werden.

### 5.6.2 Beschreibung der Falzrollenbewegung

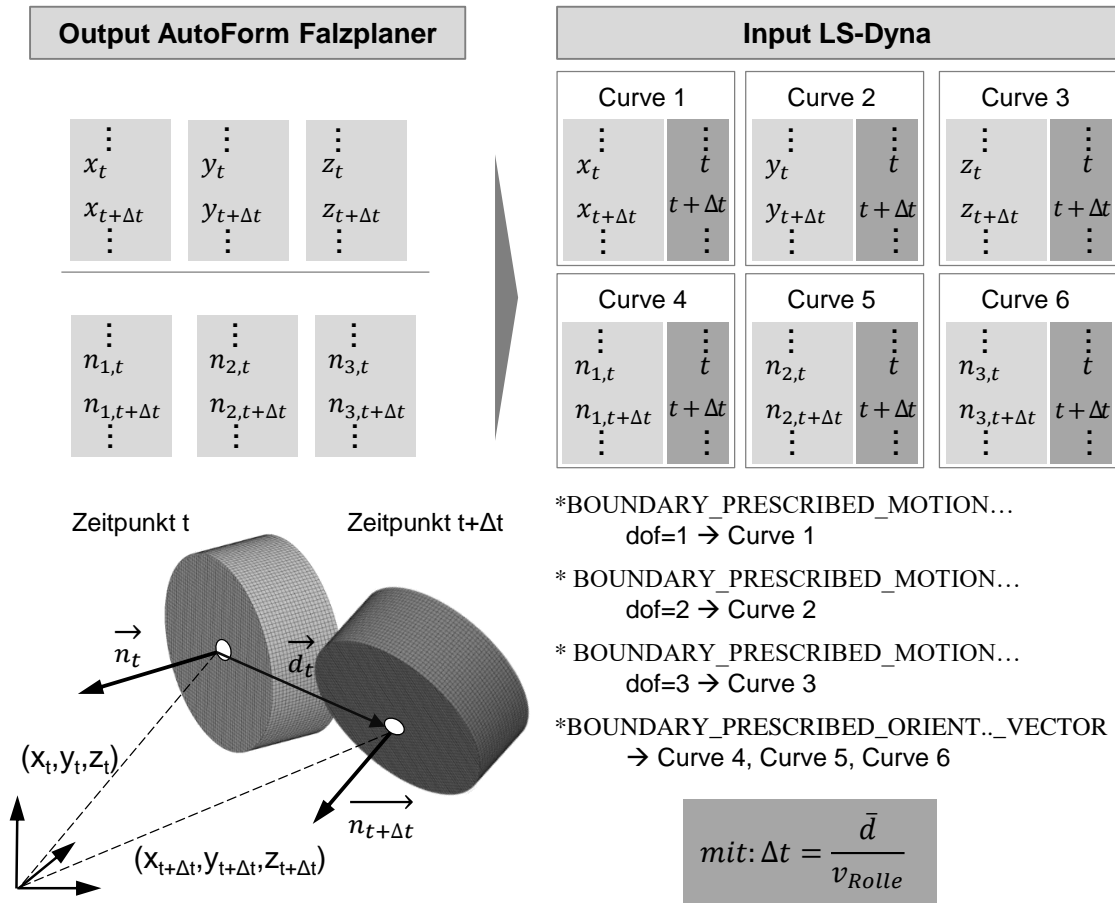
Mit dem in Step I erwähnten, anwenderfreundlichen AutoForm-HemPlanner<sup>plus</sup> ist es beim Falzen derzeit nicht möglich, die Fügeverbindung einer elastisch-plastischen Beplankung und einer elastischen Unterbaugruppe aus mehreren Einzelteilen zu simulieren. Für diese Problemstellung kommen aus den derzeit kommerziell am Markt verfügbaren FE-Solvern ausschließlich LS-Dyna und Pam-Stamp in Frage. Für den Berechnungsschritt Step IV wurde der FE-Solver LS-Dyna gewählt, auf welchen sich die im Folgenden dargestellten Befehle und Grafiken beziehen.

Da für den Zusammenbau der Motorhaube der Falzprozess durch Rollfalzen definiert ist, fokussiert sich die Simulationsmethode auf die translatorische sowie rotatorische Bewegung der Falzrolle. Die Simulation eines Backenfalzprozesses könnte in gleicher Weise erfolgen, der Schwerpunkt würde dabei allerdings auf der Generierung der Backenwerkzeuggeometrie liegen. Die linearen Werkzeugbewegungen könnten in diesem Fall aus Werkzeug- und Schieberbewegungen, wie diese in Umformsimulationen verwendet werden, abgeleitet werden.

Den größten Aufwand beim PreProcessing für eine Rollfalzsimulation stellt die Generierung der Rollenbahnen entsprechend der zuvor festgelegten Falzmethode dar. Die Rolle besitzt insgesamt drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade, die sich zeitlich ändern können. Mit dem PreProcessor LS-Prepost steht derzeit keine geeignete Lösung der schnellen Bahngenerierung zur Verfügung. Möglichkeiten sowie Vor- und Nachteile dazu, wie sich diese Bahnen unter entsprechend hohem Aufwand in LS-Dyna generieren lassen, werden in [Eis12] beschrieben. An dieser Stelle soll jedoch eine neue Vorgehensweise verfolgt werden. In der in Step I verwendeten Anwendersoftware, dem AutoForm-HemPlanner<sup>plus</sup>, steht dem Anwender eine grafische GUI zur Verfügung, mit deren Hilfe sich der Aufbau der Falzmethode relativ einfach gestalten lässt. Entlang der Radiuseinsatzlinie des Flanschverlaufes lassen sich Zustellung und Winkel der Falzrolle an beliebigen Positionen definieren. Dadurch können auch räumlich komplexe Bahnbewegungen erzeugt werden. Die Bewegung der Rolle lässt sich vom Programm in Form eines tabellarischen Outputs ausgeben. Inhalt dieses Outputs sind die Raumkoordinaten der Rollenmitte entlang der Falzbahn sowie der Richtungsvektor der Rollenachse. Die zeitliche Zuordnung der einzelnen Punkte auf der Falzbahn ist jedoch nicht gegeben. Abgesehen davon



müsste diese beim Wechsel von der impliziten (AutoForm) auf die explizite Zeitdiskretisierung in LS-Dyna neu definiert werden. Die zeitliche Zuordnung erfolgt dabei über die virtuelle Werkzeuggeschwindigkeit. Für eine stabile numerische Berechnung konnte der nach [Eis12] ermittelte Wert für die virtuelle Rollengeschwindigkeit von 100 mm/ms bestätigt und verwendet werden.



**Abbildung 80:** Zusammenhang der in AutoForm-HemPlanner<sup>plus</sup> generierten Rollenbewegung und der in das LS-Dyna-Keyword-Format transferierten Befehle

Die translatorische Bewegung der Rolle, die als Starrkörper idealisiert wird, kann mit den aus der Umformsimulation bekannten Befehlen erfolgen. Für die drei Raumrichtungen erreicht man dies über den Befehl \*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_RIGID und eine tabellarische Zuordnung von Raumkoordinate und Zeit.

Für die zeitliche Orientierung der Rollenachse wurde der Befehl \*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_ORIENTATION\_RIGID\_VECTOR verwendet. Über drei in LS-Dyna zu definierenden Kurven (Befehl \*DEFINE\_CURVE) ist der normierte Vektor der Rollenachse zeitlich eindeutig beschrieben. Den Zusammenhang zwischen dem im AutoForm-HemPlanner<sup>plus</sup> generierten Output und dem im Programm LS-Dyna verwendeten Input veranschaulicht Abbildung 80.

Da die Konvertierung sämtlicher Falzbahnen aus AutoForm in LS-Dyna mit einem relativ hohen Aufwand verbunden ist, wurde eine automatische Bahngenerierung mittels eines neuen

Programms nach Eingabe von ausgewählten Parametern bewerkstelligt. Auf diese Weise kann die im AutoForm-HemPlanner<sup>plus</sup> definierte Falzmethode mit geringem Aufwand in das LS-Dyna-Format konvertiert werden.

### **5.6.3 Parameterwahl für die Rollfalzsimulation mit einem elastischen ZB-Innenteil**

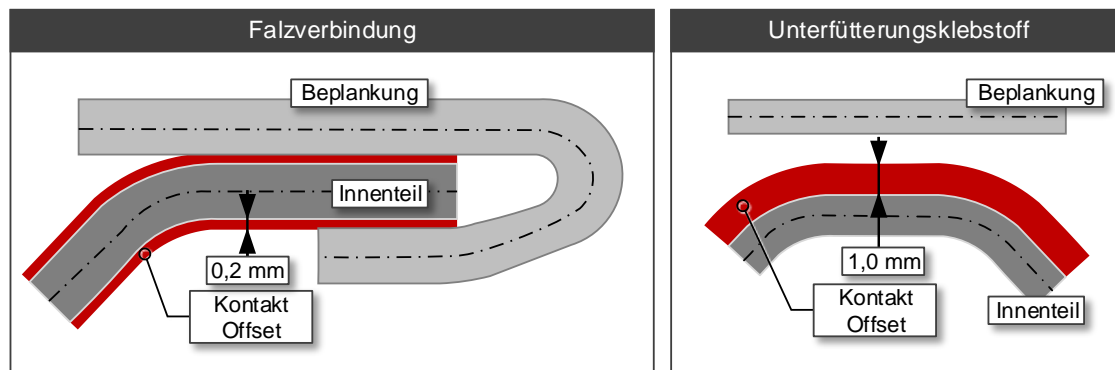
Im Folgenden wird auf die ermittelten Simulationsparameter bei der Rollfalzsimulation mit elastischem, mehrteiligem Innenteil eingegangen. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Kontaktformulierung zwischen den Einzelteilen sowie die zeitliche Diskretisierung des Rollfalzprozesses.

#### ***Kontaktbeschreibung***

Aus der Fugesimulation der Unterbaugruppe des Innenteils können sämtliche Kontaktformulierungen für den Falzprozess übernommen werden. Für die verwendeten Schalenelementformulierungen kommt dabei der Kontakttyp `*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE` zum Einsatz [Liv11]. Der neu hinzukommenden Kontaktpaarung zwischen Beplankung und der Unterbaugruppe Innenteil kommt jedoch eine besondere Bedeutung zu, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Für Falze an Türen und Klappen werden in der Serienproduktion Strukturklebstoffe verwendet. Diesen Klebstoffen sind Zusätze beigemischt, sodass bei geschlossenem Falz zwischen Innenteil und Beplankung ein im Idealfall definierter Abstand von 0,2 mm bestehen bleibt. Die applizierte Klebstoffmenge entspricht dabei einer vollständigen Benetzung der Fügepartner bei geschlossenem Falz (vgl. Abbildung 81 li. Seite). Für die Simulation bedeutet dies, dass sowohl für die Ober- als auch Unterseite des Innenteils ein sogenannter Kontakt-Offset definiert werden muss, damit der Klebstoff im Falz geometrisch berücksichtigt wird. Da der Klebstoff zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausgehärtet ist, wird dessen Festigkeit nicht berücksichtigt.

In Bereichen, in denen ein mittelweicher Karosserieklebstoff zur Unterfütterungen von Innenteil und Beplankung zum Einsatz kommt, wurde ein Offset von 1 mm gewählt (vgl. Abbildung 81 re. Seite). Der konstruktiv vorgesehene Abstand zwischen Innenteil und Beplankung beträgt jedoch 7 mm. Dieser Klebstoff ist jedoch bei seiner Applikation im nicht ausgehärteten Zustand sehr viskos und lässt sich dadurch sehr leicht verdrängen. Die Stützwirkung des Klebstoffs ist folglich im nicht ausgehärteten Zustand sehr gering. Bei der Simulationsauswertung sollte in diesen Bereichen dennoch darauf geachtet werden, wie sich der Abstand von Innenteil zu Beplankung verhält. Nur ein numerisch aufwändiges viskoelastisches Materialverhalten könnte das Verhalten des Stützklebstoffes realitätsnah abbilden. Dabei sei jedoch angemerkt, dass nach derzeitigem Stand der Technik keine Materialkennwerte für den Klebstoff im nicht ausgehärteten Zustand vorhanden sind und das Klebstoffverhalten sehr stark von unterschiedlichen Einflussgrößen, wie beispielsweise der aufgetragenen Klebstoffmenge, der Verarbeitungstemperatur, der Geometriebedingungen an der Klebnaht etc., beeinflusst wird.



**Abbildung 81:** Geometrische Berücksichtigung des Klebstoffes im Simulationsmodell mittels Kontaktoffsets: Im Bereich des Falzklebers (li.); im Bereich des Unterfütterungsklebstoffes (re.)

## 5.7 Vereinfachungen in der Simulationsmethode

Um komplexe Problemstellungen in einer Simulation abzubilden, müssen Annahmen getroffen werden, die oftmals zu Vereinfachungen der Problemstellung führen. Diese Vereinfachungen sind oftmals der zur Verfügung stehenden Rechenleistung, der Kennwertaufnahme oder beispielsweise auch den Möglichkeiten zur Materialcharakterisierung geschuldet. Für die Simulationsvalidierung müssen diese Vereinfachungen berücksichtigt werden, um Abweichungen zwischen Realität und Simulation richtig zu deuten. Die Tabellen 4 und 5 fassen die wesentlichen Vereinfachungen die im Rahmen der vorgestellten Simulationsmethodik getroffen wurden zusammen. Da bei dieser Arbeit im Wesentlichen auf Simulationsbausteine der Umformsimulation zurückgegriffen wurde, sind die meisten Vereinfachungen analog derer aus der Umformsimulation.

Allgemeingültige Vereinfachungen	
Geometriemodellierung Werkstück / Pressteile	idealisiert durch FE-Netz aus Schalenelementen
Materialmodellierung	je nach verwendetem Materialmodell ergeben sich unterschiedliche Vereinfachungen, abhängig von der Beschreibung von Fließkurve, Fließort, Versagen und Dehnratenabhängigkeit
Umformgeschwindigkeit	im Allgemeinen nicht berücksichtigt
Reibung	vereinfacht über Coulombsches Reibmodell
Temperaturentwicklung	nicht berücksichtigt
Pressteilesimulation	
Werkzeugdarstellung Umformsimulation	idealisiert starr
Einarbeitung der Werkzeuge	nicht berücksichtigt
Ziehsticks	über Ersatzmodell vereinfacht

**Tabelle 4:** Vereinfachte Annahmen der Umformsimulation

<b>Datenaustausch</b>	
Umformhistorie	ausschließlich Ausdünnung und plastische Dehnung lassen sich berücksichtigen
<b>Simulation Unterzusammenbau</b>	
Clinchverbindung	Fügeersatzmodell berücksichtigt keine lokalen Deformationen
Werkzeugmodellierung Spanntechnik	idealisiert starr
<b>Falzsimulation der Baugruppe</b>	
Robotersteifigkeit	idealisierte Bahnbewegung der Falzrolle
Werkzeugmodellierung Spanntechnik	idealisiert starr
<b>Klebstoff in der Simulation</b>	
Strukturklebstoff / Falzkleber	nur über Kontaktoffset geometrisch berücksichtigt, keine versteifende Wirkung im nicht ausgehärteten Zustand
Unterfütterungsklebstoff	ausschließlich über einen Kontaktoffset berücksichtigt

**Tabelle 5:** Vereinfachungen in der Simulationsmethode; Datenaustausch zwischen Umformsimulation und Simulation des Zusammenbaus

## 5.8 Prozessketten Karosseriebau - Zeitliche Einordnung im Produktentwicklungsprozess

Der zeitliche Aufwand für den Simulationsaufbau einer durchgängigen Prozesssimulation ist derzeit noch verhältnismäßig hoch. Für die dargestellte Motorhaube ergibt sich für eine Variante der Zusammenbausimulation eine Berechnungsdauer von ca. vier Tagen. Dieser Aufwand lässt sich nur dann rechtfertigen, wenn aus den Simulationsergebnissen Maßnahmen abgeleitet werden können, die zur Qualitätsverbesserung beitragen. Im Hinblick auf den Einsatz bzw. den Aufbau einer durchgängigen Prozesssimulation bestehen somit zwei wesentliche Fragestellungen:

- Zu welchem Zeitpunkt ist es sinnvoll, die Produktionsprozesse aus Presswerk und Rohbau ganzheitlich simulativ zu betrachten?
- Welche Erkenntnisse lassen sich aus den Simulationsuntersuchungen gewinnen und welche Maßnahmen können daraus abgeleitet werden?

Lassen sich Antworten auf diese Fragestellungen finden, kann sich die dargestellte Simulationsmethode in modernen Produktentstehungsprozessen etablieren. Für eine zeitliche Einordnung sollen zunächst die derzeitigen Meilensteine bezüglich des Produktreifegrades vorgestellt werden, um anschließend die durchgängige Prozesssimulation hinsichtlich ihres Nutzens einordnen zu können.

**Digitaler Prototyp**

- erster voll aufgebauter CAD-Produktdatenstand mit ersten DMU (Digitaler Mock-UP) Untersuchungen
- Herstellbarkeit der Einzelteile noch nicht geprüft

**Daten:** erste Produktdaten per CAD beschrieben; geringer Reifegrad

**Folgeschritte:** Reifegraderhöhung hinsichtlich der Herstellbarkeit

- Umformsimulation
- Falzsimulation → Falzzugabe und Flanschlängenfestlegung
- weitere digitale Gesamtfahrzeugabsicherungen (Crash etc.)

**Prototypendaten**

- prinzipielle Herstellbarkeit der Einzelteile gegeben
- Falzzugaben und Flanschlängen in den Produktdatensatz eingearbeitet

**Daten:** erhöhter Reifegrad der Produktdaten

- Umformwirkflächen als DieDesign Daten
- Anlagenfügefolge + Groblayout der Anlagen (keine CAD-Daten)

**Folgeschritte:** Beginn des Engineerings der Prototypenwerkzeuge und der Anlagen

- Umformsimulation sämtlicher Operationsfolgen inkl. Rückfederungsbetrachtung für Kompensationsmaßnahmen in der Prototypenphase
  - Festlegung der Kompensationsmaßnahmen für die Prototypen
  - Generierung CAD-Daten; Fräsdaten der Werkzeuge (Prototypenteile)
  - Generierung CAD-Daten der Anlagen (Prototypenaufbau)
- Anlagen: Schachteluntersuchungen, Delmia Ablaufsimulationen (Zugänglichkeit) werden geprüft
- Anfragedatenstand bei externen Herstellern

**Werkzeugdatenstand**

- Vorabdatenstand für die Serie

**Daten:** Reifegrad der Produktdaten entspricht nahezu dem Serienstand

**Folgeschritte:** Start Engineering der Serienwerkzeuge und –anlagen

- Vergabe an externe Hersteller von Werkzeugen und Anlagen

**Serienstand**

- finaler Datenstand für die Serienproduktion

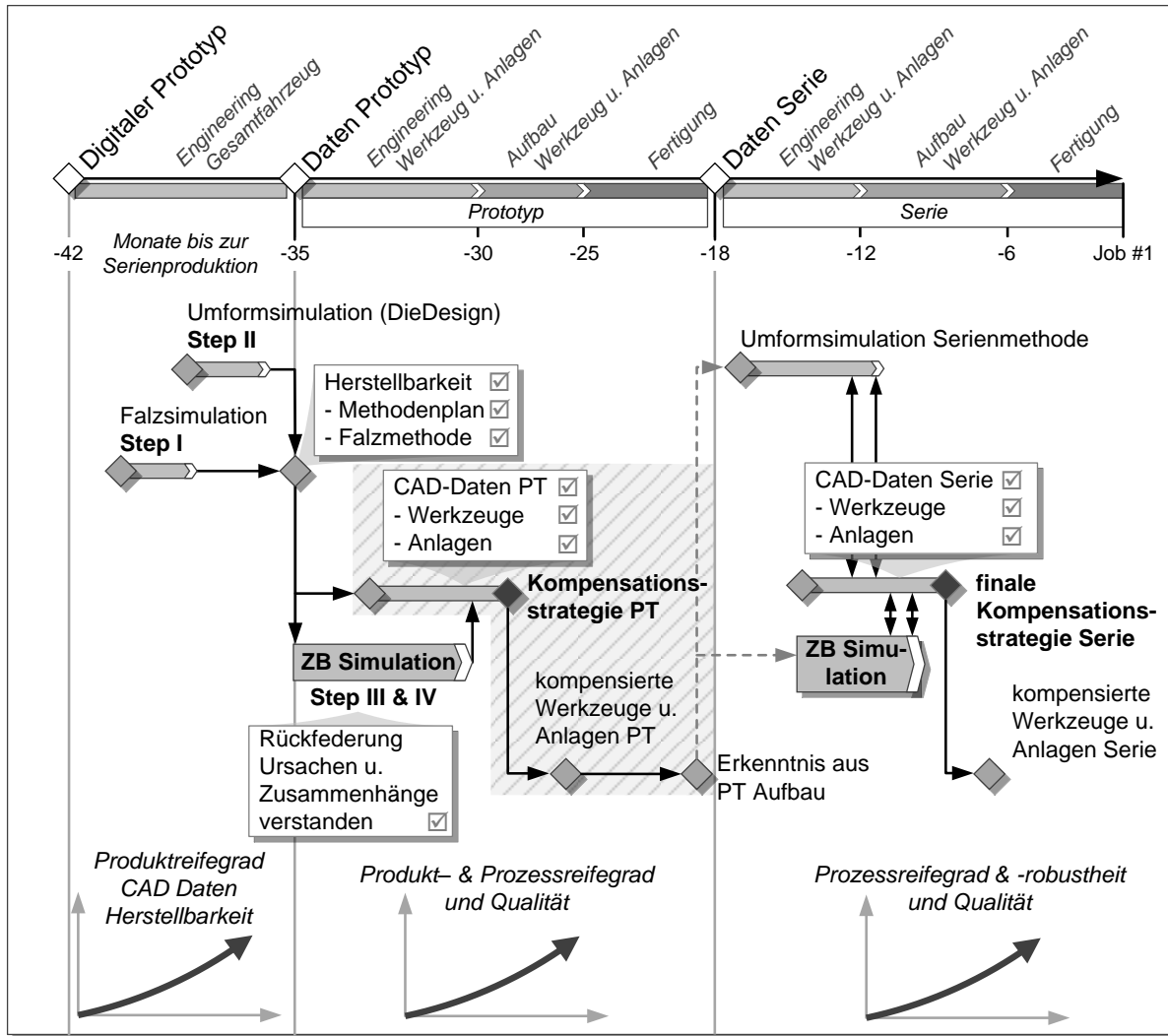
**Daten:** Reifegrad der Produktdaten entspricht nahezu dem Serienstand

**Folgeschritte:** Werkzeugdaten werden durch Serierendatenstand ersetzt, dieser wird eingepflegt

- Kompensationsmaßnahmen müssen final für den Serienstand festgelegt werden

Wie bereits dargestellt wurde, kann eine erste durchgängige Prozesssimulation nur auf Basis der Umformsimulation der Einzelteile erfolgen. Verlässliche Daten (Machbarkeit der Pressesteile abgesichert) stehen folglich erst ab dem Prototypendatenstand des Fahrzeuges zur Verfügung. Zu diesem Zeitpunkt kann jedoch noch nicht auf die CAD-Daten für die Rohbauanlagen zurückgegriffen werden. Sollen jedoch Erkenntnisse der durchgängigen Prozesssimulation in Form von Kompensationsmaßnahmen in die Konstruktion der Prototypenwerkzeuge einfließen, muss folglich eine schnelle Generierung prozessrelevanter Geometrien (insbesondere Auflage-, Ausricht- und Spannflächen) einer Rohbauanlage für die FE-Simulationsumgebung vorhanden sein. Da in der Rohbaukonstruktion im Wesentlichen auf Standardkomponenten zurückgegriffen wird, können diese anhand von Bibliotheken für die FE-Simulation zur Verfügung gestellt werden. Nur so kann ein einfacher Prozessaufbau durch die FE-Simulation erfolgen und die CAD-Rohbauanlagenkonstruktion im Anschluss daran davon abgeleitet werden. Dieses Vorgehen ist mit dem der Umformsimulation vergleichbar. Dabei werden die mit Hilfe des AutoForm-DieDesigners<sup>®plus</sup> im Rahmen der Machbarkeitsanalyse relativ schnell generierten Wirkflächen des Umformwerkzeuges für die spätere Fräsbearbeitung der Werkzeuge im CAD-System „nachkonstruiert“.

Ist schließlich die Möglichkeit einer durchgängigen Prozesssimulation auf Basis der Umformsimulation gegeben, kann diese schließlich dazu genutzt werden, Ursachen für Maßabweichungen am Zusammenbau zu untersuchen. Daraus können wiederum Kompensationsmaßnahmen für die einzelnen Pressesteile zur Verbesserung der Maßhaltigkeit des Zusammenbaus abgeleitet werden. In der Prototypenfertigung und auch beim folgenden Serienanlauf können dadurch der Produkt- und der Prozessreifegrad sowie die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus gesteigert werden. Abbildung 82 veranschaulicht die zeitliche Einordnung der durchgängigen Prozesssimulation innerhalb des derzeitigen Produktentstehungsprozesses. Das langfristige Ziel muss jedoch sein, durch eine verbesserte Simulationsgenauigkeit den Umfang und die Dauer der Prototypenphase deutlich zu reduzieren sowie den Serienanlauf zu beschleunigen. Neben der Prozesssimulation sind dazu aber auch Verbesserungen im Bereich der Produktsimulation (beispielsweise Crash- und Betriebsfestigkeitssimulationen) notwendig, um auch in diesen Bereichen auf aufwändige Prototypenfahrzeugversuche verzichten zu können.



**Abbildung 82:** Derzeitiger Einsatz der ZB-Simulation zur Kompensation von Rückfederungseffekten entlang des derzeitigen Produktentstehungsprozesses [Kae13c]

## 6 Validierung des Simulationsmodells

Der in Kapitel 4 beschriebene Produktionsprozess für die hier beispielhaft gewählte Motorhaube wurde anhand der Simulationsmethode nach Kapitel 5 aufgebaut und simuliert. Im folgenden Kapitel wird der Simulationsaufbau für den Zusammenbau der Motorhaube beschrieben und die Simulationsergebnisse den Messungen gegenübergestellt. Die Simulationsuntersuchungen beschränken sich dabei auf die Produktionsprozesse im Presswerk und Rohbau. Die beiden kleinen Stanzteile zur Dämpferbefestigung wurden unter der Annahme, dass diese einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Maßhaltigkeit der Motorhaube besitzen, für den folgenden Simulationsaufbau nicht berücksichtigt.

### 6.1 Simulationskette Zusammenbau der Motorhaube

Die Simulationskette zur Rückfederungsberechnung des Zusammenbaus setzt sich aus einer Vielzahl einzelner Simulationsschritte zusammen, welche in den Tabellen 6 bis 8 zusammengefasst sind. Das Ergebnis eines einzelnen Simulationsschrittes dient dabei immer als Input für den Folgeschritt. Bevor jedoch mit den einzelnen Simulationsschritten begonnen werden kann, müssen die FE-Netze für die einzelnen Pressteile generiert werden. Die unterschiedlichen Möglichkeiten, die in dieser Arbeit untersucht werden, sind zunächst in Abschnitt 6.2 aufbereitet. Im Anschluss daran werden die einzelnen Simulationsschritte, die sich im Wesentlichen an der Fügefolge und den Fügestationen der Serienproduktion orientieren, erläutert und anhand der Messergebnisse aus Abschnitt 4.4 validiert.

Berechnung Step	Beschreibung	Fügestation / Messvorrichtung	Zeitdiskretisierung	Kapitel
	<b>Aufbereiten der Einzelteildaten aus:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ CAD-Daten der Einzelteile</li> <li>▪ AutoForm Umformsimulation → Validierung mit Kapitel 4.4.1</li> <li>▪ aus Messungen mit GOM System</li> </ul>			6.2
1.1	<b>Einlegen</b> (inkl. Schwerkraft) des Innenteils vorne und der Schlossverstärkung	Fügevorrichtung ZB-Innenteil vorne  → Fahrzeuglage	implizit	Simulation 6.3 → Validierung mit Messungen aus Kapitel 4.4.2
1.2	<b>Sequentielles Schließen der Spanner</b>		explizit	
1.3	<b>Sequentielles Fügen</b> aller Fügepunkte des ZB-Innenteils vorne mit dem Fügeersatzmodell		explizit	
1.4	<b>Rückfederungsrechnung</b> für den nächsten Simulationsschritt	ungespannt ohne Schwerkraft	implizit	

**Tabelle 6:** Simulationsschritte bei der Zusammenbausimulation – Datenaufbereitung und Fügen des ZB-Innenteils vorne



Berechnung Step	Beschreibung	Fügestation / Messvorrichtung	Zeitdiskretisierung	Kapitel
2.1	<b>Einlegen u. Schachteln</b> des ZB-Innenteil vorne, Innenteil li. / re. und Innenteil hinten (inkl. Schwerkraft)	Fügevorrichtung ZB-Innenteil (viele Spannungspunkte)	implizit	Simulationsaufbau 6.3 → Validierung mit Messungen aus Kapitel 4.4.2
2.2	<b>Sequentielles Schließen der Spanner</b>	→ Überkopflage	explizit	
2.3	<b>Sequentielles Fügen</b> (Fügeersatzmodell) ausschließlich der Geo-Clinchpunkte		explizit	
2.4	<b>Rückfederungsrechnung</b> für nächsten Simulationsschritt	ungespannt ohne Schwerkraft	implizit	
3.1	<b>Einlegen</b> unter Schwerkraft des ZB-Innenteils	Fügevorrichtung ZB-Innenteil ausclinchen (wenig Spannungspunkte)	implizit	
3.2	<b>Sequentielles Schließen der Spanner</b>	→ Fahrzeuglage	explizit	
3.3	<b>Sequentielles Fügen</b> der restlichen Clinchpunkte (Fügeersatzmodell)		explizit	
3.4.1	<b>Rückfederung</b> nach Messvorrichtung gespannt (inkl. Schwerkraft) → Auswertung des ZB-Innenteils	Messvorrichtung → Fahrzeuglage gespannt inkl. Schwerkraft	implizit	
3.4.2	<b>Rückfederung</b> für nächsten Simulationsschritt	ungespannt ohne Schwerkraft	implizit	

**Tabelle 7:** Simulationsschritte bei der Zusammenbausimulation – Fügen des ZB-Innenteil in der Geo-Station und „ausclinchen“

Berechnung Step	Beschreibung	Fügestation / Messvorrichtung	Zeitdiskretisierung	Kapitel
4.1	<b>Einlegen u. Schachteln</b> der Beplankung und des ZB-Innenteils (inkl. Schwerkraft)	Falzbett → Überkopflage nach Falzmethode	implizit	Simulationsaufbau 6.4 Validierung mit Messungen aus Kapitel 4.4.3
4.2	<b>Spannen</b> von Beplankung u. Innenteil über Niederhalter im Falzbett		explizit	
4.3	<b>Falzen</b> mit elastischem ZB-Innenteil Falzbahn 1 Falzbahn 2 ...		explizit	
4.4	<b>Rückfederung</b> nach Messvorrichtung aufgelegt am Innenteil (inkl. Schwerkraft) → Auswertung des ZB-Motorhaube	Messvorrichtung ZB-Motorhaube → Fahrzeuglage	implizit	

**Tabelle 8:** Simulationsschritte bei der Zusammenbausimulation – Rollfalzen der ZB Motorhaube

## 6.2 Geometrievarianten der Einzelteile

Ausgangspunkt für eine Simulation des Zusammenbaus sind die Pressteile im rückgefederten Zustand. Wie bereits in Kapitel 4.5 dargestellt, können die Einzelteile einen sehr unterschiedlichen Einfluss auf die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus aufweisen. Wird folglich die Maßhaltigkeit eines Pressteils in der Umformsimulation nicht richtig prognostiziert, kann auch das Ergebnis der Zusammenbausimulation keine brauchbare Lösung liefern. Aufgrund dessen wurden bei der Generierung der Pressteilnetze, die eine wichtige Eingangsgröße für die Maßhaltigkeit der Einzelteile darstellen, mehrere Wege verfolgt. Insbesondere wurden aus den stl-Oberflächenbeschreibungen auf Basis der gescannten Prototypenpressteile FE-Netze erzeugt. Die Geometrie der Pressteile lässt sich als Eingangsgröße für die Zusammenbausimulation somit in drei unterschiedlichen Varianten darstellen:

- Die Geometrie der Einzelteile wird idealisiert aus den CAD-Daten modelliert.
- Die Geometrie der Einzelteile wird aus der Umformsimulationen entnommen.
- Die Geometrie der Einzelteile wird aus den in Kapitel 4 dargestellten Messungen der Einzelteile erstellt.

Im Folgenden werden diese drei Möglichkeiten, die sich bei der Geometriemodellierung der Pressteile ergeben, näher erläutert. Bei allen drei Varianten wurde, wie bereits in Kapitel 5 erläutert, auf Schalenelemente zurückgegriffen. Die Diskretisierung der Geometrie (Elementanzahl, Elementgröße u. Verfeinerungsbereiche) ist bei allen drei Varianten nahezu identisch.

### 6.2.1 Geometrie der Einzelteile auf Basis der CAD-Daten („CAD-Null“)

Bei dieser Variante werden die Einzelteile für die Zusammenbausimulation direkt auf Basis der CAD-Daten generiert. Die Geometrie der Einzelteile entspricht somit der Soll-Vorgabe. Mit dieser idealisierten Annahme kann keine Umformhistorie aus der vorangegangenen Einzelteilfertigung (beispielsweise Blechausdünnung, Verfestigung, Restspannungen) berücksichtigt werden. Prinzipiell lassen sich deshalb lediglich folgende Aspekte beleuchten:

- Einfluss der Schwerkraft auf den Zusammenbau.
- Einfluss des Falzprozesses auf die Maßhaltigkeit des Gesamtzusammenbaus.

### 6.2.2 Generierung der Einzelteilgeometrie aus der Umformsimulation

Die Verwendung der Einzelteilgeometrie aus der Umformsimulation ist jene Variante, bei der eine durchgängige digitale Abbildung des Produktionsprozesses gegeben ist. Die Daten für die Zusammenbausimulation können hierbei direkt aus der Umformsimulation abgeleitet werden.

Die Umformsimulation sämtlicher Einzelteile wurde in dem Programmsystem AutoForm durchgeführt. Entsprechend der Fertigung der Prototypenteile, wurden alle Operationsfolgen nach den verwendeten Fräsdaten simuliert. Die Simulation beinhaltet dabei auch einzelne Prozessschritte, wie beispielsweise das Einlegen der Platine oder des Ziehteils in Folgeoperationen

oder Rückfederungsschritte zwischen den einzelnen Umformoperationen. Die Simulationseinstellungen entsprechen den in vergangenen Jahren validierten Standardeinstellungen für Rückfederungsberechnungen von Pressteilen. Die wesentlichen Simulationsparameter nach den zur Verfügung stehenden Standards sind in Tabelle 9 dargestellt.

Parameter	Einstellung
Geometrie Diskretisierung	Dreieck Schalenelement mit linearer Ansatzfunktion und 11-Integrationspunkten über die Blechdicke
Vernetzung	Startelementkantenlänge 20 mm (Platine); max. zulässiger Sehnenfehler bei der Verfeinerung 0,22 mm; max. 5-fache Elementverfeinerung
Zeitintegration	Implizite Zeitintegration
Materialmodell	BBC 2000 [Ban04]
Werkzeugwirkflächen	idealisiert, starr aus Fräsdaten der Prototypen-Werkzeuge
Kontakt – Reibmodell	Coulombsche Reibung + Schubspannungsmodell
Sickenmodellierung	über LineForce als Ersatzmodell modelliert

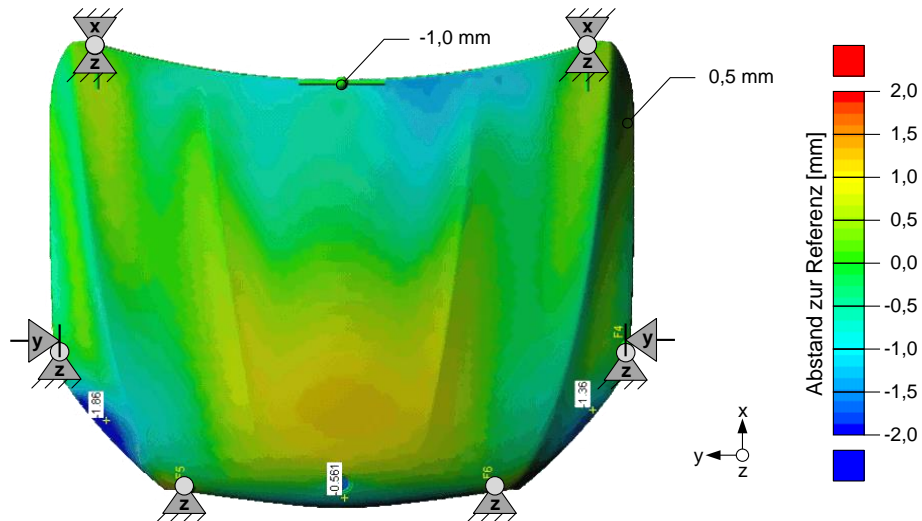
**Tabelle 9:** Übersicht der verwendeten Simulationsparameter für die AutoForm Umformsimulation

Nach der eigentlichen Umformsimulation der einzelnen Operationsstufen (Tiefziehen, Beschneiden, Abkanten und Nachformen) wurden jeweils zwei unterschiedliche Rückfederungsberechnungen durchgeführt. Diese Berechnungsschritte unterscheiden sich im Wesentlichen in der Pressteillagerung. In der ersten Variante wurden die Pressteile entsprechend der Messaufnahme in der Simulation gelagert und die Rückfederung unter dem Schwerkräfteinfluss berechnet. Die Simulationsergebnisse dieser Variante können den Messergebnissen aus Kapitel 4.4.1 direkt gegenübergestellt werden. In der zweiten Variante wurde die sogenannte „freie“ Rückfederung berechnet (vgl. Kapitel 5.4), dabei werden die Pressteile ohne Lagerrandbedingungen und ohne den Schwerkräfteinfluss rückgefedert. Die Pressteile nehmen dabei einen Geometriezustand der minimalen inneren Energie an. Die Ergebnisse der zweiten Rückfederungsberechnung stellen somit ausschließlich die Eingangsgrößen der Pressteilgeometrie für die Zusammenbausimulation dar.

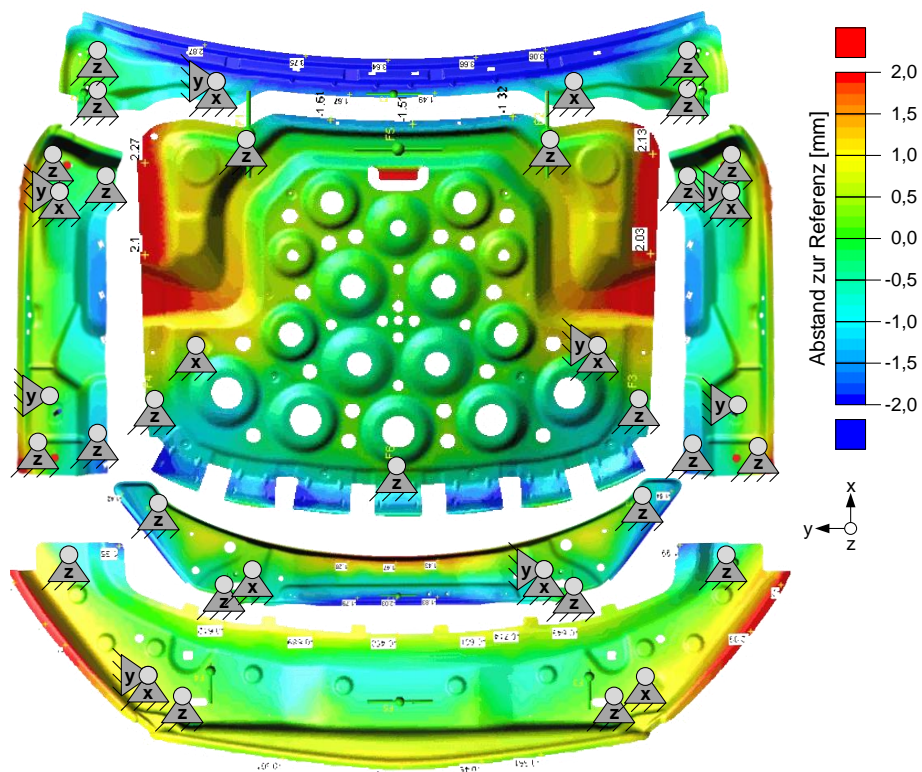
Die Rückfederungsergebnisse der ersten Variante (entsprechend der Messvorrichtung gespannter Lage) für die einzelnen Pressteile fassen die Abbildung 83 (für die Beplankung) und Abbildung 84 (für die Innenteile) zusammen. Die Falschfarbenbilder zeigen dabei immer den Abstand der Soll-Geometrie zum rückgefederten Simulationsergebnis.

Vergleicht man diese Simulationsergebnisse mit den Messungen aus Kapitel 4.4.1, so zeigt sich, dass für die Innenteile mit der Umformsimulation weitestgehend sehr gute Ergebnisse erzielt werden konnten. Einzig bei der Schlossverstärkung treten sehr große Unterschiede in Bezug auf das in Kapitel 4.4.1 vorgestellte Messergebnis auf. Die Abweichung zwischen der Messung der Schlossverstärkung und der Simulation lässt sich dadurch erklären, dass bei der

Prototypenfertigung das Fluid-Cell-Verfahren zum Einsatz gekommen ist, in der Simulation hingegen von einem normalen Tiefziehvorgang ausgegangen wurde. Die Messung aus Kapitel 4.5.2 des ZB-Innenteils vorne hat zwar gezeigt, dass die Schlossverstärkung nahezu keinen Einfluss auf die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus besitzt, dennoch wurde für die im Folgenden dargestellte Simulation des Zusammenbaus das aus der optischen Messung aufbereitete FE-Netz verwendet.



**Abbildung 83:** Rückfederungsergebnis der AutoForm Umformsimulation für die Beplankung; die Pressteillagerung erfolgte entsprechend der Messvorrichtung nach Kapitel 4.3.1 („reduziertes Spannkonzep“ mit sechs z-Spannpunkten)



**Abbildung 84:** Rückfederungsergebnis der AutoForm Umformsimulation für die Innenteile; die Pressteillagerung erfolgte entsprechend der Messvorrichtung nach Kapitel 4.3.1

Das Simulationsergebnis der Beplankung hingegen deckt sich nicht mit der Messung. Insbesondere im Bereich des Windschutzes zeigen sich im Vergleich zur Messung größere Differenzen. Wird von der Simulation in Haubenmitte ein Einfallen um 1 mm prognostiziert, zeigt das Falschfarbenbild der Messung eine Abweichung von 12 mm. Diese großen Unterschiede lassen sich hauptsächlich dadurch erklären, dass in diesem Bereich mit einem schälenden Backenangriff abgekantet wird und kleine Änderungen an der Backengeometrie erhebliche Auswirkungen auf das Rückfederungsergebnis haben können. Diese kleinen Änderungen führen zu einem veränderten Spannungszustand im abgekanteten Falzflansch, welcher sich wiederum relativ stark auf die labile Beplankung auswirkt.

Für die folgenden Simulationsschritte wurden die „frei“ rückgefederten Simulationsnetze der AutoForm Simulation nach den in Abschnitt 5.4 beschriebenen Kriterien aufbereitet. Die wesentlichen Schritte bildeten dabei die Neuvernetzung für die Folgesimulationen sowie das Daten-Mapping. Als Ergebnisgrößen wurden ausschließlich die plastische Dehnung sowie die Blechausdünnung auf das neu erzeugte Netz übertragen.

### 6.2.3 Generierung der Einzelteilgeometrie aus den optischen Oberflächenscans der Prototypenteile

Die dritte Möglichkeit zur Generierung von Berechnungsnetzen der Einzelteile für die Zusammenbausimulation bildet die Aufbereitung der Messergebnisse der optisch vermessenen Realbauteile. Die Geometrie der Pressteile in Form einer Punktwolke lässt sich über die GOM Software als Dreiecksfacettenkörper über die stl-Schnittstelle exportieren [Gal05]. Dieses stl-Netz beinhaltet in der Regel jedoch sehr viele Netzfehler und muss, bevor es für die Neuvernetzung eines FE-Netzes verwendet werden kann, regularisiert und geglättet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass ausschließlich lokale Spitzen geglättet werden und die Rückfederung nicht durch die Datenaufbereitung verfälscht wird. Für die Aufbereitung der stl-Netze wurde zunächst auf die Software GOM-Inspect und anschließend für die Neuvernetzung auf den Pre-Processor ANSA zurückgegriffen. Der Aufwand für diese Datenaufbereitung ist dabei sehr zeitintensiv und mit einer umfassenden Nachbearbeitung verbunden, da voll automatisierte Lösungen derzeit nicht zur Verfügung stehen. Abbildung 85 zeigt einen Ausschnitt einer stl-Vernetzung und eine aufbereitete FE-Neuvernetzung.

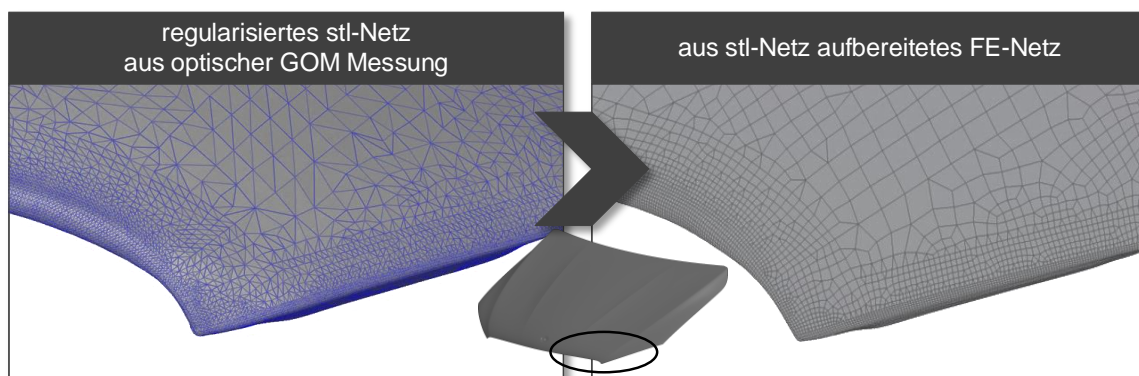
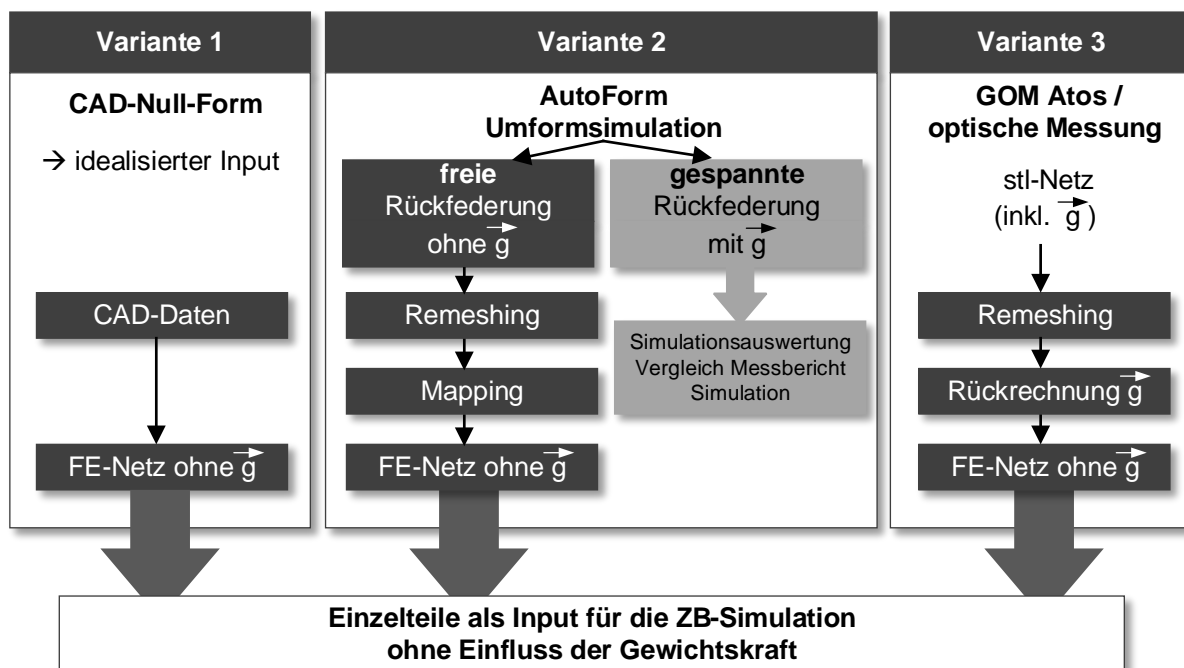


Abbildung 85: Datenaufbereitung von stl-Netzen (li.) zu FE-Netzen (re.)

Die so generierten FE-Netze können jedoch nicht direkt als Input für die Simulation des Zusammenbaus verwendet werden, da die optisch erfassten Daten den Zustand der Pressteile unter dem Einfluss der Schwerkraft und in der Messvorrichtung gelagert darstellen. Würden diese Netze im ersten Simulationsschritt, dem Einlegen der Einzelteile in die Fügevorrichtung unter Schwerkrafteinfluss, verwendet werden, so wäre das Eigengewicht der Einzelteile in doppelter Weise in der Simulation berücksichtigt. Aus diesem Grund wurden sämtliche aus stl-Daten erzeugte FE-Netze in einer ersten Simulation mit einer fiktiv invertierten Schwerkraft beaufschlagt, um so den Einfluss der Schwerkraft „herauszurechnen“. Die Lagerbedingungen bei diesem Simulationsschritt entsprechen dabei jenen der Messvorrichtung.

Abbildung 86 stellt das Vorgehen der drei beschriebenen Varianten bei der Einzelteil-Netzgenerierung für die Zusammenbausimulation dar. Die Vereinfachungen, die mit jeder Variante verbunden sind, werden in Tabelle 10 zusammengefasst.

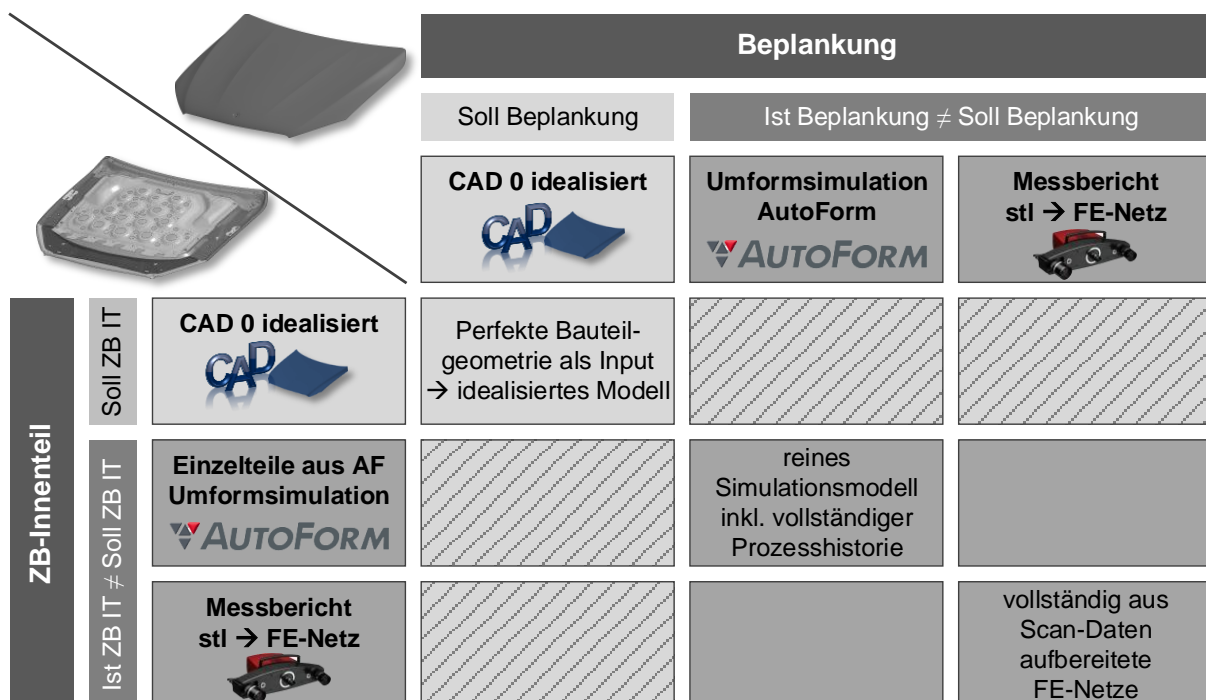


**Abbildung 86:** Vorgehensweise bei der FE-Netzgenerierung der Einzelteile für die drei untersuchten Varianten: Variante 1 – Vernetzung aus den CAD-Daten; Variante 2 – Vernetzung aus der AutoForm Umformsimulation; Variante 3 – Vernetzung aus dem optisch erfassten Flächenscan

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
	CAD-Null-Daten	AutoForm Umformsimulation	GOM Atos optische Messung
Maßabweichung der Einzelteile	nicht berücksichtigt	aus Simulation berücksichtigt	real gemessene Einzelteile
Umformhistorie	nicht vorhanden	- plastische Dehnung - Ausdünnung	nicht vorhanden
Datenaufbereitungsaufwand	gering	hoch	sehr hoch
wesentlicher Vorteil	schneller, parametrisierbarer FE-Netzaufbau auf CAD-Daten möglich	durchgängige Simulationsvariante	Einfluss der Maßhaltigkeit der Einzelteile wird sehr gut erfasst
wesentlicher Nachteil	Maßabweichungen am ZB zeigen nur den Einfluss des Fertigungsprozesses	Qualität der Einzelteilsimulation maßgeblich für Folgesimulationen (Fehlerverschleppung)	eine rein digitale Absicherung ist nicht möglich

**Tabelle 10:** Vergleich der Geometrievarianten der Pressteile (FE-Netze) als Eingangsgröße für die Zusammenbausimulation

Aus den drei Varianten lassen sich unterschiedliche Geometrievarianten für die Simulation generieren, insbesondere für die Falzsimulation ergeben sich die in Abbildung 87 dargestellten Kombinationen. Mit den einzelnen Varianten können das Zusammenwirken von Beplankung und ZB-Innenteil und die Auswirkungen auf die Maßhaltigkeit analysiert werden, woraus sich im Hinblick auf Rückfederungskompensationen Maßnahmen ableiten lassen.



**Abbildung 87:** Kombinationsvarianten bei der Falzsimulation von ZB-Innenteil und Beplankung

Die Parameter für Elementkantenlänge und Netzausrichtung wurden bei allen drei Varianten identisch gewählt. Für die Vernetzung der Einzelteile wurden die in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Einstellungen verwendet. Bei sämtlichen Pressteilen kam in der späteren Simulation in LS-Dyna das vollintegrierte Schalenelement vom Elementtyp 16 zum Einsatz. In Blechdickenrichtung wurde eine Integrationspunktanzahl von sieben gewählt. Diese Simulationseinstellungen entsprechen weitestgehend denen einer Umformsimulation, wie sie beispielsweise in Arbeiten von [Fle09] u. [Gös10a] verwendet werden.

Bei der Materialmodellierung wird auf Materialkarten zurückgegriffen, welche in Umformsimulationen bereits validiert wurden. Für die beiden verwendeten Aluminiumwerkstoffe und die verwendeten Schalenelementformulierungen stehen Materialkarten mit der Fließortbeschreibung nach Yld2000 [Bar03] u. [Yoo03] (\*mat133 in LS-Dyna) zur Verfügung. Für das anisotrope Materialverhalten liefert diese Materialbeschreibung eine sehr gute Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Fließbeginn von Aluminiumwerkstoffen. Die Fließkurvenapproximation erfolgt bei den beiden verwendeten Materialkarten nach dem Ansatz von Hockett-Sherby bzw. Gosh. Die kinematische Verfestigung, d. h. das Verfestigungsverhalten nach Lastumkehr, wird über das im Materialmodell Yld2000 implementierte Chaboche-Rousselier-Modell beschrieben. Die verwendeten Parameter für die Einzelteile fasst Tabelle 11 zusammen.

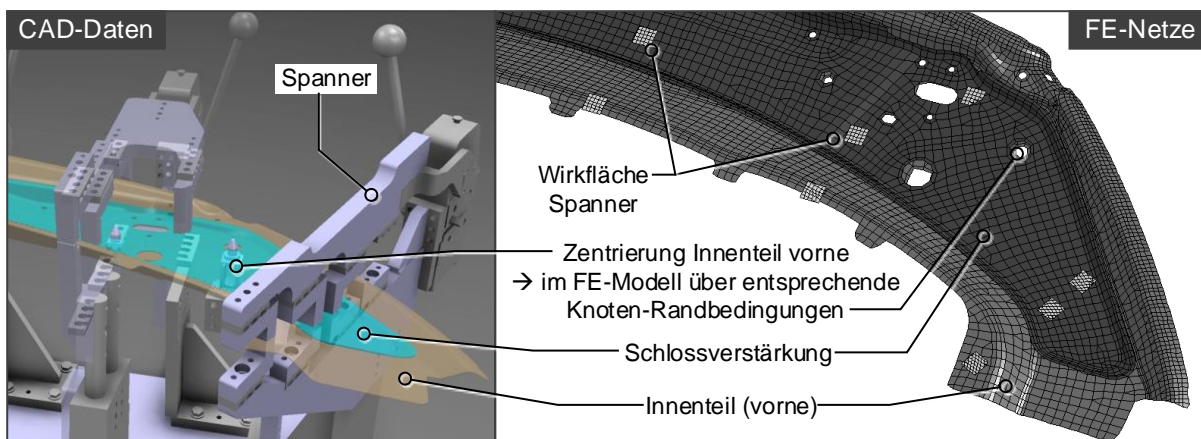
	Elementtyp	Integrationspunkte über die Blechdicke	Elementanzahl	Materialmodell in LS-Dyna	Fließkurvenextrapolation	isotrop-kinematische Verfestigung
<b>Beplankung</b>	16	7	396.626	YLD 2000	Hockett-Sherby	Chaboche-Rousselier
<b>Innenteile</b>	16	7	IT vorne 8.859 IT hinten 7.275 IT Mitte 15.870 IT li. / re. 36.235 IT Verst. 3.650	YLD 2000	Gosh	Chaboche-Rousselier
			$\Sigma$ 468.515			

**Tabelle 11:** Verwendete Parameter bei der Diskretisierung der Geometrie und die Materialbeschreibung der Pressteile für die Zusammenbausimulation



### 6.3 Füg simulation des ZB-Innenteils

Wie in Kapitel 4 beschrieben, wurde entsprechend dem realen Prozess zunächst der Fügeprozess des ZB-Innenteils berechnet. Die Fügefolge entspricht dabei der in Kapitel 4 dargestellten. Die Modellierung der Prozessfolge und der Fügeverbindung erfolgte nach der Vorgehensweise, welche in Kapitel 5.5 beschrieben ist. Für diese Arbeit konnte auf eine bereits vorhandene Anlagenkonstruktion zurückgegriffen werden. Die Wirkflächen der Rohbauanlagen wurden aus den CAD-Daten abgeleitet und als Starrkörper in der Simulation modelliert. Nach dem Einlegen der Einzelteile unter dem Einfluss der Schwerkraft wurden in der Simulation, entsprechend den Realversuchen, die Spanner sequentiell weggesteuert geschlossen. Für den gesamten Zusammenbau des Innenteils entstehen damit insgesamt 112 der Bauteilkontur angepasste Spannflächen. Im Anschluss daran wurden, ebenfalls entsprechend der Fügesequenz, die Pressteile im Bereich der Fügeverbindung zueinander in Kontakt gebracht und über das generierte Ersatzmodell (aus Kapitel 5.5.3) miteinander verbunden. Sämtliche 76 Clinchpunkte des Zusammenbaus wurden gemäß dem Realversuch auf die jeweiligen Fügestationen verteilt. In der ersten, voll gespannten Konfiguration wurde somit zunächst das Fügen der sogenannten Geo-Fügepunkte und anschließend in einer reduzierten Spannkongfiguration das Fügen der restlichen Clinchpunkte simuliert. Den größten Aufwand bei der Füg simulation des Innenteils bilden die Datengenerierung der Fügevorrichtung sowie die Umsetzung der Fügeprozesssequenz. Mit Hilfe einzelner Makros im PreProcessing konnte diese Sequenz jedoch mit vergleichsweise geringem Aufwand aus den CAD-Daten generiert werden. Einen Ausschnitt der für die Simulation aufbereiteten Daten zeigt Abbildung 88 für das ZB-Innenteil vorne.

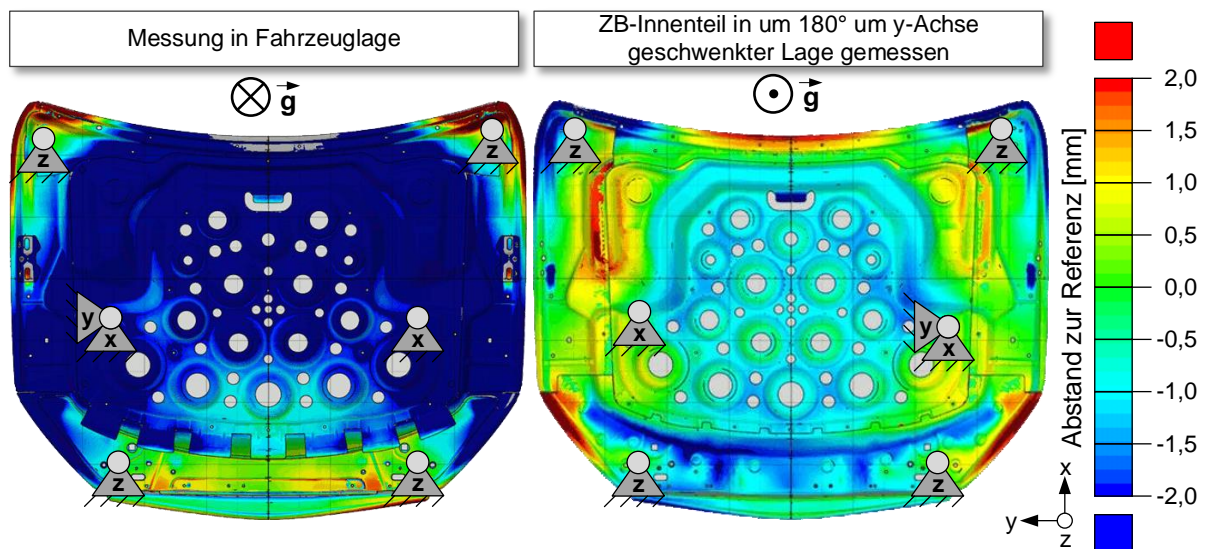


**Abbildung 88:** Aufbereitung der CAD-Daten insbesondere der Spannflächen (li.) für die FE-Simulation (re.)

Den Abschluss der Füg berechnung stellte die Rückfederungsberechnung des ZB-Innenteils dar. Die Rückfederung wurde dabei für zwei unterschiedliche Varianten berechnet. In der ersten Variante wurde die Schwerkraft vernachlässigt und der Zusammenbau mit keinerlei Randbedingungen beaufschlagt. Dies entspricht der „freien“ Rückfederung und dient ausschließlich der Übergabe an den folgenden Falzsimulationsschritt. In der zweiten Variante wurde der Zusammenbau entsprechend den Lager- und Aufnahmepunkten der Messvorrichtung gelagert. In

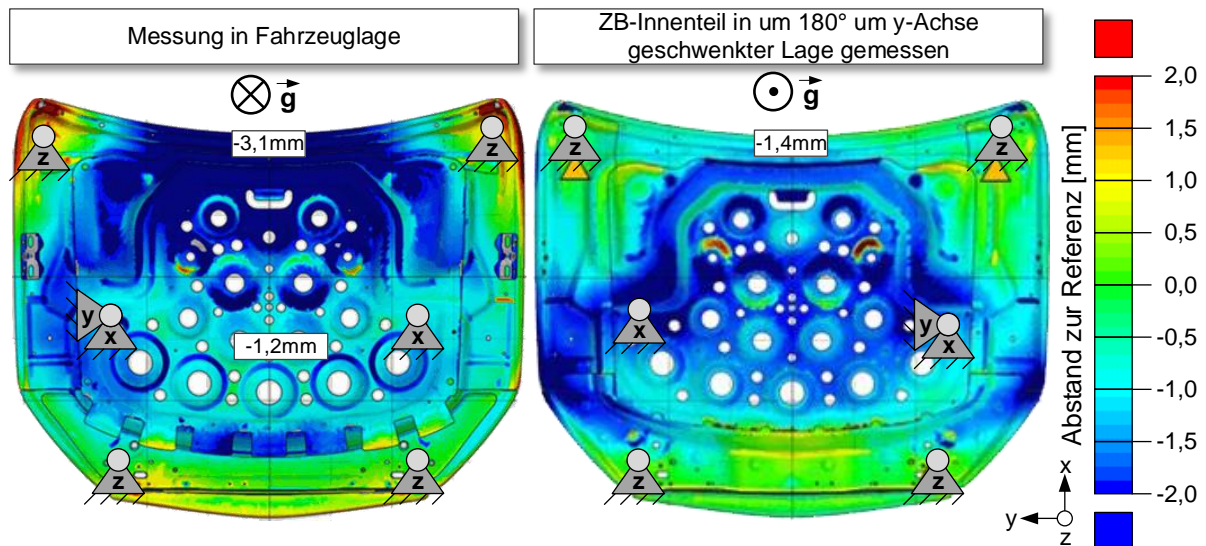
der Simulation erfolgt dies durch Randbedingungen an Knoten der FE-Netze im Bereich der Messaufnahme. Die Lagerung erfolgt dabei im Fahrzeugkoordinatensystem über die in Abschnitt 4.3.2 erläuterten Aufnahmepunkte der Messvorrichtung. Die Schwerkraft wirkt dabei in negativer z-Koordinatenrichtung. Sondermessungen, in denen der Zusammenbau in „Überkopflage“ (d. h. um  $180^\circ$  um die y-Achse geschwenkter Lage) gemessen wurde, lassen sich in der Simulation sehr einfach durch Invertierung des Richtungsvektors der Schwerkraft realisieren. Die Berechnungsnetze des Zusammenbaus wurden nach der Rückfederungssimulation in GOM-Inspect eingelesen und in derselben Weise ausgewertet, wie die optisch erfassten Messdaten. Die dargestellten Falschfarbenbilder (vgl. Abbildung 89) zeigen auch bei dieser Auswertung den Abstand zwischen der Soll-Geometrie und den Simulationsergebnissen.

Zunächst wird hier das Rückfederungsergebnis für den Zusammenbau des Innenteils aus den FE-Netzen der Umformsimulation dargestellt. Wie schon bei den Einzelteilsimulationen zeigt sich auch im Zusammenbau, dass im Bereich des Windschutzes (Innenteil hinten) die größten Abweichungen zum Soll-Datensatz vorhanden sind (4,2 mm, vgl. Abbildung 89). In Haubenmitte zeigt der Vergleich zwischen den beiden Falschfarbenbildern mit entgegengesetztem Schwerkräfteinfluss, dass insbesondere in diesem Bereich ca. 1,5 mm der Abweichung aus dem Einfluss der Schwerkraft resultieren. Die größten Abweichungen zur Messung aus Abschnitt 4.4.2 ergibt sich bei dieser Variante im Bereich Leuchten-Kotflügel. An diesen Stellen weicht das Simulationsergebnis um bis zu 1,3 mm von der Messung ab.



**Abbildung 89:** ZB-Innenteil aus AutoForm Umformsimulation zum Zusammenbau gefügt; Lagerung in Fahrzeuglage (li.); mit invertierter Schwerkräftrichtung (re.)

In der zweiten Variante wurden die aufbereiteten stl-Netzte zur Füg simulation des ZB-Innenteils verwendet. Den Vergleich zwischen Soll-Geometrie und Simulationsergebnis zeigen die Falschfarbenbilder in Abbildung 90 für beide der betrachteten Schwerkräftrichtungen. Vergleicht man die Falschfarbenbilder der optischen Messung mit der Simulation, so ergibt sich in diesem Fall eine sehr gute Übereinstimmung.

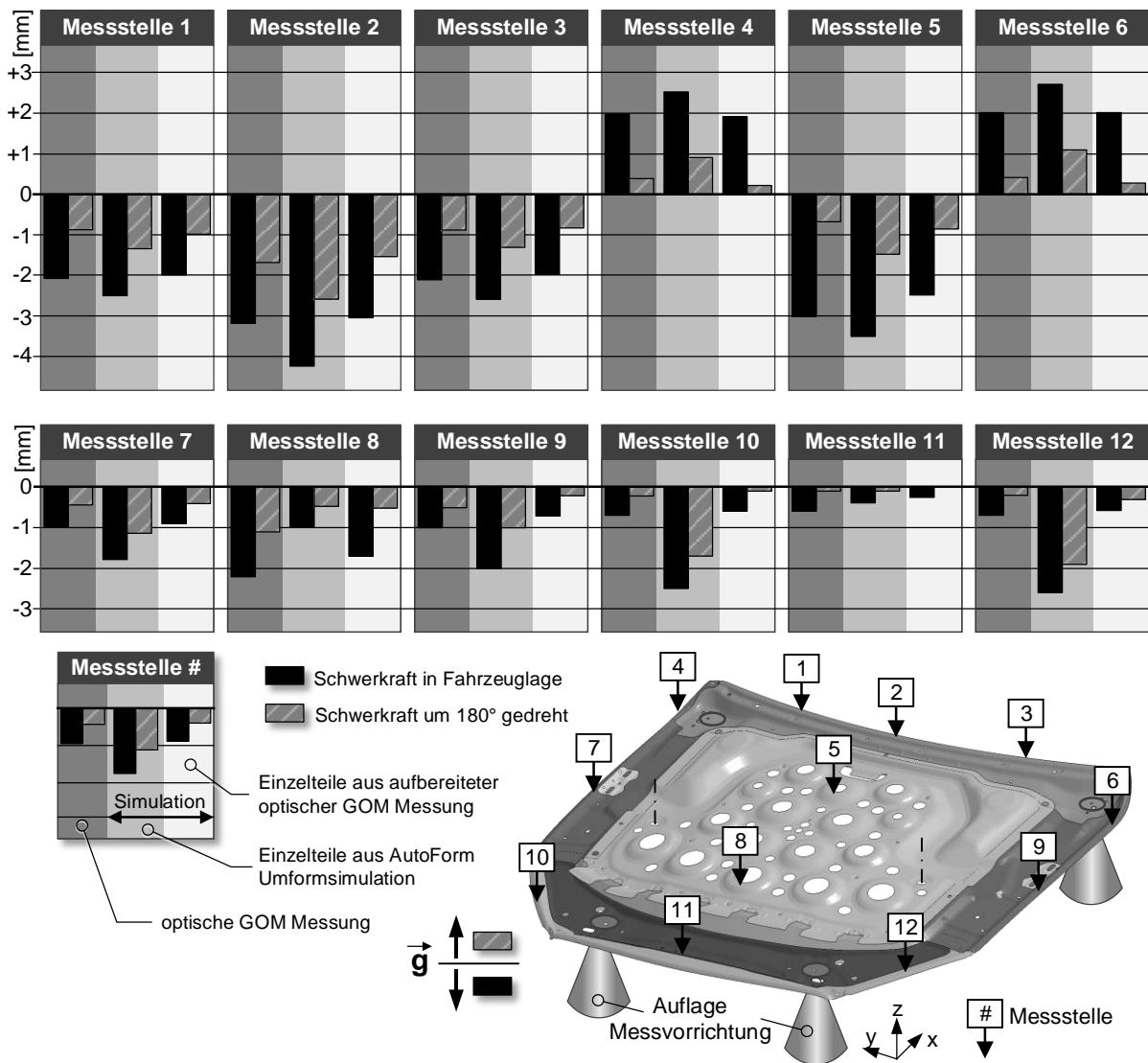


**Abbildung 90:** ZB-Innenteil aus aufbereiteten optischen GOM Messungen zum Zusammenbau gefertigt; Lagerung in Fahrzeuglage (li.); mit invertierter Schwerkrafttrichtung (re.)

Da bei diesen Ergebnissen keine Umformhistorie berücksichtigt wird, liegt die Vermutung nahe, dass diese auf das Simulationsergebnis nur einen vergleichsweise geringen Einfluss haben. Betrachtet man die Spannungen in den Bauteilen, so hat sich gezeigt, dass trotz der betragsmäßigen Abweichungen der Einzelteile von bis zu 3,5 mm beim Spannen keine plastischen Deformationen aufgetreten sind. In diesem Fall hätte die Berechnung mit einem rein elastischen Materialverhalten ein vergleichbares Ergebnis geliefert.

Eine Zusammenfassung der beiden Simulationsergebnisse im Vergleich zur Messung illustriert Abbildung 91 anhand von zwölf ausgewerteten Messpunkten. Die Messpunkte konzentrieren sich dabei auf den Umriss des Zusammenbaus im Falzflanschbereich (Auflage Beplankung). Diese Bereiche sind am Fahrzeug insbesondere für den Übergang zu den angrenzenden Bauteilen, wie beispielsweise Kotflügel und Frontmodul, von besonderer Bedeutung.

Die Zusammenfassung verdeutlicht, dass insbesondere die Simulation aus den stl-Daten eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Messpunkten der Prototypenteile liefert. Aufgrund der Auswertungen mit invertiertem Schwerkrafteinfluss wird deutlich, dass dieser in der Simulation sehr gut erfasst wird. Die Vereinfachung der Clinchpunkte über ein Hex-8 Solid-Ersatzmodell als ein einfaches Kontaktmodell hat sich in diesem Fall als ausreichend erwiesen.



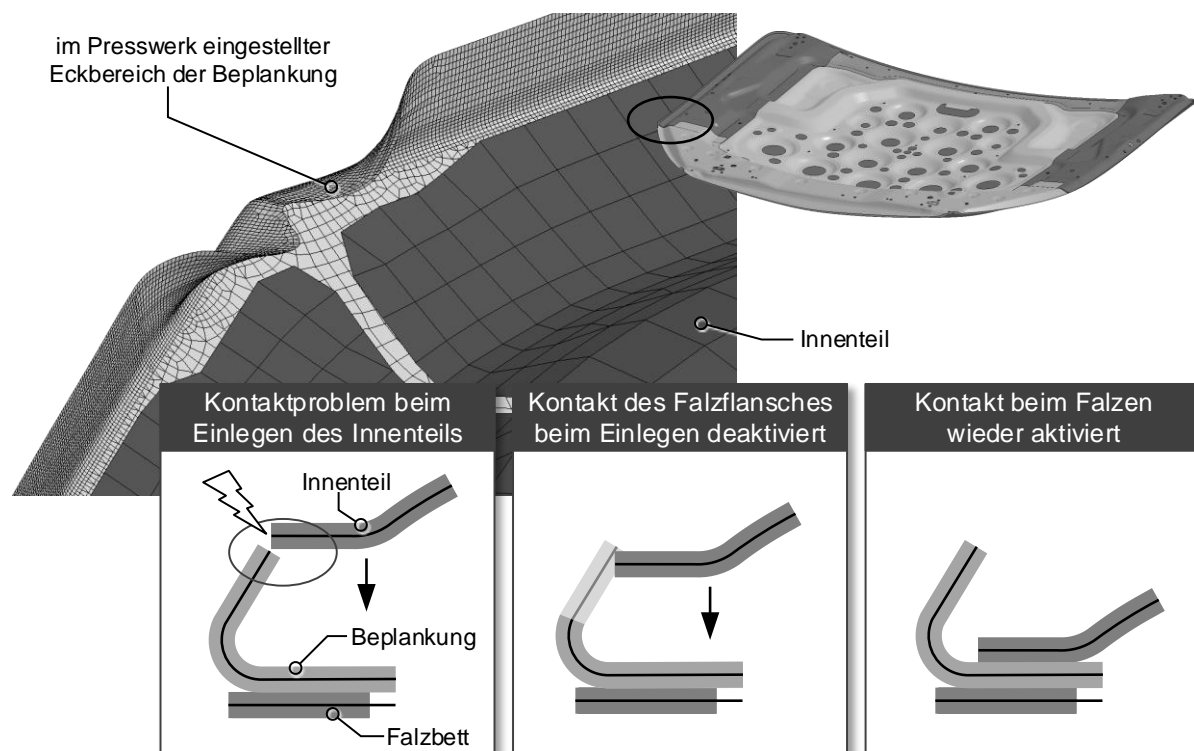
**Abbildung 91:** Übersicht einzelner Messstellen für den Vergleich zwischen Simulation des ZB-Innenteils und der Messung der ZB-Innenteil Prototypenfertigung

Abweichungen aus dem Vergleich zwischen optischer GOM Messung und dem Zusammenbau aus Einzelteilen aus der AutoForm Umformsimulation lassen sich mit den bereits erläuterten Abweichungen aus der Umformsimulation begründen. In einer frühen Phase der Produktentwicklung und Prozessdefinition könnten dennoch auf Basis dieser Ergebnisse Maßnahmen abgeleitet werden. So ist beispielsweise aus beiden Simulationen ersichtlich, dass insbesondere im Bereich des Windschutzes (Messstellen 1-3) mit größeren Abweichungen zu rechnen ist und die Konstruktion des Zusammenbaus vor allem unter dem Einfluss der Schwerkraft stärker verformt wird.

## 6.4 Falzsimulation der ZB-Motorhaube

Den ersten Simulationsschritt bei der Falzsimulation stellt das Einlegen der Beplankung ins Falzbett dar. Das Falzbett wird als idealisiert starr betrachtet und in der Simulation ausschließlich über die mit der Beplankung in Kontakt tretende Wirkfläche beschrieben.

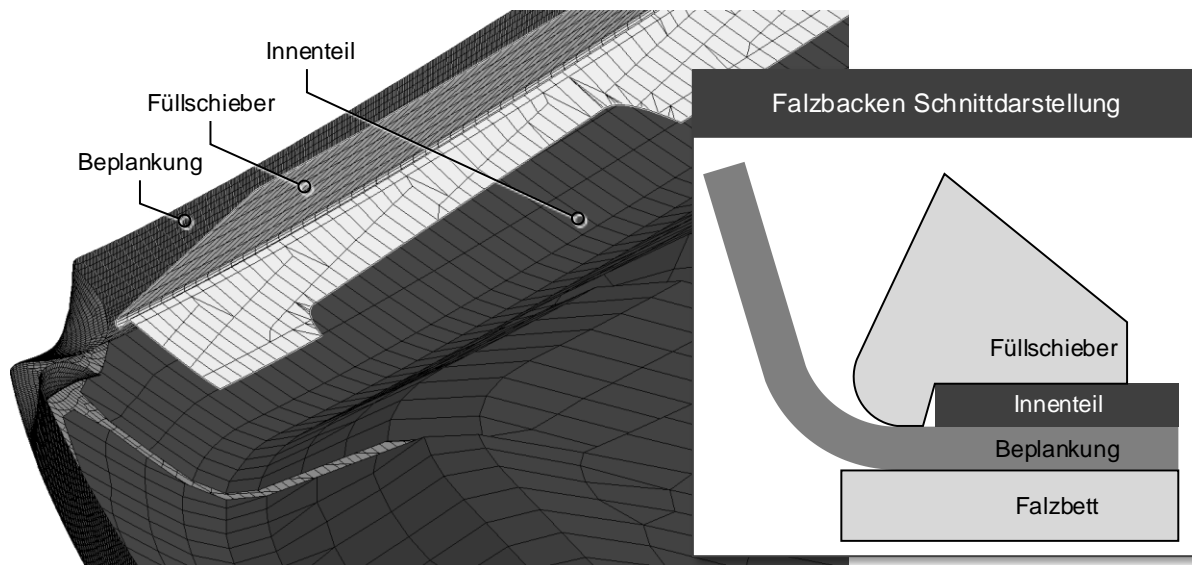
Im zweiten Berechnungsschritt wird das Innenteil auf der Innenseite der Beplankung positioniert. Beim Einlegen des Innenteils kann es bei der numerischen Simulation vereinzelt an den Schalenelementkanten (im Falzflanschbereich) zu Kontaktproblemen kommen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn beispielsweise in Eckbereichen in den Folgeoperationen im Presswerk der Falzflansch lokal nachgeformt wird (vgl. Abbildung 92 mit lokalem Hinterschnitt beim Einlegen des Innenteils). In der Produktion wird diese Problematik meist über eine Schwenk- und Drehbewegung des Roboters, der das Innenteil positioniert, gelöst. In der Simulation hingegen kann beim Einlegen des Innenteils der Kontakt zwischen Innenteil und Beplankung vollständig erfasst oder über die Prüfung der Kontaktnormalen deaktiviert werden. Diese Vorgehensweise hat sich für die Simulationsuntersuchung als praktikabel erwiesen.



**Abbildung 92:** Kontakmodifikation beim Einlegen des ZB-Innenteils in die Beplankung vor dem Falzen

Sobald Beplankung und ZB-Innenteil unter dem Einfluss der Schwerkraft auf dem Falzbett liegen, werden diese mit Hilfe der Glockenspanntechnik auf das Falzbett aufgedrückt. Die Glockenspanntechnik wird dabei in der Simulation ausschließlich über die mit dem ZB-Innenteil in Kontakt tretenden Wirkflächen beschrieben (vgl. Spanner beim Fügen des ZB-Innenteils). Die Bewegung der Wirkflächen erfolgt weggesteuert, wie dies auch in der Produktion der Fall ist.

Anschließend folgt die eigentliche Falzsimulation des Zusammenbaus. Die Falzbahnen für die LS-Dyna Simulation wurden dabei direkt aus der bereits erstellten Falzmethode abgeleitet. Die Rollfalzbahnen der AutoForm Falzsimulation wurden dabei ins LS-Dyna Format transferiert und für die Simulation des Zusammenbaus verwendet. Entgegen der AutoForm Simulation (starres Innenteil) kann an dieser Stelle nicht auf den Füllschieber im Bereich der Falzflansche am Übergang zum Kotflügel verzichtet werden (vgl. Abbildung 93). Die Deformationen der Beplankung wären durch die Elastizität des ZB-Innenteiles, wie dies auch in der Realität der Fall ist, bei der ersten Vorfalzbahn zu groß. In der Simulation wurde der Füllschieber wie auch das Falzbett, die Spanntechnik und die jeweiligen Falzrollen als idealisiert starr angenommen.



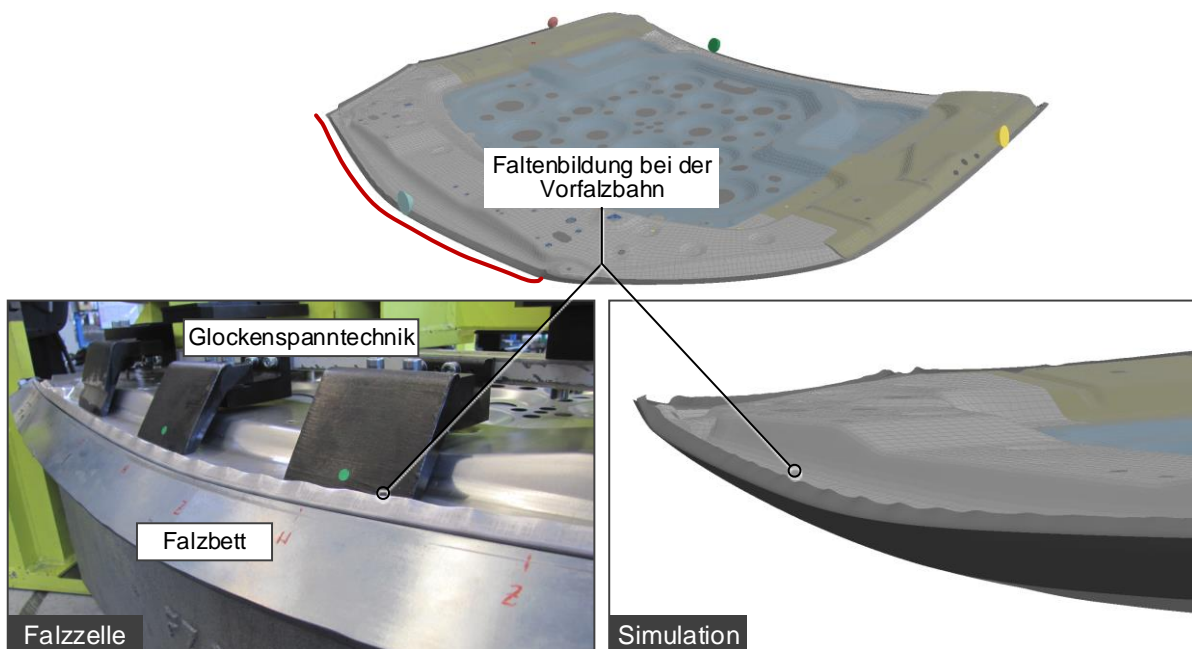
**Abbildung 93:** Darstellung des Füllschiebers in der Simulation bei der ersten Vorfalzbahn im Kotflügelbereich

Die Kontakte zwischen den einzelnen Bauteilen in der Simulation unterscheiden sich folglich nur in den beiden Paarungen starr - deformabel und deformabel – deformabel.

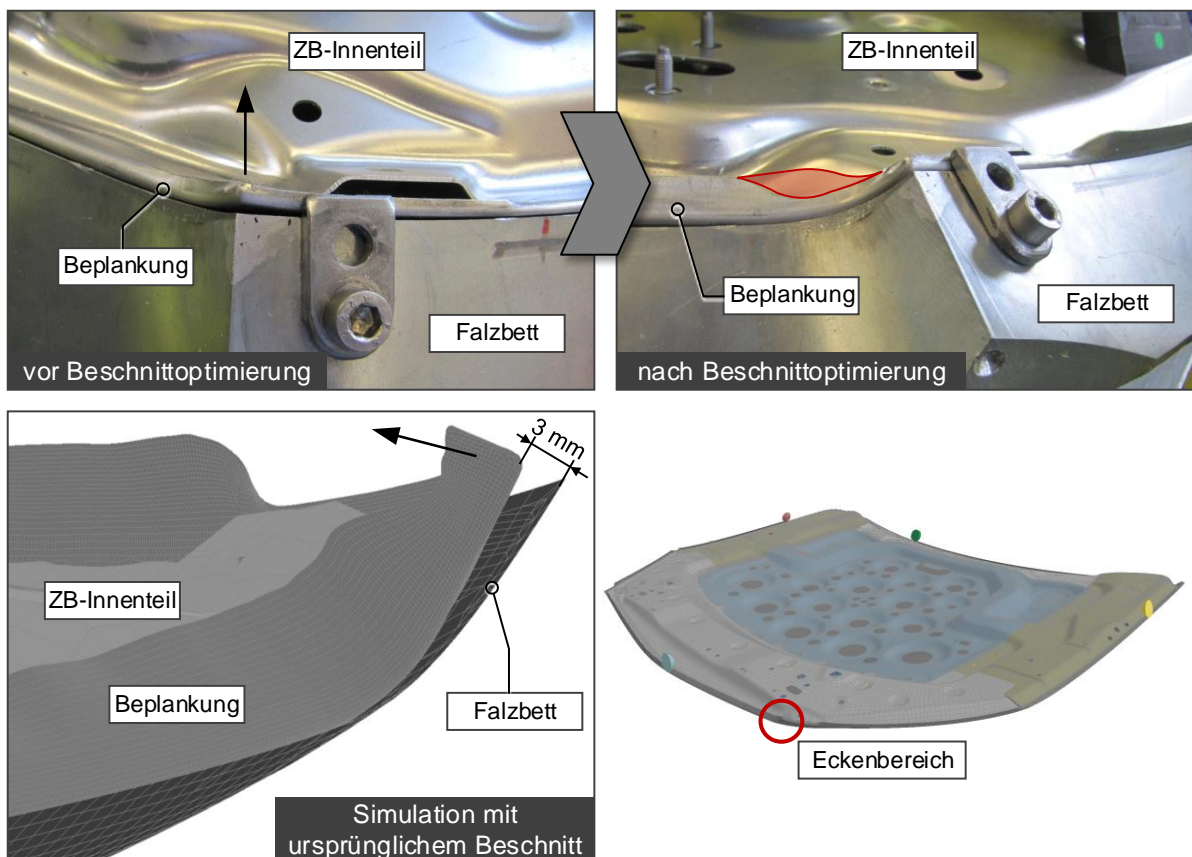
Die größte Herausforderung besteht bei der Falzsimulation darin, Kontaktsteifigkeiten, Zeitschrittweiten und Werkzeuggeschwindigkeiten derartig fein abzustimmen, dass keine dynamischen Effekte erzeugt werden und die Simulationszeiten trotz der Modellgröße in einem vertretbaren Rahmen bleiben. Für den gesamten Falzprozess, inkl. Einlegen der Einzelteile, Spannen, Falzen der einzelnen Bahnen und der Rückfederungsberechnung, ergeben sich trotz der Verwendung von MPP-Gleichungslösern (Massively Parallel Processing) auf einem Rechencluster mit 128 CPUs Rechenzeiten von bis zu 50 Stunden für den hierbeschriebenen Falzvorgang.

Neben der Rückfederung des Zusammenbaus (Maßhaltigkeitsbetrachtung) lassen sich in der Falzsimulation weitere Auswertungen vornehmen. Zusätzlich zur Faltenbildung, den Flanschlängen und dem Falzverlust können auch lokale Verformungen in Eckbereichen relativ genau ausgewertet werden.

Abbildung 94 zeigt beispielsweise die Faltenbildung während der Vorfalzbahn im Bereich des Frontmoduls. In der Simulation konnte im selben Bereich ein nahezu identisches Faltenbild berechnet werden, wie es in der Prototypenproduktion beobachtet wurde.



**Abbildung 94:** Faltenbildung beim Falzen der Vorfalzbahn, Gegenüberstellung Produktion (li.) – Simulation (re.)



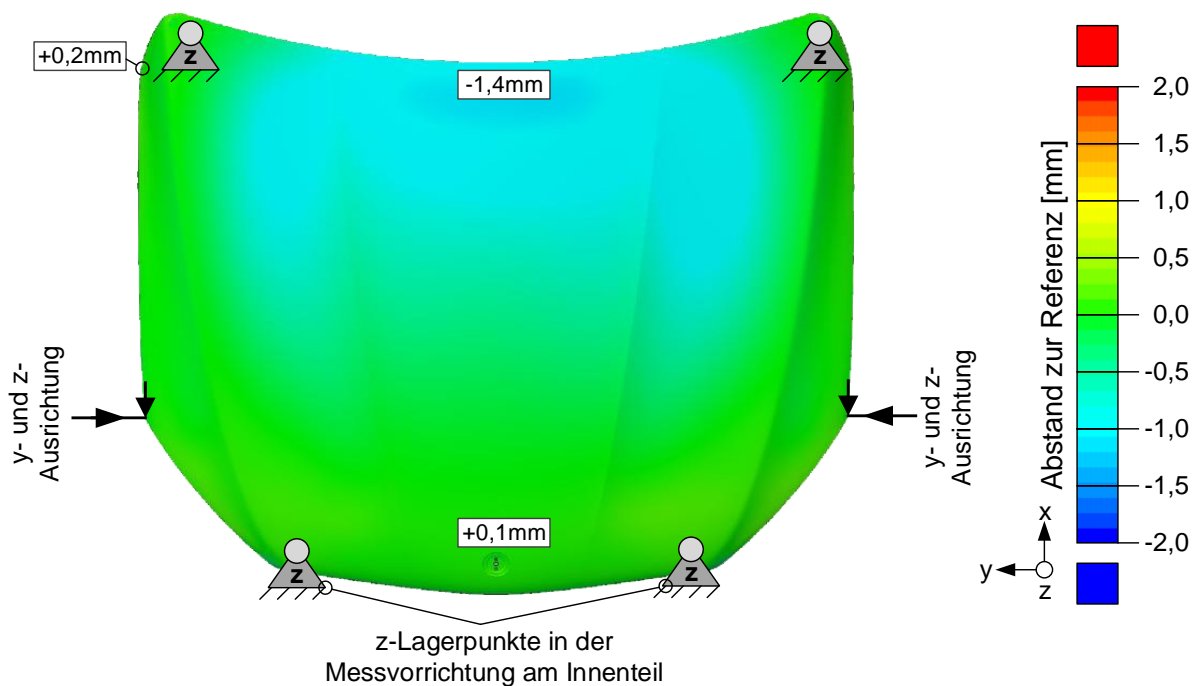
**Abbildung 95:** Falzflanschbeschnitt-Anpassung im Eckenbereich: Gegenüberstellung der Situation in der Produktion (oben) und in der Simulation (unten)

Des Weiteren konnten in den Eckbereichen am Übergang zwischen Frontmodul und Leuchten sowohl in der Simulation als auch in der Produktion der Prototypen lokale Deformationen beobachtet werden. Aufgrund einer zunächst zu groß festgelegten Flanschbreite werden die Ecken durch den Rollfalzprozess um bis zu 3 mm nach „innen gezogen“. Bei der Beschnittfestlegung mit der AutoForm Falzsimulation wurde das Innenteil als idealisiert starr angenommen und folglich konnte diese Deformation nicht beobachtet werden. Wird jedoch das Innenteil durch ein elastisch-plastisches Materialverhalten in der Falzsimulation berücksichtigt, kann dieser Effekt sehr wohl beobachtet werden (vgl. Abbildung 95).

#### 6.4.1 Rückfederungsergebnisse auf Basis der idealisierten „CAD-Null“-Geometrie (Variante 1)

Wie bereits im Zusammenhang mit den Simulationsergebnissen für den Zusammenbau des Innenteils dargestellt, wurden die Rückfederungsergebnisse der ZB-Motorhaube als FE-Netz exportiert und entsprechend den realen Messergebnissen in GOM-Inspect ausgewertet. In der Rückfederungsberechnung wurde die ZB-Motorhaube an vier Stellen analog zur Messvorrichtung gelagert, die Ausrichtung an den Kotflügeln wurde wiederum in GOM-Inspect ausgeführt. Die im Folgenden dargestellten Falschfarbenbilder zeigen dabei stets den Abstand der Soll-Geometrie zum Simulationsergebnis einer untersuchten Variante des fertig gefalzten Zusammenbaus.

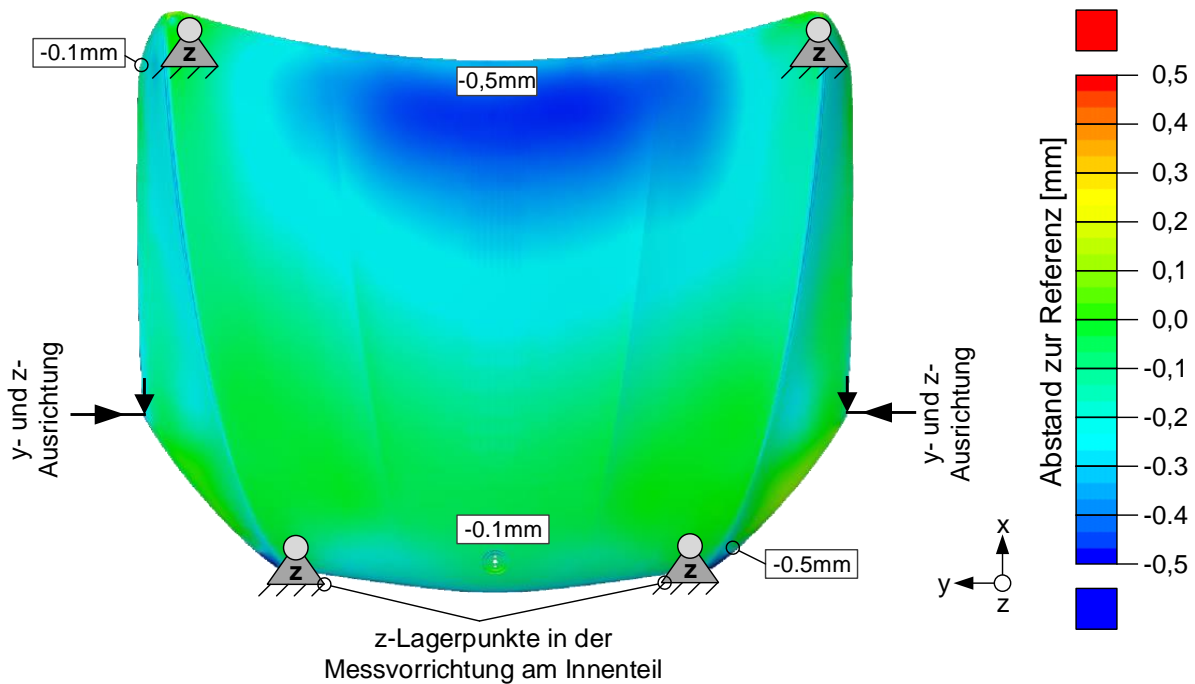
Zunächst soll jene Variante dargestellt werden, bei der die CAD-Daten des ZB-Innenteils sowie die CAD-Daten der Beplankung mit geöffneten Falzflanschen vernetzt wurde. Abbildung 96 zeigt das berechnete Rückfederungsergebnis unter dem Einfluss der Schwerkraft mit den idealisierten Eingangsgrößen.



**Abbildung 96:** ZB-Motorhaube aus Einzelteilen gefügt. Input Beplankung: CAD-Daten; ZB-Innenteil: CAD-Daten; inkl. Schwerkrafteinfluss



Größere Abweichungen von der Soll-Geometrie ergeben sich ausschließlich im Bereich des Windschutzes. Aus diesem Ergebnis lässt sich jedoch nicht der eigentliche Einfluss des Rollfalzprozesses ableiten. Wie bereits einige Untersuchungen in Kapitel 4 gezeigt haben, hat auch die Schwerkraft einen gewissen Einfluss auf die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus. Aus diesem Grund wurde in einer zweiten Rückfederungsberechnung der Schwerkrafteinfluss vernachlässigt, um den ausschließlichen Einfluss des Falzprozesses auf die Rückfederung bestimmen zu können.



**Abbildung 97:** ZB-Motorhaube aus Einzelteilen gefügt. Input Beplankung: CAD-Daten; ZB-Innenteil: CAD-Daten; ohne Schwerkrafteinfluss

Abbildung 97 verdeutlicht, dass durch den Falzprozess ausschließlich im Windschutzbereich eine globale Formabweichung von 0,5 mm resultiert. Ursache hierfür ist der konkave Umriss der Motorhaube in diesem Bereich, woraus beim Falzen Zugspannungen im Flansch entstehen. In den anderen Falzflanschbereichen der Motorhaube (meist mit dominierender konvexer Krümmung des Umrisses) ist dies nicht der Fall, hier wurden eher leichte Tendenzen zur Faltenbildung beobachtet.

Durch die Anpassung der Falschfarbenbildskala auf  $\pm 0,5$  mm kann lokal im Bereich des Übergangs zwischen Frontmodul und Leuchten trotz der Beschnittkorrektur, eine Verformung durch den Falzprozess von  $-0,5$  mm beobachtet werden.

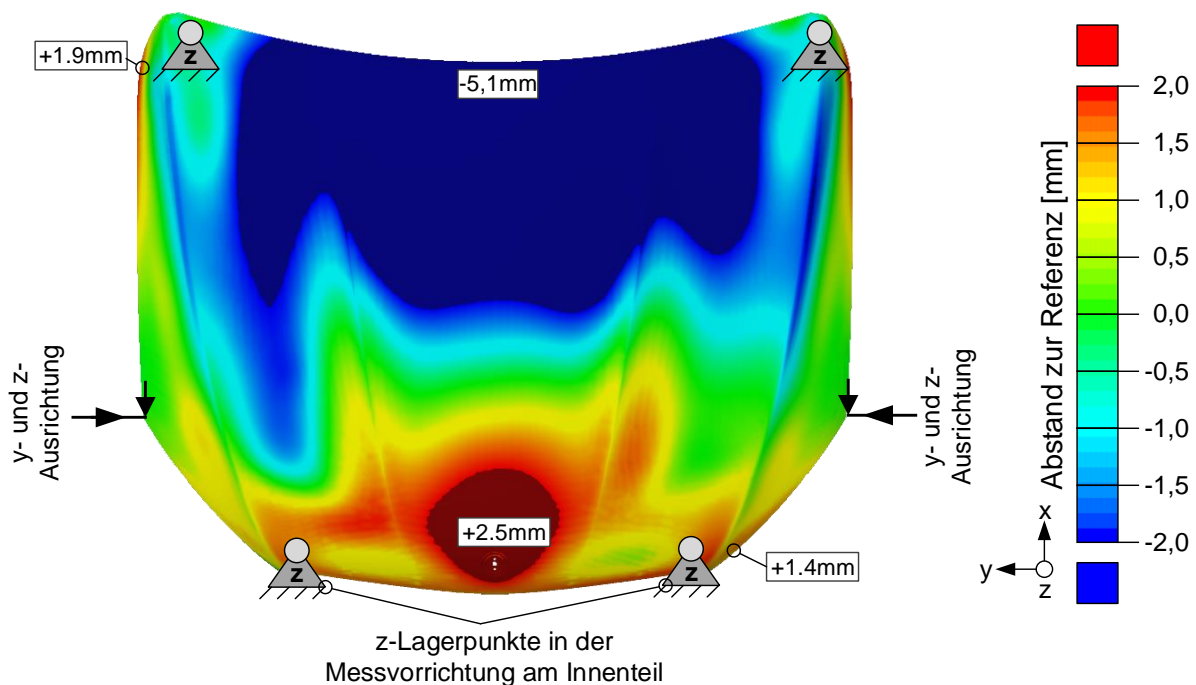
Der Vergleich zwischen den beiden Rückfederungsergebnissen bestätigt, was sich bereits am ZB-Innenteil gezeigt hat, dass die Motorhaube im Bereich des Windschutzes am stärksten durch die Schwerkraft deformiert wird. In Hauben-Mitte ergibt sich der maximale Unterschied von ca. 0,9 mm, was mit jenen Werten vergleichbar ist, die auch am Innenteil gemessen wurden.

### 6.4.2 Rückfederungsergebnis auf Basis der Umformsimulationsergebnissen (Variante 2)

Bei der zweiten Simulationsvariante sind die Einzelteile vollständig aus der Umformsimulation übertragen worden, d. h. sowohl die Einzelteile des ZB-Innenteils als auch die Beplankung sind aus den AutoForm Netzen abgeleitet.

Die in Abbildung 98 dargestellte Rückfederung ist somit der vollständig digital abgebildete Produktionsprozess aus Presswerk und Rohbau.

Ein Vergleich mit der Messung aus Kapitel 4.4.3 zeigt, dass die Tendenz der Rückfederung durch die Simulation richtig abgebildet wurde. Im Bereich des Windschutzes in Haubenmitte wird jedoch die Rückfederung mit  $-5,1\text{ mm}$  (Messung  $-4,2\text{ mm}$ ) um  $0,9\text{ mm}$  zu hoch prognostiziert. Auch im Bereich des Frontmoduls liegen die Rückfederungswerte der Berechnung um ca.  $0,5\text{ mm}$  über denen der Messung.

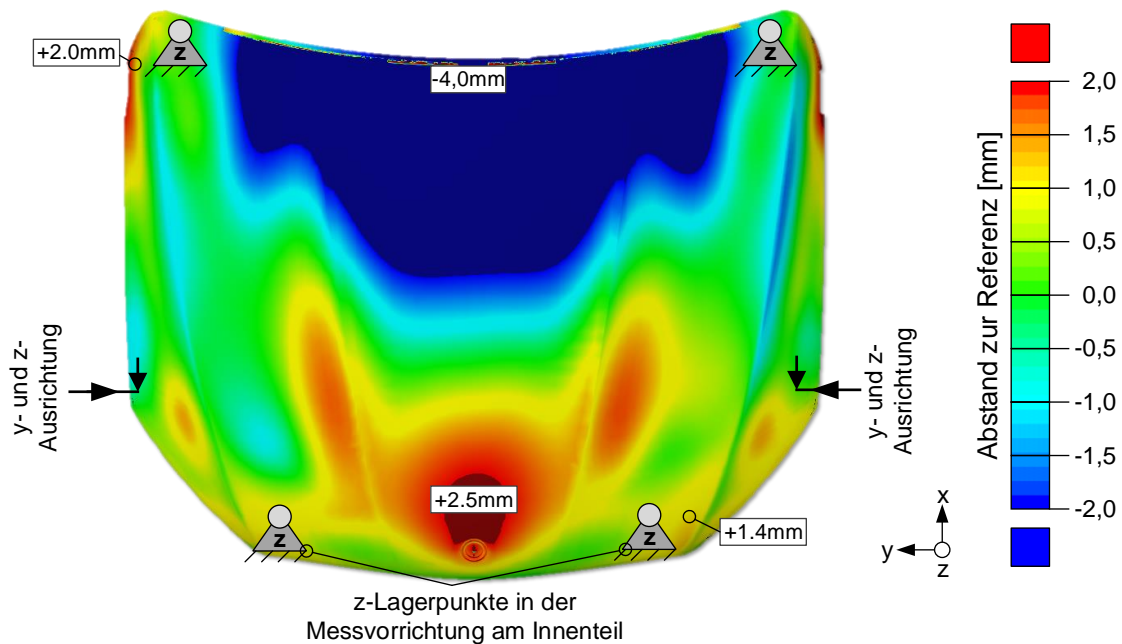


**Abbildung 98:** ZB-Motorhaube aus Einzelteilen gefügt. Input Beplankung: AutoForm Umformsimulation; ZB-Innenteil: Einzelteile aus AutoForm Umformsimulation

### 6.4.3 Rückfederungsergebnis auf Basis der aufbereiteten Daten der optischen Messungen (Variante 3)

In der dritten Variante, bei der die Einzelteile der ZB-Motorhaube aus den aufbereiteten GOM Messungen resultieren, zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung des Simulationsergebnisses mit der Messung aus Kapitel 4.4.3. Abbildung 99 zeigt zunächst den Abstand der Soll-Geometrie zur berechneten Simulationsvariante 3. Der Vergleich beider Falschfarbenbilder (Simulation und Messung) zeigt ein nahezu identisches Bild. Die Abweichungen der Simulation zur Messung sind in allen Bereichen der Motorhaube kleiner als 10% der absolut gemessenen Rückfederung. Trotz der getroffenen Annahmen, wie

beispielsweise die Vernachlässigung der Umformhistorie (Spannungen, Dehnungen u. Ausdünnung) und dem stark vereinfachten Fügemodell, liefert die Simulation in diesem Fall ein sehr zufriedenstellendes Ergebnis. Das Ergebnis lässt darauf schließen, dass bei einer Verbesserung der Rückfederungsberechnung der jeweiligen Pressteile, wie sie für die Variante 2 verwendet wurden, auch bei der Variante 2 eine ähnlich gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung erzielt werden hätte können.



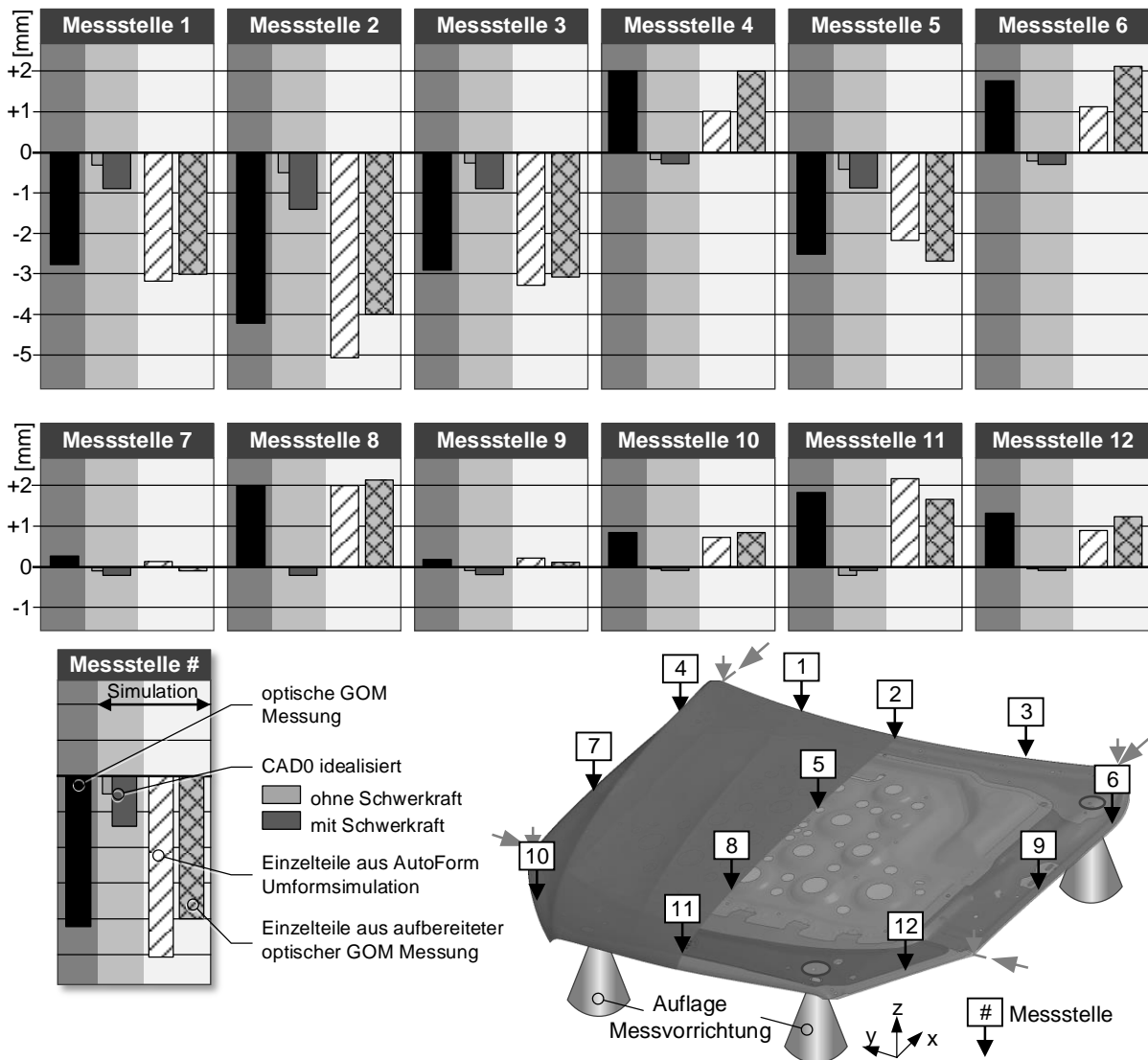
**Abbildung 99:** ZB-Motorhaube aus Einzelteilen gefügt. Input Beplankung: Aufbereitete optische GOM Messung; ZB-Innenteil: Aufbereitete optische GOM Messung

## 6.5 Genauigkeit der Rückfederungsberechnung der Baugruppe

Abbildung 100 fasst die dargestellten Simulationen sowie das Ergebnis der optischen GOM Messung für insgesamt zwölf Messstellen, vorzugsweise am Umriss der Motorhaube, in einer Übersicht zusammen.

Die Übersicht verdeutlicht nochmals die sehr gute Übereinstimmung der Simulation, basierend auf den GOM Messungen der Einzelteile, im Vergleich zur Messung der ZB-Motorhaube. Jedoch auch die Variante, bei der die Einzelteile aus der AutoForm Simulation aufbereitet wurden, liefert ein Ergebnis, das die Rückfederungstendenzen richtig erfasst. Auf Basis dieses Ergebnisses lassen sich durchaus Kompensationsmaßnahmen generieren, um die Rückfederung des Zusammenbaus zu reduzieren.

Der Einfluss des Falzprozesses auf die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus scheint verhältnismäßig gering zu sein. Folglich müssen die Maßabweichungen aus dem ZB-Innenteil oder aus der Beplankung resultieren. Da die Messergebnisse des ZB-Innenteils am Umriss vergleichbare Abweichungen zur Soll-Geometrie zeigen, liegt die Vermutung nahe, dass der Einfluss der Beplankung auf die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus am Umriss relativ gering ist. Im folgenden Unterkapitel soll dieser Zusammenhang durch die Simulation nun genauer untersucht werden.

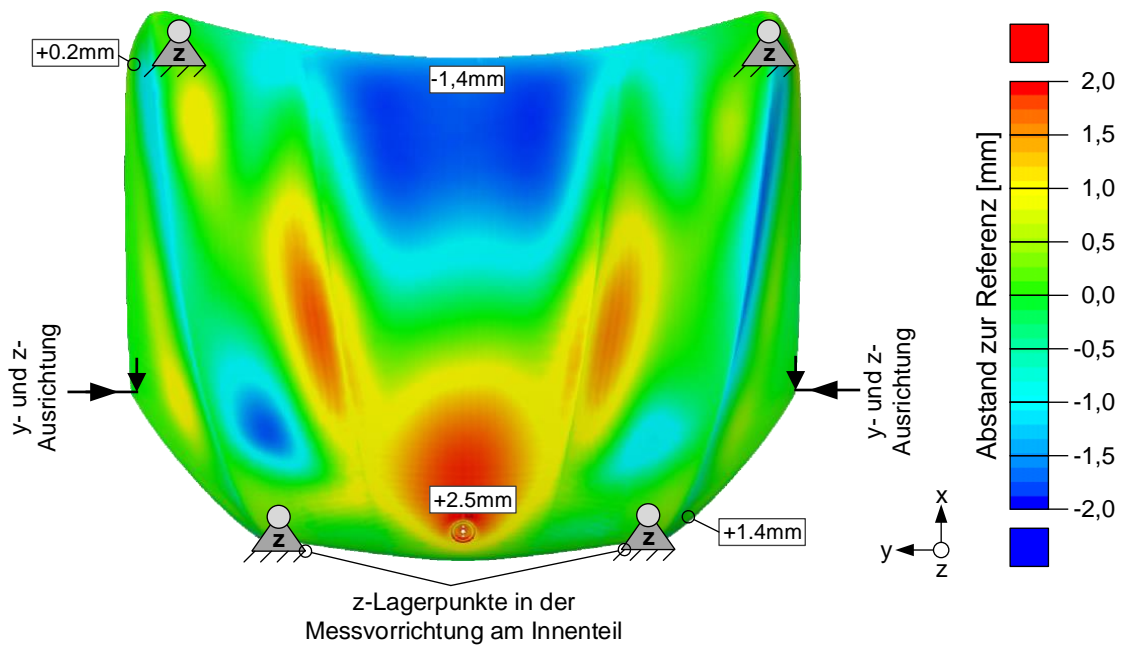


**Abbildung 100:** Zusammenfassung der Simulationsergebnisse an zwölf Messstellen am Umriss und in Motorhaubenmitte im Vergleich zur optischen GOM Messung

## 6.6 Einfluss der Beplankung auf den Versatz am Umriss der Motorhaube

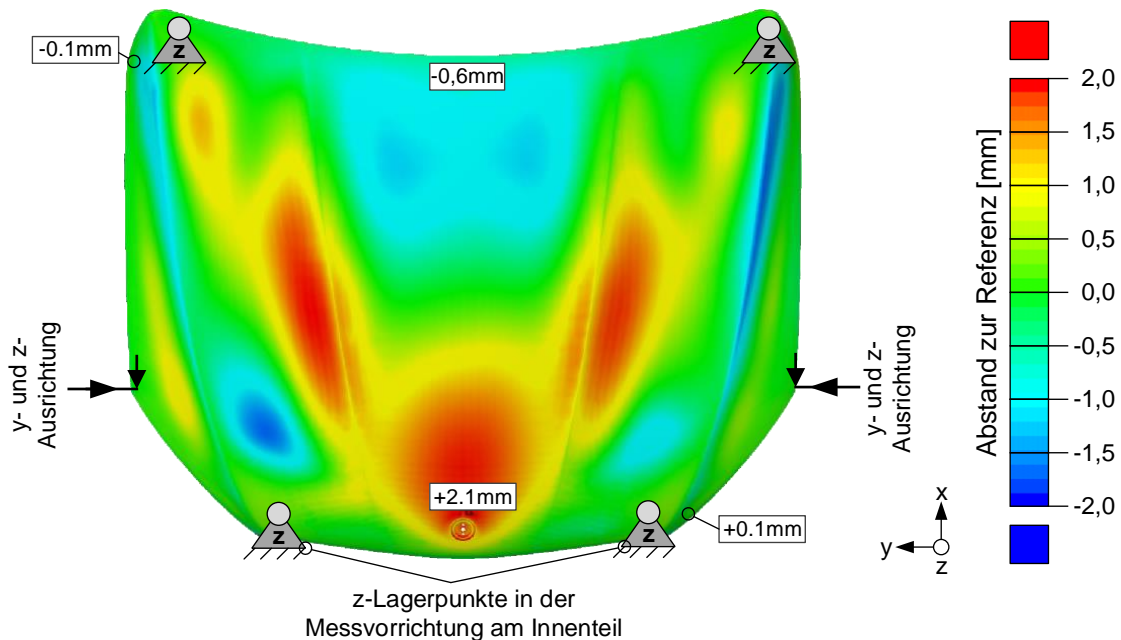
Durch die Simulationmethode soll im Folgenden die Frage beantwortet werden, welchen Einfluss die Beplankung auf die Maßhaltigkeit des ZB-Innenteils besitzt. Als Referenz dient dazu die idealisierte Simulation aus den „CAD-Null“ Daten. Tauscht man in dieser Simulation die Beplankung durch die optisch erfasste Beplankung aus, so würde dies in der Realität einer Paarung aus perfekt gefertigtem ZB-Innenteil und einer Beplankung mit großen Abweichungen zur Soll-Geometrie entsprechen.

Abbildung 101 zeigt nun ein solches Berechnungsergebnis der Rückfederungssimulation für den Zusammenbau der Motorhaube unter Berücksichtigung der Schwerkraft. In Haubenmitte entsprechen die Abweichungen des Zusammenbaus annähernd jenen der Beplankung. Am Umriss der Motorhaube hingegen zeigen sich jedoch die berechneten Abweichungen zur Soll-Geometrie, abgesehen vom Windschutzbereich, als verhältnismäßig klein.



**Abbildung 101:** ZB-Motorhaube aus Einzelteilen gefügt. Input Beplankung: Aufbereitete optische GOM Messung; ZB-Innenteil: CAD-Daten, mit Schwerkräfteinfluss

Um den Einfluss der Schwerkraft zu vernachlässigen, wie auch bei der idealisierten Variante aus Kapitel 6.4.1, ist in Abbildung 102 das Rückfederungsergebnis ohne den Schwerkräfteinfluss dargestellt.

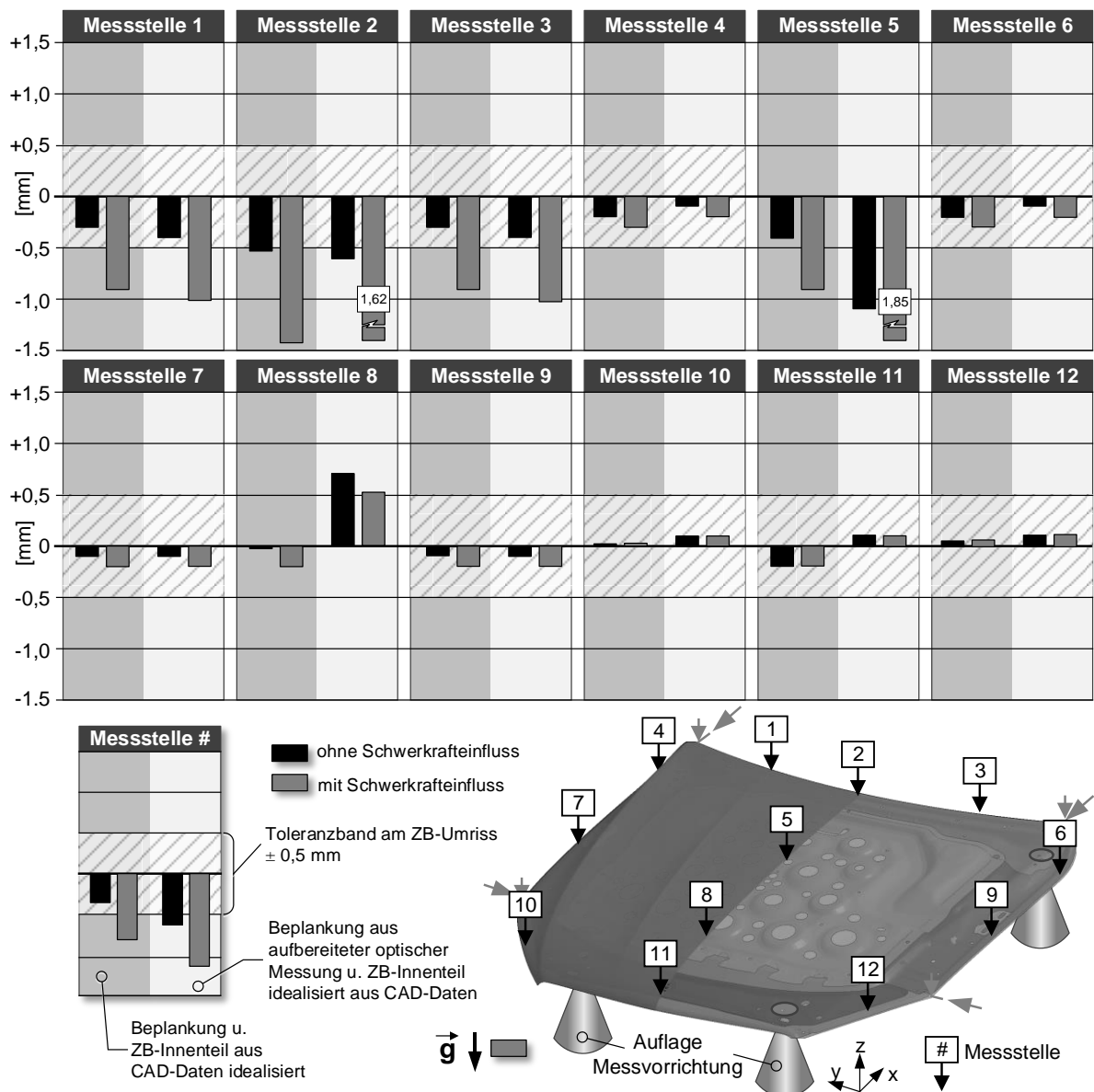


**Abbildung 102:** ZB-Motorhaube aus Einzelteilen gefügt. Input Beplankung: Aufbereitete optische GOM Messung; ZB-Innenteil: CAD-Daten, ohne Schwerkräfteinfluss

Fasst man alle vier Berechnungen in einer Übersicht zusammen (vgl. Abbildung 103), so zeigt sich beim Vergleich der beiden Varianten (idealisierte Beplankung – real gemessene Beplankung) ein maximaler Unterschied von ca. 0,2 mm am Umriss der Motorhaube. Die Maßabwe-

chung der Beplankung hat folglich nahezu keinen Einfluss auf die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus. Einzig an den Messstellen 5 und 8 (kein direkter Kontakt zwischen Beplankung und ZB-Innenteil) hat die Maßhaltigkeit der Beplankung Auswirkungen auf den Zusammenbau.

Abgesehen von den Messstellen 1 bis 3 (an diesen Stellen besitzt das ZB-Innenteil nicht die ausreichende Steifigkeit und daher ist ein starker Schwerkrafteinfluss vorhanden) würde der Zusammenbau der Motorhaube am Umriss, trotz der maßlich weit außerhalb der Einzelteilteranz liegenden Beplankung, innerhalb der geforderten Toleranz von  $\pm 0,5$  mm liegen.

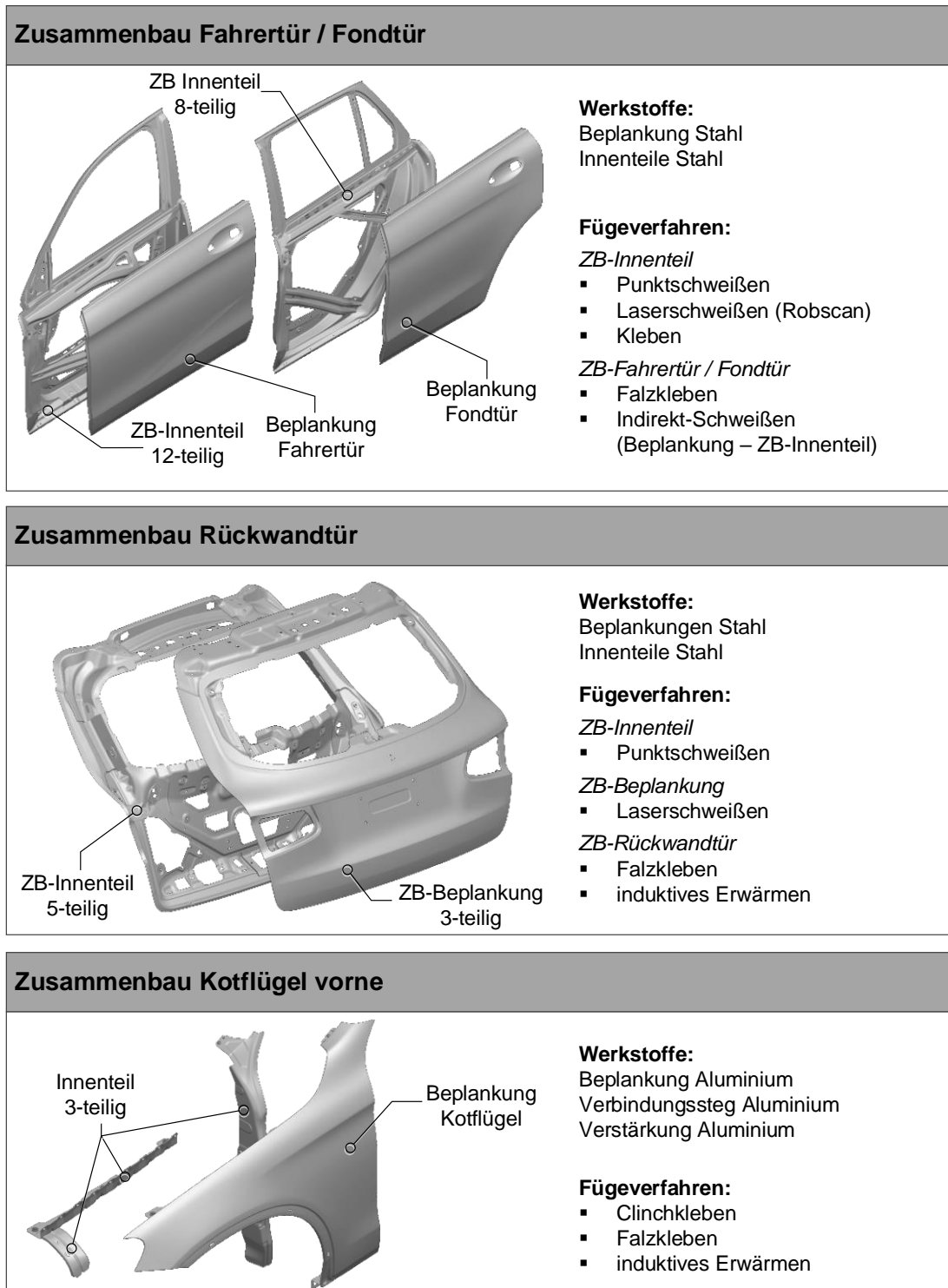


**Abbildung 103:** Einfluss von Beplankung und Schwerkraft auf die Maßhaltigkeit der ZB-Motorhaube

## 6.7 Übertragbarkeit des Ansatzes auf andere Baugruppen

Für die Motorhaube liefert die vorgestellte Simulationsmethodik (insbesondere mit der Variante 3 in der die Pressteile aus den gescannten Prototypenteile aufbereitet wurden) eine sehr gute Übereinstimmungen mit den jeweiligen Messungen. Deshalb stellt sich abschließend die Frage, wie gut sich diese Simulationsmethodik auch auf andere Baugruppen übertragen lässt.

Zunächst sollen dazu die anderen Klappen- und Anbauteile jenes Fahrzeugs, von dem die Motorhaube bereits untersucht wurde, betrachtet werden. Abbildung 104 fasst diese zusammen und gibt eine Übersicht über die verwendeten Fügeverfahren. Der Aufbau der Baugruppen erfolgt ausschließlich aus Pressteilen. Die Fahrer- und Fondtür sowie die Rückwandtür sind vollständig aus Stahl-Werkstoffen aufgebaut, der Kotflügel hingegen ist wie die Motorhaube in Aluminiumbauweise gefertigt.



**Abbildung 104:** Übertragbarkeit der Simulationsmethode auf andere Klappen- und Anbauteile am Fahrzeug

Bei den Türen kommt hauptsächlich Widerstandspunktschweißen zum Einsatz. In [Gov12] u. [Gov13] wird das Widerstandspunktschweißen auf ähnliche Weise abgebildet, wie die Clinchpunkte in dieser Arbeit. Die Simulationsergebnisse am Beispiel eines Prinzipbauteils haben dabei eine sehr gute Übereinstimmung mit den Experimenten geliefert. Aus diesem Grund sollte sich die entwickelte Simulationsmethodik auch auf diese Baugruppen anwenden lassen.

Beim Zusammenbau der Beplankung der Rückwandtür kommt jedoch das Laserschweißen zum Einsatz, welches die drei Beplankungsteile über die gesamte Breite miteinander verbindet. Der Wärmeeintrag beim Laserschweißen ist zwar verhältnismäßig gering, aufgrund der relativ langen Schweißnaht darf dieser jedoch nicht vernachlässigt werden. An dieser Stelle muss folglich der Falzsimulation eine Schweißverzugsimulation vorausgehen, um den thermischen Verzug zu erfassen. Daher kann für die Rückwandtür die Beurteilung der Maßhaltigkeit bislang noch nicht vollständig mit der in dieser Arbeit dargestellten Simulationsmethodik erfolgen.

Da die Fügeverfahren für den Zusammenbau des Kotflügels identisch mit jenen der Motorhaube sind, lässt sich dieser in gleicher Weise simulativ absichern. Jedoch dominieren bei diesem Zusammenbau erfahrungsgemäß die Einflüsse der Maßhaltigkeit der Beplankung sowie des Verbindungsstegs. Die Zusammenbausimulation reduziert sich folglich auf den Falzprozess dieser beiden stark maßbestimmenden Bauteile. Die größere Herausforderung besteht derzeit darin, das Rücksprungverhalten der relativ komplexen Beplankungsgeometrie des Vorderkotflügels abzubilden.

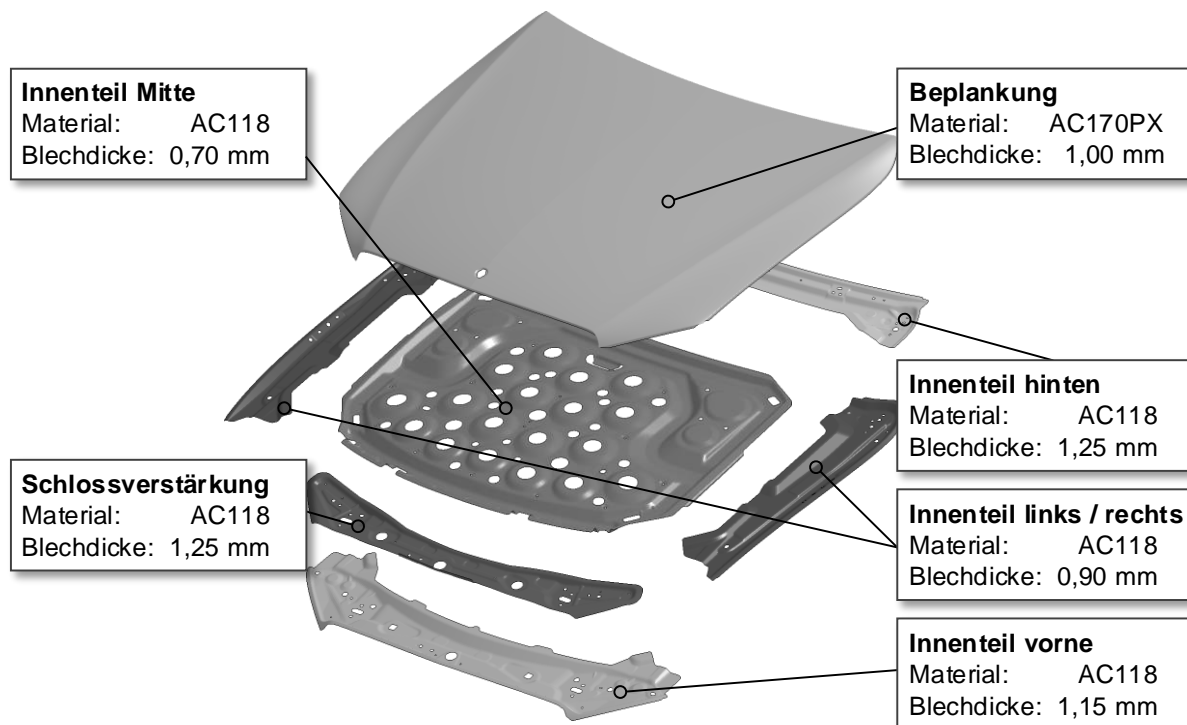
Aus Kapitel 2.1 und 2.2.2 wird jedoch deutlich, dass die Komplexität im Karosserieaufbau aufgrund von verwendeten Halbzeugen, Werkstoffen und Fügeverfahren deutlich höher sein kann als in den Abbildung 104 dargestellten Anbauteilen. Beispielsweise ist es durchaus möglich, dass je nach Derivat selbst bei Klappen- und Anbauteilen Einzelteile aus Druckguss oder Strangpressprofilen integriert sind. In der aufgebauten Simulationsmethodik lassen sich jedoch auch solche Einzelteile berücksichtigen, deren Geometrie als Solid-Element diskretisiert werden müsste. Die hier vorgestellte Simulationsmethodik sollte in diesen Fällen eventuell um entsprechende Kontaktformulierungen erweitert werden. Die Beurteilung der Maßhaltigkeit solcher Einzelteile muss jedoch gesondert erfolgen, Simulationsmethoden sind heute auch für solche Bauteile vorhanden [Tho13], [Hof12] u. [Kar11].

Natürlich lässt sich die Simulationsmethodik auch auf Baugruppen der Struktur des Fahrzeuges anwenden. Jedoch kommt bei Baugruppen aus der Struktur des Fahrzeuges kein Falzen als Füge-technik zum Einsatz. Die größere Herausforderung ist dabei eine in der Regel deutlich höhere Anzahl an Einzelteilen. Dies führt wiederum zu einem deutlich höheren Aufwand hinsichtlich der Simulationsdatengenerierung (Anzahl der Einzelteile, Fügepunkte, Spannungspunkte, etc.) sowie einer dadurch steigenden Berechnungsdauer.



## 7 Einflussanalyse mit Hilfe der Simulationstechnik

Nachdem die Ergebnisse der Rückfederungsberechnung aus Kapitel 6 eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen gezeigt haben, werden im folgenden Kapitel die Simulationsergebnisse einer zweiten Motorhaube vorgestellt. Der Aufbau dieser zweiten Motorhaube ist identisch mit der in Kapitel 4 und 5 vorgestellten. Das Innenteil setzt sich wiederum im Wesentlichen aus sechs Einzelteilen zusammen, die ausschließlich durch Clinch-Kleben miteinander gefügt werden. Die Beplankung wird in gleicher Weise durch Rollfalzen mit dem Innenteil verbunden. Die Motorhauben unterscheiden sich jedoch in der Form und den Hauptabmessungen. Die Einzelteile dieser Motorhaube (Nr. 2) sind in Abbildung 105 zusammengefasst.



**Abbildung 105:** Übersicht der Einzelteile des Zusammenbaus Motorhaube (Nr. 2)

Die Vorgehensweise beim Simulationsaufbau ist analog zu der in Kapitel 6 vorgestellten und soll an dieser Stelle nicht erneut in der detaillierten Form erfolgen.

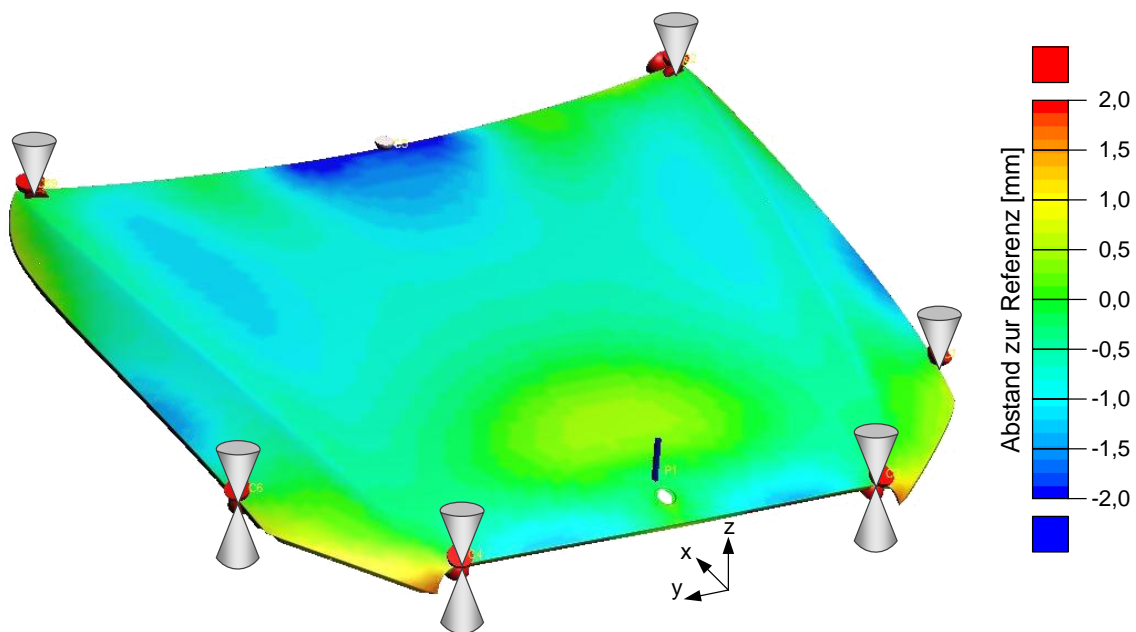
Da zum Zeitpunkt der hier beschriebenen Simulationsuntersuchung im Gegensatz zu der in vorangegangenen Kapiteln behandelten Motorhaube keine Pressteile und gefügten Motorhauben vorhanden waren, wird an dieser Stelle ausschließlich auf Simulationsdaten zurückgegriffen. Ausgangspunkt für die Simulation des Zusammenbaus dieser Motorhaube sind somit ausschließlich die Pressteile auf Basis der Umformsimulationen oder idealisiert aus den Konstruktionsdatensätzen abgeleitet.

Im folgenden Kapitel 7.1 werden zunächst die Rückfederungsergebnisse der Einzelteile aus der Umformsimulation vorgestellt, bevor im Anschluss daran auf die Ergebnisse des Zusammenbaus eingegangen wird. Bei den Zusammenbausimulationen wurde der Schwerpunkt auf die Einflussanalyse der Einzelteilmaßhaltigkeit auf den Gesamtzusammenbau gelegt.

## 7.1 Rückfederungsergebnisse der Einzelteile

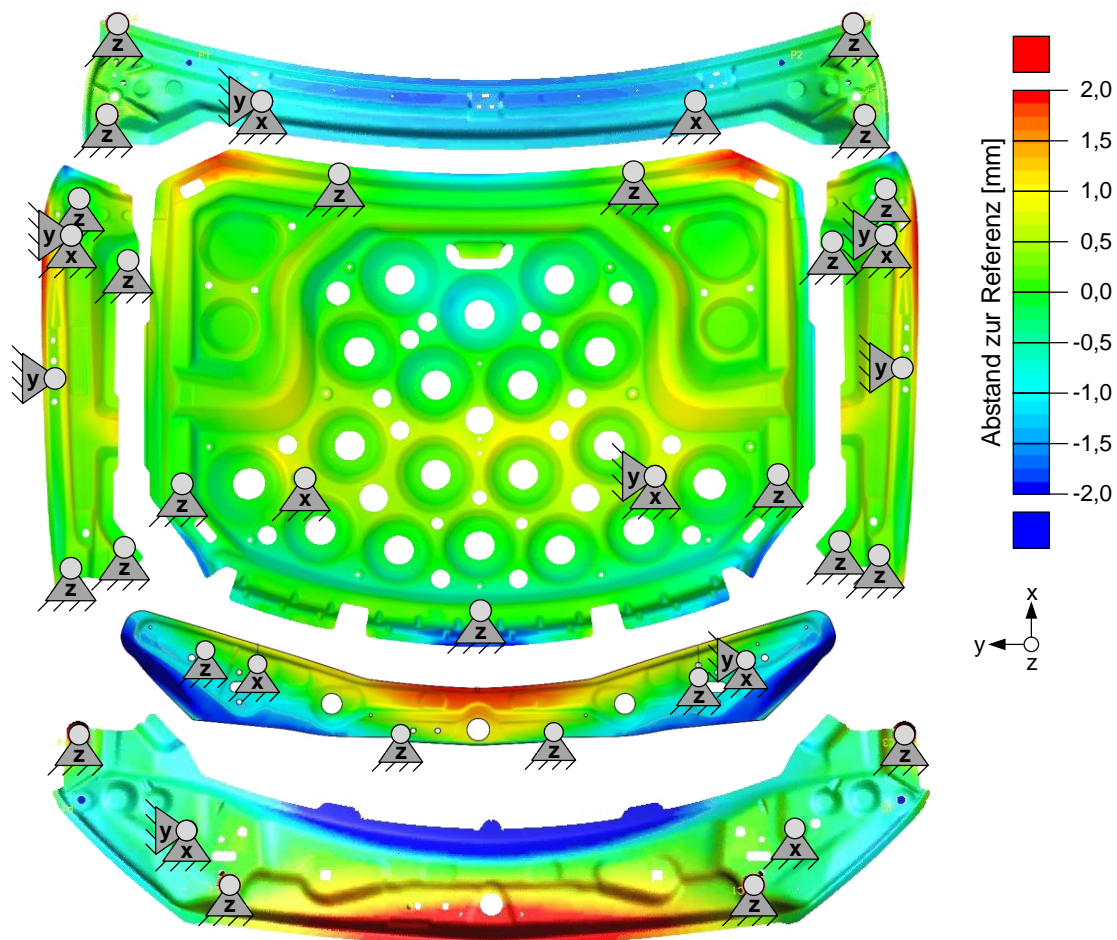
Die Umformsimulationen sämtlicher Einzelteile wurden im Vorfeld in AutoForm durchgeführt. Die Simulationen beinhalten dabei sämtliche Operationsfolgen der Fertigung im Presswerk. Bei der Rückfederungsberechnung wurden wiederum zwei getrennt voneinander betrachtete Simulationen durchgeführt. In der ersten Simulation wurde die Rückfederung unter dem Schwerkrafteinfluss und den nach dem Spann- und Fixierkonzept entsprechenden Lagerbedingungen berechnet. Diese Berechnung dient ausschließlich der im Folgenden vorgestellten Rückfederungsberechnung. Für den eigentlichen Datentransfer zum Zweck der Simulation des Zusammenbaus dient hingegen die simulierte „freie“ Rückfederung ohne Schwerkrafteinfluss und dadurch mit möglichst geringer inneren Energie.

Für die Einzelteile des Innenteils wurden zunächst keine Kompensationsmaßnahmen in der Umformsimulation berücksichtigt, d. h. alle Wirkflächen der Umformoperationen entsprechen dem Konstruktionsdatensatz. Bei der Beplankung hingegen wurden die Wirkflächen der OP20 mit einer Bombierung versehen. In der Abkantoperation (OP50) sind zusätzliche Kompensationsmaßnahmen in der Umformgeometrie berücksichtigt (schälendes Abkanten im Windschutzbereich und ein zusätzlicher Faltenhalter im Bereich Frontmodul und Kotflügel li. / re.).



**Abbildung 106:** Rückfederungsergebnis der Beplankung als Pressteil aus der AutoForm Umformsimulation für den ZB-Motorhaube (Nr. 2)

Das Rückfederungsergebnis der AutoForm Umformsimulation für die Beplankung mit insgesamt sechs z-Spannpunkten zeigt Abbildung 106. Die Rückfederung der Beplankung ist aufgrund der eingebrachten Kompensationsmaßnahmen vergleichsweise gering. Im Bereich Windschutz-Mitte beträgt sie, gemessen zum Soll-Datensatz, ca. -2 mm. Im Leuchtenbereich zeigt sich ein lokaler Aufsprung der Ecken um ca. +1,7 mm. Am Übergang zum Kotflügel (zwischen den Spannstellen) weicht die Beplankung um ca. -1,5 mm von der Soll-Geometrie ab.



**Abbildung 107:** Rückfederungsergebnisse der Innenteile als Pressteil aus der AutoForm Umformsimulation für den ZB-Motorhaube (Nr. 2)

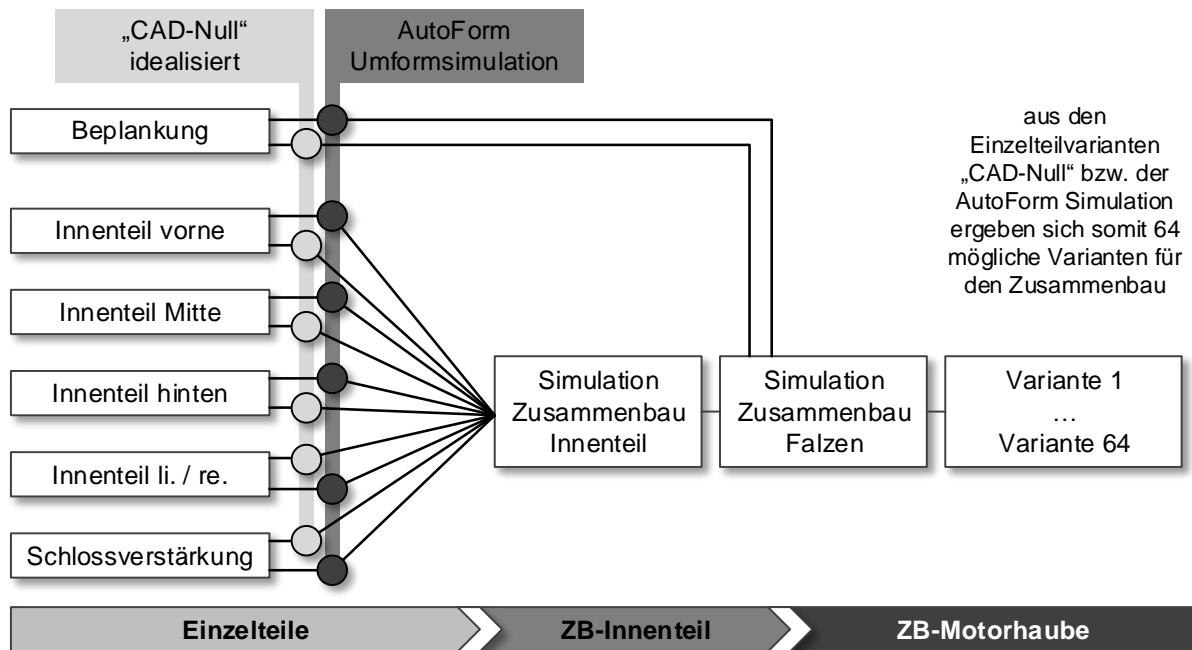
Das Spannkonzzept der Innenteile besteht bei allen Teilen im Wesentlichen aus einer Loch-Langloch-x-y-Ausrichtung sowie vier z-Spannpunkten. Ausschließlich am Innenteil Mitte soll ein zusätzlicher z-Spannpunkt dazu dienen, das mit +0,7 mm Blechdicke labile Pressteil zusätzlich gegen die Schwerkraft abzustützen.

Im Vergleich zur Beplankung zeigen die Innenteile, da bei diesen Teilen keine Rückfederungskompensation eingebracht wurde, teilweise ein stärkeres Rücksprungverhalten (vgl. Abbildung 107).

Insbesondere bei den Pressteilen Innenteile hinten sowie Innenteil vorne und Schlossverstärkung wurden Abweichungen von max.  $\pm 3,5$  mm berechnet. Am Innenteil li. / re. weicht hauptsächlich der Flanschbereich, um den später gefalzt wird, um ca.  $+1,8$  mm ab. Die Maßabweichungen resultieren im Wesentlichen aus den bei der Umformung entstehenden Biegespannungen im Bereich der stark gekrümmten und bombierten Verprägungen bzw. Stufen der Innenteile.

## 7.2 Rückfederungsergebnis des gefalzten Zusammenbaus

Für die Simulation des Zusammenbaus stehen für jedes Einzelteil zwei Varianten zur Verfügung. Dies sind zum einen das Ergebnis der Umformsimulation nach der „freien“ Rückfederung und zum anderen das FE-Netz, resultierend aus dem Soll-Datensatz. Für die FE-Netze, die aus der Umformsimulation resultieren, wurden die Daten entsprechend dem in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Vorgehen aufbereitet, sowie die plastische Dehnung und die lokalen Blechdicken auf die neu generierten Netze gemappt.



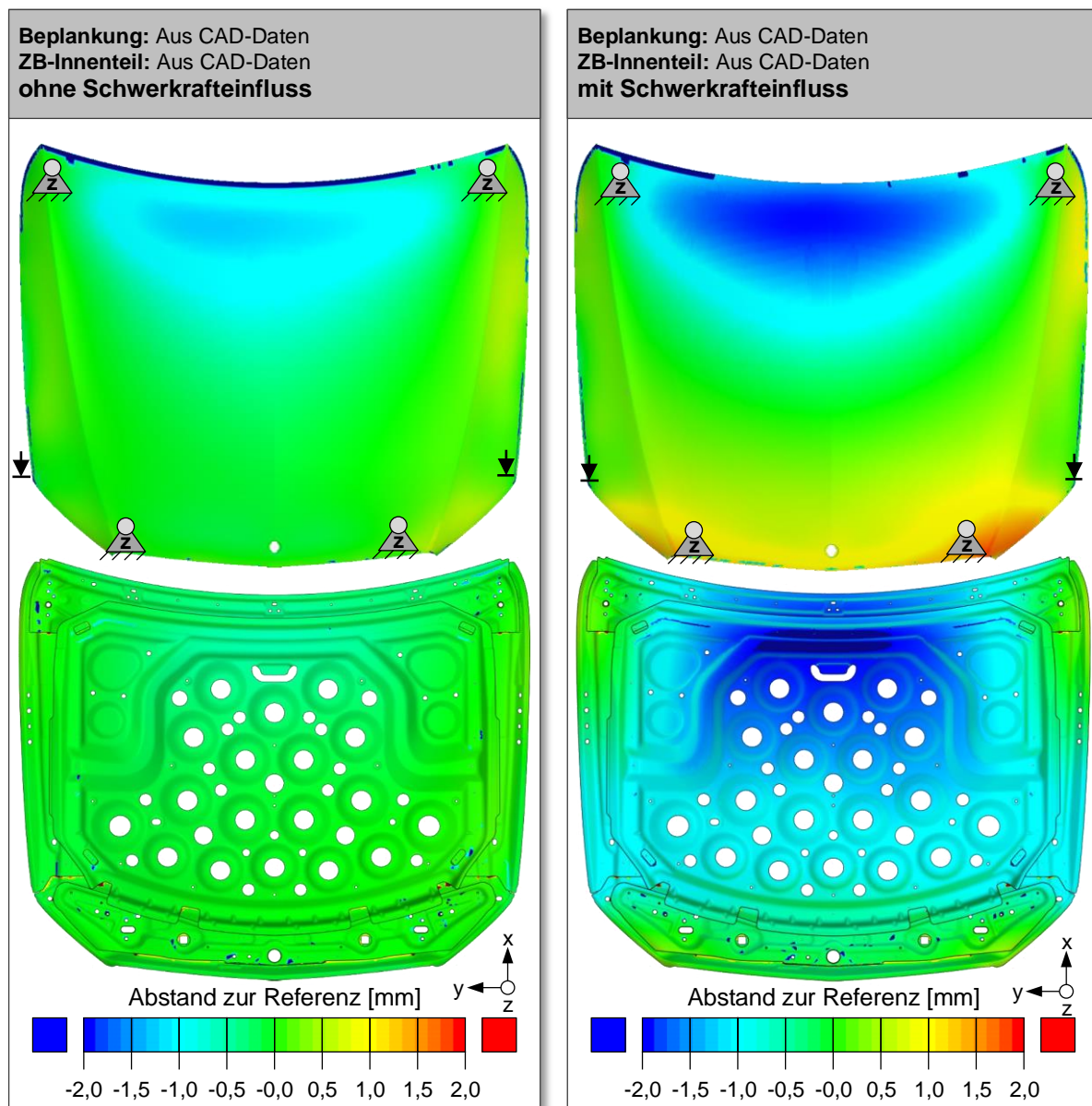
**Abbildung 108:** Kombinationsvarianten aus den vernetzten, idealisierten CAD-Daten und den berechneten Umformsimulationen der Pressteile

Aus den beiden Varianten des jeweiligen Einzelteiles (Soll-Geometrie oder Geometrie der Umformsimulation) würden sich, wenn man das Innenteil li. / re. als symmetrisches Gleichteil betrachtet, insgesamt 64 verschiedene Variationsmöglichkeiten für den Zusammenbau ergeben. Aufgrund der derzeit verfügbaren Rechenleistung und der daraus resultierenden Rechenzeit für eine Simulation des Zusammenbaus konnten nicht alle Variationsmöglichkeiten untersucht werden. Aus diesem Grund wurden im Folgenden jene Varianten gewählt, die den Einfluss der Maßhaltigkeit der Bepankung sowie des ZB-Innenteils auf die Maßhaltigkeit der gefalzten Motorhaube verdeutlichen. Zusätzlich wurden für weitere Variationen Pressteile des

ZB-Innenteils als idealisiert (ohne Maßabweichungen) angenommen, um zunächst deren Auswirkung auf die Maßhaltigkeit der Motorhaube zu untersuchen und anschließend auf Basis dieser Ergebnisse Kompensationsmaßnahmen für die jeweiligen Pressteile zu definieren.

### 7.2.1 Zusammenbau aus idealisierten Einzelteilen

In einer ersten Simulation wurden sämtliche Pressteile als idealisiert (maßhaltig) angenommen, um zum einen den Einfluss aus dem Rollfalzprozess und zum anderen den Einfluss der Schwerkraft auf die Eigensteifigkeit der Motorhaube bewerten zu können. Abbildung 109 stellt die Rückfederungsergebnisse der Rollfalzsimulation des Zusammenbaus ohne und mit Schwerkrafteinfluss einander gegenüber.

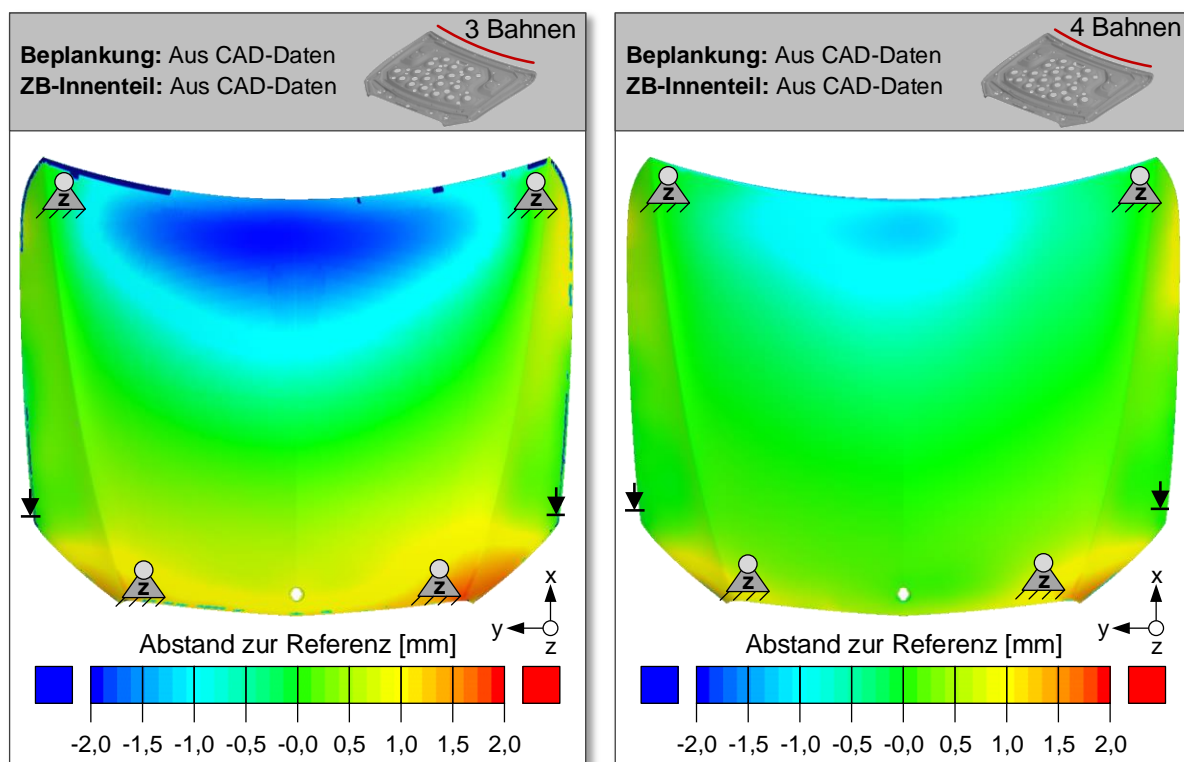


**Abbildung 109:** Einfluss der Schwerkraft auf das Rückfederungsergebnis der ZB-Motorhaube (Nr. 2)

Der Zusammenbau der Motorhaube ist dazu an vier z-Aufnahmestellen gelagert. Die FE-Netze der Rückfederung wurden zuvor entsprechend der Soll-Geometrie am Kotflügel ausgerichtet.

Die Maßabweichungen bei der Simulation ohne Schwerkräfteinfluss müssen folglich aus dem Rollfalzprozess resultieren. Die Differenz aus beiden Simulationsergebnissen hingegen resultiert aus der Schwerkraft. Im Bereich Windschutz wird deutlich, dass auch bei dieser Motorhaube ein Einfallen um ca. 1 mm aus der Schwerkraft resultiert. Abweichungen von max. +1,2 mm im Bereich der Leuchten und des Frontmoduls ergeben sich ebenfalls aus der Schwerkraft und dem Ausrichten am Übergang zum Kotflügel.

Am Umriss gemessen weist der Rollfalzprozess im Bereich Windschutz mit ca. -0,9 mm den größten Einfluss auf die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus auf. An den anderen Falzbereichen ist kein signifikanter Einfluss auf die Maßhaltigkeit erkennbar. Aus diesem Grund wurde in einer weiteren Simulation für den Bereich Windschutz eine zusätzliche Falzbahn hinzugefügt, um die ursprüngliche 30° Falzwinkelzustellung auf ca. 22,5° zu reduzieren. Das Ergebnis dieser Simulation im Vergleich zur ursprünglichen Variante zeigt Abbildung 110 (beide Simulationen berücksichtigen den Einfluss der Schwerkraft). Es wird deutlich, dass durch die zusätzliche Falzbahn der Rücksprung im Windschutzbereich um ca. +0,6 mm reduziert wurde. Durch die zusätzliche Falzbahn erhöht sich jedoch die Taktzeit des Falzprozesses.

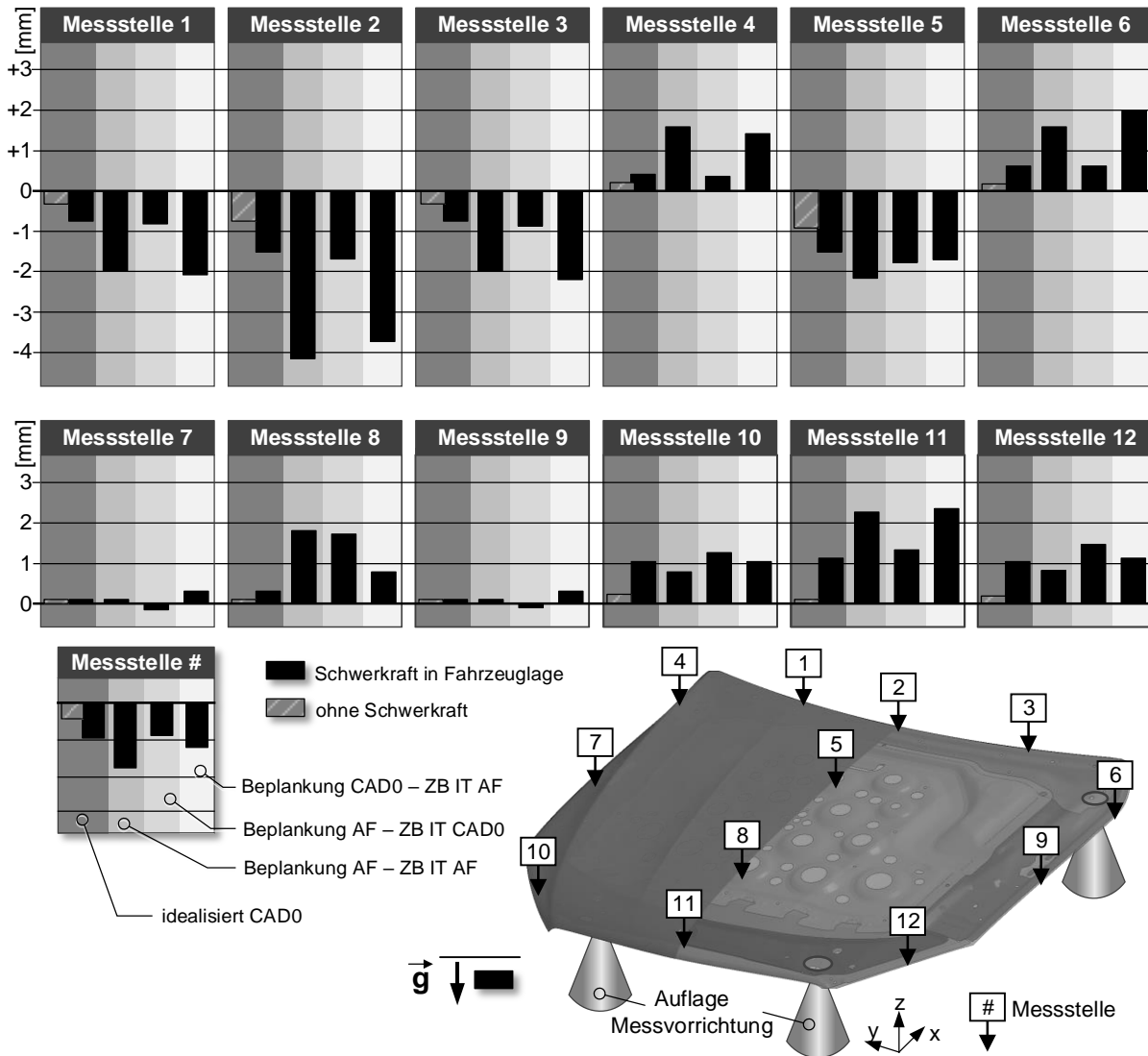


**Abbildung 110:** Einfluss einer zusätzlichen Falzbahn im Bereich Windschutz; Abstand der Soll-Daten zu den berechneten Ist-Daten

### 7.2.2 Zusammenbau aus nicht maßhaltigen Einzelteilen

Im nächsten Schritt wurde der Einfluss der Beplankung sowie des ZB-Innenteils auf die Maßhaltigkeit der Motorhaube untersucht. Dazu wurden insgesamt vier Varianten miteinander verglichen. Die erste Variante ist die bereits dargestellte aus idealisierter Beplankung und idealisiertem ZB-Innenteil (vgl. Abbildung 110). Die zweite Variante setzt sich aus Pressteilen

zusammen, die vollständig aus den AutoForm Umformsimulationen generiert wurden. In der dritten und vierten Variante wurde entweder der Zusammenbau des Innenteils idealisiert vorausgesetzt oder auch die Beplankung. Den Vergleich dieser vier Simulationsvarianten fasst Abbildung 111 an zwölf ausgewählten Messstellen zusammen.



**Abbildung 111:** Übersicht der Rückfederung des ZB-Motorhaube an zwölf Messstellen; Vergleich der Berechnungsvarianten mit unterschiedlichen Eingangsdaten für die Pressteile

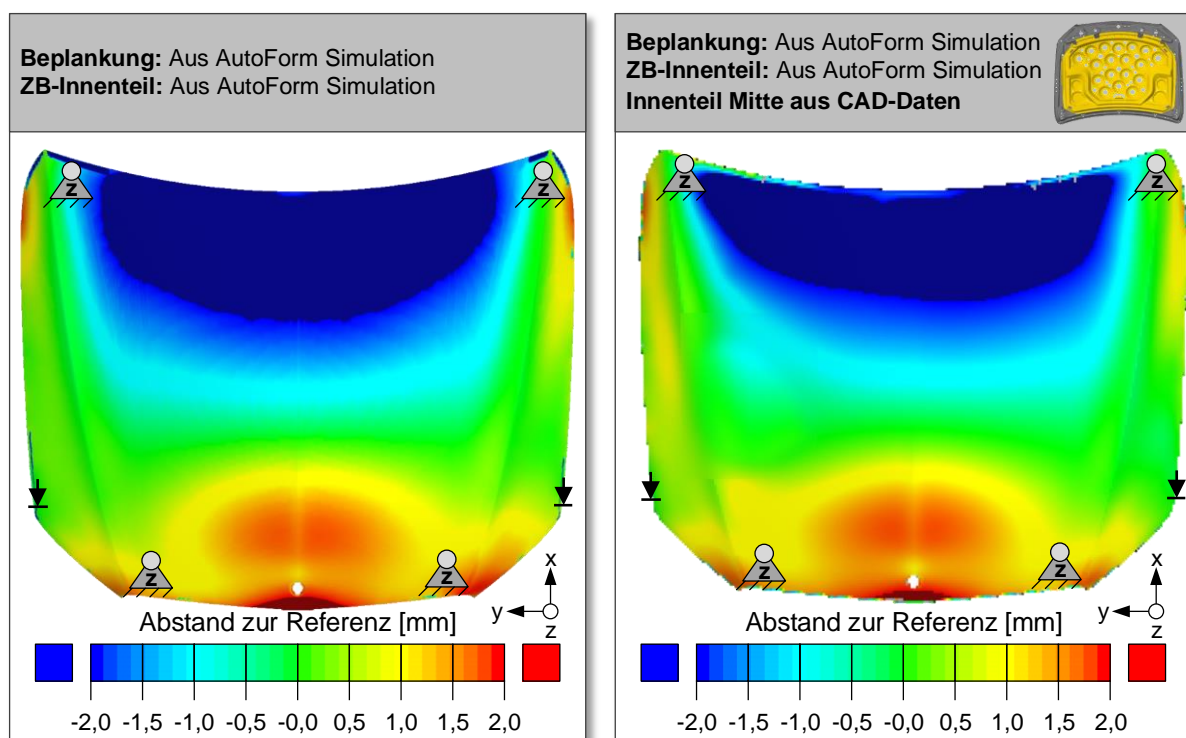
Die Variante aus idealisiertem ZB-Innenteil, gefalzt mit der Beplankung aus der AutoForm Umformsimulation, zeigt nahezu identische Abweichungen wie die vollständig idealisierte Variante. Die Maßabweichungen der Beplankung wirken sich ausschließlich in Haubenmitte (Messstellen 8 und 5) aus (Kontakt Beplankung zu Innenteil ausschließlich über den Unterfütterungsklebstoff).

Die Simulationsergebnisse in Abbildung 111 haben gezeigt, dass insbesondere entlang des Umrisses der Motorhaube der Zusammenbau des Innenteils für die Maßhaltigkeit des Gesamtzusammenbaus ausschlaggebend ist. Hinsichtlich einer Rückfederungskompensation stellt sich folglich die Frage, welches Einzelteil des ZB-Innenteils wiederum den größten

Einfluss auf die Gesamtmaßhaltigkeit besitzt, sodass dessen Rückfederung entsprechend kompensiert werden muss.

Ausgehend von der Simulationsvariante, bei der sich sämtliche Pressteile aus den voran gegangenen AutoForm-Umformsimulation aufbauen (die Abweichung zur Soll-Geometrie zeigt Abbildung 112, linke Seite), wurden jeweils Einzelteile der Unterbaugruppe ZB-Innenteil durch entsprechend idealisiert vernetzte Pressteile ersetzt. Der Einfluss des Pressteils Innenteil hinten, der im Wesentlichen zum Einfallen der Motorhaube im Windschutzbereich führt (analog zu Kapitel 4 und 6), soll an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden.

In Abbildung 112 (re.) wurde zunächst das Innenteil Mitte durch die idealisierte Geometrie ersetzt. Der Vergleich der beiden Falschfarbenbilder zeigt, dass das Einzelteil nahezu keinen Einfluss auf die Maßhaltigkeit der Motorhaube nach dem Falzprozess aufweist. Am Umriss sind die Abweichungen nahezu identisch. Eine Rückfederungskompensation zur Verbesserung der Maßhaltigkeit der Motorhaube am Umriss ist folglich über das Innenteil Mitte nicht sinnvoll.

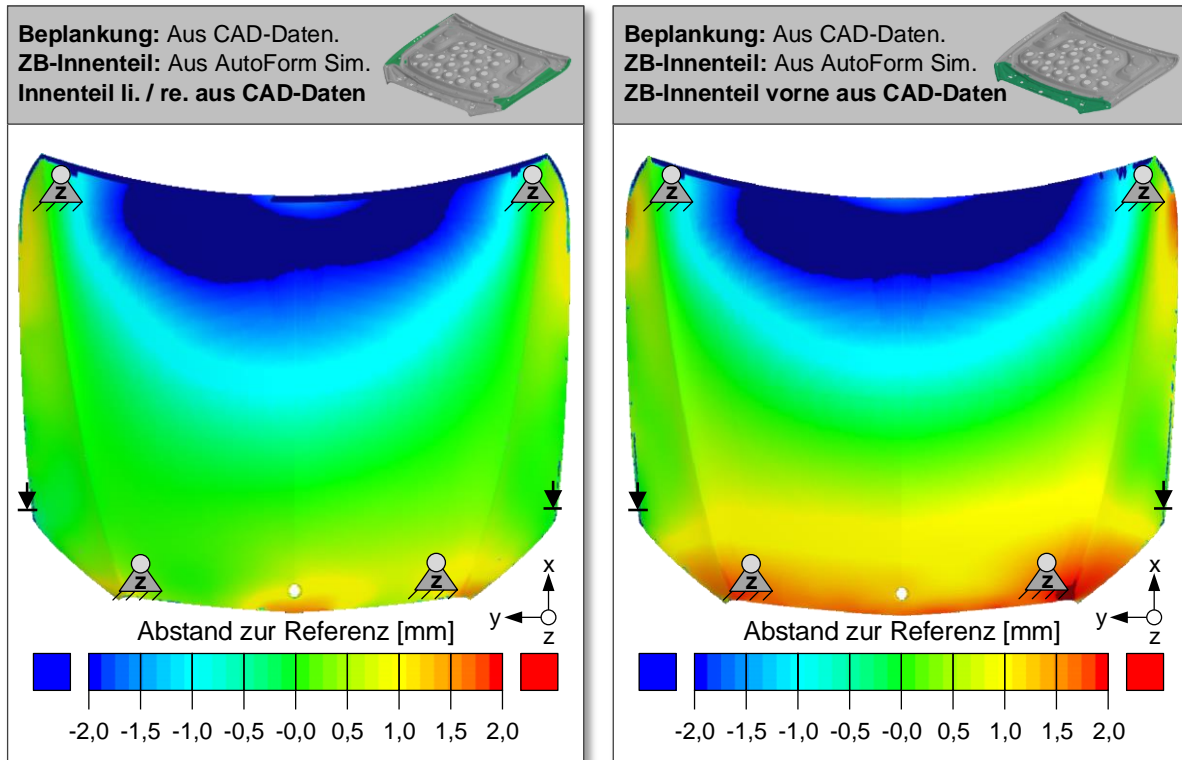


**Abbildung 112:** Einfluss des Innenteils Mitte auf die Rückfederung der ZB-Motorhaube (Nr. 2)

Abbildung 113 fasst zwei weitere untersuchte Varianten zusammen. Bei der Variante auf der linken Seite der Abbildung wurden die Innenteile li. / re. entsprechend ausgetauscht, bei jener auf der rechten Seite der Zusammenbau aus Innenteil vorne und Schlossverstärkung. Die gemessene Abweichung zur Soll-Geometrie zeigt, dass die Innenteile li. / re. einen deutlich größeren Einfluss auf die Maßhaltigkeit der Motorhaube im Bereich des Frontmoduls besitzen, als der Zusammenbau aus Innenteil vorne und Schlossverstärkung. Ursache hierfür sind neben der Maßhaltigkeit der Einzelteile Innenteil li. / re. wiederum die Lagerung und Ausrichtung der



Motorhaube sowie der Schwerkrafteinfluss. Durch die Schwerkraft „hängt“ die Motorhaube in x-Richtung leicht durch. Das anschließende Ausrichten am Kotflügel führt also dazu, dass das FE-Netz des Rückfederungsergebnisses am Übergang zum Frontmodul sichtbar oberhalb von der Soll-Geometrie (roter Bereich) liegt.



**Abbildung 113:** Einfluss der Baugruppe ZB-Innenteil vorne und Innenteil li. / re. auf das Rückfederungsergebnis der ZB-Motorhaube (Nr. 2)

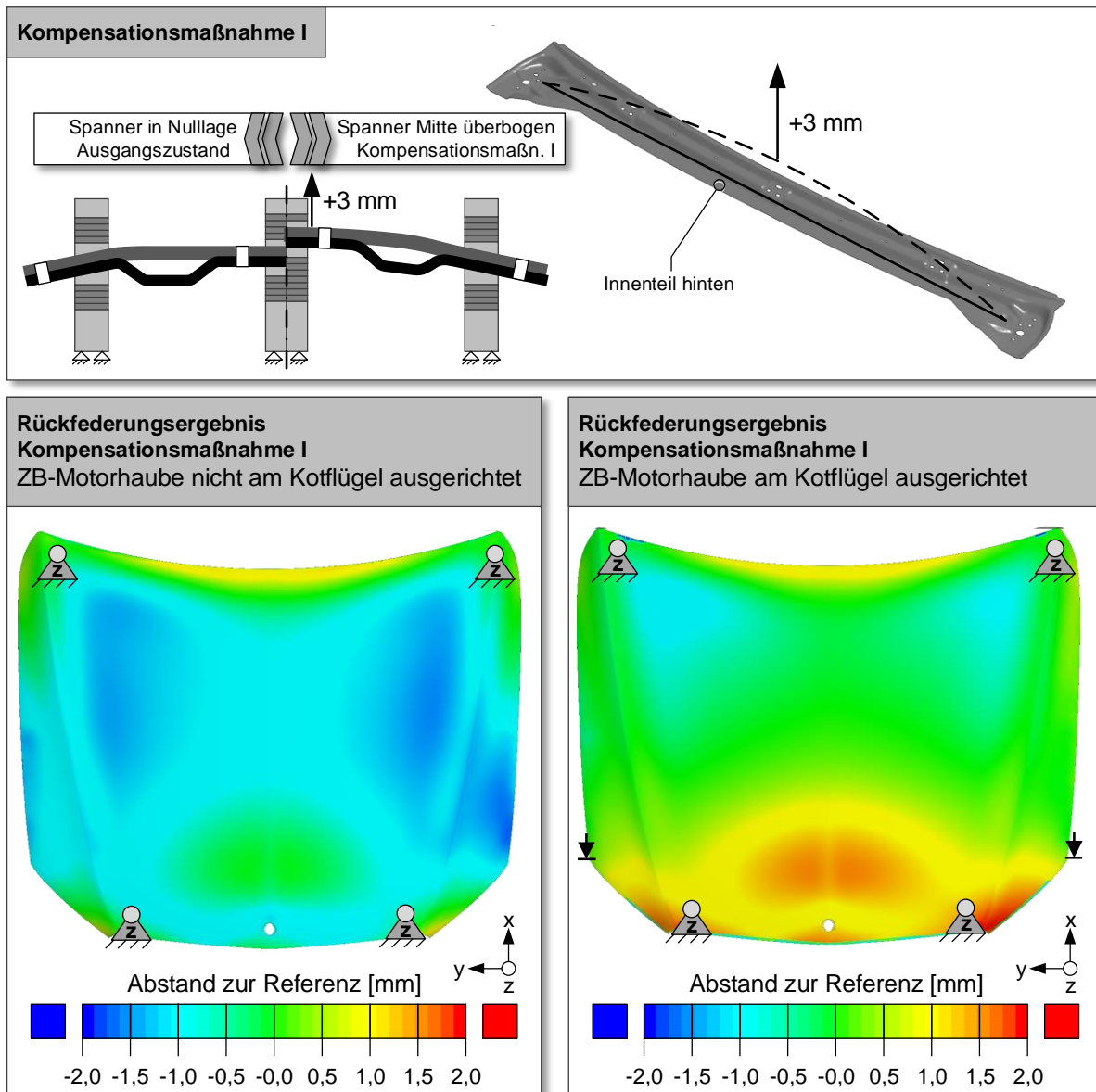
### 7.3 Abgeleitete Kompensationsmaßnahmen am Zusammenbau

Aus den Erkenntnissen der vorangegangenen Kapitel 7.1 und 7.2 soll nun eine Kompensationsstrategie abgeleitet werden, um die Maßhaltigkeit der Motorhaube gezielt zu optimieren. In den Rückfederungsergebnissen der untersuchten Varianten haben die Innenteile hinten sowie die Innenteile li. / re. den größten Einfluss auf die Maßhaltigkeit der Motorhaube gezeigt. Aus diesem Grund werden diese Einzelteile schrittweise kompensiert und die Auswirkungen dieser Einzelteilkompensationen auf den Gesamtzusammenbau der Motorhaube anhand der Simulationsergebnisse der Rückfederung analysiert.

Zunächst wurde das Innenteil hinten mittels der CAD-Daten in der Mitte des Bauteils um ca. 3 mm überbogen, um zum einen dem Einfallen durch die Schwerkraft und zum anderen der Formabweichung durch den Falzprozess in diesem Bereich entgegenzuwirken. Für die Herstellung des Pressteils bedeutet diese Maßnahme eine neue Zielvorgabe hinsichtlich der Maßhaltigkeit. Dies bedeutet, dass für das Innenteil hinten zwei Geometrien im Datensatz hinterlegt werden, dies sind zum einen der Konstruktionsdatensatz in Soll-Lage (Null-Datensatz) und zum anderen ein um drei Millimeter überbogener Datensatz. Zusätzlich

zur Überbiegung des Innenteils hinten, wurden in der Simulation auch die Spannpositionen der Fügevorrichtungen dem überbogenen Pressteil angepasst (vgl. Abbildung 38).

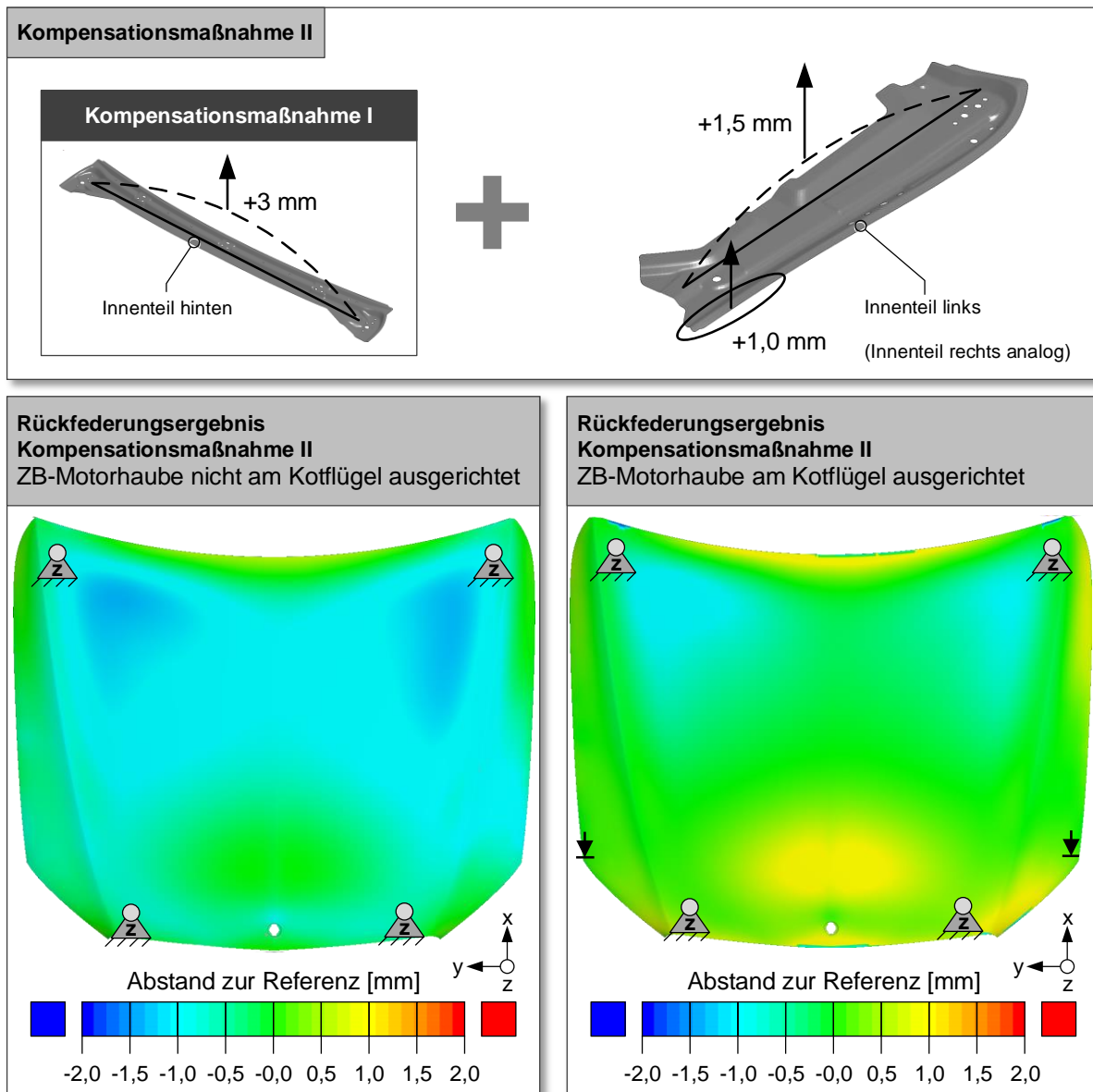
Mit Hilfe der Simulation lässt sich diese Kompensationsmaßnahme nun überprüfen. Dazu wurden sämtliche Einzelteile aus den jeweiligen Umformsimulationen verwendet. Das Innenteil hinten hingegen wurde aus den überbogenen Zielvorgaben abgeleitet. Das Ergebnis dieser ersten Kompensationsmaßnahme zeigt Abbildung 114.



**Abbildung 114:** Ergebnis der ersten Kompensationsmaßnahme - Überbiegung des Innenteils hinten für den ZB-Motorhaube (Nr. 2)

Auf der linken Seite von Abbildung 114 ist die Abweichung zur Soll-Geometrie der Motorhaube vor der Ausrichtung auf den Übergang zum Kotflügel dargestellt, auf der rechten Seite hingegen wurde das Rückfederungsergebnis entsprechend auf den Übergang zum Kotflügel ausgerichtet. Durch diese erste Maßnahme konnte im Bereich des Windschutzes die Maßhaltigkeit bereits deutlich verbessert werden. Im Bereich des Frontmoduls hingegen muss

jedoch eine zusätzliche Maßnahme eingebracht werden, um insbesondere die Formabweichungen resultierend aus dem Ausrichten der Motorhaube auf den Übergang zum Kotflügel zu verbessern.



**Abbildung 115:** Ergebnis der zweiten Kompensationsmaßnahme - Überbiegung des Innenteils hinten und der Innenteile li. / re. für den ZB-Motorhaube (Nr. 2)

In einer zweiten Kompensation wurden aus diesem Grund zusätzlich zur Überbiegung des Innenteils hinten die beiden Pressteile Innenteil li. / re. überbogen. Die Überbiegung erfolgte auch bei diesen Bauteilen auf Basis der CAD-Daten. Die Bauteile wurden zum einen in x-Achsenrichtung überwölbt (+1,5 mm) und zusätzlich wurde der Flansch im Falzbereich Kotflügel-Leuchten leicht überbogen (+1 mm). Das Ergebnis der Rückfederungsberechnung für beide Kompensationsmaßnahmen ist in Abbildung 115 dargestellt.

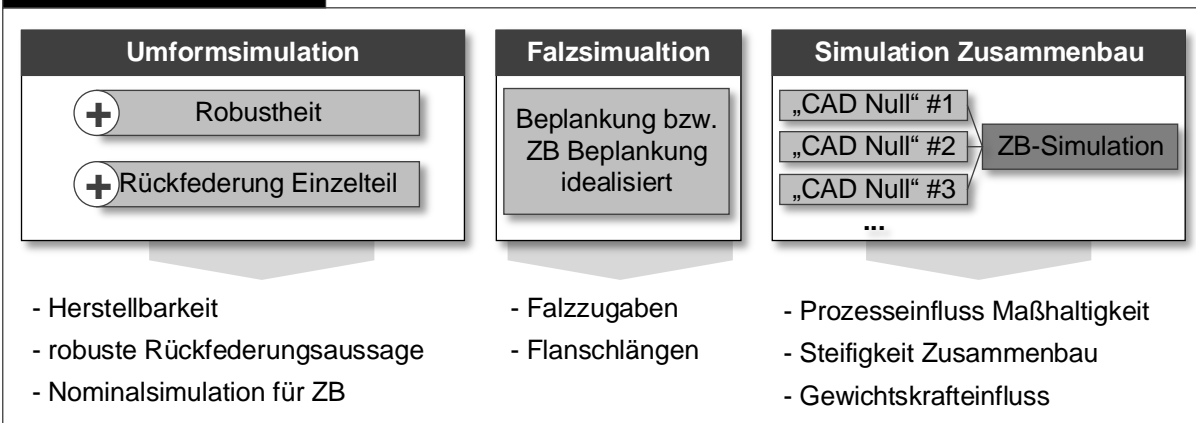
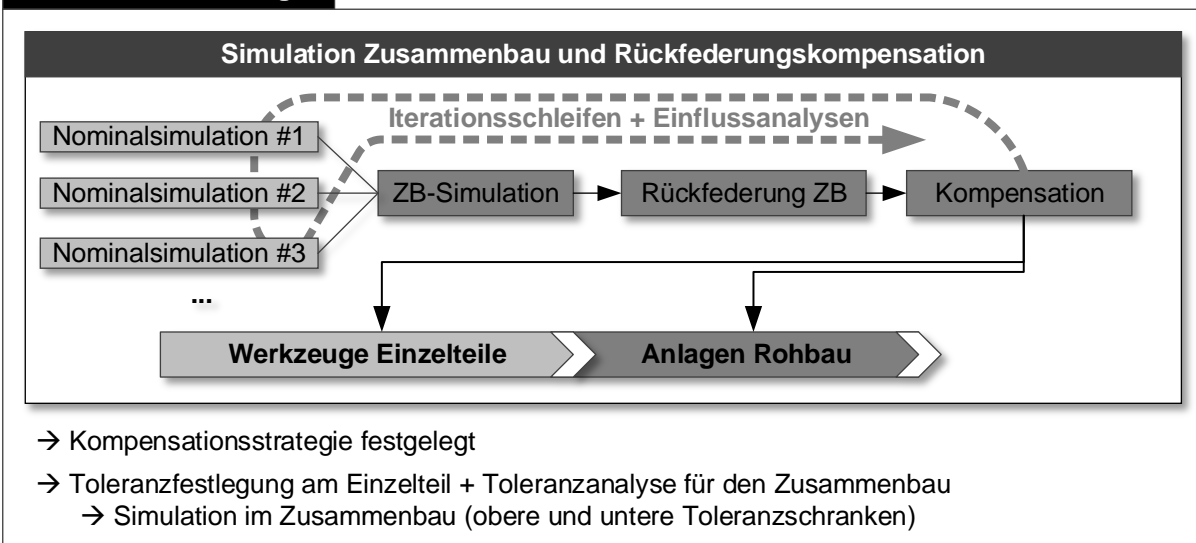
Aus den Simulationsergebnissen lässt sich nun ableiten, dass durch die beiden Kompensationsmaßnahmen bzw. Maßvorgaben für die Innenteile hinten sowie Innenteil li. / re. die Maßhaltigkeit der Motorhaube deutlich verbessert werden kann. Für die restlichen drei Pressteile des Zusammenbaus des Innenteils waren folglich keine Kompensationsmaßnahmen notwendig. Die Rückfederung dieser Einzelteile hat auf die Maßhaltigkeit des Gesamtzusammenbaus nur einen geringfügigen Einfluss gezeigt.

## **7.4 Kompensationsstrategie mit Hilfe der durchgängigen Prozesssimulation**

Aus der anhand der Motorhaube in diesem Kapitel beschriebenen Vorgehensweise soll im Folgenden mit Hilfe der durchgängigen Prozesssimulation eine verallgemeinerte Methode zur Kompensation der Rückfederung und Verbesserung der Maßhaltigkeit von Zusammenbauten abgeleitet werden. Grundlage für diese Methode soll die digitale Produktionsabsicherung zur Verbesserung der Maßhaltigkeit sein, um zukünftig Versuche in Form von Prototypen teilweise zu reduzieren oder idealerweise vollständig überflüssig zu machen.

Ausgangspunkt für eine Kompensation auf Basis der Rückfederungsberechnung im Zusammenbau sind die Umformsimulationen und Rückfederungsberechnungen bezüglich der Einzelteile. Hierzu sollten in einem ersten Schritt der Produktbeeinflussung (vgl. Abbildung 116) simulierte Rückfederungsergebnisse der einzelnen Pressteile vorliegen, die in Robustheitsanalysen unter definierten Prozessparameterschwankungen ein stabiles Rückfederungsverhalten zeigen. Parallel zu den Umformsimulationen kann unter der Annahme idealisierter Pressteile (auf Basis des CAD-Konstruktionsdatensatzes) der Einfluss der Schwerkraft sowie der einzelnen Fertigungsprozesse (in diesem Fall der Falzprozess) auf den Zusammenbau untersucht werden.

In einem zweiten Schritt kann mit Hilfe der Rückfederungsergebnisse der Nominalsimulationen (aus der Robustheitsanalyse) der Pressteile, die Rückfederung des Zusammenbaus berechnet werden. In diesem Simulationsschritt lässt sich mit Hilfe von Variationsrechnungen der Einfluss der jeweiligen Einzelteile auf die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus analysieren, um daraus entsprechende Kompensationsmaßnahmen abzuleiten. Entgegen der derzeitigen Vorgehensweise erfolgt die Rückfederungskompensation somit nicht mehr auf Basis der Einzelteilsimulation, sondern auf der des Zusammenbaus. Ist eine zielführende Kompensationsstrategie gefunden, lassen sich daraus beispielsweise überbogene Konstruktionsdatensätze für die jeweiligen Einzelteile ableiten und die dafür korrespondierenden Toleranzvorgaben definieren. Die Toleranzvorgaben können dabei gemäß dem Einfluss des Einzelteils auf die Maßhaltigkeit des Zusammenbaus gewählt werden. Überdies hinaus könnten die so definierten oberen und unteren Toleranzschranken durch die numerische Zusammenbausimulation abgesichert werden.

**Produktbeeinflussung I****Produktbeeinflussung II**

**Abbildung 116:** Kompensationsstrategie mit Hilfe der durchgängigen Prozesssimulation [Kae14]

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der digitalen Absicherung der Maßhaltigkeit von Zusammenbaugruppen im Karosseriebau. Fokussiert werden dabei die Fügeprozesse Clinchen und Rollfalzen von mehreren Pressteilen für Klappen- und Anbauteile. Übergreifendes Ziel dieser Arbeit stellt dabei die numerische Simulation der Produktionsprozesse im Presswerk sowie im Karosseriebau dar mit dem Ziel einer Maßhaltigkeitsprognose. Die Rückfederungsberechnung, wie sie bei Pressteilen schon seit einigen Jahren etabliert ist, wird dabei auf mehrteilig gefügte Baugruppen erweitert. Einen Schwerpunkt bildet der Rollfalzprozess, der die Bepunktung mit dem Innenteil verbindet.

In Kapitel 2 wird der derzeitige Stand der Technik im Karosseriebau aufgezeigt. Die zentralen Aspekte bildeten dabei zunächst die Bauweisen der Karosserie, der Produktentstehungsprozess, die verfahrenstechnischen Grundlagen, die heutigen Qualitätskriterien im Karosseriebau, Ursachen für Maßabweichungen sowie die Simulationsmethoden, welche heutzutage zur digitalen Absicherung der Fertigungsprozesse im Einsatz sind.

Am Beispiel des Zusammenbaus einer Motorhaube, welche im vorliegenden Fall aus insgesamt neun Pressteilen aufgebaut ist, wurde in Kapitel 4 der Fertigungsprozess von der Platine bis zum fertig lackierten Zusammenbau beschrieben. Optische Messungen nach jedem einzelnen Prozessschritt geben Aufschluss darüber, wie sich die Maßhaltigkeit im Laufe der Produktentstehung entwickelt und wie diese beeinflusst wird. Von besonderer Bedeutung sind dabei das Zusammenwirken aus der Einzelteilabweichung und die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf den Zusammenbau.

Auf Basis der Messergebnisse entlang der Fertigung der Motorhaube aus Kapitel 4 wurden in Kapitel 5 Methoden entwickelt, um den Produktionsprozess mit Hilfe numerischer Prozesssimulationen digital abzubilden. Die essentiellen Bausteine bestehen darin, die wesentlichen Fertigungsschritte in einzelne Simulationsschritte zu transferieren. Im Bereich des Karosseriebaus sind dies vor allem die Spann- und Ausrichtkonzepte der Pressteile zueinander sowie die Abbildung der einzelnen Fügeverfahren. Herausfordernd war es, die Fügeprozesse derart vereinfacht abzubilden, dass bei derzeitig verfügbarer Rechenleistung die wesentlichen Einflussgrößen auf die Maßhaltigkeit hinreichend genau abgebildet werden konnten. Eine weitere Anforderung an die Simulationsmethode stellte die schnellstmögliche Generierung des Simulationsinputs aus den vorhandenen Produkt- und Prozessdaten, wie sie derzeit im PLM-System oder den CAD-Daten abgelegt sind, dar. Nur dadurch konnte gewährleistet werden, dass die Simulationsmethodik in den derzeitigen digitalen Absicherungsprozess integriert und zukünftig im Serieneinsatz verwendet werden kann.

Die Validierung der Simulationsmethodik zur ganzheitlichen numerischen Maßhaltigkeitsbetrachtung erfolgte in Kapitel 6. Die Simulationsergebnisse für die untersuchte Motorhaube werden dabei den Messungen aus Kapitel 4 gegenübergestellt. Für die einzelnen Pressteile standen für die Zusammenbausimulation jeweils drei unterschiedliche Varianten zur Verfügung. Mit der ersten wurden Einzelteile auf Basis der CAD-Daten idealisiert, mit der zweiten auf Basis von vorangegangenen Umformsimulationen und mit der dritten Variante wurden Einzelteile verwendet, die aus den optischen Einzelteilmessungen aufbereitet wurden.

Die besten Ergebnisse für die rollgefalzte Rückfederungsberechnung konnten mit den Eingangsdaten der Pressteile aus den optischen Messungen erzielt werden. Durch die Zusammenbausimulation konnte die Maßhaltigkeit bis auf Abweichungen kleiner als 0,3 mm prognostiziert werden. Doch auch aus den Umformsimulationen konnten im Zusammenbau Ergebnisse erzielt werden, die sich für eine Einflussanalyse verwenden lassen. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn die Gesamtprozesskette eines Zusammenbaus vollständig digital abgesichert werden soll. Es hat sich jedoch gezeigt, dass Fehler bei der Rückfederungsberechnung der Pressteile auch die Aussagequalität der Zusammenbausimulation verschlechtern.

Im letzten Kapitel wurden anhand einer zweiten Motorhaube mit Hilfe der in dieser Arbeit entwickelten Simulationsmethode numerische Einflussanalysen durchgeführt, um den Zusammenhang zwischen der Maßhaltigkeit der Pressteile des Innenteils sowie der Beplankung zu analysieren. Die Ergebnisse zeigen, dass sich Einzelteile mit Hilfe der Simulation identifizieren lassen, die für die Gesamtmaßhaltigkeit der Baugruppe von besonderer Bedeutung sind. Dadurch ist es möglich, Toleranzen am Einzelteil gezielt festzulegen oder beispielsweise Kompensationsmaßnahmen am Pressteil zu definieren, die aus der Zusammenbausimulation abgeleitet werden. Darin ist mit Sicherheit das größte zukünftige Potenzial der Simulationsmethode zu sehen. In der vorliegenden Arbeit wurde dieses exemplarisch für eine zweite untersuchte Motorhaube angewendet und validiert. Gezielte Einzelteilüberwölbungen haben in der Simulation zu einer schnellen Verbesserung der Maßhaltigkeit des Zusammenbaus geführt.

Im Rahmen dieser Doktorarbeit konnte somit eine Methode entwickelt werden, die den sequentiellen Aufbau einer Zusammenbausimulation zur Bestimmung der Maßhaltigkeit gefügter Pressteile beschreibt. In der digitalen Phase des Produktentstehungsprozesses ergeben sich dadurch neue bzw. erweiterte Möglichkeiten frühzeitig auf die Verbesserung der Maßhaltigkeit Einfluss zu nehmen. Insbesondere kann durch die ganzheitliche Betrachtung der Produktionsprozesse im Presswerk und Rohbau die Definition der Kompensationsstrategie auf Basis der Zusammenbausimulation erfolgen.

## 8.2 Ausblick

Mit dieser Arbeit wurde aufgezeigt, dass eine durchgängige Prozesssimulation für die Fertigungsschritte Umformen und Fügen der Einzelteile, insbesondere durch Rollfalzen, hinsichtlich genauer Analysen der sich einstellenden Maßhaltigkeit möglich ist. Die Qualität der Rückfederungssimulation im Zusammenbau hängt jedoch sehr stark von der Maßhaltigkeit der Einzelteile ab. Folglich muss die konsequente Verbesserung der Umformsimulation im Hinblick auf die möglichst exakte Prognose der Rückfederung, wie sie in der vergangenen Dekade vorangetrieben wurde, auch weiterhin erfolgen. Hierbei muss sich in der Praxis vor allem der Einsatz von Robustheitsanalysen im digitalen Absicherungsprozess weiter festigen. Nur so lässt sich sicherstellen, dass ein robustes Rückfederungsergebnis als Eingangsgröße für die Zusammenbausimulation zum Serienanlauf vorliegt.

Die eingangs dieser Arbeit vorgestellten Fügeverfahren, die derzeit im Karosseriebau zur Anwendung kommen, müssen ebenso in die Simulationsmethode integriert werden, da sich nur auf diese Weise der Anwendungsbereich erweitern lässt. Schwerpunkte bilden dabei vor allem die thermischen Fügeverfahren. Auch an dieser Stelle gilt es, diese beispielsweise durch einfache Ersatzmodelle in den Gesamtsimulationsprozess einzubinden. Dies ist für eine Anwendung in der frühen Phase der Produktentwicklung und Produktionsplanung sowie im Hinblick auf die derzeit verfügbare Rechenleistung sicherlich ausreichend.

Um die Vorteile der Simulationsmethode, insbesondere in der Kompensation der Rückfederung der gesamten Baugruppe, zukünftig nutzen zu können, sind vor allem folgende Punkte von wesentlicher Bedeutung:

- Verlässliches Rückfederungsergebnis der Einzelteile.
- Schneller Simulationsaufbau in einer benutzerfreundlichen GUI, im Idealfall mit direkter Anbindung an das PLM-System.
- Akzeptable Rechenzeiten, um auch Variationsrechnungen durchführen zu können.
- Die Qualität der Simulationsergebnisse muss dem Reifegrad der Eingangsgrößen entsprechen.

Diese Punkte setzen jedoch zudem voraus, dass sich die Sichtweise des Anwenders auf den gesamtheitlichen Produktionsprozess erweitert. Nur dadurch können Kostenpotentiale ausgeschöpft werden, die sich durch eine schnellere Optimierung der Werkzeuge und Anlagen sowie der gezielten Toleranzfestlegung ergeben.



## 9 Literaturverzeichnis

- [Ada95] Adam, H., *Leichtbau im Karosseriebau - Werkstoffe und Bauweisen*. 5. Aachener Kolloquium Fahrzeug- u. Motorentech, Aachen 1995.
- [Alb10] Albiez, C. und Liewald, M., *Bewertung der Oberflächenqualität von Blechbauteilen nach thermischen Prozessen*. WT Werkstattstechnik online Ausgabe 10-2010, VDI Springer Verlag, 2010.
- [Alb11] Albiez, C. und Liewald, M., *Enhanced requirements for surface quality for outer car body shells according to thermal manufacturing processes*. Key Engineering Materials Vol. 473, S. 857-964, 2011.
- [Alb12] Albiez, C., Liewald, M., Schmidel, O. und Görres, A., *Virtuelle Produkt- und Prozessabsicherung - der Lacktrocknungsprozesse*. Institut für Umformtechnik IFU Universität Stuttgart, Neuere Entwicklungen in der Blechumformung, Fellbach 2012.
- [Ann11] Annen, C., *Methodik der Prozessmodellierung für die robuste Auslegung und Beherrschung mehrstufiger, adaptiver Ziehprozesse*. Dissertation, Institut für Virtuelle Produktion, ETH Zürich 2011.
- [Ans16] BETA CAE Systems, *ANSA - the advanced CAE pre-processing software for complete model build up*, <https://www.beta-cae.com/ansa.htm>, 08.03.2016
- [Atz98] Atzema, E. H. und Baartman, R., *Finite element simulation of the hemming process*. Proceedings of the Numiform, S. 933-939, Enschede 1998.
- [Aut13] Expo, A. E., *Aktuelle Trends im Karosseriebau*. Presseinformationen / Expertengespräch: Klaus Koglin, Januar 2013, <https://www.automotive-engineering-expo.com/de/presse/presseinformationen/automotive-engineering-expo-2013-aktuelle-trends-im-karosseriebau--pressnews>.
- [Aut15] AutoForm Engineering GmbH, *AutoForm plus R6 – Ein neues Set leistungsstarker Funktionalitäten zur Erweiterung der digitalen Prozesskette*. Mitteilung auf der Homepage vom 10. Juni 2015 <http://www.autoform.com/de/aktuelles/mitteilungen/autoform-plus-r6-erweiterung-der-digitalen-prozesskette/>.

- [Awi10] Awizsus, B., Bolck, S., Leck, L., Brylla, U. und Pinner, S., *Durchgängige Simulationsprozesskette in der Fahrzeugentwicklung*. Neuere Entwicklungen in der Blechumformung 2010, Institut für Umformtechnik IFU, Universität Stuttgart, Fellbach 2010.
- [Bac00] Bachhofer, A., *Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karosseriebau*. Dissertation, Universität Stuttgart, Laser in der Materialbearbeitung IFSW, 2000.
- [Ban04] Banabic, D., Kuwabara, T. und Comsa, D. S., *An anisotropic yield criterion for sheet metals*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 157-158, S. 462-465, 2004.
- [Ban10] Banabic, D., *Constitutive modelling and numerical simulation*. 1. Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg 2010, ISBN 978-3-540-88112-4.
- [Bar03] Barlat, F. et al., *Plane stress yield function for aluminum alloy sheets—part 1: theory*. International Journal of Plasticity, Band 19, S. 1297-1319, 2003.
- [Bar05] Bargel, H.-J. und Schulze, G., *Werkstoffkunde*. VDI-Buch, 9. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2005, ISBN 978-3-540-26107-9.
- [Bar08] Bartos, R., *Aktuelle Stahlsorten und Konstruktionsweisen für tragende Bleche und Profile*. Beitrag in Konstruktions Praxis, 09.01.2008, <http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/themen/werkstoffe/metalle/articles/114297/>.
- [Bar11] Barlat, F. et al., *An alternative to kinematic hardening in classical plasticity*. International Journal of Plasticity 27, S. 1309-1327, 2011.
- [Bat84] Bathe, K. J. und Dvorkin, E. N., *A Continuum Mechanics Based Four Node Shell*. International Journal in Computer-Aided Engineering and Software 1, 1984, S. 77–88.
- [Bat02] Bathe, K. J. und Zimmermann, P., *Finite-Elemente-Methoden*. Springer Verlag, 2. Auflage, 2002, ISBN: 978-3-540-66806-0.
- [Bau05] Baumgarten, J. und Plapper, P., *Numerical Analysis of High Speed Roller Hemming Processes*. 4. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg 20.10.2005.
- [Bay05] Bayerische Motoren Werke AG, *Anlage zum geometrischen Fügen eines Karosseriegerippes*. Patentschrift: DE102005036463A1; Erfinder: Ibron, Walter; Anmeldedatum: 03.08.2005.

- [Bay13] Bayer, J., Collisi, T. und Wenzel, S., *Simulation in der Automobilproduktion*. Springer Verlag Heidelberg, Berlin 2013, ISBN 978-3-642-55720-0.
- [Bel08] Belytschko, T., Liu, W. K. und Moran, B., *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*. Wiley Verlag, 2008.
- [Bey03] Beyer, J., Collisi, T. und Wenzel, S., *Simulation in der Automobilproduktion*. Springer Verlag, Heidelberg, New York 2003, ISBN 978-3-642-55720-0.
- [Bir13] Birkert, A., Haage, S. und Straub, M., *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile. Auslegung von Ziehanlagen*. Springer Vieweg Verlag, Berlin, Heidelberg 2013, ISBN 978-3-642-34670-5.
- [Blö01] Blöck, M., *Aluminium-Karosserieblech: Werkstoffe und Oberflächenvorbehandlungen als Systemlösung*. Vortrag an der ETH Zürich, Material Days 18.05.2001.
- [Boh98] Bohn, M., *Toleranzmanagement im Entwicklungsprozess: Reduzierung der Auswirkung von Toleranzen auf Zusammenbauten der Automobil-Karosserie*. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Karlsruhe 1998.
- [Boh13] Bohn, M. und Hetsch, K., *Toleranzmanagement im Automobilbau*. Carl Hanser Verlag, München 2013, ISBN 978-3-446-43496-7.
- [Bon09] Bonitz, P., *Freiformflächen in der rechnerunterstützten Karosseriekonstruktion und im Industriedesign*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2009, ISBN 978-3-540-79439-4
- [Bra07] Braess, D., *Finite Elemente - Theorie, schnelle Löser und Anwendungen in der Elastizitätstheorie*. 4. überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg 2007, ISBN 978-3-540-72449-0.
- [Bra11] Bracht, U., Geckler, D. und Wenzel, S., *Anwendungen der Digitalen Fabrik*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2011, ISBN 978-3-540-89038-6.
- [Bra13] Braess, H.-H. und Seiffert, U., *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 7. Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg 2013, ISBN 978-3-658-01691-3.
- [Buc11] Buchitz, I., Fritsche, D., Hillmann, M., Burchitz, I. A. und Grundmann, G., *Efficient planning and numerical analysis of industrial hemming processes*. Proceedings of the 8th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, Numisheet 2011, Seoul 21.-28.08.2011.

- [Bud03] Budde, L., *Technische Innovationen und Trends in der Fügetechnik - Alternativen und / oder Ergänzungen zum Schrauben*. Jahres-Mitgliederversammlung des FDS, München 15.05.2003.
- [Bur08] Burchitz, I. A., *Improvement of Springback Prediction in Sheet Metal Forming*. PHD Thesis, Universität Twente 2008.
- [Cai05] Cai, W., Wang, P. C. und Yang, W., *Assembly dimensional prediction for self-piercing riveted aluminum panels*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 45, Issue 6, 2005, S. 695–704.
- [Cer07] Ceretti, E., Attanasio, A., Fiorentino, A. und Giardini, C., *Sheet Hemming with Rolling Tools: Analysis and Optimization of the Part Quality*. Key Engineering Materials, Vol. 344, S. 357-364, Sheet Metal 2007.
- [Cha08] Chaboche, J. L., *A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories*. International Journal of Plasticity 24, S. 1642-1693, 2008.
- [Cha11] Chapelle, D. und Bathe, K.-J., *The Finite Element Analysis of Shells - Fundamentals*. Springer Verlag Berlin, Heidelberg 2011, ISBN 978-3-642-16407-1.
- [Dai15] Daimler Media Site: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/>, 20.09.2015.
- [Den11a] Denninger, R., Liewald, M. und Sindel, M., *Contribution towards improved determination of bending properties of light-weight sheet metal materials*. European Conference on Aluminium Alloys. ECAA 2011, Bremen 2011.
- [Den11b] Denninger, R., Liewald, M., Held, C. und Sindel, M., *Investigations On Bendability Of Leight Weight Materials For Various Load Paths*. The 14th International ESAFORM Conference on Material Forming, Belfast 2011.
- [Den14] Denninger, R., *Beitrag zur Prozessabsicherung des Einsatzes von Aluminiumblechwerkstoffen für Fahrzeugkoarrosserien*. Dissertation, Institut für Umformtechnik IFU, Universität Stuttgart 2014.
- [DIN755] DIN EN 755-2, *Aluminium und Aluminiumlegierungen - Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile - Teil 2: Mechanische Eigenschaften*. Beuth Verlag, Berlin 2013.
- [DIN8580] DIN 8580, *Einteilung der Fertigungsverfahren, Begriffe, Einteilung*. Beuth Verlag, Berlin 2003.
- [DIN8582] DIN 8582, *Fertigungsverfahren durch Umformen - Begriffe, Einteilung*. Beuth Verlag, Berlin 2003.

- [DIN8593] DIN 8593, *Fertigungsverfahren Fügen. Teil 5: Fügen durch Umformen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Beuth Verlag, Berlin 2003.
- [Doe07] Doege, E. und Behrens, B.-A., *Handbuch Umformtechnik*. 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2007, ISBN 978-3-540-48924-5.
- [Dyl02a] Dylan, T., Galbraith, C., Bull, M. und Finn, M. J., *Prediction of Springback and Final Shape in Stamped Automotive assemblies: Comparison of Finite element Predictions and Experiments*. International Body Engineering Conference & SAE Technical Paper Series, 2002-01-2063, S. 1-11, Exhibition and Automotive & Transportation Technology Conference Paris 09.-11.07.2002.
- [Eck11a] Eckert, A., Altermann, T., Roessinger, M. und Wahl, M., *Beitrag zur Prozesskettensimulation im Karosseriebau*. Pam-Stamp Forum, Landshut 2011.
- [Eck11b] Eckert, A. et al., *Application limits of a method to predict distortion caused by mechanical joining technologies in car body construction*. Numisheet, South Korea 2011.
- [Eck12a] Eckert, A., *Prognose der Maßhaltigkeit punktförmig mechanisch gefügter Karosserieanbauteile*. Dissertation, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz 2012.
- [Eck12b] Eckert, A., Rössinger, M., Schulz, F. und Mauermann, R., *Numerische und experimentelle Toleranzprognose im Karosseriebau*. Fügen im Karosseriebau, Automotive Circle International, Bad Nauheim 17.-19.04.2012.
- [Eis09] Eisele, U. und Roll, K., *Simulation des Rollfalzens mit LS-DYNA*. Vortragsfolien: LS-DYNA Updateforum, <http://www.dynamore.de>, Filderstadt 2009.
- [Eis10a] Eisele, U., Roll, K. und Liewald, M., *Development of an empirical model to determine results from FEA roller hemming processes*. 9. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg 12.10.2010.
- [Eis10b] Eisele, U., Liewald, M. und Roll, K., *New approaches for validation of roller hemming process simulation*. Proceedings of IDDRG 2010, Graz 31.05.-02.06.2010.
- [Eis12] Eisele, U., *Ein Beitrag zur verbesserten Auslegung von Rollfalzprozessen*. Dissertation, Institut für Umformtechnik IFU, Universität Stuttgart 2012.
- [Emr13] Emrich, A., *Systematik zur Robustheitsanalyse von Umformprozessen für Karosseriekomponenten aus Blech*. Dissertation, Institut für Umformtechnik IFU, Universität Stuttgart 2013.

- [Eng89] Engelmann, B. E., Whirley, R. G. und Goudreau, G. L., *A Simple Shell Element Formulation for Large-Scale Elastoplastic Analysis*. Analytical and Computational Models of Shells, ASME CED-Vol. 3, 1989, S. 399–416.
- [Eng91] Engelmann, B. E. und Whirley, R. G., *A New Explicit Shell Element Formulation for Impact Analysis*. Computational Aspects of Contact Impact and Penetration, Elmpress International, Lausanne 1991, S. 51–90.
- [Erh05] Erhart, T., *Implizite Berechnungen mit LS-DYNA - Einführung und Anwendungsbeispiele*. DYNAMore GmbH, Stuttgart 30.06.2005.
- [Fel14] Feldmann, K., Schöppner, V. und Spur, G., *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren Edition Handbuch der Fertigungstechnik*. Carl Hanser Verlag, München 2014, ISBN 978-3-446-42827-0.
- [Feu10] Feucht, M. und Haufe, A., *Damage and Failure Models in LS-DYNA*. Nordic LS-DYNA Users Forum, 2010.
- [Fle09] Fleischer, M., *Absicherung der virtuellen Prozesskette für Folgeoperationen in der Umformtechnik*. Dissertation, Universität München 2009.
- [FOS09] FOSTA Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., *Rückfederung von Blechbauteilen – Verbesserte Simulation und experimentelle Untersuchung des Phänomens an Praxisbauteilen des Automobilbaus*. Abschlussbericht P734, 2009.
- [Fri04] Fritz, A. H., *Fertigungstechnik*. 6. neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg 2004, ISBN 978-3-540-00598-8.
- [Fri08] Friedrich, H. E., Treffinger, P., Kopp, G. und Knäbel, H., *Werkstoffe und Bauweisen ermöglichen neue Fahrzeugkonzepte*. In: Forschung für das Auto von Morgen, Herausgeber: Schindler, V., Springer Verlag Berlin Heidelberg 2008, ISBN 978-3-540-74150-3.
- [Gal03] Galbraith, C., Thomas, D. und Finn, M. J., *Manufacturing simulation of an automotive hood assembly*. 4th European LS-Dyna Conference, Ulm 2003.
- [Gal05] Galanulis, K., Friebe, H. und Reich, C., *Optische Messung in der Blechumformung*. Produktvortrag GOM mbH, Sindelfingen 25.10.2005.
- [GOM14] GOM Gesellschaft für optische Messtechnik, *Anwendungsbeispiel: 3D-Koordinatenmesstechnik - Mobile 3D-Koordinatenmesstechnik*. Produktbeschreibung Messsystem TRITOP, <http://www.gom.com>, 07.05.2014.

- [Gös01] Gössing, H.-P., *Virtuelle Auslegung der Karosseriestruktur für Betriebsbeanspruchungen*. Dissertation, Universität München 2001.
- [Gös10a] Gösling, M. J., *Metamodell unterstützte Simulation und Kompensation von Rückfederungen in der Blechumformung*. Dissertation, Technische Universität Dortmund 2010.
- [Gös10b] Gösling, M. J., Kracker, H., Kuhnt, S., Tekkaya, A. E. und Brosius, A., *Strategies for springback compensation regarding process robustness*. Production Engineering, Band 5, S. 49-57, 26.06.2010.
- [Gov12] Govik, A., Nilsson, L. und Moshfegh, R., *Finite element simulation of the manufacturing process chain of a sheet metal assembly*. Journal of Materials Processing Technology, Band 212, S. 1453-1462, 2012.
- [Gov13] Govik, A., Moshfegh, R. und Nilsson, L., *The effects of forming history on sheet metal assembly*. International Journal of Material Forming, 2013.
- [Grä00] Grässel O., Krüger L., Frommeyer G., Meyer L. W.: *High Strength Fe-Mn-(Al,Si) TRIP/TWIP Steels Development-Properties-Application*. International Journal of Plasticity Band 16, S. 1391, 2000
- [Gra12] Grasse, J., *Beitrag zur Gestaltung eines Qualitätsmethodenverbundes in der Karosserieentwicklung und -planung*. Dissertation, Institut für Verkehrs und Maschinensysteme, Technische Universität Berlin 2012.
- [Gro07] Grossenbacher, K., *Virtuelle Planung der Prozessrobustheit in der Blechumformung*. Dissertation, Institut für Virtuelle Produktion, ETH Zürich 2007.
- [Güh02] Gühning, J., *3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion*. Dissertation, Universität Stuttgart 2002.
- [Haa11] Haage, S., *Reducing tryout efforts - by effective application of the simulation for springback compensation*. Tools and Technology for Processing Ultra High Strength Materials (TTP 2011), Graz 19.-21.09.2011.
- [Har04] Harnau, M., *Finite Volumen- und Schalenelemente für große Deformationen und Kontakt*. Dissertation, Universität Karlsruhe 2004.
- [Hau10a] Haufe, A., *Blechumformung mit LS-DYNA*. Umforminfotag - Oktober 2010, DYNAMore GmbH, Stuttgart 29.10.2010.

- [Hau10b] Haufe, A., Pietsch, G., Graf, T. und Feucht, M., *Modelling of Weld and Adhesive Connections in Crashworthiness Applications with LS-DYNA*. NAFEMS Seminar, Wiesbaden 28.-29.04.2010.
- [Hei14] Heizmann, J., Walzl, H. und Rothenpieler, H.-J., *Optimierung von Produktionsprozessen, Vom Design zum Produkt – Produkt- und Betriebsmittelentwicklung, Produktionsstrategien und Innovationen*. Technische Universität Chemnitz, Vorlesungsunterlagen Fertigungsstrategie im Automobilbau, Sommersemester 2014, [https://www.tu-chemnitz.de/mb/WerkzMasch/studium/lehrvst/fertstrat\\_automobil/vorlesung/Pruefungsskript\\_Schwerpunkte\\_SS2014.pdf](https://www.tu-chemnitz.de/mb/WerkzMasch/studium/lehrvst/fertstrat_automobil/vorlesung/Pruefungsskript_Schwerpunkte_SS2014.pdf).
- [Hen11] Henning, F. und Elvira, M., *Handbuch Leichtbau - Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. Carl Hanser Verlag, München, Wien 2011.
- [Hoc04] Hochholdinger, B. *Validierung der Rückfederungssimulation für hochfeste Stähle und Aluminium mit LS-DYNA*. 3. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg 14.-15.10.2004.
- [Hoe13a] Hönle, S. und Liewald, M., *Prozesssichere Gestaltung von Maschinenfalzprozessen unter Berücksichtigung der Werkstoffbeanspruchung von Karosseriekomponenten aus Blech*. 20. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Dresden 2013.
- [Hoe13b] Hönle, S. und Liewald, M., *Beitrag zur Bewertung der Biegebeanspruchung beim Falzen von Aluminiumblechwerkstoffen*. UTFsciense 2/2013, Verlag Meisenbach GmbH Verlag, Bamberg 2013.
- [Hof12] Hofer, P., Kaschnitz, E. und Schumacher, P., *Messung und Simulation von Verzug und Eigenspannung in Druckgussteilen*. GIESSEREI (99), 2012.
- [Hor01] Hora, P., *On the way from a simple FE-model to a virtual reality*. Simulation of Materials Processing, S. 35-43, 2001.
- [ISO5458] Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Bezüge und Bezugssysteme (ISO 5459:2011); Deutsche Fassung EN ISO 5459:2011; Ausgabedatum: 2013-05
- [ISO5459] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): *Technische Zeichnungen, Form- und Lagetolerierung: Bezüge und Bezugssysteme für geometrische Toleranzen*. EN ISO 5459, Ersatz für Ausgabe 1982. Berlin: Beuth Verlag, 2011
- [Jen07] Jensen, M. R., *Introduction to LS-DYNA Implicit - Version 1.0*. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California 2007.



- [Jer03] Jernberg, A., *A method for modifying the forming tool geometry in order to compensate for springback effects*. 4th European LS-DYNA Users Conference, Ulm 22.-23.05.2003.
- [Jon06] Jonkers, B., *Simulation of the Roboter roller Hemming process*. Dissertation, Department of Mechanical Engineering - Applied mechanics, Universität Twente 2006.
- [Jor14] Jorden, W. und Schütte, W., *Form- und Lagetoleranzen - Handbuch für Studium und Praxis*. Carl Hanser Verlag, München 2014.
- [Kae12] Kästle, C, Liewald, M. und Roll, K., *Prozesssimulation von Karosseriebaugruppen unter Einbeziehung der Fertigungsschritte Umformen im Presswerk und Rollfalzen im Rohbau*. 19. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Chemnitz 2013.
- [Kae13a] Kästle, C., Liewald, M. und Roll, K., *Springback simulation of the Process chain press line forming and roller hemming processes*. Trans Tech Publications, Key Engineering Materials Vol. 549 2013 S. 231-238.
- [Kae13b] Kästle, C., Liewald, M. und Roll, K., *Rückfederungsberechnung von Karosserieunterbaugruppen im Zusammenbau*. 33. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung, Fellbach 2013.
- [Kae13c] Kästle, C., Liewald, M. und Roll, K., *Potentials of finite element bodyshell work process simulations*. 6th Forming Technology Forum 2013, Herrsching 2013.
- [Kae14] Kästle, C., Liewald, M., und Roll, K., *Simulative Rückfederung von Blechformteilen im Zusammenbau*. 17. Workshop Simulation in der Umformtechnik, Stuttgart 2014.
- [Kar11] Karsten, O., Schimanski, K. und von Hehl, A., *Ursachen und Einflussgrößen des Verzugs in der Prozesskette eines Aluminium-Druckgussteils*. Journal of heat treatment and materials (66-3), 2011.
- [Kie07] Kiefer, J., *Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosseriebau*. Dissertation, Universität des Saarlandes, Lehrstuhl Fertigungstechnik, 2007.
- [Kes07] Kessler, L., Gerlach, J. und Rösen, H., *Weiterentwicklung der Umformsimulation für Stahlwerkstoffe – Konsequenzen für den Anwender*. 6. LS-Dyna Anwenderforum, Frankenthal 2007.

- [Kle02] Klein, B., *Statische Tolerierung*. Carl Hanser Verlag, München 2002, ISBN 978-3-446-22117-8.
- [Kle06] Klein, B., *Toleranzmanagement in Maschinen- und Fahrzeugbau*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München 2006, ISBN 978-3-486-57850-8.
- [Kle07] Kleinpeter, B., *Innovative Fügekonzepte für modularisierte Fahrzeugstrukturen in Mischbauweise*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig 2007.
- [Kle10] Klein, B., *FEM - Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. 8. verbesserte und erweiterte Auflage, Vieweg + Teubner-Verlag, Wiesbaden 2010, ISBN 978-3-8348-0844-8.
- [Klo06] Klocke, F. und König, W., *Fertigungsverfahren 4 - Umformen*. 5. neu bearbeitete Auflage, VDI-Buch, Springer Verlag Berlin, Heidelberg 2006, ISBN 978-3-540-39533-1.
- [Klo04] Klocke, M., Schinke, W. u. Dollmann, H., *Optimierte Prozesskette im Ziehwerkzeugbau*. Sonderdruck aus CAD-CAM Report Nr. 11 November 2004
- [Klö13] Klöpfer, E., *Moderne Stahlvielfalt mit Blickpunkt Zukunft was die Automobilindustrie erwarten dar*. Vortrag auf der Hannover Messe - 13. Werkstoff-Forum: Das Forum für Werkstoff-, Fertigungs- und Anwendungsfragen, Hannover, 09.04.2013.
- [Kra05] Krasovskyy, A., *Verbesserte Vorhersage der Rückfederung bei der Blechumformung durch weiterentwickelte Werkstoffmodelle*. Dissertation, Universität Karlsruhe 2005.
- [Kri07] Krieg, T., *Untersuchung verschiedener Einflussgrößen auf den Falzvorgang zur Evaluierung der Falzsimulation*. Diplomarbeit, Hochschule Esslingen 2007.
- [Küh06] Kühn, W., *Digitale Fabrik - Fabriksimulation für Produktionsplaner*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2006, ISBN 978-3-446-40619-3.
- [Kuk14] KUKA Roboter GmbH, *Vollgas für die Produktion: Produktbeschreibung*. [http://www.kuka-systems.com/NR/rdonlyres/4CF66B50-0A1E-4090-9B42-3E0FC246903A/0/LI\\_0372Br\\_Automotive\\_Web\\_D.pdf](http://www.kuka-systems.com/NR/rdonlyres/4CF66B50-0A1E-4090-9B42-3E0FC246903A/0/LI_0372Br_Automotive_Web_D.pdf), 28.07.2015.
- [Kün11] Künzel, M., *Möglichkeiten zur Reduktion der Simulationszeiten mit LS-DYNA und eta/DYNAFORM*. LS-Dyna Info-Day 2011, DYNAmore GmbH, Stuttgart 2011.

- [Lan02] Lange, K., *Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft - Grundlagen*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin 2002, ISBN 978-3-540-43686-7.
- [Lan75] Lange, K., *Umformtechnik Band 3: Blechbearbeitung*. Springer Verlag Berlin, Heidelberg 1975, ISBN 978-3-662-22089-4.
- [LeM06a] Le Maoût, N., *Analyse des procédés de sertissage de tôles métalliques*. Dissertation, Université de Bretagne-Sud 2006.
- [LeM06b] Le Maoût, N., Thuillier, S., Manach, P. Y., Debois, D. und Wadoux, J. C., *Numerical Simulation of Flat-Surface Roll hemming: Influence of Geometry and Material Models*. Proceedings of IDDRG 2006, Porto 19.-21.06.2006.
- [Lem99] Lemke, T., *Simulation des Abkantens und Falzens mit Hilfe der Finiten Elemente Methode*. Diplomarbeit, Daimler AG, Sindelfingen 1999.
- [Leu10] Leuschel, R., *Toleranzmanagement in der Produktentwicklung am Beispiel der Karosserie im Automobilbau*. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg 2010.
- [Lie09] Liewald, M., Blach, C., *Approaches for Evaluation of Robustness and Optimization of Manufacturing Processes in Sheet Metal Press Shop*. Proceedings of the 9th International Stuttgart Symposium on Automotive and Engine Technology 2009, FKFS, Stuttgart 2009.
- [Lie12] Liewald, M., Wagner, S., *Recent Research Activities in the Field of Sheet Metal Forming at the Institute for Metal Forming Technology*. Internationale Konferenz Neuere Entwicklungen in der Blechumformung, Fellbach 2012.
- [Lie14] Liewald, M., *Neuere Entwicklungen in der Blechumformung*. Vortragstext der gleichnamigen Internationalen Konferenz am 13.-14. Mai 2014 in Fellbach. Verlag Frankfurt/M., ISBN:978-3-88355-400-6.
- [Lie15a] Liewald, M., *Umformtechniker aufgepasst bei Industrie 4.0!*, Werkstattstechnik online, Jahrgang 105 (2015) H. 10, Springer Verlag VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf 2015.
- [Lie15b] Liewald, M., Hönle, S., Sindel, M., *Surface Roughening of an Aluminium 6016 Alloy during Bending and Hemming*. International Journal of Material Forming, 2015.

- [Liv11] Livermore Software Technology Corporation, *Contact Modeling in LS-Dyna*. Livermore Software Technology Corporation, 19.10.2011, <http://www.dynasupport.com/tutorial/ls-dyna-users-guide/contact-modeling-in-ls-dyna>.
- [Liv15] Livermore Software Technology Corporation, *LS-Dyna Theory Manual, Version 03.08.2015*. Livermore Software Technology Corporation 2015.
- [Mak00] Maker, B. N. und Zhu, X., *Input Parameters for Metal Forming Simulation using LS-DYNA*. Livermore Software Technology Corporation, Livermore California 2000.
- [Mak01] Maker, B. N. und Zhu, X., *Input Parameters for Springback Simulation using LS-DYNA*. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California 2001.
- [Mak03] Maker, B. N. und Zhu, X., *A Procedure for Springback Analysis Using LS-DYNA*. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California 2003.
- [Mak08] Maker, B. N., *User's Guide to Static Springback Simulation using LS-DYNA*. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California 2008.
- [Mel12] Meling, F., *Methodik für die Rekombination von Anlagen*. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, 2012.
- [Mem05] Memhard, D. et al., *Entwicklung und Anwendung von Ersatzmodellen für die Modellierung von Klebverbindungen unter Crashbelastung*. 4. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg 20.10.2005.
- [Mey07] Meywerk, M., *CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik*. Springer Verlag Berlin, Heidelberg 2007, ISBN 978-3-540-49866-7.
- [Müc08] Mücklich, S., *Leichtbaupotenziale durch Einsatz von Leichtmetallen*. Habilitationsschrift, Technische Universität Chemnitz 2008.
- [Mur02] Murata, M., Junhu, L. und Kiyoshi, T., *Simulation for hemming of aluminium sheet metals*. Materials Science Forum, Vol. 396/402, Part 3, S. 1629-1634, 2002.

- [Mut05] Muthler, A., *Berechnung der elastischen Rückfederung von Tiefziehbauteilen mit der p-Version der Finite-Elemente-Methode*. Dissertation, Universität München 2005.
- [Neu11] Neugebauer, R. et al., *Prediction Dimensional Accuracy of Mechanically Joined Car Body Assemblies*. Duflou J.R. et al.: Key Engineering Materials, Band 473, S. 973-980, Sheet Metal 2011.
- [Neu12] Neugebauer, R., Mayer, B. und Michel, S., *Fehlstellen beim Falzkleben im automobilen Rohbau verhindern*. Blechnet, 06.02.2012.
- [Neu13] Neugebauer, R. et al., *Predicting dimensional accuracy of laser welded aluminum add-on body parts*. 15th International Conference on Sheet Metal, SheMet 2013, Belfast 25.-27.03.2013.
- [Neu14] Neugebauer, R., Drossel, W.-G., Rössinger, M., Eckert, A., und Hecht, B., *Roller Hemming Simulation: State of the art and application limits*. Trans Tech Publications, Key Engineering Materials, Vol. 611-612, S. 1062-1070, 2014.
- [Obe12] Oberschelp, C., *Hybride Leichtbaustrukturen für den Karosseriebau – gusswerkstofforientierte Anwendungsuntersuchungen für das Druckgießen*. Dissertation, Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2012.
- [Ost07] Ostermann, F., *Anwendungstechnologie Aluminium: Ein Werkstoffhandbuch*. 2. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, New York 2007, ISBN 978-3-540-71196-4.
- [Pap08] Papadakis, L., *Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains*. Dissertation, Technische Universität München 2008, ISBN 978-3-8316-0813-3.
- [Pat85] Patentschrift JP000061262432A, *Roller type hemming device and its method*. Inhaber: TORAI ENG KK; Erfinder: Sawa Masumi; Japanese Patent Office 1985.
- [Per13] Perret, W., *Welding Simulation of Complex Automotive Welded Assembly - Possibilities and Limits of the Application of Analytical Temperature Field Solutions*. Dissertation, Bundesanstalt für Materialforschung, Berlin 2013, ISBN: 978-3-981-59440-9.
- [Pin14] Pinner, S., *Untersuchung von Methoden zur durchgängigen Prozesskettensimulation im Karosseriebau*. Dissertation, Berichte aus der virtuellen Fertigungstechnik, Technische Universität Chemnitz, Band 10, 2014.

- [Raq14] Raquet, J., *Abstreckziehen - Grenzen und Möglichkeiten in der aktuellen Modelltechnik*. Infotag eta/DYNAFORUM, Attendorn, 12.03.2014.
- [Rei07] Reinstettel, M., *Laboruntersuchung zur Prozessstabilität beim Niet-Clinchen*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz 2007.
- [Röt05] Röhler, B., *Möglichkeiten zur Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften von kaltgewalzten TRIP-Stählen*. Dissertation, Technische Universität München 2005.
- [Roh01] Rohleder, M., *Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen im Produktentstehungsprozess von Blechformteilen*. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Dortmund, Shaker Verlag, Aachen 2001.
- [Rol93] Roll, K., *Numerische Verfahren in der Prozesssimulation in der Umformtechnik*. In: Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 4, Herausgeber K. Lange, S. 330-435, Springer Verlag 1993.
- [Rol02] Roll, K. und Rohleder, M., *Einsatz und Potenzial der Blechumformsimulation im Entwicklungsprozess von Karosserieformteilen*. 17. Umformtechnisches Kolloquium, Hannover 2002.
- [Rol04] Roll, K., Lemke, T. und Wiegang, K., *Simulationsgestützte Kompensation der Rückfederung*. LS-Dyna Anwenderforum, Bamberg 2004.
- [Rol07] Roll, K., *Simulation der Blechumformung - neue Anforderungen und Tendenzen*. Dresdner Freundeskreis der Werkzeugmaschinen- und Steuerungstechnik, 12. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar, Dresden 06.-07.12.2007.
- [Rol11] Roll, K., *Simulation der Prozesskette Blechteilefertigung*. Behrens B.-A.: 20. Umformtechnisches Kolloquium Hannover 23.-24.02.2011.
- [Rol12] Roller, S., *Integrierte Lackierprozess-Simulation an virtuellen Fahrzeugprototypen in der Digitalen Fabrik*. Dissertation, Technische Universität Clausthal 2012, ISBN 978-3-8440-0766-4.
- [Ros15] Rosenschon, M., Merklein und M. Sutter, S., *Evaluation of kinematic hardening models for multiple stress reversals under continuous cyclic shearing and multi-step bending*. 10th European LS-DynaConference, Würzburg 2015.
- [Rus11] Rust, W., *Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen - Kontakt, Geometrie, Material*. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg + Teubner-Verlag, Wiesbaden 2011, ISBN 978-3-8348-1491-3.

- [Sch03a] Schmidt-Jürgensen, R., *Untersuchung zur Simulation rückfederungsbedingter Formabweichung beim Tiefziehen*. Dissertation, Universität Hannover 2003.
- [Sch03b] Schiller, E. F., Roll, K., Wöhlke, G. und Wiegand, K., *Digital manufacturing in press part production*. Modelling and numerical simulation in continuum mechanics, Centro International de Matemática, Coimbra 14.-19.06.2003.
- [Sch04] Schulz, N., *Falztechnik Rollfalzen*. Schulungspräsentation, Daimler AG, Sindelfingen 2004.
- [Sch07a] Schönbach, E., Glanzer, G., Kubli, W., Selig, M und Banabic, D., *Simulation of Secondary Operations and Springback – The Implicit Shell Provides a Precise and Rapid Solution*. Beitrag in: Banabic D.: Advanced Methods in Material Forming, S. 349-360.
- [Sch07b] Schwenk, C., *FE-Simulation des Schweißverzugs laserstrahlgeschweißter dünner Bleche*. Dissertation, Technische Universität Berlin 2007.
- [Sch12] Schröder, M., *Weitere Potenziale der Topologieoptimierung zur Rückfederungskompensation von Blechformteilen*. Dresdner Freundeskreis der Werkzeugmaschinen- und Steuerungstechnik, 12. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar, Dresden 06.-07.12.2007.
- [Sch96] Schuler GmbH, *Handbuch der Umformtechnik*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1996, ISBN 978-3-662-07703-0.
- [Sch99] Schulte, S., *Umformsimulation als fester Bestandteil des Produktentstehungsprozesses bei Audi*. 16. Umformtechnisches Kolloquium, Hannover 26.02.1999.
- [Sie93] Siegert, K., *Untersuchungen über das Falzen (180°-Biegen) von Aluminiumblechen*. EFB-Forschungsbericht Nr. 47, Europäische Forschungsgemeinschaft Blechverarbeitung e.V., Hannover 1993.
- [Sim98] Simo, J. C. und Hughes, T. J. R., *Computational Inelasticity*. Springer Verlag New York 1998, ISBN 978-0-387-22763-4.
- [Ste07] Steinke, P., *Finite-Elemente-Methode*. 2. neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2007, ISBN 978-3-540-72235-9.
- [Ste16] Produktbeschreibung Steinbichler ABIS II - Oberflächeninspektionssystem für unterschiedliche Ausbaustufen und Anlagenkonzepte, 08.03.2016  
<http://optotechnik.zeiss.com/produkte/oberflaecheninspektion-abis/abis-ii>

- [Stü09] Stühmeyer, A., *Implizite und explizite Zeitintegration in der FEM*. ANSYS Competence Center FEM, Hannover, 2009.
- [Sut14] Suttner, S., Rosenschon, M., Merklein, M., *Methodik zur Parameteridentifikation des kinematischen Verfestigungsmodells nach Chaboche und Rousselier*. Tagungsband Werkstoffprüfung, S. 205-210, 2014.
- [Sve00] Svensson, M., *Simulation of hemming of automotive body components with the explicit FE-method*. Proceedings of the ECCOMAS 2000, Barcelona 2000.
- [Sve01] Svensson, M., *Simulation of hemming with different element formulations and time integration methods*. Proceedings of the Numiform, Toyohashi 2001.
- [Sve98] Svensson, M., *Hemming simulation*. Proceedings of the Numiform, S. 933-939, Enschede 1998.
- [Tho13] Thoma, C., Volk, W., Branner, G. und Eibisch, H., *Simulationsgestützte Optimierung der Maßhaltigkeit in der Prozesskette Druckguss*. 5. NEWCAST-Forum im Rahmen der deutschen Gießereitage 2013. 26.04.2013, Fellbach.
- [Tie13] Tietze, O., *Strategische Positionierung in der Automobilbranche: Der Einsatz von virtueller Produktentwicklung und Wertschöpfungsnetzwerken*. Springer Verlag, Heidelberg, Berlin 2013, ISBN 978-3-322-81642-9.
- [Tra09] Trattng, G., *Arbeitskreis Thema Rückfederung: Rückfederung von Blechbauteilen – Verbesserte Simulation und experimentelle Untersuchung des Phänomens an Praxisbauteilen des Automobilbaus*. Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. im Stahl-Zentrum, Düsseldorf 2009, ISBN 3-937567-82-8.
- [VDI3001] VDI-Richtlinie 3001, *Bördelverbindungen im Karosseriebau*. VDI-Verlag, Düsseldorf 1998.
- [Ver05] Verhoeven, H. und Weigert, P., *Über neue methodenplanerische Anforderungen bei der Maßhaltigkeitsoptimierung*. Umdruck zur Vortragsreihe 4. Chemnitzer Karosseriekolloquium, S. 267-286, Chemnitz 2005.
- [Vog10] Vogel, P., *Simulation und Werkzeugkonstruktion in der Blechumformung mit eta/DYNAFORM und LS-DYNA*. DYNAMore GmbH Umforminfotag - Oktober 2010, Stuttgart 29.10.2010, <http://www.dynamore.de/en/downloads/infodays/dokumente/umformsimulation-mit-ls-dyna-und-eta-dynaform>.



- [Vol09] Volk, W., *Virtual engineering and planning process in sheet metal forming*. 7th European LS-DYNA Users Conference, Salzburg 14.-15.05.2009.
- [Vol15] Volk, W., Jocham, D., Gaber, C. und Böttcher, O., *Neue Methodik zur Vorhersage des Materialversagens bei nicht-linearen Dehnwegen*. Konferenzband 35. EFB-Kolloquium 2015 Intermezzo der hybriden Werkstofflösungen.
- [Von02] Von Praun, S., *Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess*. Dissertation, Universität München 2002.
- [Wag13] Wagoner, R. H., Lim, H., Lee, M.-G., *Advanced issues in springback*. International Journal of Plasticity 45, S. 3-30, 2013.
- [Wah11] Wahl, M., Schulz, F., Altermann, T. und Eckert, A., *Die Prozesskettensimulation - ein Beitrag zum virtuellen Karosseriebau*. Car Body Colloquium, Chemnitz 2011.
- [Wal09] Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A. und Olschewski, I., *Strategien in der Automobilindustrie: Technologietrends und Marktentwicklungen*.: Springer Verlag Berlin, Heidelberg 2009, ISBN 978-3-834-89311-6.
- [Wec06] Weckerman, A., Gabbia, A und Weickmann, J., *Optische Prüfung umgeformter Blechbauteile unter Anwendung virtueller Verzugskompensation*. SFB 396, Tagungsband zum Industriekolloquium, Bamberg 2006.
- [Wec12] Weckenmann, A., *Koordinatenmesstechnik - Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. Carl Hanser Verlag, München, Wien 2012, ISBN 978-3-446-40739-8.
- [Wei09] Weigert, P., *Berücksichtigung formänderungsbedingter Effekte (Rückfederung) im Entwicklungsprozess der Methodenplanung von tiefgezogenen Karosseriebauteilen*. Dissertation, Fraunhofer Institut Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Technische Universität Chemnitz 2009.
- [Wei10] Weickmann, J., *Assistenzsystem für die Prüfung von Blechbauteilen mit Mehrkomponenten-Streifenprojektionssystemen unter Anwendung der virtuellen Rückdeformation*. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg 2010.
- [Wie10] Wiegand, K. und Zubeil, M., *Einsatz der Simulation in der Prozesskette Karosseriebau*. 9. LS-Dyna Forum, Bamberg 2010.

- [Wio01] Wiora, G., *Optische 3D-Messtechnik: Präzise Gestaltvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren*. Dissertation, Ruprechts-Karls-Universität Heidelberg 2001.
- [Wri01] Wriggers, P., *Nichtlineare Finite-Element-Methoden*. Springer Verlag, 2001, ISBN: 978-3-540-67747-5.
- [Yoo03] Yoon, J.-W., Barlat, F., Dick, R. E., Chung, K. und Kang, T. J., *Plane stress yield function for aluminum alloy sheets—part II: FE formulation and its implementation*. International Journal of Plasticity, Band 20, S. 495-522, 2003.
- [Yoo07] Yoon, Y. S. et al., *The study of Roller Hemming Process for Aluminium Alloy via Finite Element Analysis and Experimental Investigations*. SAE Technical Paper Series 2007-01-3737, S. 1-9, 4th Asia Pacific Automotive Engineering Conference Hollywood, California August 05.-08.08.2007.
- [Yos98] Yoshida, F., Urabe, M., Toporov, V. V., *Identification of Material Parameter in Constitutive Model for Sheet Metals from Cyclic Bending Tests*. International Journal of Mechanics 40(2-3), S. 237-249, 1998.
- [Yos15] Yoshida, F., Hamasaki, H., Uemori, T., *Modelling of anisotropic hardening of sheet metals including description of Bauschinger effect*. International Journal of Plasticity 75, S. 170-188, 2015.
- [Zei16] Carl Zeiss Industrielle Messtechnik, [http://www.zeiss.de/industrial-metrology/de\\_de/produkte/systeme/horizontalarm-messgeraete/carmet.html](http://www.zeiss.de/industrial-metrology/de_de/produkte/systeme/horizontalarm-messgeraete/carmet.html), Homepage der ZEISS CARMET Produktbeschreibung
- [Zie05] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., und Zhu, J. Z., *The Finite Element Method. Its Basis and Fundamentals*. Elsevier Ltd, 6. Auflage, Elsevier Ltd, Oxford 2005, ISBN 978-075-066320-5.
- [Zha09] Zhang, L., *LS-PrePost: Metal Forming Simulation - Tutorial Manual - Forming*. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California 2009.

## 10 Anhang

*Auszüge aus dem LS-Dyna Simulationsinput der in Kapitel 5 beschriebenen Simulationsmethodik*

Randbedingungen:

---

```
*BOUNDARY_SPC_NODE
$#      nid      cid      dofz      dofry      dofzx
13005468      500      1
13053383      500      1      1
16063943      500      1
16131189      500      1      1
```

Niederhalterkraft

---

```
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$      Niederhalterkraft
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$
$*LOAD_RIGID_BODY
$$#      pid      dof      lcid      sf      cid      m1      m2      m3
$      51      3      51      -1.0      500
$$
$*DEFINE_CURVE_TITLE
$$# title
$Force Niederhalter ramp
$$#      lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
$      51
$$#      a1      o1
$      0.0      0.0
$      0.5      0.0
$      2.5      5.0
$      5.0000000      10.0
$      2000.0000000      10.0
$$
$*CONSTRAINED_RIGID_BODY_STOPPERS
$$#      pid      lcmax      lcmin      psidmx      psidmn      lcvmx      dir      vid
$      51      -52      0      0      0      53      4      503
$$#      tb      td
$      0.0      1.000E+7
$$
```

Austausch für Folgeoperation

---

```
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$      INTERFACE_SPRINGBACK_LSDYNA
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$
$*INTERFACE_SPRINGBACK_LSDYNA
$#      psid      nshv      dynain
100      1000      0
```

## Kontaktbeispiele

```

$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$      Contact
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$
*CONTACT_FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE_MPP_ID
$#      cidtitle
      1 Part 50 - Part 16 / Falzbett - Beplankung
$#  ignore  bucket  lcbucket  ns2track  inititer  parmax  unused  cparm8
      0      20      0          1          0      0.000      0          0
$#  ssid    msid    sstyp    mstyp    sboxid    mboxid    spr      mpr
      50     16     2        2        0         0         1        1
$#  fs      fd      dc      vc      vdc      penchk    bt      dt
      0.05   0.0    0.0     0.0    20.000000  0         0 1.000E+20
$#  sfs     sfm     sst     mst     sfst     sfmt     fsf     vsf
      1.000  1.000                0.000   0.000   0.000   0.000
$#  soft    sofsc1  lcidab  maxpar  sbopt    depth    bsort    frcfrq
      0
$#  penmax  thkopt  shlthk  snlog   isym    i2d3d    sldthk  sldstf
      1          1          1
$#  igap    ignore  dprfac  dtstif                flangl  cid_rcf
      1
$
*CONTACT_AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE_MPP_ID
$#      cidtitle
      2 Part 16 - Part 11 / Beplankung - IT hinten
$#  ignore  bucket  lcbucket  ns2track  inititer  parmax  unused  cparm8
      0      20      0          1          0      0.000      0          0
$#  ssid    msid    sstyp    mstyp    sboxid    mboxid    spr      mpr
      16     11     2        2        0         0         1        1
$#  fs      fd      dc      vc      vdc      penchk    bt      dt
      0.05   0.000   0.000   0.000  20.000000  0         0 1.000E+20
$#  sfs     sfm     sst     mst     sfst     sfmt     fsf     vsf
      1.000  1.000&tblank16 &toff11  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
$#  soft    sofsc1  lcidab  maxpar  sbopt    depth    bsort    frcfrq
      0
$#  penmax  thkopt  shlthk  snlog   isym    i2d3d    sldthk  sldstf
      1          1          1
$#  igap    ignore  dprfac  dtstif                flangl  cid_rcf
      1

```

## Anhang zu Kapitel 5.6.2: Rollendefinition

```

$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$      Part Rolle Softnose 1/2
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
*SET_PART_LIST_TITLE
$# title
Rolle Softnose 1/2
$#      sid      da1      da2      da3      da4
      101      0.000      0.000      0.000      0.000
$#      pid1      pid2      pid3      pid4      pid5      pid6      pid7      pid8
      101         0         0         0         0         0         0         0
*PART_INERTIA
$# title
Rolle Softnose 1/2
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      101         101         101         0         0         0         0         0
$#      xc      yc      zc      tm      ircs      nodeid
         0         0         0 1.0000E-5         0         0
$#      ixx      ixy      ixz      iyy      iyz      izz
1.000000      0.000      0.000 1.000000      0.000 1.000000
$#      vtx      vty      vtz      vrz      vry      vrz
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*SECTION_SHELL_TITLE
$# title
Rolle Softnose 1/2
$#      secid      elform      shrf      nip      propt      qr/irid      icomp      setyp
      101         2 0.830000      2         1         0         0         1
$#      t1      t2      t3      t4      nloc      marea      idof      edgset
1.000000 1.000000 1.000000 1.000000      0.000      0.000      0.000      0
*MAT_RIGID_TITLE
$# title
Rolle Softnose 1/2
$#      mid      ro      e      pr      n      couple      m      alias
      101 7.8300E-6 210.00000 0.300000      0.000      0.000      0.000
$#      cmo      con1      con2
         1         0         0
$#lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
1.000000      0.000      0.000      0.000 1.000000      0.000
*CONSTRAINED_EXTRA_NODES_SET
$#      pid      nsi      iflag
      101      1010      0
*SET_NODE_LIST
$#      sid
      1010
$#      nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
      1019999

```

## Anhang zu Kapitel 5.6.2: Rollen vorpositionieren

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ Part Move: Rollen vorpositionieren
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*PART_MOVE
$# pid xmov ymov zmov cid ifset
101 -716.344 -497.222 392.015 0 1
102 -703.52 -489.363 387.192 0 1
201 649.991 736.636 685.296 0 1
202 650.578 733.507 672.179 0 1
301 -475.533 795.423 453.354 0 1
401 -466.362 -799.672 452.392 0 1

```

## Anhang zu Kapitel 5.6.2: Rollenbewegung

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ Curves fuer die Position X Y Z
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DEFINE_CURVE
$ lcid sidr sfa sfo offa offo dattyp
401411 0 1.0 1.0 0 0 0
$ a1 o1
0.0 -466.362
5 -466.362
5.132356766 -463.223
...
17.96060659 631.124
18.02379766 635.561
18.05207603 637.352
1.0000E+20 637.352
*DEFINE_CURVE
$ lcid sidr sfa sfo offa offo dattyp
401412 0 1.0 1.0 0 0 0
$ a1 o1
0.0 -799.672
5 -799.672
5.132356766 -800.347
...
18.02379766 -771.47
18.05207603 -770.135
1.0000E+20 -770.135
*DEFINE_CURVE
$ lcid sidr sfa sfo offa offo dattyp
401413 0 1.0 1.0 0 0 0
$ a1 o1
0.0 452.392
5 452.392
5.132356766 453.192
...
18.02379766 682.54
18.05207603 684.274
1.0000E+20 684.274
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ Curves fuer die Normalenvektoren
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DEFINE_CURVE
$ lcid sidr sfa sfo offa offo dattyp
401414 0 1.0 1.0 0 0 0
$ a1 o1
0.0 1
5 0.264268
5.132356766 0.306009
...
18.02379766 0.390899

```

```

18.05207603      0.401211
1.0000E+20      0.401211
*DEFINE_CURVE
$   lcid   sidr   sfa   sfo   offa   offo   dattyp
   401415    0    1.0    1.0    0    0    0
$           a1     o1
           0.0     0
           5     0.193338
           5.132356766  0.180719
...
18.02379766      0.226296
18.05207603      0.208749
1.0000E+20      0.208749
*DEFINE_CURVE
$   lcid   sidr   sfa   sfo   offa   offo   dattyp
   401416    0    1.0    1.0    0    0    0
$           a1     o1
           0.0     0
           5     -0.944872
           5.132356766 -0.934719
...
18.02379766      -0.892182
18.05207603      -0.891882
1.0000E+20      -0.891882
$
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
$ Boundary fuer Rolle
$---+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_NODE
$#   pid   dof   vad   lcid   sf   vid   death   birth
   4019999    1    2   401411   0.000   01.0000E+20   0
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_NODE
$#   pid   dof   vad   lcid   sf   vid   death   birth
   4019999    2    2   401412   0.000   01.0000E+20   0
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_NODE
$#   pid   dof   vad   lcid   sf   vid   death   birth
   4019999    3    2   401413   0.000   01.0000E+20   0
*BOUNDARY_PRESCRIBED_ORIENTATION_RIGID_VECTOR
$#   pidb   pida   intrp   birth   death
   401     0     1     01.0000E+20
$#   lcidv1  lcidv2  lcidv3   lcids  valspin
   401414   401415   401416

```

## Anhang zu Kapitel 5.5.3: Fügeelement als Hex-8 Element

```

*ELEMENT_SOLID (ten nodes format)
$#   eid   pid
    9000001   22
$#   n1    n2    n3    n4    n5    n6    n7    n8    n9    n10
    9000008 9000009 9000010 9000011 9000012 9000013 9000014 9000015    0    0
*CONSTRAINED_INTERPOLATION
$#   icid   dnid   ddof   cidd
    35   9000008   123456    0
$#   inid   idof   twghtx   twghty   twghtz   rwghtx   rwghty   rwghtz
    11010999   123 1.5613E-2  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
    11011000   123 0.373866  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
    11011001   123 0.586048  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
    11011002   123 2.4473E-2  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
*CONSTRAINED_INTERPOLATION
$#   icid   dnid   ddof   cidd
    36   9000009   123456    0
$#   inid   idof   twghtx   twghty   twghtz   rwghtx   rwghty   rwghtz
    11011003   123 0.307535  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
    11011004   123 8.2070E-2  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
    11011005   123 0.128579  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
    11011006   123 0.481816  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
*CONSTRAINED_INTERPOLATION
$#   icid   dnid   ddof   cidd
    37   9000010   123456    0
$#   inid   idof   twghtx   twghty   twghtz   rwghtx   rwghty   rwghtz
    11011007   123 0.450331  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
    11011008   123 4.8275E-2  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
    11011009   123 4.8545E-2  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
    11011010   123 0.452850  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
*CONSTRAINED_INTERPOLATION
$#   icid   dnid   ddof   cidd
    38   9000011   123456    0
$#   inid   idof   twghtx   twghty   twghtz   rwghtx   rwghty   rwghtz
    11011011   123 4.8887E-3  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
    11011012   123 0.483983  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
    11011013   123 0.506017  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
    11011014   123 5.1113E-3  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000

```

## Fügestpunkt als Spotweld Contact

```

$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
$ Part und Kontakt Definition Fuegepunkt SPOTWELD_1_1
$---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7----+----8
*PART
$# title
SPOTWELD_1_1
$#   pid   secid   mid   eosid   hgid   grav   adpopt   tmid
    101   101     101
*ELEMENT_BEAM_PID
$#   eid   pid   n1   n2   n3   rt1   rr1   rt2   rr2   local
    101   101   1011  1012
$#   pid1   pid2
    1     2
*CONTACT_SPOTWELD_ID
$#   cidtitle
    1013SPOTWELD_1_1 Kontakt
$#   ssid   msid   sstyp   mstyp   sboxid   mboxid   spr   mpr
    101     0102   3       2       0       0       1     1
$#   fs     fd     dc     vc     vdc     penchk   bt     dt
    0.000   0.000   0.000   0.000   0.000   0       5.50  57.60
$#   sfs    sfm    sst    mst    sfst    sfmt    fsf    vsf
    0.000   0.000   0.000   0.000   0.000   0.000   0.000  0.000
$#   soft   sofsc1  lcidab  maxpar  sbopt   depth   bsort  frcfrq
    0

```



```

$# penmax thkopt shlthk snlog isym i2d3d sldthk sldstf
1
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$# cid Heading
1011Kontakt Part 1 vs. Tool1 oben
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
1 40 3 3
$# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
0.5 20 0.50 6.50
$# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$# cid Heading
1012Kontakt Part 2 vs. Tool1 unten
$# ssid msid sstyp mstyp sboxid mboxid spr mpr
2 21 3 3
$# fs fd dc vc vdc penchk bt dt
0.5 20 0.50 6.50
$# sfs sfm sst mst sfst sfmt fsf vsf

```

# Lebenslauf

## Persönliche Daten:

Name: Christian Kästle  
Geburtsdatum: 09.04.1985 in Balingen  
Staatsangehörigkeit: deutsch

## Schule und Zivildienst:

09/1999 – 07/2004 Besuch des Gymnasiums Liebfrauenschule Sigmaringen  
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife  
09/2004 – 05/2005 Zivildienst Körperbehindertenschule, Mössingen  
Einsatzbereich: Schülerbetreuung

## Studium und Praktika:

10/2007 – 03/2011 Studium des Maschinenwesens an der Universität Stuttgart  
Studienschwerpunkte: Umformtechnik, Materialprüfung,  
Werkstoffkunde u. Festigkeitslehre  
Abschluss: Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)  
03/2010 – 08/2010 Daimler AG, Sindelfingen  
Forschung und Entwicklung im Bereich Karosserierohbau  
08/2005 – 09/2005 DaimlerChrysler South East Asia Pte Ltd (DC SEA), Singapur  
Abteilung Strategy & Business Development  
06/2005 – 07/2004 Hammerwerk Fridingen GmbH, Fridingen  
Fertigungstechnisches Grundpraktikum

## Beruflicher Werdegang:

06/2011 – 05/2014 Daimler AG, Sindelfingen  
Doktorand, Prozesssimulation Karosseriebau  
06/2014 – 07/2015 Daimler AG, Sindelfingen  
Methodenplanung Werkzeugbau  
seit 08/2015 Daimler AG, Sindelfingen  
Produktionsplanung Karosseriebau