

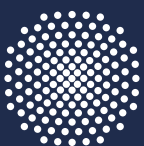
BEITRÄGE ZUR UMFORMTECHNIK



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

Felix Schuler

89 Methodik zur virtuellen Kompensation geometrischer Fehler von Zusammenbauten aus Blech aufgrund maßabweichender Einzelteile



Universität Stuttgart

Methodik zur virtuellen Kompensation geometrischer Fehler von Zusammenbauten aus Blech aufgrund maßabweichender Einzelteile

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

von
Felix Schuler
aus Frankfurt a.M.

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt
Tag der mündl. Prüfung: 02.02.2021

Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart

2021

M.Eng. Felix Schuler

Institut für Umformtechnik

Universität Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA

Institut für Umformtechnik

Universität Stuttgart

D93

ISBN 978-3-946818-14-4

Institut für Umformtechnik

Universität Stuttgart

Holzgartenstraße 17

70174 Stuttgart

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 wie auch durch eine Zusammenarbeit zwischen dem Institut und einem Unternehmen entstanden sind bzw. 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 Grundlagenerkenntnissen 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 diesem 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 Tätigkeiten als Doktorand und Projektingenieur bei der Adam Opel GmbH im Werk Rüsselsheim im Bereich ME Tool & Die Operations.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA, dem Direktor des Instituts für Umformtechnik der Universität Stuttgart, für die wertvollen fachlichen Diskussionen, für das mir entgegengebrachte Vertrauen mit der Möglichkeit zur Promotion sowie für die Übernahme des Hauptreferats.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement des Werkzeugmaschinenlabors WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, danke ich herzlich für die Durchsicht meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferats.

Besonders möchte ich meinen ehemaligen Vorgesetzten Herrn Dr.-Ing. Niels Koch, Herrn Dr.-Ing. Albert Emrich und Herrn Lutz Renger für die Unterstützung meiner Arbeit bei Opel und die zahlreichen fachlichen und persönlichen Gespräche danken, die im Wesentlichen zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben. Weiterhin danke ich dem gesamten ehemaligen Team Die Engineering & Simulation des Bereichs ME Tool & Die Operations für die kompetente Unterstützung und Einarbeitung in die verschiedenen Werkzeuge der Umformsimulation sowie das kollegiale und freundschaftliche Verhältnis.

Außerdem bedanke ich mich sehr herzlich bei Herrn Ralf Schmidt und seinem Team der AutoForm Engineering GmbH für die enge Entwicklungsarbeit und die Bereitstellung der für diese Arbeit wichtigen Simulationsprogramme.

Den wissenschaftlichen und technischen Mitarbeitern des Instituts für Umformtechnik danke ich für die Unterstützung während meiner Aufenthalte in Stuttgart. Hierbei möchte ich mich insbesondere bei Herrn Reinhard Niewöhner für die Betreuung und Unterstützung beim Aufbau meiner Versuche sowie bei Frau Britta Berns für die Administration bedanken.

Einen ganz besonderen Dank gilt meiner Familie, die mich in allen Lebenssituationen unterstützt und mich zu der Person gemacht hat, die ich heute bin. Euch widme ich diese Arbeit.

Vielen Dank.

„Springback is like the weather. It happens every day, is highly visible, may be predictable, is rarely understood, and picks the worst time to act up" Stuart Keeler, 2003.

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort des Herausgebers	i
Danksagung	ii
Inhaltsverzeichnis.....	iv
Abkürzungsverzeichnis	viii
Formelzeichen und Symbole	ix
Kurzfassung.....	xii
Abstract.....	xv
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik.....	4
2.1 Grundlagen der Karosserietechnik	4
2.2 Karosserieziehen.....	8
2.2.1 Versagensfälle beim Karosserieziehen	9
2.2.2 Rückfederung metallischer Werkstoffe	11
2.3 Scherschneiden	12
2.4 Abkanten.....	13
2.5 Punktuelle Fügeverfahren im Karosseriebau.....	15
2.6 Falzen	17
2.6.1 Konventionelles Maschinenfalzen mit starren Werkzeugen	18
2.6.2 Rollfalzen.....	19
2.7 Optische 3D-Messtechnik für räumliche Körper	21
2.8 Kompensationsmaßnahmen zur Verbesserung der Maßhaltigkeit von Karosseriezusammenbauten	27
2.8.1 Kompensationsmaßnahmen in der Einzelteilherstellung	27
2.8.2 Kompensationsmaßnahmen in Fügeprozessen von Rohbauanlagen	31
2.8.3 Anpassung des Rollfalzprozesses	33
2.9 FE-Simulation in der Karosserieentwicklung	33
2.9.1 Grundlagen der Finite-Elemente-Methode	34

2.9.2	Explizit dynamische Zeitintegration	37
2.9.3	Implizite Zeitintegration.....	38
2.9.4	Prinzipieller Ablauf einer Blechumformsimulation.....	38
2.9.5	Werkstoffmodellierung in der FE-Simulation	40
2.9.6	Rückfederungsberechnung in der FE-Simulation	45
2.9.7	FE-Simulation von Fügeprozessen	47
2.9.8	Prozesskettensimulation im Karosseriebau.....	51
2.10	Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments.....	55
2.10.1	Vollständige faktorielle Versuchspläne	55
2.10.2	Stochastische Analyse	56
2.10.3	Meta-Modellbildung zur Modellanalyse mittels Kriging-Verfahren.....	59
2.11	Zusammenfassung und Diskussion des Standes der Technik.....	61
3	Motivation und Zielsetzung der Arbeit	65
3.1	Problemstellung	65
3.2	Motivation und Zielsetzung der Arbeit.....	66
3.3	Vorgehensweise und Versuchsplanung	68
4	Aufbau einer durchgängigen Prozesskettensimulation	71
4.1	Ermittlung der rückfederungsbedingten Bauteilabweichungen der Serienteile.....	73
4.1.1	Rückfederungsbedingte Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile.....	73
4.1.2	Rückfederungsbedingte Bauteilabweichungen der Außenhaut und des Gerippes	74
4.2	Umformsimulation der Einzelteile.....	77
4.2.1	Umformsimulation der Verstärkungsteile.....	77
4.2.2	Umformsimulation der Außenhautbeplankung und des Gerippes	85
4.3	Fügesimulation des Unterzusammenbaus.....	92
4.4	Falzsimulation des Zusammenbaus	102
4.4.1	Aufbau einer seriennahen Versuchsfalzzelle	102
4.4.2	Aufbau der Falzsimulation.....	105

4.4.3	Abgleich des Rückfederungsergebnisses des ZSB aus der Falzsimulation mit einer gescannten Versuchsbaugruppe	108
4.5	Zusammenfassung des Aufbaus einer durchgängigen Prozesskettensimulation....	114
5	Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile	116
5.1	Versuchsplanung und Durchführung.....	116
5.1.1	Erzeugen einer definierten reproduzierbaren Bauteildurchbiegung	119
5.1.2	Erzeugen einer definierten reproduzierbaren Bauteilverdrehung.....	121
5.2	Auswertung der Variantensimulationen	122
5.3	Zusammenfassung der Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile	140
6	Absicherung der Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile mittels realer Bauteilversuche	144
6.1	Konzipierung eines Versuchswerkzeugs	146
6.2	Auswertung der Bauteilversuche.....	148
6.3	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	153
7	Entwicklung einer neuartigen Kompensationsmethode	156
7.1	Statistische Versuchsplanung	158
7.2	Prozesskettensimulationen mit festgelegten Inputvariablen	160
7.3	Meta-Modellerstellung zur Analyse der Rückfederung des ZSB.....	164
7.4	Solver mit definierter Zielfunktion.....	166
7.5	Übertragbarkeit der Kompensationsmethode	169
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	171
8.1	Zusammenfassung	171
8.2	Ausblick.....	174
9	Anhang.....	176
9.1	Messergebnisse der Verstärkungsteile	176
9.2	Auswertungen der Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile	178
9.3	Varianten zur Absicherung der Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile mittels realer Bauteilversuche	199

9.4	Rückfederungsergebnisse des Zusammenbaus nach Modifikation der Werkzeugwirkflächen	200
9.5	Tabelle zur Auswertung der Prozesskettensimulationen mit modifizierten Werkzeugwirkflächen	207
Literaturverzeichnis		208
Normen		219
Curriculum Vitae.....		221

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
ASM	Berechnetes Simulationsergebnis aus AutoForm als Datei mit Endung .asm
CAD	Computer Aided Design, rechnergestütztes Konstruieren
CAE	Computer Aided Engineering, rechnergestützte Produkt-, Prozess- und Herstellungsverfahrensentwicklung
CAX	Computer Aided x, allgemeines rechnerunterstütztes Entwicklungsverfahren
FBC	Fixed Boundary Conditions, fixierte Randbedingungen
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
FLC	Grenzformänderungskurve, aus dem englischen Forming Limit Curve
GRG	Methode des generalisierten Gradienten
GUI	Graphical User Interface, grafische Benutzeroberfläche
IFU	Institut für Umformtechnik
KTL	Kathodische Tauchlackierung
LHC	Latin-Hypercube
LHS	Latin-Hypercube-Sampling
OP	Operation
PKS	Prozesskettensimulation
PLM	Product Lifecycle Management, Produktlebenszyklusmanagement
RPS	Referenzpunktsystem
STL	Stereolithografie, aus dem englischen Standard Tessellation Language, Standardschnittstelle für CAD- Systeme zur Beschreibung von 3D-Körpern
TCP	Tool Center Point, Arbeitspunkt eines Werkzeugs
UZSB	Unterzusammenbau
ZSB	Zusammenbau

Formelzeichen und Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
σ	[N/mm ²]	Spannung
E	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul
ε	[-]	Dehnung
σ_f	[N/mm ²]	Fließspannung
F	[N]	Kraft
A	[mm ²]	Fläche
k_f	[N/mm ²]	Fließspannung
σ_v	[N/mm ²]	Vergleichsspannung
σ_1	[N/mm ²]	Hauptspannung
σ_2	[N/mm ²]	Hauptspannung
σ_3	[N/mm ²]	Hauptspannung
$\sigma_{v,Hill48}$	[N/mm ²]	Vergleichsspannung nach [Hil48]
r_0	[-]	Anisotropiewert in 0° zur Walzrichtung
r_{45}	[-]	Anisotropiewerte in 45° zur Walzrichtung
r_{90}	[-]	Anisotropiewerte in 90° zur Walzrichtung
Q_{plast}	[N/mm ²]	Plastisches Potenzial
$\dot{\varepsilon}_{ij}^{pl}$	[1/s]	Plastische Dehnrate
λ	[-]	Plastischer Multiplikator
φ	[-]	Umformgrad
ε_{el}	[-]	Elastische Dehnung
ε_{pl}	[-]	Plastische Dehnung
$R_{p0,2}$	[N/mm ²]	Ersatzstreckgrenze
ε_b	[-]	Biegedehnung
σ_b	[N/mm ²]	Biegespannung
M_b	[Nm]	Biegemoment
M_r	[Nm]	Rückfederungsmoment
σ_r	[N/mm ²]	Radialspannung
ε_r	[-]	Rückfederungsdehnung
s_0	[mm]	Blechdicke
ε_{res}	[-]	Resultierende Dehnung
σ_{res}	[N/mm ²]	Restspannung
σ_{ZUG}	[N/mm ²]	Zugspannung
σ_{DRUCK}	[N/mm ²]	Druckspannung

σ_θ	[N/mm ²]	Tangentiale Zugspannung
σ_{HL}	[N/mm ²]	Spannung in Falzbahntangentenrichtung
l_k	[mm]	Abstand Nominalgeometrie zu kompensierter Wirkfläche
l_A	[mm]	Abstand rückgefedertes Bauteil zur Nominalgeometrie
κ	[-]	Kompensationsfaktor
l_N	[mm]	Abstand Skalierungspunkt zu Nominalgeometrie
ς_x	[-]	Skalierungswert in x-Richtung
ς_y	[-]	Skalierungswert in y-Richtung
ς_z	[-]	Skalierungswert in z-Richtung
l_s	[mm]	Abstand Skalierungspunkt zu skalierte Geometrie
∂u	[-]	Virtuelles Verschiebungsfeld
S	[N]	Oberflächenkraft
V	[mm ³]	Volumen
$\vec{n}$	[-]	Normalenvektor der Oberfläche
$\partial \varepsilon$	[-]	Dehnungstensor
x	[-]	Momentane Position eines Körpers
t	[s]	Zeit
X	[-]	Ursprüngliche Position eines Körpers
$\vec{u}$	[-]	Verschiebungsvektor
$\overrightarrow{t_{appl}}$	[-]	Vektor der applizierten Oberflächenkräfte
$N(x)$	[-]	Normfunktion
$\bar{K}$	[-]	Steifigkeitsmatrix
$\vec{p}$	[-]	Kraftvektor
$\bar{M}$	[-]	Massenmatrix
$\bar{C}$	[-]	Dämpfungsmatrix
i	[s]	Zeitschritt
Δt_{krit}	[s]	Kritischer Zeitschritt
v_s	[m/s]	Schallwellengeschwindigkeit
l_e	[mm]	Charakteristische Länge
ρ	[kg/m ³]	Dichte
c_m	[-]	Massenvergrößerungsfaktor
FLD_0	[mm]	Abstand FLC zur Nebenformänderungsachse
r	[mm]	Radius
N	[-]	Anzahl Intervalle
x_i	[-]	Erprobter Messpunkt (Beobachtungsvariable)

D	[-]	Messbereich
x_0	[-]	Nicht erprobter Messpunkt (Zufallsvariable)
$\vec{h}$	[-]	Abstandsvektor
$z(x_i)$	[-]	Messwert der ortsunabhängigen Beobachtungsvariable
$Z(x_i)$	[-]	Zufallsfunktion
$E(x_0)$	[-]	Erwartungswert der Zufallsvariable
$\gamma(h)$	[-]	Semi-Variogrammfunktion
$\hat{\gamma}(h)$	[-]	Variogrammschätzfunktion
$N(h)$	[-]	Anzahl von Datenpaaren mit Abstand h
$Z^*(x_0)$	[-]	Geschätzte Zufallsvariable am unerprobten Messpunkt
σ^*	[-]	Kriging-Varianz
λ_i	[-]	Gewichtungsfaktor
l_f	[mm]	Falzflanschlänge
a	[mm]	Abstand
v	[-]	Poissionzahl

Kurzfassung

Die numerischen Simulationsmethoden haben in den letzten Jahrzehnten stärker an Bedeutung gewonnen und sind inzwischen fester Bestandteil eines jeden Karosserieentwicklungsprozesses. Mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) werden die Wirkflächen der Umformwerkzeuge erstellt und das Umform- und Aufsprungverhalten der Blechformteile untersucht. Hierbei liegt der Fokus hauptsächlich auf der Untersuchung der Bauteile hinsichtlich deren fertigungstechnischer Herstellbarkeit und der Optimierung werkstoffbedingter, dimensionaler Maßabweichungen. Der strukturelle Einfluss der anschließenden Fügeprozesse im Karosseriebau und die damit verbundenen Spannungsänderungen und Wechselwirkungen der einzelnen Blechkomponenten im Verbund werden dabei bisher nur teilweise oder gar nicht betrachtet oder verstanden. Aus diesem Grund werden zur Erreichung der hohen dimensional Qualitätsanforderungen bei Karosserieanbauteilen, welche aus 5-15 Blecheinzelteilen bestehen können, mehrere kosten- und zeitintensive Qualitätsschleifen benötigt. Diese Qualitätsschleifen beinhalten u.a. das Überarbeiten der Einzelteilwerkzeuge oder das Einstellen der Fügeanlagen.

Für die Verbesserung der Maßhaltigkeit einer Baugruppe wird dabei die Qualität schrittweise in den einzelnen Prozessschritten im Presswerk und Rohbau verbessert und beurteilt. Einzelteile werden nach der Umformung vermessen und mit der vorgegebenen Nominalgeometrie verglichen. Abweichungen zur Nominalgeometrie werden im Werkzeug nach spezifischen Strategien derart kompensiert, sodass die vorgegebenen Toleranzen unter Produktionsbedingungen eingehalten werden. Die FEM-Simulation unterstützt hierbei in der Auslegung der Werkzeugwirkflächen, welche bereits a priori auf Basis einer festgelegten Rückfederungskompensationsstrategie gefräst bzw. angefertigt werden können. Die Problematik in der Praxis besteht jedoch darin, dass das Fügen von maßhaltigen Einzelteilen nicht zwingend zu einem maßhaltigen Zusammenbau (ZSB) führt. Abweichungen, die in den Fügeprozessen des Unterzusammenbaus (UZSB) und des fertigen ZSB entstehen, müssen erneut bewertet und auf Basis komplexer Kompensationsstrategien aufwändig reduziert werden. Dafür bedarf es spezifischer und praktischer Fachkompetenz, wodurch der digitalen Abbildung des gesamten Herstellungsprozesses im Rohbau eine zunehmend hohe Bedeutung zukommt. Dadurch könnte bereits während der Entwicklungsphase der Einzelteile eine zielführende virtuelle Kompensationsstrategie ausgearbeitet werden, um die Maßhaltigkeit der Gesamtbaugruppe zu verbessern.

Inzwischen gibt es unterschiedliche Forschungsansätze, numerische Simulationsmethoden zu einer möglichst durchgängigen Prozesskettensimulation (PKS) zu verbinden. Die Falzsimulation beispielsweise ist bereits in den marktüblichen Simulationscodes integriert, jedoch wird

hier hauptsächlich das Fügen von einem starren Innen- mit einem elastischen Außenteil betrachtet. Arbeiten u.a. von [Eck11, Kae16, Sch15a] zeigen, dass mithilfe der FE-Simulation das Umform- und Rückfederungsverhalten mehrerer elastischer Bauteile im selben Simulationsmodell bereits heute berechnet werden kann. Der Aufbau dieser komplexen Simulationsketten ist jedoch mit einem hohen Modellierungsaufwand verbunden. Dabei werden teilweise ergänzende experimentelle Grundlagenuntersuchungen zur Ermittlung der richtigen Spannungszustände während der Fügeprozesse benötigt. Zur Abbildung der gesamten Prozesskette, beginnend mit der Umformung der Einzelteile, bis hin zum Fügen der fertigen Baugruppe, werden verschiedene Softwarecodes und Simulationsprogramme verwendet, da bis dato kein Programm auf dem Markt verfügbar ist, welches die gesamte Prozesskette simulativ abbilden kann. Bei diesen Wechseln zwischen den Simulationsprogrammen gehen bei der Übertragung der Simulationsergebnisse, dem sog. Daten-Mapping, verschiedene Informationen wie beispielsweise die durch die Umformung entstehenden Eigenspannungen innerhalb der Einzelteile verloren. Dies führt u.a. zu einer Reduzierung der Prognosegenauigkeit. Weiterhin lassen sich aus den Rückfederungsergebnissen der ZSB-Simulation nur schwer zielführende Kompensationsstrategien für die Einzelbauteile ableiten, welche zur Verbesserung der Maßhaltigkeit der Baugruppe notwendig sind.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine neue Methodik zur virtuellen Kompensation von Einzelteilen aus Blech mit dem Ziel eines maßhaltigen ZSB vorgestellt. Hierbei wird der Produktentstehungsprozess am Beispiel einer PKW-Motorhaube im Presswerk und im Rohbau betrachtet und eingehend untersucht. Hierzu werden zunächst die Fertigungsprozesse der Einzelteile der betrachteten Motorhaube digital nachgebildet und in eine möglichst durchgängige PKS überführt. Anschließend wird die Prognosegenauigkeit der FE-Simulation mithilfe realer Bauteilversuche überprüft und somit die virtuelle Methodik abgesichert. Hierfür werden die Verstärkungsteile des UZSB gezielt deformiert (simulativ und real) und in verschiedenen Kombinationen aus Gut- und Schlechteilen dem Fügeprozess (Clinchen) zugeführt, um sie nach deren Vermessung mit den entsprechenden Simulationsergebnissen abzugleichen. Dieser Abgleich der gescannten Einzelteilmessungen untereinander, sowie mit Messungen der UZSB und ZSB weisen dabei eine gute Übereinstimmung in allen Prozessschritten auf, sowohl in Betrag als auch in Richtung der auftretenden Rückfederungen. Der modellierten PKS konnte somit eine sehr gute Prognosegenauigkeit zur Bewertung der Maßhaltigkeit des untersuchten ZSB nachgewiesen werden. Anschließend wird Mithilfe der durchgängigen PKS am Beispiel einer wirkflächenbasierten Modifizierung der Ziehanlage des Innenteils eine neuartige Kompensationsmethode abgeleitet.

Bei dieser Methode werden lokale Bereiche der diskretisierten Ziehanlage des Innenteils festgelegt, welche mithilfe eines definierten statistischen Versuchsplans gezielt manipuliert werden. Mit den dadurch entstehenden Varianten zahlreicher Ziehanlagen werden die einzelnen PKS durchgeführt. Die dadurch resultierenden Rückfederungsergebnisse des ZSB werden anschließend ausgewertet und mithilfe eines räumlichen Interpolationsverfahrens, dem sog. Kriging-Verfahren, in ein numerisches Meta-Modell überführt. Dieses Modell wird letztlich dazu verwendet, die lokalen Kompensationswerte zur Manipulation der Ziehanlage des Innenteils abzuleiten, die zur geringsten dimensionalen Abweichung des ZSB führen. Mit den auf diese Weise ermittelten lokalen Kompensationswerten für die Wirkflächen der Ziehanlage des Innenteils wird mithilfe der modellierten PKS die Fähigkeit der vorgestellten Kompensationsmethode nachgewiesen.

Auf diese Weise konnte der Gesamtbetrag der Rückfederung in der Form des hier betrachteten Motorhauben-ZSB des Opel Adam (Modelljahr 2013-2019) um insgesamt 60% reduziert und der Maximalwert der Rückfederung am Umriss von 1,24 mm auf 0,30 mm verringert werden. Die Übertragbarkeit der neu entwickelten Kompensationsmethode auf weitere Anwendungsfälle, wie z.B. die Untersuchung des Einflusses der Spannerendpositionen oder der Fügereihenfolge auf die Maßhaltigkeit des ZSB wurde an dieser Stelle ebenfalls erläutert und bestätigt die Praxisfähigkeit und den Mehrwert dieser Methodik.

Abstract

The numerical simulation methods in car body engineering have become increasingly important in recent decades as the most powerful tool when developing car bodies and its sheet metal components. Starting from the car designers given nominal outer skin surface data, during metal forming simulation, the real die contact surfaces of the forming tools are created; thus, the dimensional elastic-plastic forming of sheet metal component and corresponding springback behaviour are examined numerically. During the car body development phase, the main focus today is to put on the sheet metal component feasibility study and the dimensional improvement of the individual parts. The subsequent joining processes and the associated stress changes due to heat (welding) or mechanical force application (clinching, hemming) and interactions of the individual components embedded into the assembly's structure are totally neglected during this very early engineering phase. To achieve the high dimensional quality requirements for car body closure assemblies, many costly and time-consuming quality loops are still required. During the development phase of the car body assembly, the quality is evaluated stepwise and improved in the individual process steps. Thus, all single components such as outer skin, inner panel and all reinforcement components conventionally are characterized dimensionally as single parts after forming stages and are compared with the given nominal geometry. Deviations from nominal are compensated by varying tool active surfaces until the specified tolerances of the work piece after springback are obtained. The finite-element-analysis simulation supports this stepwise correction during the development phase, so related areas of tool active surfaces are changed based on the workers experience according to his individual compensation strategy. Here, practical work being performed in the tool shops shows that the joining of dimensionally stable individual parts does not necessarily lead to a dimensionally stable assembly. Deviations that are determined in the joining processes of the subassembly and in the finished assembly in some cases must be continually reassessed and compensated. This again requires specific expertise and knowledge in changing active surfaces of the drawing tool. Until now, there is still no commonly applicable compensation strategy for drawing tools available to compensate spring back of sheet metal components [Goe10].

Meanwhile, there are different approaches in use to combine numerical simulation methods to a complete process chain simulation. The hemming simulation for example today is already integrated in common simulation software programs, but here mainly the joining of an inner and an outer part is numerically modelled. The research work of [Sch15], [Kae16] and [Eck11] show that the consideration of multiple elastic components in the finite element analysis is already possible. Unfortunately, the set-up and evaluation of multiple simulation runs is time-

consuming and requires some experimental baseline investigations. In addition, it is difficult to derive or to implement suitable compensation strategies for the single components from the resulting springback of the car body assembly.

The following is a new compensation strategy to improve the dimensional component quality of closure assemblies by choosing a bonnet assembly as a reference. A model will be presented to show how a compensation strategy can be determined and investigated with the help of an integrated process chain simulation. For this purpose, local areas of the inner part's active surface areas in the drawing operation are identified and outlined by a defined statistical design. Subsequently, the springback results of the overall assembly are evaluated and converted into a meta-model based on a spatial interpolation method. This model can ultimately be used to derive the correct local compensation values that may result in the smallest dimensional deviation of the assembly. As a result, the number of assembly correction loops of drawing dies and time phase for optimizing single components and assembling processes can be shortened. The presented new compensation strategy is prospectively capable of being fully automatic computed to deliver all compensated single component's tool active surfaces to obtain a dimensionally accurate assembly.

1 Einleitung

Der beständig wachsende Preisdruck auf neue Fahrzeugbaureihen, sowie die Einführung neuer Derivate und Fahrzeugmodelle zwingt die Automobilindustrie und deren Zulieferer zu einer stetigen Verkürzung der Produkt- und Prozessentwicklungszeit. Die damit verringerte Durchlaufzeit der Betriebsmittel, welche für die Herstellung der Blechkomponenten im Presswerk benötigt werden, darf sich dabei nicht negativ auf die Qualität der Fahrzeuge auswirken. Die Blechumformprozesse und die nachfolgenden Fügeprozesse der Bauteile müssen daher genau aufeinander abgestimmt werden. Virtuelle Methoden liefern dabei ein hohes Steigerungspotential des Produktreifegrades in der frühen Produktentwicklungsphase der Fahrzeugkarosserie [Bay02]. Darunter zählen speziell in der Auslegung von Karosseriebauteilen auch die numerischen Simulationsmethoden mit Unterstützung leistungsfähiger CAx-Werkzeuge.

Die FEM hat sich zwischenzeitlich zur leistungsfähigsten Berechnungsmethode zur Auslegung und Optimierung der Betriebsmittel und der Fertigungsprozesse in der Karosserieherstellung entwickelt und trägt damit maßgeblich dazu bei, eine erfolgreiche Produkt- und Fertigungsentwicklung zu gewährleisten. Mithilfe verschiedener Softwareprogramme, wie z.B. AutoForm, LS-Dyna und Pam-Stamp werden heute Ziehanlagen für die Blechumformung effizient entwickelt und fertigungstechnische Risiken von Einzelteilen, etwa durch schwankende Prozessparameter untersucht und reduziert. Mit diesen Simulationen soll ein hohes Qualitätsniveau bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung sichergestellt sowie die Funktionalität des Produktes verifiziert werden [Kre06]. Dabei werden unter anderem Auswertegrößen wie die Bauteilrückfederung, die Ausdünnung der Bauteile aus Blech in bestimmten Bauteilzonen oder die Faltenbildung, untersucht. Dadurch wird die kostenintensive Einarbeitung der Umformwerkzeuge zur Herstellung der Einzelteile (u.a. Ziehen, Schneiden, Nachformen) sowie der darauffolgenden Fügeprozesse und -anlagen reduziert und auftretende Maßabweichungen der Einzelteile oder ZSB, die bspw. zu einer Neuanfertigung der Betriebsmittel führen könnte, vermieden. Die Maßhaltigkeit eines Blechbauteils wird im Wesentlichen durch seine materialspezifische Rückfederung beeinflusst [Zub14]. Diese Rückfederung der Einzelteile kann durch verschiedene Maßnahmen kompensiert werden, sodass die geforderte geometrische Genauigkeit des Einzelteils eingehalten wird. Dennoch kann die Maßhaltigkeit des ZSB außerhalb der festgelegten Baugruppentoleranz liegen, obwohl die hierfür verwendeten Einzelteile innerhalb der Einzelteiltoleranz liegen. Dies führt zu einer Korrektur des ZSB in Form von Kompensationsmaßnahmen an den Einzelteilen oder den Fügeprozessen, was zur geometrischen Veränderung von Einzelteilen außerhalb ihrer zeichnungsgemäßen Spezifikationen führen kann. Diese

schrittweise Verbesserung von Einzelteilen und des ZSB begründet mehrere zeit- und kostenintensive manuelle Nacharbeitstätigkeiten an den Einzelteilwerkzeugen und/oder an den Fügeanlagen. Durch eine frühzeitige Prognose der Maßhaltigkeit eines ZSB aus mehreren Einzelteilen kann die Produkt- und Prozessentwicklung deutlich beschleunigt werden. Zusätzlich können manuelle Optimierungsschleifen deutlich reduziert werden, wodurch Einsparpotenziale besser ausgeschöpft werden.

Zur Vermeidung dieser manuellen Optimierungsschleifen werden die einzelnen Prozessschritte der Einzelteilherstellung vorab simulativ abgebildet. Trotz einer deutlichen Verbesserung dieser sog. Virtual-Engineering-Werkzeuge hinsichtlich ihrer Prognosegenauigkeit können Fügeprozesse heute unter Berücksichtigung mehrerer Blechbauteile mit ihrem elastischen Bauteilverhalten und der Fügekräfteinleitung nicht zufriedenstellend abgebildet werden. In der numerischen Simulation werden üblicherweise die Umformanalyse und die Bauteilrückfederung der Einzelteile sowie die Auswertung des Falzprozesses eines Innenteils mit einem Außenteil abgebildet. Der Einfluss der Verstärkungsteile und des Fügeprozesses des UZSB auf die Maßhaltigkeit des ZSB werden dabei heute noch nicht oder nur vereinzelt berücksichtigt. Für eine gute Prognose der Maßhaltigkeit ist es demnach notwendig, die gesamte Prozesskette der Herstellung eines ZSB simulativ abbilden zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb zunächst eine durchgängige PKS am Beispiel einer Motorhaube entwickelt, mit der die Maßhaltigkeit des ZSB realitätsnah untersucht werden kann. Im Gegensatz zum aktuellen Stand der Technik werden dabei neue Modellierungsansätze gewählt, bei denen kein Wechsel des FE-Codes notwendig ist und dadurch kein Informationsverlust beim Übertragen der Simulationsergebnisse entsteht. Der Fokus liegt dabei in der praxisnahen Abbildung der Herstellungsprozesse von der Einzelteilherstellung bis hin zum Fügen des UZSB durch Clinchen sowie dem Rollfalzen der Baugruppe. Mithilfe der PKS lässt sich anschließend der singuläre und kumulierte Einfluss dimensionaler Bauteilabweichungen der Einzelteile auf die Maßhaltigkeit des ZSB untersuchen. Dadurch können Struktureffekte und Wechselwirkungen von Verstärkungsteilen in Großteilen untersucht und die lokale sowie globale Steifigkeit eines ZSB analysiert werden. Auf diese Weise lassen sich später lokale Bauteilbereiche der Einzelteile identifizieren, die mithilfe einer gezielten Kompensationsstrategie zur Verbesserung der Maßhaltigkeit des ZSB angepasst werden sollen. Die Simulationsergebnisse dieser PKS werden mittels realer Bauteilversuche abgeglichen und deren Prognosegenauigkeit charakterisiert.

Auf Basis der Erkenntnisse der durchgeführten PKS wird schließlich eine neuartige Methodik zur virtuellen Kompensation von Maßabweichungen an Einzelteilen aus Blech mit dem Ziel

eines maßhaltigen Zusammenbaus entwickelt. Die Idee dieser Kompensationsmethode ist die Verknüpfung der modellierten PKS mit den Methoden der stochastischen Analyse und die Überführung der dadurch ermittelten Ergebnisse in ein Meta-Modell. Im Gegensatz zu konventionellen Methoden, die iterativ einzelne gemessene oder simulierte Abweichungen des ZSB kompensieren (rückwärtsgerichtete Methoden), soll mit der neuen Methode die Analyse des Rückfederungsverhaltens eines ZSB in allen Prozessen und Bauteilen der Herstellung ermöglicht werden (vorwärtsgerichtete Methode). Das Ziel der Entwicklungen auf diesem Gebiet hierbei liegt darin, die Einzelteile auf Basis dieser Methodik gezielt zu kompensieren, sodass nach dem Fügeprozess ein maßhaltiger ZSB entsteht.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die thematisch zur Bearbeitung dieser Arbeit relevanten und angrenzende Themengebiete erläutert. Die allgemeinen Grundlagen über die Verfahren und die Funktionsweise von Umformwerkzeugen sowie das Werkstoffverhalten von Stählen werden an dieser Stelle zum Verständnis der Arbeit vorausgesetzt und sind in einschlägiger Literatur nachzuschlagen [Doe07, Lan75, Sie15]. Die spezifischen Grundlagen des Tief- und Streckziehens sowie die für den Karosseriebau relevanten Umformverfahren und die damit verbundenen Herstellungsprozesse werden im folgenden Kapitel kurz erläutert.

2.1 Grundlagen der Karosserietechnik

In der Karosserietechnik werden Blechformteile aus verschiedenen Blechwerkstoffen hergestellt und anschließend zu einer Karosserie zusammengebaut. Die Wahl der Werkstoffe erfolgt auf Basis der zu erfüllenden Anforderungen an das jeweilige Bauteil. Aufgrund der mechanischen Eigenschaften wie beispielsweise einer guten Umformbarkeit, Fügbarkeit bei gleichzeitig hoher Festigkeit und vergleichsweise geringen Kosten, dominieren im Karosseriebau bis heute Stahlfeinbleche im Dickenbereich zwischen 0,3mm und 2mm [Kae16]. Hauptsächlich werden diese Stahlgüten für die Herstellung von Bauteilen und -gruppen für den Außenhautbereich eingesetzt und unterliegen daher sehr hohen Anforderungen bezogen auf Qualität, Funktionalität, Gewicht, Optik, Kosten und Herstellbarkeit, da sie maßgeblich das Gesamtdesign des Fahrzeugs prägen [Hei14]. Fahrzeugdesign, optische Anmutung der Außenhaut und die Verarbeitungsqualität bilden dabei die Alleinstellungsmerkmale der Automobilhersteller. Der allgemeine Karosserieherstellungsprozess ist in Abb. 2-1 dargestellt.

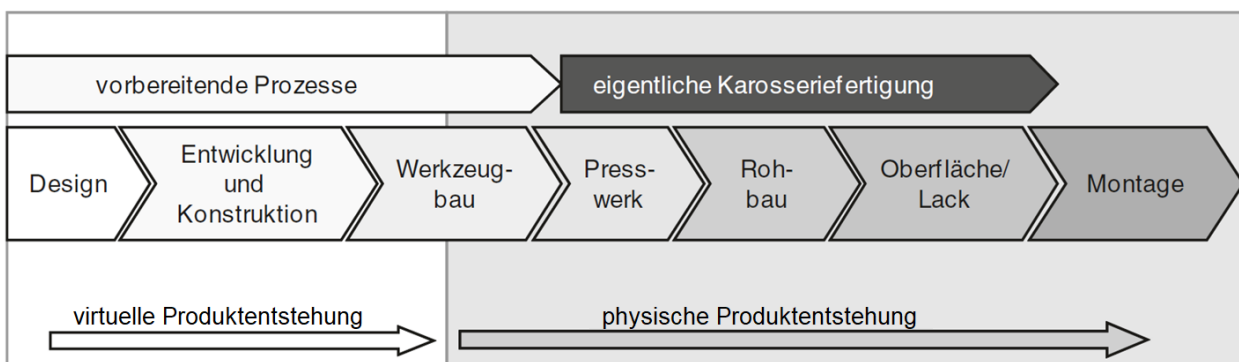


Abb. 2-1: Prozesskette des Karosserieherstellprozesses nach [Bir13].

Nach [Bir13] wird der Karosserieherstellungsprozess in die vorbereitenden Prozesse und die eigentliche Karosseriefertigung unterteilt. Zu den vorbereitenden Prozessen zählt das Design, in dem hauptsächlich die Gestaltung des Exterieurs und des Interieurs festgelegt wird. Diese werden zu einem späteren Zeitpunkt in der Entwicklung und Konstruktion in CAD-Daten für

das Gesamtfahrzeug umgesetzt. Mit diesen CAD-Daten werden u.a. auch die Umformwerkzeuge entwickelt, konstruiert und anschließend im Werkzeugbau gefertigt. Daher steht in dieser Organisationsform der Werkzeugbau als Bindeglied zwischen der virtuellen und der physischen Produktentstehung. Hier wird die entwickelte Methode zur Umformung der Einzelteile in entsprechenden Ziehanlagen und Werkzeuggeometrien umgesetzt. Abb. 2-2 zeigt beispielhaft die Umformmethode zur Herstellung der Motorhauben-Außenhautbeplankung des Opel Adam (Modelljahr 2013-2019).

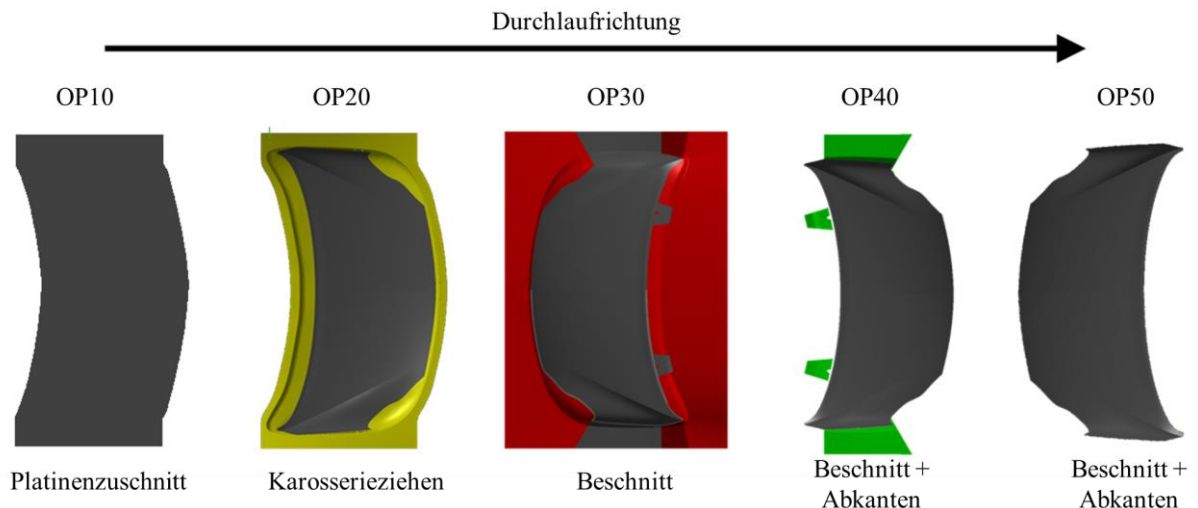


Abb. 2-2: Prozessplan der Außenhautbeplankung der Motorhaube des Opel Adam (Modelljahr 2013-2019).

Die einzelnen Prozessschritte (auch Operationen genannt) werden als Methodenplan eines Bauteils zusammengefasst. In der Operation 10 (OP10) wird die Platine zugeschnitten oder eine bereits zugeschnittene Platine der sog. Pressenstraße zugeführt. Diese wird in der OP20 zum Ziehteil umgeformt (vgl. Kapitel 2.2). In den darauffolgenden Stufen folgen mehrere Beschnitt- und Nachformoperationen. Die Seitenbereiche der in Abb. 2-2 gezeigten Außenhaut der Motorhaube werden beispielsweise noch zusätzlich mit Schiebern abgekantet (OP50), da die Flanschöffnungswinkel für das spätere Falzen (vgl. Kapitel 2.6) des ZSB eine bestimmte Stellung aufweisen müssen. Die in den einzelnen Prozessschritten hergestellten Bauteile werden innerhalb der Pressenstraße mithilfe von Robotern in die jeweilige Folgeoperation transportiert. Die hier eingesetzte Robotertechnologie für den Bauteiltransfer erlaubt lediglich eine einfache Rotationsbewegung entlang der Roboterhöhenachse, sodass die Bauteile von Werkzeug zu Werkzeug um 180° gedreht werden.

Nach der Anfertigung und Einarbeitung der Umformwerkzeuge werden die einzelnen Bauteile im Presswerk unter Serienbedingungen hergestellt und anschließend im Rohbau zu verschiedenen Baugruppen gefügt, ehe sie anschließend chemisch behandelt, lackiert und in der Endmontage zur fertigen Karosserie zusammengebaut werden.

Eine Karosserie kann – je nach Komplexität und Bauweise – aus bis zu 500 Einzelteilen bestehen [Ada95], wobei diese im Allgemeinen in Struktur- und Außenhautteile unterteilt werden können. Strukturteile (oder auch Verstärkungsteile) tragen hauptsächlich zur strukturellen Festigkeit des ZSB bei und sind in der Regel am Fahrzeug außen nicht sichtbar. Nach [Kae16] werden sie in ZSB wie beispielsweise Motorhauben, Türen und Klappen als maßbestimmend in der Karosseriefertigung angesehen und unterliegen daher in der Regel engen maßlichen Toleranzen.

Außenhautteile liegen im Sichtfeld der Kunden und müssen daher hohen optischen Ansprüchen genügen. Im Vordergrund steht hier die Oberflächenqualität der Pressteile [Bon09], darunter wird beispielsweise die Oberflächenbeschaffenheit (frei von Kratzern und Einfallstellen), die Ebenheit und die Qualität der Radienübergänge von Blechbauteilen verstanden.

Abb. 2-3 zeigt den in dieser Arbeit untersuchten ZSB der Motorhaube des Opel Adam, bestehend aus diversen Strukturbauteilen und dem designbestimmendem Außenhautteil.

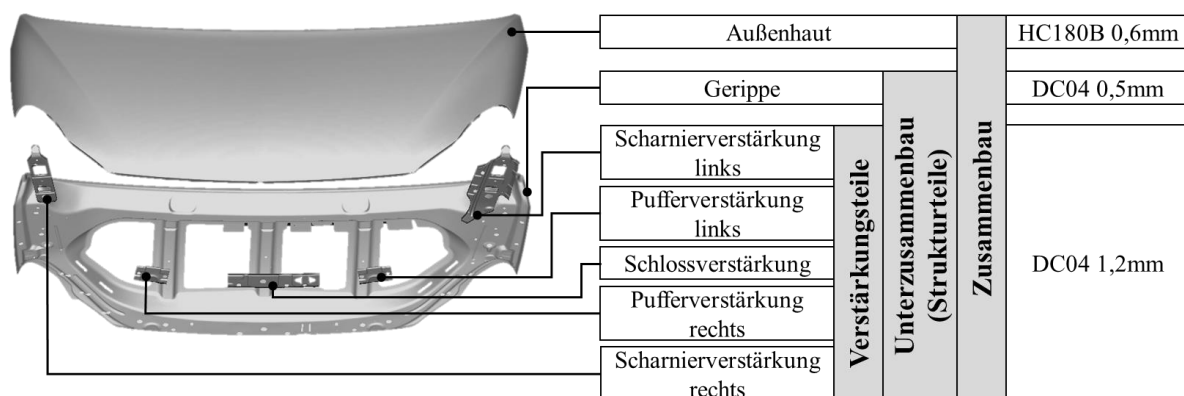


Abb. 2-3: Bauteile und verwendete Blechwerkstoffe des ZSB Motorhaube des Opel Adam (Modelljahr 2013-2019).

Der ZSB besteht aus fünf Verstärkungsteilen, die mit dem Gerippe zum UZSB gefügt werden. Die Strukturteile sind aus einem weichen Tiefziehstahl der Güte DC04 gefertigt. Tiefziehstähle zeichnen sich durch gute Umformbarkeit beim Tief- und Streckziehen aus (vgl. Kapitel 2.2). Die Position der Verstärkungsteile und deren Anbindung an das dünnwandige Gerippe wird so gewählt, dass sich dieses z.B. beim Öffnen und Schließen der Motorhaube aufgrund der geringen Festigkeit plastisch nicht verformt.

Das Außenhautteil besteht aus einem Bake-Hardening-Stahl der Güte HC180, welche im Lieferzustand gut umformbar ist. Im späteren Lackier- und Trocknungsprozess wird eine Festigkeitssteigerung durch sog. Reckalterung erzielt, welche sich positiv auf die Beulfestigkeit (Widerstandsfähigkeit gegen lokale plastische Verformung wie Hagel, Steinschlag usw.) auswirkt.

Dabei werden eine Erhöhung der Fließspannung und gleichzeitig eine Steigerung des Verformungswiderstandes erreicht [Got01].

In Abb. 2-4 werden die einzelnen Herstellungsoperationen der untersuchten Motorhaube in die Fertigungsverfahren nach DIN 8580 eingeteilt. Dabei werden die Umformmethode der Außenhaut (vgl. Abb. 2-2) und die anschließenden Fügeprozesse des UZSB und ZSB dem jeweiligen Fertigungsverfahren zugeordnet.

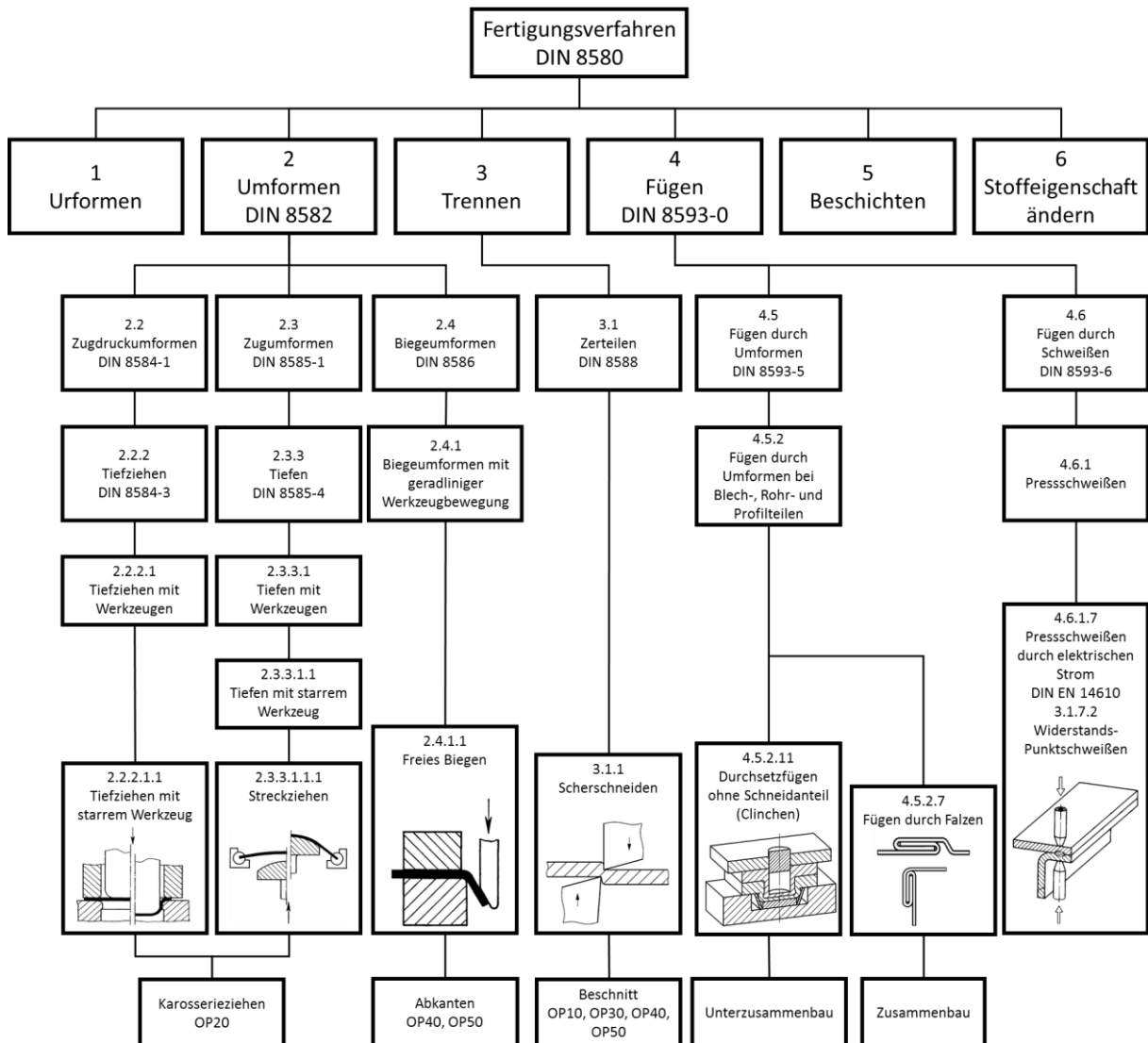


Abb. 2-4: Einordnung von Herstellungsoperationen für eine Motorhaube nach [DIN8580, DIN8582, DIN85841, DIN85843, DIN85851, DIN85854, DIN8586, DIN8588, DIN8593, DIN85935, DIN85936, DIN14610].

Wie bereits im Prozessplan (vgl. Abb. 2-2) dargestellt, sind zur Herstellung von Außenhautbauteilen die Fertigungsverfahren Scherschneiden in den Beschnittoperationen, das Karosserieziehen als kombiniertes Tief- und Streckziehen sowie das freie Biegen in den Abkantoperationen erforderlich. Entsprechend dieser Auflistung werden auch alle anderen Einzelteile hergestellt. Die zugehörigen Prozesspläne werden zu einem späteren Zeitpunkt (vgl. Kapitel 4.2) aufgeführt. Beim anschließenden Fügeprozess der Verstärkungsteile mit dem Gerippe werden

die Bauteile punktuell durch Clinchen (vgl. Kapitel 2.5) oder Widerstandspunktschweißen verbunden. Der dadurch entstehende UZSB wird anschließend in einer Falzanlage zum fertigen ZSB gefügt (vgl. Kapitel 2.6).

In den folgenden Kapiteln werden die beschriebenen Fertigungsverfahren nach Abb. 2-4 erläutert. Dabei liegt der Fokus auf den Prozessen zur Herstellung einer konventionellen Karosseriebaugruppe von der Einzelteilherstellung im Presswerk bis zur gefalzten Baugruppe im Rohbau sowie den heutigen Simulationsmethoden zur digitalen Abbildung dieser Prozesse.

2.2 Karosserieziehen

Das Karosserieziehen ist ein gängiger Begriff in der Automobilindustrie und wird in der Fachliteratur als eine Kombination aus Tiefziehen und Streckziehen beschrieben, ist jedoch selbst als Begriff nicht genormt. Beim Tiefziehen wird ein ebener Blechzuschnitt (Platine oder Ronde) zu einem einseitig offenen Hohlkörper umgeformt (Zug-Druck-Umformung).

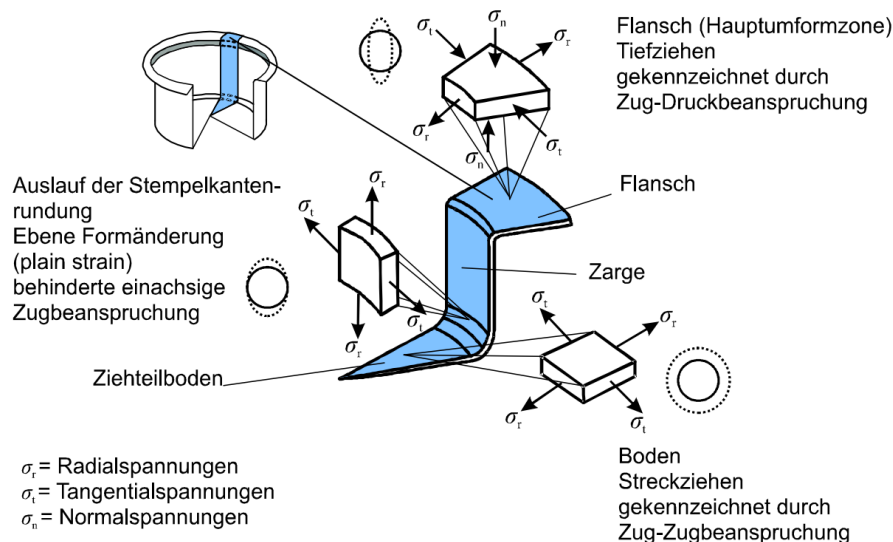


Abb. 2-5: Spannungszustände beim Tiefziehen [Doe07].

Als Streckziehen wird nach DIN8584 „das Tiefen eines Zuschnittes mit einem starren Stempel, wobei das Werkstück am Rand fest eingespannt ist“ bezeichnet (Zugumformen). Während beim Tiefziehen die Umformung ohne beabsichtigte Änderung der Blechdicke erfolgt, fließt beim Streckziehen der Werkstoff aus der Blechdicke (beabsichtigte bzw. zugelassene Blechdickenänderung).

Beim Ziehen von Karosseriebauteilen bestimmt im Wesentlichen die Geometrie des Werkstücks, welches der beiden Verfahren aufgrund aktuell vorherrschender Spannungszustände dominiert. Bauteilbereiche können während der Umformung demnach phasenweise Zug- als auch Zug-Druckbeanspruchungen erfahren, weshalb hierbei eine Mischform von Tief- und Streckziehen vorherrscht und daher vom Karosserieziehen gesprochen wird.

2.2.1 Versagensfälle beim Karosserieziehen

Die geometrische Komplexität der im modernen Karosseriebau zu fertigenden Bauteilgeometrien führt zu einem ungleichmäßigen Blechkanteneinzug der Platine und einer inhomogenen Spannungsverteilung im Ziehteil. Dadurch ist der Arbeitsbereich beim Karosserieziehen, in dem Gutteile hergestellt werden können, stark eingeschränkt [Lie12, Lie14, Pap11]. Die inhomogene Spannungsverteilung im Bauteil kann zu spezifischen Versagensfällen führen (vgl. Abb. 2-6), die zu Ausschuss des Bauteils führen. Die verschiedenen Versagensfälle gilt es durch gezielte Werkzeugoptimierungen zu vermeiden. In Abb. 2-6 sind die häufigsten Versagensfälle des Karosserieziehens dargestellt.

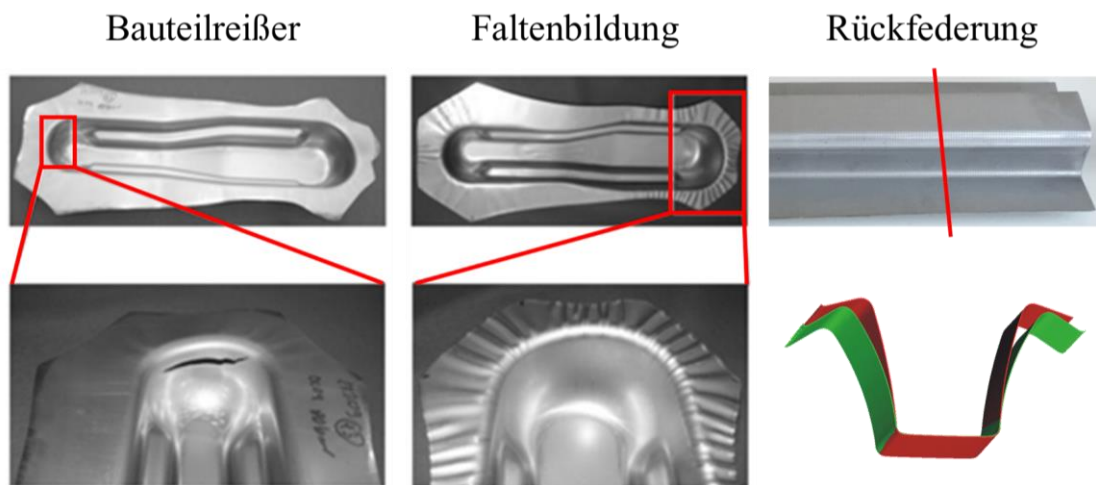


Abb. 2-6: Versagensfälle beim Karosserieziehen nach [Cwi11], [Goe10] und [Sch15c].

Bauteilreißer oder auch Einschnürungen treten bei Überschreiten des Formänderungsvermögens des Blechwerkstoffes auf und führen häufig zum Ausschuss eines Ziehteils. Diese treten in der Regel im Bodenradius oder im Übergangsbereich des Bodenradius zur Zarge auf (vgl. Abb. 2-5). In der FE-Simulation wird zur Ermittlung dieses Versagensfalls in der Regel die FLC verwendet.

Bei der Faltenbildung wird in der Blechumformung zwischen der Faltenbildung 1. Art und 2. Art unterschieden. Im Gegensatz zum Versagen des Bauteilreißen sind sie nicht auf die im Prozess auftretenden Formänderungen zurückzuführen, sondern auf die lokal vorherrschenden Spannungszustände im Bauteil. Dabei entstehen Falten 1. Art stets durch tangential Druckspannungen im Flansch- bzw. Blechhalterbereich. Falten 2. Art entstehen in Bauteilbereichen mit tangentialen Druckspannungen, vornehmlich im Zargenbereich (vgl. Abb. 2-5) und in Bereichen freier Überspannung der Platine ohne direkten Werkzeugkontakt, sowie in der Bauteilfläche selbst [Emr13]. In der Simulation kann die Faltenbildung durch eine Vielzahl von Kriterien bewertet werden [Han14, Han15, Lie11, Lie15a, Lie15b], auf die in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen wird. Die Faltenbildung kann in der Praxis u.a. durch Erhöhung der

Rückhaltekraft der Platine (Blechhalterkraft, Ziehsicken) oder durch Einbringen von sog. Verbrauchern in einer Ankonstruktion aber auch im Bauteilbereich selbst vermieden werden. Daher ist es wichtig, den Platinenkanteneinzug gezielt und prozessabhängig zu steuern.

Beim Karosserieziehen wird der Platinenkanteneinzug primär durch die Rückhaltung der Platine im Flanschbereich gesteuert. Abb. 2-7 zeigt heute in der Praxis übliche Möglichkeiten zur Beeinflussung der Platinenrückhaltung.

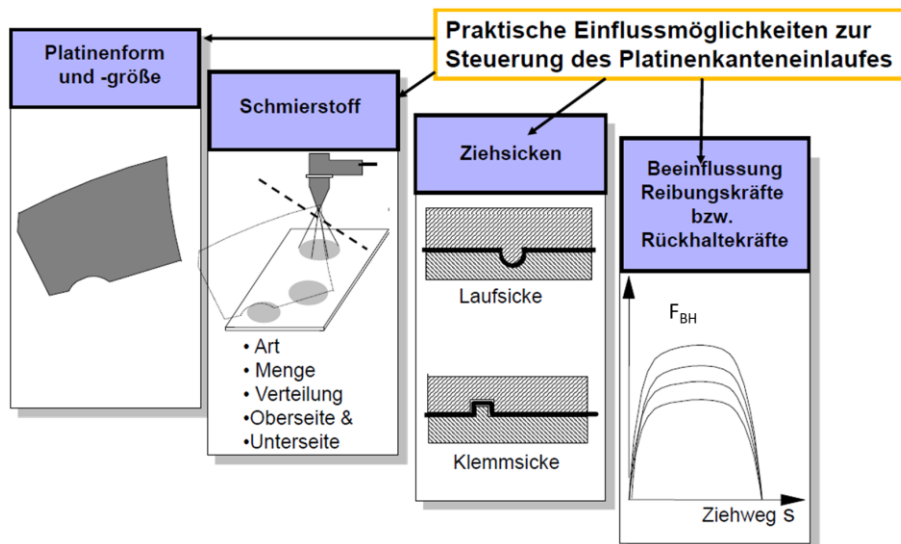


Abb. 2-7: Möglichkeiten der Beeinflussung der Rückhaltewirkung des Ziehteilflansches [Lie19].

Der Flanscheinlauf wird hauptsächlich durch die im Umformprozess entstehende Reibungskraft zwischen Blechhalter und Platine sowie zwischen Platine und Matrize beeinflusst. So ist z.B. die Rückhaltung direkt abhängig von der Wahl des Schmierstoffes und der Schmierstoffmenge sowie der eingestellten Blechhalterkraft. Durch Variation der Platinengröße und -geometrie kann die Rückhaltung im Bereich des Bauteilflansches ebenfalls gezielt beeinflusst werden. Mit zusätzlicher Einbringung sog. Ziehsicken in die Matrize, respektive in die Blechhaltergeometrie, kann der Platinenkanteneinzug im Zargenbereich des Bauteils verändert werden. Durch mehrmalige Umlenkung und Biegung des Platinenrandes aufgrund des Durchlaufens einer Sicke im Flanschbereich wird der Platinenkanteneinzug gebremst und ein reduziertes Einlaufen der Platine in den Ziehspalt erreicht [Sie15]. Je nach Sickengeometrie kann der Flanscheinlauf behindert werden (Laufsicke) oder sogar ganz unterbunden werden (Klemmsicke). Für die Gestaltung der Ziehsicken werden bei den einzelnen Werkzeugherstellern definierte Ausführungsgeometrien verwendet. Ziehsicken können dabei vereinfacht in Halbrundziehsicken und Rechteckziehsicken unterteilt werden (vgl. Abb. 4-20). Zusätzlich können bei den Ziehsickengeometrien die jeweiligen Parameter wie Einlaufradien (R_3 und R_4 , vgl. Abb. 4-20) und Ziehsickentiefen (H_2 , vgl. Abb. 4-20) etc. festgelegt werden, wodurch die Anzahl der eingesetzten Ziehsickenvarianten verringert wird. Während der Einarbeitung der Werkzeuge werden die

Ziehsicken durch manuelles Schleifen in ihrer Höhe vorsichtig reduziert bzw. durch Auftragschweißen und anschließender manueller oder maschineller Bearbeitung erhöht. Dabei sollte allerdings das Auftragsschweißen vermieden werden, da sich der Wärmeeintrag negativ auf die Form und die Standzeit der Werkzeuge auswirken kann. Daher wird in der Praxis ein Aufmaß für die Einarbeitung der Ziehsicken vorgesehen, sodass die Anpassung der Höhe lediglich durch deren Reduzierung mittels manueller Bearbeitung erfolgt. Dieser Aufwand zur manuellen Einarbeitung der Ziehsicken wird betrieben, da jeder Bereich des Ziehumrisses einen speziellen Platinenkanteneinzug zur Folge hat und somit das Ziehergebnis hinsichtlich Reißen, Faltenbildung und Rückfederung maßgeblich beeinflusst.

2.2.2 Rückfederung metallischer Werkstoffe

Einen maßgeblichen Faktor für die dimensionale Bauteilgenauigkeit von Karosseriebauteilen und von ZSB bildet der Betrag der elastischen Rückfederung nach der Umformung bzw. nach der Fügeoperation. Nach der Umformung stehen die Spannungen in einem Werkstück im Gleichgewicht mit den Werkzeugkräften der geschlossenen Werkzeuge. Je nach Betrag dieser Spannungen entstehen unterhalb der Streckgrenze elastische (reversible) und darüber plastische (irreversible) Dehnungsanteile. Nach Entlastung des Bauteils bzw. des ZSB durch das Öffnen der Werkzeuge und wirkender Spannelemente bewirkt die daraus resultierende Veränderung im Lastkollektiv eine Spannungsumlagerung im Bauteil oder in der Baugruppe. Diese führt zu einer Rückfederung, wobei weiterhin merkliche Restspannungen (sog. Eigenspannungen) im Bauteil erhalten bleiben. Diese Eigenspannungen können sich wiederum in Folgeoperationen oder -prozessen negativ auf die dimensionale Bauteilgenauigkeit auswirken (vgl. Kapitel 2.3). Die Rückfederung der Bauteile lässt sich nicht vermeiden, sondern kann nur durch geometriespezifische Gegenmaßnahmen kompensiert werden (vgl. Kapitel 2.8). Der Betrag der Rückfederung ist dabei hauptsächlich abhängig von der Geometrie des Bauteils (oder der Baugruppe), vom eingesetzten Werkstoff und den wirkenden Spannungen während der Operationsfolge im Presswerk. Abb. 2-8 zeigt den Einfluss ausgewählter Materialeigenschaften auf den Betrag der elastischen Dehnung. Bei kleinerem E-Modul oder erhöhter Werkstofffestigkeit steigt der Betrag der elastischen Dehnung und somit der Betrag der Rückfederung des Bauteils.

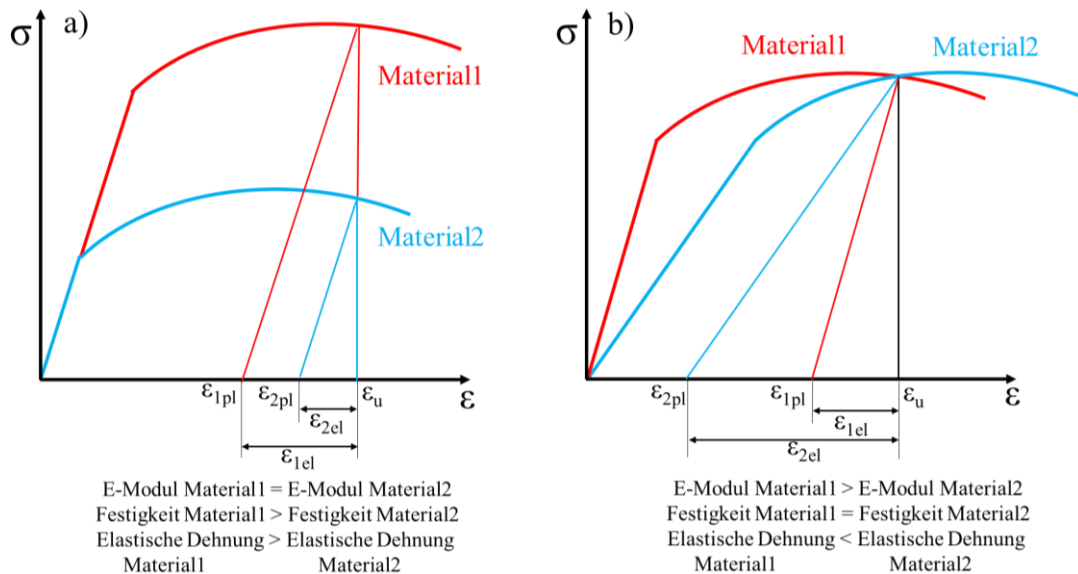


Abb. 2-8: Einfluss des Streckgrenzeniveaus a) und des E-Moduls b) auf den elastischen Dehnungsbetrag, dargestellt im Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

Nach [Rol04] ist aufgrund der komplexen Formänderungs- und Spannungsverhältnisse in Karosserieblechformteilen eine analytische Berechnung der exakten Voraussage der rückfederungsbedingten Formabweichungen nicht möglich. Die Formabweichung durch Rückfederung kann mithilfe zweier Grundmechanismen erläutert werden:

- Biegespannungen senkrecht zur Blechdicke
- unterschiedliche Membranspannung in der Platinenebene

Auf diese grundsätzlichen Rückfederungsmechanismen wird in Kapitel 2.4 näher eingegangen.

2.3 Scherschneiden

Auf das Karosserieziehen in der Serienfertigung folgen meist eine oder mehrere Beschnittoperationen. Die Anzahl der Beschnittoperationen ist abhängig von der Teilegeometrie und den Folgeoperationen. Dabei wird das Werkstück zwischen zwei Schneiden zerteilt, die sich parallel aneinander vorbei bewegen [DIN8588]. Der sich ergebende Winkel zwischen dem Schneidewerkzeug und dem Bauteil wird als sog. Schnittwinkel bezeichnet. Um ein bestmögliches Schnittergebnis zu erhalten, erfolgt der Bauteilbeschnitt rechtwinklig zur Bauteilebene. Aufgrund der Bauteilgeometrie kann dieser jedoch davon abweichen, sodass nicht im optimalen Winkel aus Pressenarbeitsrichtung beschnitten werden kann. Bei abweichenden spitzen bzw. stumpfen Schnittwinkeln von ca. 15° (Richtwert für Stahl) zur Arbeitsrichtung werden sog. Schieber eingesetzt, um einen optimalen Schnittwinkel zu ermöglichen. Der dabei entstehende Abfall wird aus dem Presswerkzeug abgeführt (z.B. durch Abfallschächte oder Rutschen). Aus diesem Grund wird das Werkstück abhängig von der Bauteilgröße in der Regel segmentiert

beschnitten, um die einzelnen Abfallstücke klein zu halten und in der Serienfertigung prozesssicher abführen zu können. Bei sich anschließenden Abkantoperationen (vgl. Kapitel 2.4) bestimmt die Beschnittkurve in den Beschnittoperationen die Flanschlängen des Fertigteils. Wird im Anschluss dieser Flansch zusätzlich gefalzt (vgl. Kapitel 2.6), werden die hierfür erforderlichen Flanschlängen im Methodenplan für das Falzen festgelegt.

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, weist ein Bauteil nach einem Umformprozess wie dem Karosserieziehen Restspannungen auf. Durch eine Beschnittoperation werden Bauteilbereiche mit teilweise hohem elastischen Spannungsanteil entfernt, sodass sich zur eigentlichen Rückfederung nach der Umformoperation ein weiterer Rückfederungseffekt im Bauteil einstellt. Die Beschnittkante selbst wird durch die Beschnittoperation selbst plastisch verformt, dies wiederum führt zu einer weiteren Maßabweichung beim Bauteilbeschnitt. Somit kann festgestellt werden, dass die Beschneideoperation maßgeblich die Rückfederung des finalen Bauteils beeinflusst. Das Scherschneiden wird bei der Karosserieteileherstellung in folgenden Anwendungsfällen eingesetzt:

	Anwendung in der Karosserieherstellung
Abschneiden	Platinenschneiden vom Coil (quer zur Vorschubrichtung)
Ausklinken	Freischnitte an der Beschnittkante zur Verbesserung nachfolgender Biegeumformverfahren. Ausklinken von Positionierhilfen für die Bauteilpositionierung in Folgeoperationen
Ausschneiden	Vollständiges Heraustrennen eines Bauteils oder Platine entlang einer geschlossenen Schnittlinie aus einem größeren Halbzeug, z.B. Rondenschneiden aus einer Rechteckplatine
Beschneiden	Wesentliches Verfahren zur Erzeugung der Außenkontur von Karosserieteilen wie z.B. Beschnittoperationen nach dem Tiefziehen. Abschneiden von räumlich geformten Bauteilen
Lochen	Einbringen von Löchern beliebiger Kontur z.B. für Abstecklöcher für Folgeoperationen. Das Bauteil kann 2D- oder 3D geformt sein
Zerschneiden	Herstellung von Spaltband (längs zur Vorschubrichtung)

Tabelle 2-1: Anwendungsfälle des Scherschneidens in der Karosserieteileherstellung nach [Doe10, Klo06, Lan75].

2.4 Abkanten

Das Abkanten (oder auch Abstellen) stellt einen Biegeprozess dar und wird nach DIN 8586 der Untergruppe 2.4.1.1 „Freies Biegen“ zugeordnet. Das Abkanten kann weiterhin in die beiden Hauptgruppen Biegeumformen mit geradliniger und drehender Werkzeugbewegung unterteilt werden. Beim Abkanten wird das Bauteil zunächst kraftschlüssig zwischen Niederhalter und Formstempel fixiert. Anschließend wird das freie Bauteilende mit dem Abkantbacken um den Radius der Bauteilaufnahme (Unterteil des Werkzeuges) gebogen. Abb. 2-9 veranschaulicht das Abkanten eines geraden Bauteils (Winkel). Dieser Biegeumformprozess kann mathematisch mit der elementaren Biegetheorie eines Balkens beschrieben werden. Als Biegespannung

wird die aufgrund des wirkenden Biegemomentes erzeugte Spannungsverteilung in Blechdickenrichtung bezeichnet.

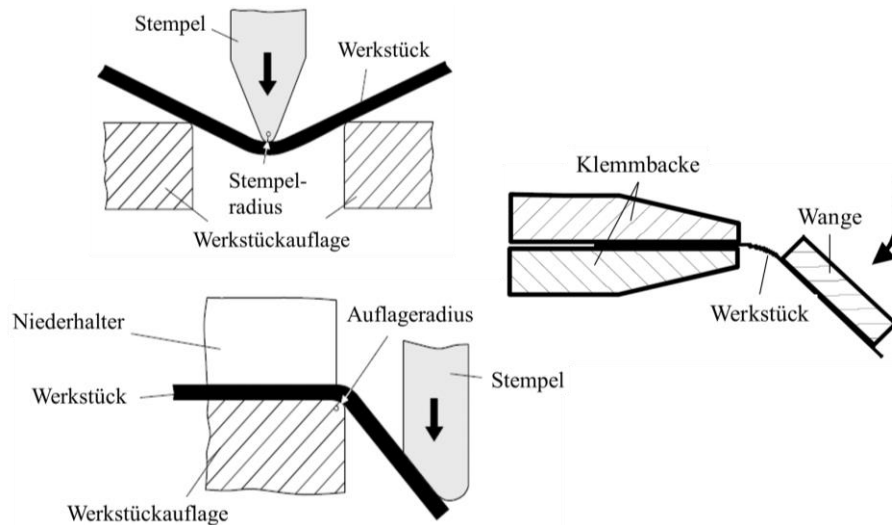


Abb. 2-9: Biegeumformen mit geradliniger (links) und drehender Werkzeugbewegung (rechts) nach [Doe07] und [Lie19].

Während der Umformung treten Zugspannungen in den Außenfasern und Druckspannungen in den Innenfasern auf. Die Umformzone erstreckt sich dabei nicht über die gesamte Blechdicke. Auch bei kleinen Biegeradien wird beim freien Biegen von geraden Bauteilen keine vollständige Plastifizierung des Platinenquerschnittes in Blechdickenrichtung erreicht. Dadurch verbleiben nach Entlastung stets Eigenspannungen im Bauteil (vgl. Abb. 2-10 unten).

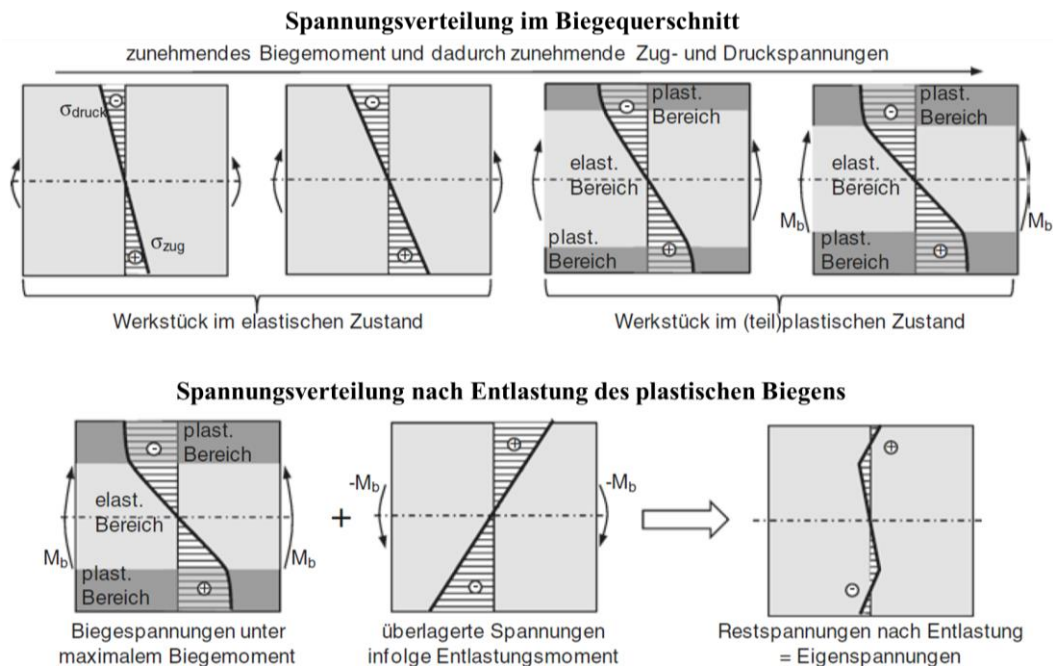


Abb. 2-10: Auftretende Spannungen und Dehnungen während des Biegeumformens und nach Entastung [Bir13].

Eine vollständige Plastifizierung kann nur durch zusätzliche Überlagerung von Zugspannungen, etwa beim ziehenden Biegen oder bei konvex bzw. konkav gekrümmten Bauteilkonturen erreicht werden. Die beschriebenen Spannungszustände werden dann zusätzlich von Zugspannungen (konkave Bauteilkontur) oder Druckspannungen (konvexe Bauteilkontur vgl. Abb. 2-11) im Flanschbereich tangential zur Arbeitsrichtung überlagert.

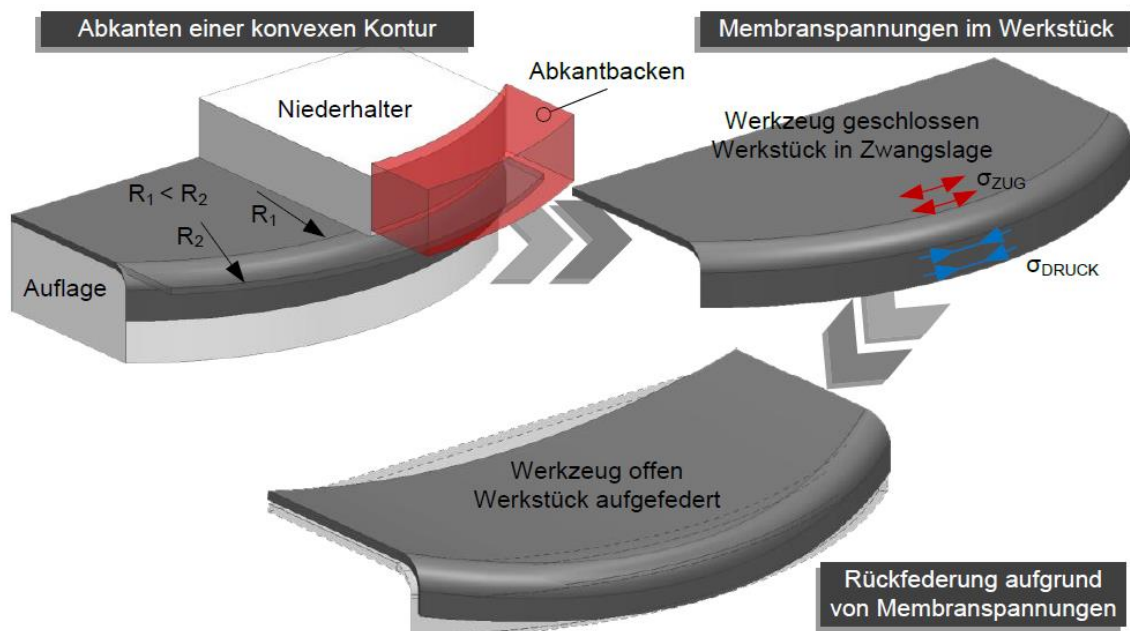


Abb. 2-11: Überlagerung von Druckspannungen im Flanschbereich beim Abkanten eines konvexen Bauteils [Kae16].

Diese auftretenden Zug- bzw. Druckspannungen werden als Membranspannungen bezeichnet. Bei komplexen Karosseriebauteilen stellt sich in der Regel eine Kombination aus diesen Spannungszuständen ein. Die daraus resultierende Rückfederung lässt sich daher nicht mehr analytisch berechnen, sondern muss näherungsweise mit geeigneten FE-Codes numerisch berechnet werden. Biegeprozesse, wie das Abkanten, besitzen daher einen großen Einfluss auf das Rückfederungsverhalten von großflächigen Bauteilen aus Blech und damit auch auf die dimensionale Bauteilgenauigkeit eines ZSB, wenn dieses aus abgekanteten Bauteilen besteht [Kae16].

2.5 Punktueller Fügeverfahren im Karosseriebau

Fügen ist nach DIN 8593 das dauerhafte Verbinden von mindestens zwei Bauteilen. Das zur Verbindung von Stahlblechen am häufigsten eingesetzte Fügeverfahren im Karosseriebau ist das Punktschweißen. Dabei werden mindestens zwei Bauteile mithilfe von Schweißelektroden aneinandergespresst und der Grundwerkstoff in der sog. Schweißlinse durch einen Stromfluss zwischen den Elektroden aufgeschmolzen. Nach der Erstarrung der Schweißlinse sind die Fügepartner stoffschlüssig miteinander verbunden.

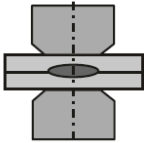
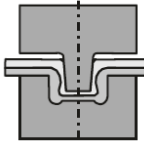
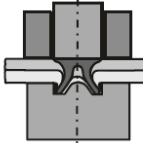
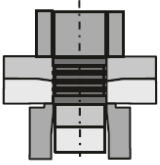
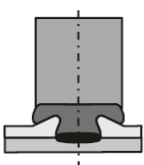
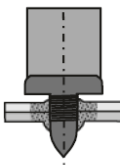
Punktueller Fügeverfahren			
	Punktschweißen	Clinchen	Halbhohl-Stanznieten
Verfahrens- prinzip			
Praxis- beispiel	Stahlblech/ Stahlblech	Stahlblech/ Alublech	Stahlblech// Alublech/-guss
Zugäng- lichkeit	beidseitig	beidseitig	beidseitig
Wirkprinzip	stoffschlüssig	kraft- und formschlüssig	kraft- und formschlüssig
	Voll-Stanznieten	Reibelement- schweißen	Fließbloßschrauben
Verfahrens- prinzip			
Praxis- beispiel	Stahlblech// Alublech/-guss	Alublech/-guss// Stahlblech (presshart)	Alublech/-guss// Stahlblech
Zugäng- lichkeit	beidseitig	beidseitig, weil große Andrückkraft	einseitig
Wirkprinzip	kraft- und formschlüssig	stoff-/kraft-/formschlüssig	kraft- und formschlüssig

Abb. 2-12: Übersicht gängiger Fügeverfahren mit punktueller Fügeverbindung [Bir13].

Da der hierbei entstehende Verzug sowie die auftretende Gefügeveränderungen des Blechwerkstoffs unerwünscht sind, wurden andere Fügeverfahren, wie z.B. das Clinchen entwickelt. Clinchen ist das Fügen von zwei oder mehrerer überlappend angeordneter Blechteile, die mittels Kaltumformen mithilfe eines Stempels und einer Matrize gefügt werden (Fügen durch Umformen). Die Bauteile werden dabei mithilfe geeigneter Werkzeuge durchsetzt (Blechwerkstoff wird partiell aus der Blechebene in Stempelrichtung verschoben) und anschließend gestaucht, sodass durch Breiten und Fließpressen eine form- und kraftschlüssige, unlösbar Verbindung entsteht (DVS 3420). Das ursprünglich für Aluminiumwerkstoffe entwickelte Clinchen findet heutzutage auch bei der Verbindung von Stahlblechen Anwendung, wie beispielsweise beim Fügen des UZSB der in dieser Arbeit untersuchten Motorhaube.

Beim Fügen werden die Bauteile zunächst definiert zueinander positioniert und gespannt. Hierzu werden die Bauteile mithilfe von Anschlägen, Stiften und Aufnahmen in eine Fügestation (auch Geo-Station genannt vgl. Abb. 4-26) eingelegt und anschließend gespannt. Aufgrund teilweise erschwelter Zugänglichkeit der Fügeworkzeuge in der Fügestation muss häufig in mehreren Stationen gefügt oder durch sequentielles Öffnen und Schließen der Spanner eine schrittweise Fügeabfolge realisiert werden. Diese Vorgehensweise findet auch beim Rollfalzen häufig Anwendung, welches im nächsten Kapitel beschrieben wird.

2.6 Falzen

Falzen ist das „Fügen durch Umformen derart, dass an ihren Rändern vorbereitete Blechteile ineinandergelegt oder ineinandergeschoben werden und durch Umlegen der Ränder einen Formschluss erhalten“ (DIN 85935). Nach dem Abkanten (vgl. Kapitel 2.4) wird ein Innenblech (oder auch ein UZSB) in eine Außenhaut (auch Beplankungsteil genannt) eingelegt und zueinander positioniert. Dieser Vorgang wird in der Praxis als „Schachteln“ bezeichnet. Das Schachteln erfolgt entweder direkt im Falzbett (vgl. Abb. 2-15) oder in einer vorgelagerten Station. In beiden Fällen muss, wie in der Fügestation auch, eine definierte Positionierung der Einzelteile zueinander bzw. eine definierte Positionierung der Baugruppe in der Falzstation sichergestellt werden. Mit Niederhaltern wird die Baugruppe anschließend in der Falzstation fixiert und ein gegenseitiges Verschieben der Bauteile während des Falzprozesses verhindert. Anschließend beginnt der eigentliche Falzprozess. Der zuvor abgekantete Bauteilflansch des Beplankungsteils wird im Falzprozess in mehreren Falzoperationen umgeformt. Dabei wirkt auf den Bauteilflansch eine je nach Falzbackengeometrie (beim Maschinenfalzen, Abb. 2-13) oder räumlicher Position der Falzrolle (beim Rollfalzen, Abb. 2-16) wirkende Falzkraft mit einer normal zum Falzbett und einer dazu orthogonal wirkenden Kraftkomponente.

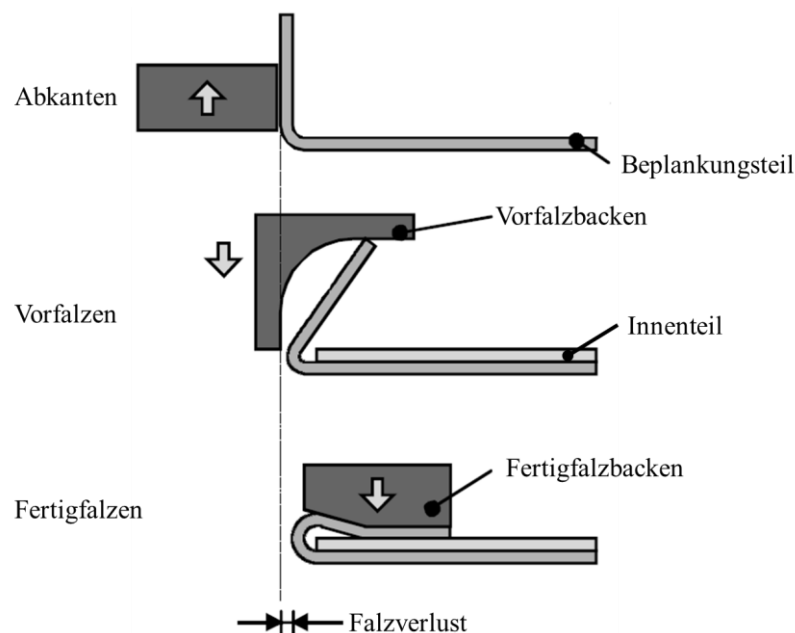


Abb. 2-13: Beispiel für das Falzen mit starren Falzwerkzeugen nach [Sie93].

Die orthogonal auf den Flansch wirkende Komponente verursacht in diesem ein Biegemoment. Durch die höhere Verfestigung des Abkantradius durch den Abkantvorgang selbst wird zur plastischen Verformung dieses Bereichs ein höheres Biegemoment benötigt, wodurch die Formänderung während des Falzens an einer anderen Stelle als beim Abkanten eingeleitet wird [Hoe16]. Aus diesem Grund kann sich während des Falzens entweder eine Vergrößerung oder

Verkleinerung des Bauteilumrisses einstellen. Bei einer Verkleinerung des Umrisses spricht man vom sog. Falzverlust (vgl. Abb. 2-13). Durch Umformen erzeugte Fügeverbindungen bieten folgende Vorteile [Kae16]:

- Geringes Gewicht (weder Zusatzfügeelement noch -werkstoff werden benötigt)
- Erhöhung der Steifigkeit der gefügten Komponenten
- Geringes Verletzungsrisiko durch außenliegende Falzschlaufen
- Keine bzw. nur geringe lokale Deformationen des Außenhautbauteiles durch den Fügeprozess

Grundsätzlich kann zwischen Maschinenfalzen (Table-Top-Falzen mit starren Werkzeugen) und dem roboterbasierten Rollfalzen unterschieden werden. Die Auswahl des Falzverfahrens erfolgt anhand der Bauteilgeometrie, der geforderten Ausbringung (Taktzeit) der Anlage und der zur Verfügung stehenden Investitionsmittel. Typische Anwendungsfälle des Falzens im Karosseriebau zeigt Abb. 2-14.

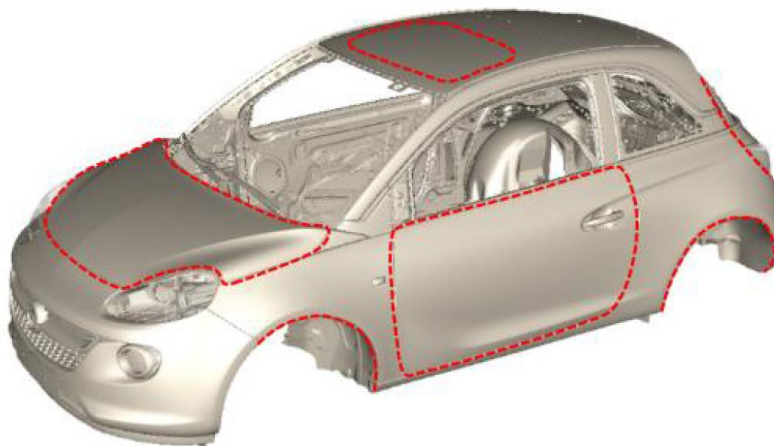


Abb. 2-14: Falzanwendungen am Beispiel des Opel Adam (Modelljahr 2013-2019).

2.6.1 Konventionelles Maschinenfalzen mit starren Werkzeugen

Beim konventionellen Maschinenfalzen wird die geschachtelte Baugruppe mit verschiedenen Falzbacken schrittweise gefügt (vgl. Abb. 2-13). Dabei wird der Flansch der Außenhaut im ersten Falzschrift mithilfe der Vorfalzbacken auf ca. 45° Restöffnungswinkel angestellt (vgl. Abb. 2-15 Vorfalzen). Im zweiten Falzschrift wird der Flansch entlang des Baugruppenumrisses zeitgleich vollständig geschlossen (Fertigfalzen). Dieses Verfahren hat sich für Bauteile, welche nach dem Abkanten einen Öffnungswinkel von 90° aufweisen, etabliert [Sie93].

Das Maschinenfalzen ist grundsätzlich ein Prozess mit einer hohen Ausbringungsleistung. Bei komplexen Bauteilgeometrien steigt die Anlagenkomplexität stark an, sodass der Fügeprozess solcher Teile nur unter Einsatz zahlreicher Backen und Schieber realisiert werden kann, wodurch die Investitionskosten dieser Falzanlagen rapide ansteigen.

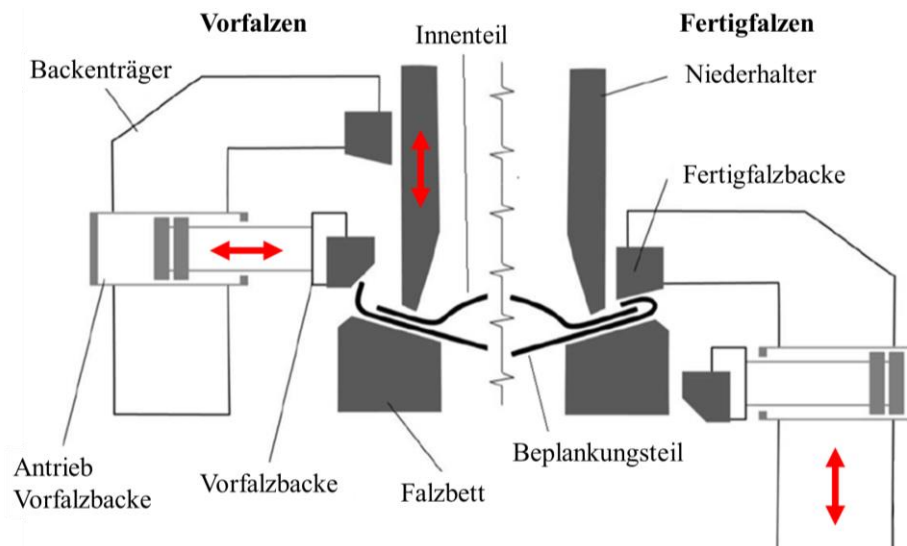


Abb. 2-15: Prinzip des Maschinenfalzens mit starren Werkzeugen und einer Vorfalzoperation mit festem Falzbett nach [Hoe16].

2.6.2 Rollfalzen

Rollfalzen ist ein robotergeführtes Fertigungsverfahren und wird nach [DIN85935] der Gruppe „Fügen durch Umformen“ zugeordnet. Dabei wird im Gegensatz zum Maschinenfalzen nicht mit starren Werkzeugen gefalzt, sondern mit rotierenden Rollen, welche an einem sog. Falzkopf angebracht sind. Das Rollfalzen stellt demnach ein inkrementelles Fügeverfahren dar.

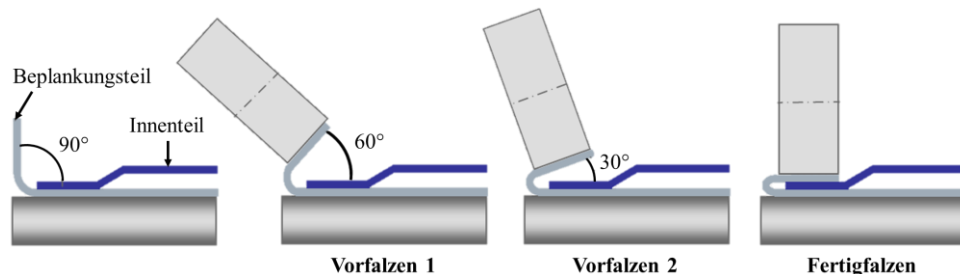


Abb. 2-16: Prinzip des Rollfalzens mit zwei Vorfalzoperationen und einer Fertigfalzoperation nach [Eis09].

Beim Rollfalzen wird der Flansch der Außenhaut durch Bewegung der Falzrolle entlang der Falzbettkante (Falzbahn) inkrementell umgebogen. Dafür haben sich zwei Vorfalzoperationen bewährt (vgl. Abb. 2-16).

Im Vergleich zum Maschinenfalzen hat das Rollfalzen eine deutlich höhere Taktzeit, was durch die praktische Umsetzung folgender Maßnahmen heute weitgehend kompensiert werden kann:

- Verwendung mehrerer parallel arbeitender Falzroboter
- Integration eines Drehtisches in den Falzprozess
- Rollfalzen mit hintereinander laufenden Rollen
- Kombination dieser Maßnahmen

Die Vorteile des Rollfalzens liegen in der hohen Flexibilität der Anlagen und der relativ niedrigen Investitionskosten im Vergleich zu den Maschinenfalzanlagen (z.B. Table-Top-Falzvorrichtungen). Durch die inkrementelle Umformung während des Rollfalzens stellen sich im Flansch andere Spannungszustände ein als beim Maschinenfalzen.

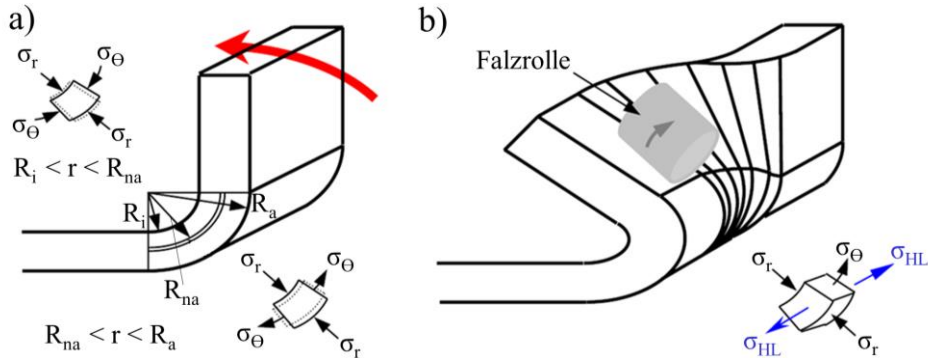


Abb. 2-17: Unterschiedliche Spannungszustände beim a) Maschinenfalzen und b) Rollfalzen [Car05].

Neben den beim Maschinenfalzen auftretenden radialen Druckspannungen σ_r und tangentialen Zugspannungen σ_θ in der Außenfaser des Biegeradius des Falzflansches (vgl. Abb. 2-17 a), treten beim Roboterfalzen zusätzliche Zugspannungen σ_{HL} in Falzbahntangentialrichtung auf. Aus diesem Grund kann bei diesem Verfahren die Oberflächenqualität des Falzflansches durch eine entsprechende Bewegungsrichtung der Falzrolle maßgeblich beeinflusst werden, was gerade in Bereichen kleiner Umrissradien eine wichtige Rolle spielt.

Weitere wichtige Bewertungskriterien für das Falzergebnis sind u.a. die Rissbildung, der Falzverlust und das Spaltmaß (vgl. Abb. 2-18).

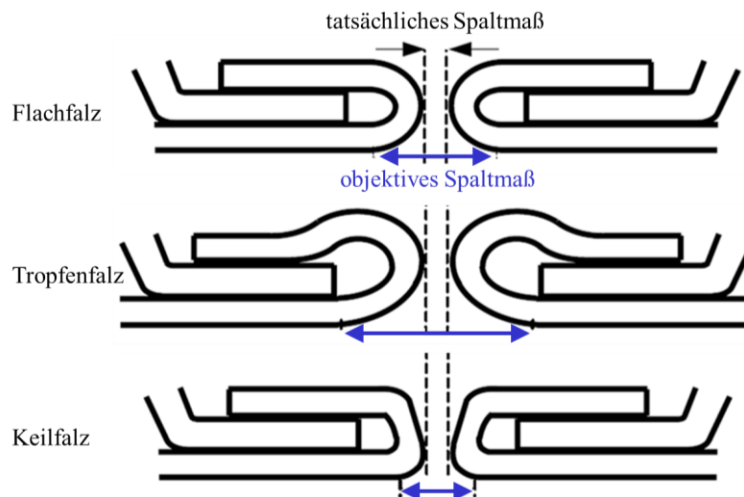


Abb. 2-18: Verhältnis von tatsächlichem zu objektiv wahrgenommenem Spaltmaß bei verschiedenen Falzgeometrien nach [Car05].

Nach [Gra02] hängt die Anmutung einer Karosserie stark vom Verlauf der Fugen zwischen den Anbauteilen ab und bildet somit ein kundenrelevantes Qualitätskriterium. Abb. 2-18 zeigt, wie

unterschiedlich die verschiedenen Falzgeometrien – bei maßlich gleichbleibendem Spaltmaß – vom Betrachter wahrgenommen werden. Je kleiner der Falzaußenradius, desto kleiner ist das objektive Spaltmaß. Dieser Effekt wird in [Bey08, Hoe16] behandelt. Obwohl der Keilfalz das kleinste objektive Spaltmaß besitzt, kann er aufgrund des scharfkantigen Falzaußenradius (Oberflächenfehler, Rissbildung etc.) technologisch nicht immer gefertigt werden. Aus diesem Grund findet der Flachfalz die häufigste Anwendung im Karosseriebau. Der Tropfenfalz wird für den Fußgängerschutz im Bereich des Radlaufs eingesetzt sowie an Bauteilkanten, welche nicht an anderen Bauteilkanten anliegen und somit kein Spaltmaß vorliegt. Durch den auftretenden Falzverlust wird das Spaltmaß dimensional beeinflusst.

2.7 Optische 3D-Messtechnik für räumliche Körper

Zur Qualitätsbeurteilung werden Bauteile und ZSB im Karosseriebau heute vornehmlich durch taktile und auch optische Koordinatenmessverfahren produktionsnah erfasst. Bei taktilen Verfahren werden die kartesischen Koordinaten definierter Punkte durch Antasten mittels eines Messtasters entlang einer festgelegten Richtung auf dem Bauteil erfasst [DIN10360]. Dabei wird der Messtaster bei Kontakt zum Messobjekt ausgelenkt. Die Messtechnik bedarf hierfür einer formstabilen Körperoberfläche. Dabei wird das Tastsystem entweder relativ zum Bauteil oder das Bauteil relativ zum Tastsystem bewegt. Bei großflächigen und nicht eigensteifen Bauteilen gemäß DIN10579 gewinnen die berührungslosen optischen Messverfahren immer mehr an Bedeutung.

	Taktile Messtechnik	Optische Messtechnik nach dem Prinzip der Streifenprojektion
Anforderungen Bauteilsteifigkeit	Messung berührt Bauteil, bei labilen Bauteilen problematisch	berührungslos
Genauigkeit	sehr hoch bis in den μm Bereich	je nach Einstellung bis zu 0,01mm
Anforderungen an die Bauteiloberfläche	unabhängig	problematisch bei Transparenz, Absorption und Glanz
Messumfang	punktuell, Erfassung von Einzelmerkmalen	„digitale Kopie“ des Messobjekts
Auswertemöglichkeiten	solange sich das Messobjekt auf der Koordinatenmessmaschine befindet, können zusätzliche Umfänge betrachtet werden	nachträgliche Auswertung lässt sich durch „digitale Kopie“ ausführen
Messaufbau	stationäre Koordinatenmessmaschine	mobile Systeme, Stativaufbau und robotergeführte Messzellen
Messvolumen	durch Koordinatenmessmaschine eingeschränkt	variables Volumen durch Photogrammetrie

Tabelle 2-2: Vor- und Nachteile taktiler und berührungsloser Messverfahren [Kae16].

Im Unterschied zu den taktilen Verfahren können durch Scannen der gesamten Oberfläche nicht nur einzelne wenige Punktinformationen ausgewertet werden, sondern eine Vielzahl von Oberflächenpunkten (Punktwolke), wodurch die Analyse geschlossener Körperoberflächen mit hoher Genauigkeit ermöglicht wird. Diese Punktwolken können anschließend mit Hilfe spezieller Software in ein Netz umgewandelt werden und mit einem Referenzbauteil verglichen werden. Vor- und Nachteile taktiler und berührungsloser Messverfahren werden in Tabelle 2-2 gegenübergestellt. Für den direkten Vergleich einer optisch vermessenen Oberfläche zu einem Referenzmodell (meist CAD-Daten) muss ein Ausrichtkonzept festgelegt werden. Dieses sog. Referenzpunktsystem (RPS) beschreibt die definierte Ausrichtung eines Bauteils oder einer Baugruppe in einzelnen Ausrichtpunkten und -flächen mit bekannten Raumkoordinaten in Bezug auf das Fahrzeugkoordinatensystem. Dadurch kann stets der Bezug der zu vermessenden Raumstruktur zur Gesamtkarosserie hergestellt werden. Der Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems befindet sich in der Regel in der Mitte der Vorderachse und ist mit der x-Achse entgegen der Fahrtrichtung und z-Achse entgegen der Schwerkraftrichtung ausgerichtet. Für jedes Bauteil und jede Unterbaugruppe sowie Baugruppe werden vom Bauteilentwickler für das Ausrichtkonzept eigene Bezugsstellen festgelegt unter Berücksichtigung einer über alle Fertigungsschritte durchgängigen und reproduzierbaren Positionierungs- und Bezugsmethodik [Kae16]. Dazu zählen bspw. physikalische Aufnahme- und Spannungspunkte in den Mess- und Fügevorrichtungen sowie sog. Funktionsflächen (Anlageflächen), an denen Bauteile zueinander ausgerichtet werden können.

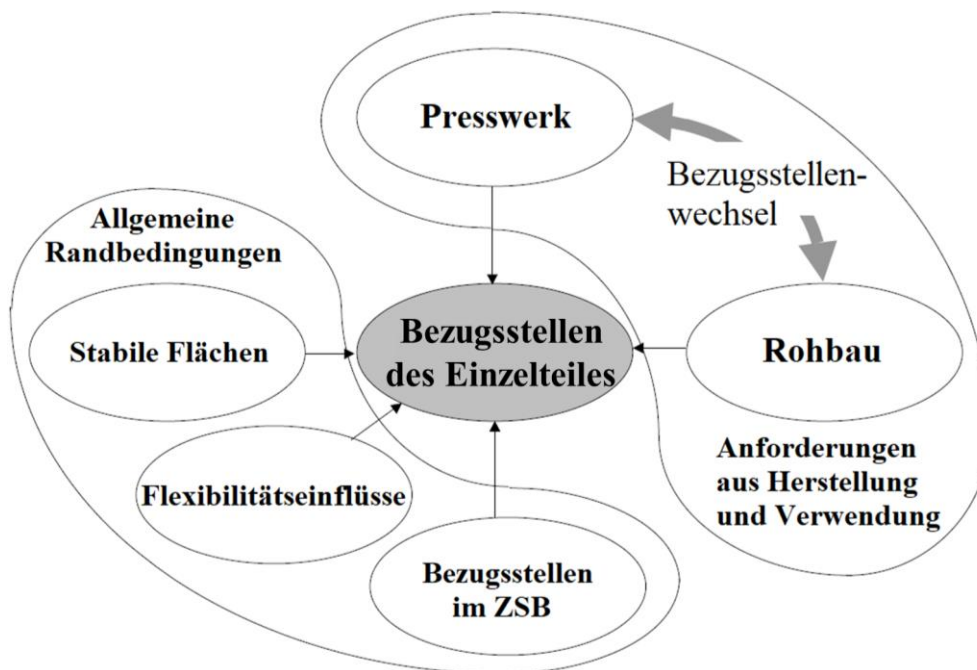


Abb. 2-19: Festlegung von Bezugsstellen für ein geeignetes Ausrichtkonzept von Karosseriebauteilen und -gruppen nach [Boh98].

Dafür werden für das Ausrichtkonzept nach [ISO5459] punktförmige, linienförmige und flächige Bezugsstellen definiert. Dabei hat die Wahl eines geeigneten Ausrichtkonzepts maßgeblichen Einfluss auf die Qualitätssicherung der Bauteile und -gruppen. Abb. 2-20 zeigt diesen Einfluss am Beispiel eines Fügeprozesses von zwei Bauteilen.

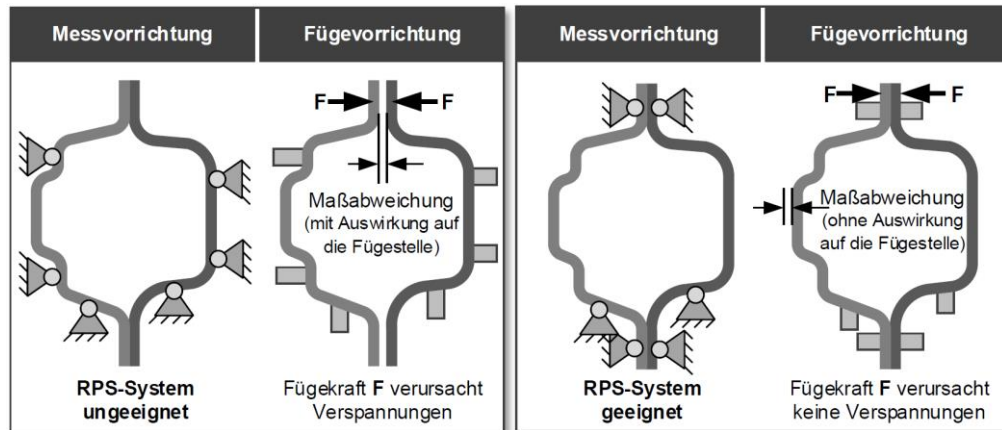


Abb. 2-20: Einfluss des Ausrichtkonzepts auf den Fügeprozess bei ungeeignetem RPS-System (links) und geeignetem RPS-System (rechts) [Kae16].

Anhand der definierten Raumkoordinaten und Ausrichtung der Bezugsstellen zum Fahrzeugkoordinatensystem können die Bauteile und -gruppen nach der Vermessung anschließend zueinander im Raum durch eine Koordinatentransformation ausgerichtet werden. Auf diese Weise können Toleranzketten festgelegt, analysiert sowie der Einfluss von Maßabweichungen auf übergeordnete Baugruppen und die Gesamtkarosserie untersucht werden. Zur Erstellung eines RPS wird in der Automobilindustrie am häufigsten das sog. 3-2-1 Prinzip angewendet (vgl. Abb. 2-21 links). Dabei werden die Freiheitsgrade des Bauteils durch sechs Ausrichtpunkte statisch eindeutig bestimmt.

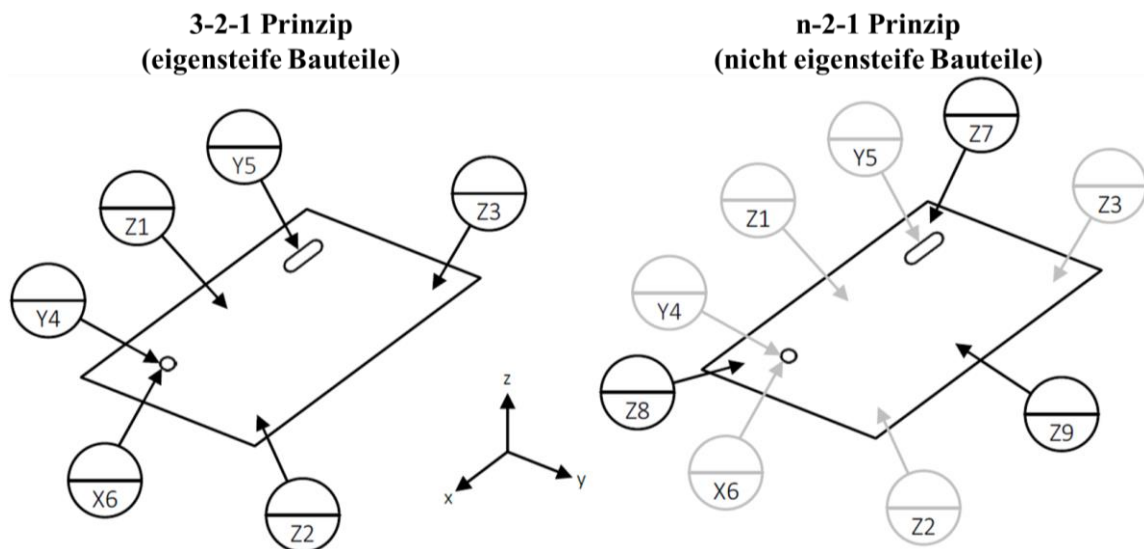


Abb. 2-21: Prinzip der RPS-Ausrichtung einer Blechtafel nach dem 3-2-1 Prinzip (links) und dem n-2-1 Prinzip (rechts) [Ste15].

Drei Ausrichtpunkte bilden die Primärebene (Einschränkung in z-Richtung über Z1, Z2 und Z3). Zwei Punkte in Normalenrichtung zur Primärebene bilden die Sekundärebene (Einschränkung in y-Richtung über Y4 und Y5). Ein Punkt in Normalenrichtung zur Primär- und Sekundärebene bildet die Tertiärebene (Einschränkung in x-Richtung in X6). Die Umsetzung des 3-2-1 Prinzips erfolgt im dargestellten Beispiel auf Basis einer Kombination aus einem Loch (Einschränkung in x- und y-Richtung in X6 und Y4) und einem Langloch (Einschränkung in y-Richtung in Y5). Das 3-2-1 Prinzip findet häufig Anwendung bei eigensteifen Bauteilen wie Struktur- und Verstärkungsteilen. Diese weisen durch den Einfluss der Schwerkraft eine vernachlässigbar kleine Verformung auf. Aus diesem Grund ist es nicht zwingend erforderlich das Bauteil in der Einzelteilmessvorrichtung in der späteren Einbaulage in der Karosserie auszurichten. Großflächige und damit nicht eigensteife Außenhautteile weisen im Gegensatz dazu eine hohe Verformung unter Schwerkrafteinwirkung auf welche zu fehlerhaften Rückschlüssen auf prozessrelevante Einflussgrößen führen können. Deshalb werden sie in der Regel durch zusätzliche Aufnahmepunkte überbestimmt nach dem n-2-1 Prinzip (vgl. Abb. 2-21 rechts) ausgerichtet. Dadurch kann der Deformation des Bauteils aufgrund des Eigengewichts unter Schwerkrafteinwirkung durch weitere Stützpunkte (Einschränkung in z-Richtung in Z7, Z8 und Z9, Abb. 2-21 rechts) entgegengewirkt werden [Cai96]. Zur Vermessung solcher großflächigen Einzelteile erfolgt die Ausrichtung in der Praxis häufig in der späteren Einbaulage in der Karosserie. Zur Erfassung dieser großen und komplexen Bauteiloberflächen werden in der Automobilindustrie heutzutage sog. aktive Messverfahren auf Basis des Triangulationsprinzips mittels Streifenprojektion eingesetzt [Wec06].

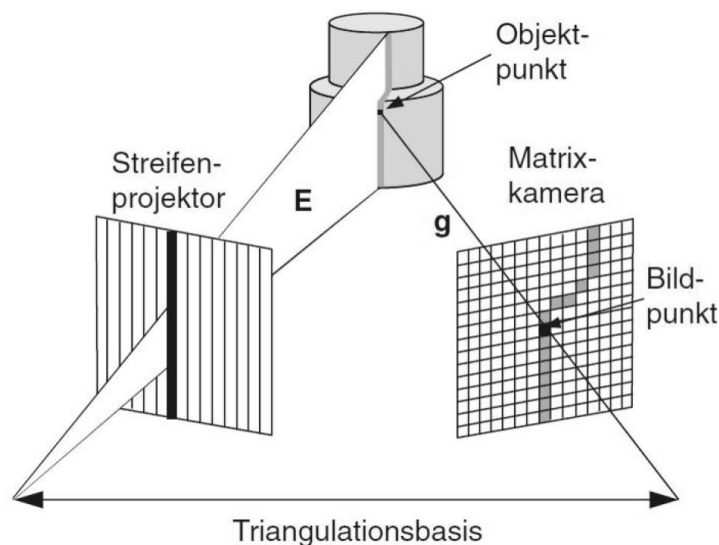


Abb. 2-22: Messprinzip der optischen Messtechnik mittels Triangulation [Wio01].

Dabei wird ein Streifenmuster auf das Messobjekt projiziert und das reflektierte Licht mit einem Kamerasystem aufgenommen. Mithilfe des Austrittswinkels der emittierten Reflexion und des

Einfallswinkels des reflektierten Lichtes wird über mathematische Triangulationsverfahren der Abstand zum Messobjekt ermittelt (vgl. Abb. 2-22).

Je nach Bauteilgröße sind dafür mehrere Messungen aus verschiedenen Aufnahmepositionen notwendig, da der Aufnahmebereich eines Streifenprojektionsscanners eingeschränkt ist (vgl. Abb. 2-25). Die einzelnen Messungen werden anschließend von der Software durch Photogrammetrie zu einer Gesamtpunktwolke zusammengefügt (vgl. Abb. 2-23). Dabei werden die aus den verschiedenen Positionen aufgenommenen einzelnen Punktwolken über Referenzmarken, welche auf dem Messobjekt (Photogrammetrie Verknüpfungspunkte) und der Kontrollvorrichtung (Codierte Photogrammetriemarkierung) appliziert werden, zueinander ausgerichtet.

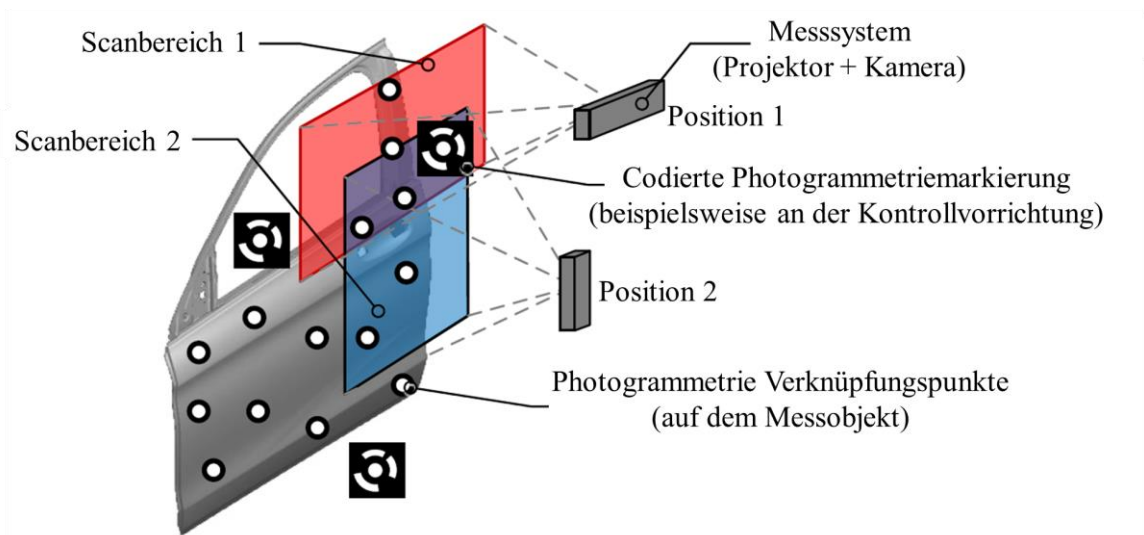


Abb. 2-23: Erweiterung des Flächenscanbereichs durch Photogrammetrie am Beispiel der optischen Vermessung einer Tür [Kae16].

Für die Triangulation muss lediglich eine Mindestanzahl an Referenzmarken (in der Regel mindestens drei auf dem Messobjekt und eine auf der Kontrollvorrichtung) durch das Kamerasystem in der jeweiligen Position erfasst werden. Anschließend wird die auf diese Weise zusammengesetzte Punktwolke durch die Software mittels Polygonisieren zu einem Flächennetz umgewandelt. Anschließend kann das erstellte Flächennetz mithilfe des festgelegten RPS auf ein Referenzkoordinatensystem, in der Regel das Fahrzeugkoordinatensystem transformiert werden und direkt mit dem Referenzmodell verglichen werden. Abweichungen des erstellten Flächennetzes zur Referenzgeometrie werden dann mithilfe verschiedener Softwaresysteme bzw. Spezialprogramme zur Auswertung farblich dargestellt.

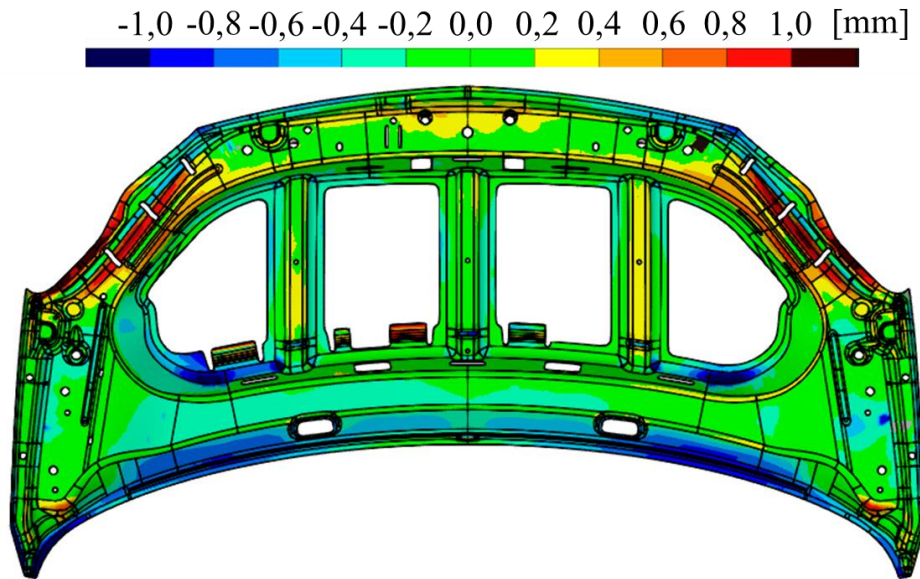


Abb. 2-24: Farbliche Darstellung der Maßabweichungen zwischen einem Flächennetz und dem CAD-Referenzmodell am Beispiel eines Innenteils einer Motorhaube.

Bei den optischen Messsystemen können sich verschiedene Einflüsse wie beispielsweise das Umgebungslicht oder Reflexionen auf der Bauteiloberfläche nachteilig auf das Messergebnis auswirken. Derzeit auf dem Markt verfügbare Streifenprojektionsscanner, wie z.B. den der Firma GOM GmbH (vgl. Abb. 2-25), verwenden daher kurzwelliges blaues Licht, sodass das Umgebungslicht bei der Bildaufnahme herausgefiltert werden kann.

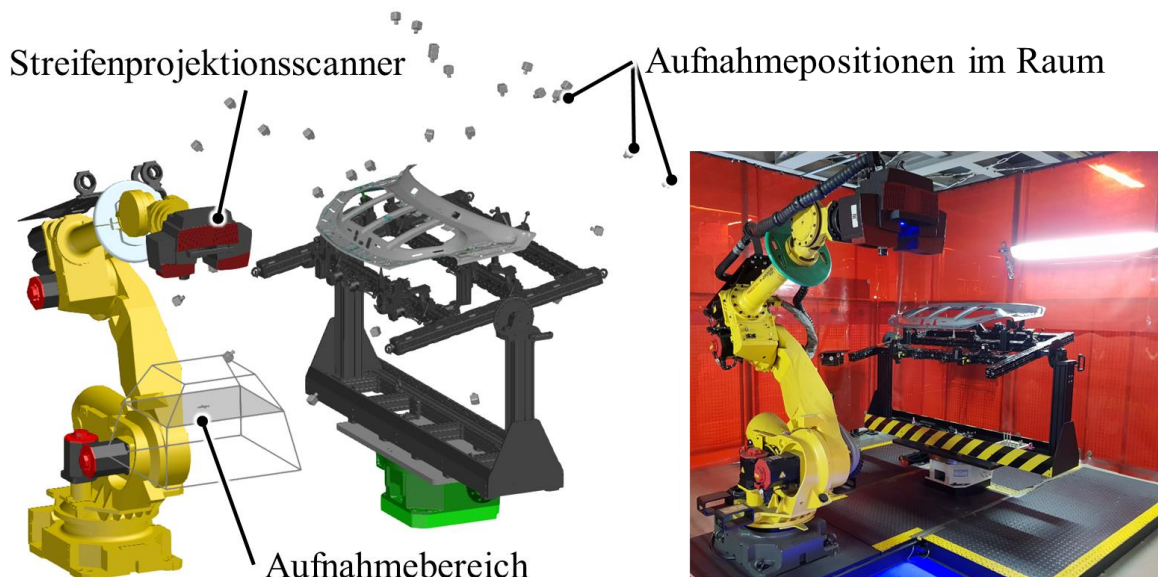


Abb. 2-25: Digitale Auslegung der Scan-Zelle mit Streifenprojektionsscanner des Messsystems GOM Atos (links) und Umsetzung im Messraum im Rohbau (rechts).

2.8 Kompensationsmaßnahmen zur Verbesserung der Maßhaltigkeit von Karosseriezusammenbauten

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 beschrieben, lässt sich die durch elastische Rückfederung nach der Umformung bzw. nach den Fügeoperationen verursachte Maßabweichung von Einzelteilen und Baugruppen nicht vermeiden. Aus diesem Grund werden zur Verbesserung der Maßhaltigkeit von ZSB geometriespezifische Gegenmaßnahmen ergriffen. Das Ziel der festgelegten Maßnahmen stellt die Kompensation der rückfederungsbedingten dimensional Abweichungen der Baugruppe dar. Der Betrag der Rückfederung ist stark von den Materialeigenschaften des Blechwerkstoffes, von der Bauteilgeometrie und der Umform- und Fügemethode abhängig. Aus diesem Grund lässt sich weder für Einzelteile noch für gefügte Zusammenbaugruppen eine allgemeingültige Kompensationsstrategie ableiten [Goe10]. Jedes Bauteil und jede Karosseriebaugruppe werden daher hinsichtlich ihrer Maßhaltigkeit in der Anlaufphase eines Neufahrzeuges spezifisch bewertet und die entsprechenden Umform- und Fügemethoden anschließend dimensional optimiert. Diese verschiedenen bauteil- und prozessspezifischen Kompensationsmöglichkeiten werden im Folgenden kurz erläutert.

2.8.1 Kompensationsmaßnahmen in der Einzelteilherstellung

Die Optimierung der Umform- und Fügemethoden zu Verbesserung der Einzelteilqualität erfolgt heutzutage bereits vor der Werkzeuganfertigung mithilfe der FE-Simulation. Zu diesem Entwicklungszeitpunkt wird die Maßhaltigkeit eines jeden Einzelteils gegenüber Abweichungen zur jeweiligen CAD-Nominalgeometrie virtuell optimiert, da noch keine optischen oder taktilen Messergebnisse der Bauteilqualität aus den Folgeprozessen vorliegen. Die Kompensationsstrategie basiert dabei auf den berechneten Rückfederungsergebnissen der Umformsimulation und auf den Erfahrungswerten des Methodenplaners und Werkzeugbauers. Die Rückfederung der Einzelteile kann im Wesentlichen durch zwei verschiedene Ansätze beeinflusst und kompensiert werden.

Kompensation ohne nennenswerte Änderung des Spannungszustands während der Umformung

Die in der heutigen Praxis des Werkzeugbaus üblicherweise eingesetzte Methode der Rückfederungskompensation in der Einzelteilherstellung ohne nennenswerte Änderung des Spannungszustands stellt jene Methode dar, welche auf einer Anpassung der Werkzeugwirkflächen der Ziehanlage basiert. Dazu wird das Rückfederungsergebnis des Fertigteils bewertet und die Werkzeugwirkflächen entgegen der Rückfederungsrichtung des Fertigteils kompensiert. Die Flächendaten der Werkzeugwirkflächen werden dazu entweder manuell in festgelegten Einzelteilbereichen oder global mithilfe eines abgeleiteten Vektorfeldes aus der Umformsimulation

oder dem Bauteilscan erster Ziehversuche modifiziert. In der Regel müssen die modifizierten Flächendaten allerdings nachträglich in einem CAD-Programm überarbeitet werden. Dafür stehen in den gängigen CAD-Programmen, wie z.B. Siemens NX, Catia oder Tebis verschiedene Module zur Verfügung. Bei dieser CAD-Aufbereitung der Umformwirkflächen besteht die größte Herausforderung darin, krümmungsstetige Wirkflächen zu erzeugen, um die optischen Anforderungen an Außenhautbauteile (sog. Class A-Oberflächen) zu gewährleisten [Kae16].

Das Prinzip der Rückfederungskompensation basiert auf der Anwendung eines sog. Kompensationsfaktors κ :

$$\kappa = \frac{l_K}{l_A} \quad (1)$$

Dieser beschreibt das Verhältnis zwischen dem Betrag der Rückfederung l_A vor der Kompensation und der Abweichung der kompensierten Wirkfläche gegenüber der Nominalgeometrie l_K . Aufgrund der Tatsache, dass trotz der Wirkflächenkompensation der Ziehanlage der Spannungszustand während der Umformung und damit der Betrag der Rückfederung nach Entlastung des Bauteils in der Regel nahezu konstant bleibt, wird in der ersten Iteration ein Kompensationsfaktor von $\kappa = 1$ (d.h. $l_K = l_A$ Abb. 2-26) verwendet.

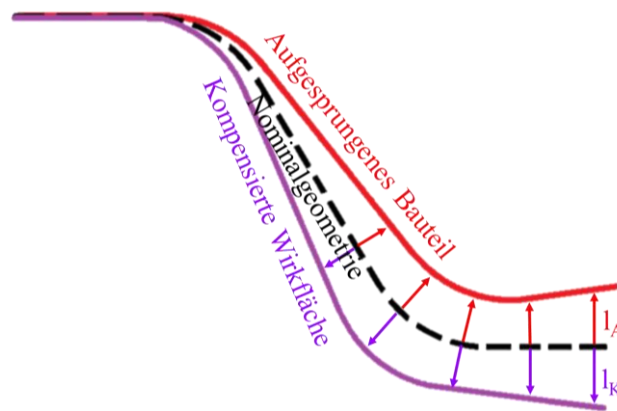


Abb. 2-26: Prinzip der Rückfederungskompensation von Werkzeugwirkflächen entgegen der Rückfederungsrichtung.

Da das Bauteil nahezu um denselben Betrag zurückfedert, wie dies bereits vor der Kompensation der Fall war, führt die Modifikation der Wirkfläche dazu, dass nunmehr das Bauteil nach der Rückfederung im Idealfall die angestrebte Nominalgeometrie erreicht.

Eine weitere gängige Kompensationsmaßnahme ohne nennenswerte Änderung des Spannungszustands im Blechbauteil stellt das Skalieren der Ziehoperation dar. Darunter versteht man die Kompensation des „Schrumpfens“ eines Bauteils nach Entlastung bzw. nach Öffnen der Umformwerkzeuge (hauptsächlich der Ziehoperation). Das Schrumpfen ist eine elastische Rückfe-

derung in Längs- und Querrichtung des Ziehteils. Diese Art der Rückfederung wird durch auftretende Membranspannungen (vgl. Kapitel 2.4) vor allem in streckziehdominanten Bereichen verursacht und führt zu einer Verkleinerung des Bauteils. Mit einer sog. Flächenskalierung kann dem Schrumpfen des Ziehteils nach dem Öffnen der Werkzeuge entgegengewirkt werden. Dabei werden die Werkzeugwirkflächen derart vergrößert, dass die gewünschte Nominalgeometrie des Bauteils nach dem Schrumpfen erreicht wird. Abb. 2-27 zeigt das Prinzip des Skalierens einer Ziehanalge.

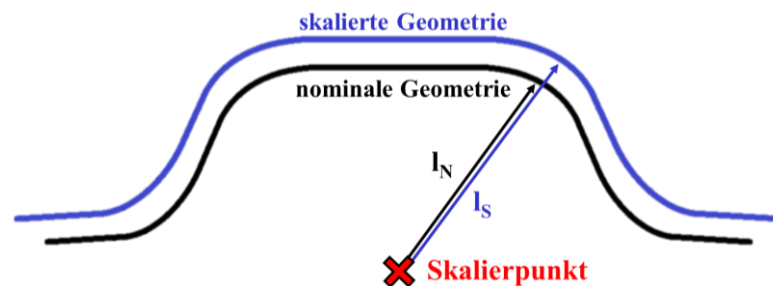


Abb. 2-27: Prinzip des Skalierens von Wirkflächen von Ziehwerkzeugen.

Dabei beschreibt l_N den Abstand eines Knotens des nominalen Geometrienetzes zum Skalierungspunkt und l_S den resultierenden Abstand dieses Knotens nach der Skalierung. Der Abstand des definierten Skalierungspunktes zur Nominalgeometrie (l_N) und die festgelegten Skalierungswerte in x-, y- und z-Richtung ($\zeta_{x,y,z}$) bestimmen dabei den Abstand (l_S) der entstehenden flächenskalierten Werkzeugform zum Skalierungspunkt (vgl. Abb. 2-27).

$$\zeta_{x,y,z} = \frac{l_S}{l_N} \quad (2)$$

In der Praxis finden häufig Skalierungswerte von $\zeta_{x,y,z} = 1,0005 \dots 1,0012$ Anwendung. Durch die Wahl unterschiedlicher Skalierungswerte in den einzelnen Koordinatenrichtungen kann u.a. der Einfluss der Anisotropie bzw. der Walzrichtung der Platine berücksichtigt werden.

Kompensation mit beabsichtigter Änderung des Spannungszustands während der Umformung

Zu den Kompensationsmaßnahmen mit beabsichtigter Änderung des Spannungszustands während der Umformung zählen u.a. die Steuerung des Platineneinzugs während des Karosserieziehens (vgl. Kapitel 2.2), die geometrische Anpassung der Folgeoperationen und die der Bauteilgeometrie selbst (z.B. durch Einbringen von Sicken oder Stufen zur strukturellen Versteifung). Ziel dieser Kompensationsmaßnahmen ist eine merkliche Veränderung des Spannungszustandes nach Entlastung und damit eine Reduzierung des Rückfederungsbetrags.

Durch die Beeinflussung der Steuerung des Platineneinzugs, z.B. durch eine erhöhte Rückhaltung, wird der Betrag der überlagerten Biege- und Membranspannungen im Ziehteil verändert

und führt zu einem merklich veränderten Rückfederungsverhalten des Bauteils. Diese Veränderung der Rückfederung lässt sich jedoch nur schwer voraussagen und wird in der Regel mit Hilfe von Umformsimulationen berechnet. Bei relativ flachen und damit nicht eigensteifen Bauteilen, wie z.B. Dach- und Motorhaubenbeplankungen, können auf diese Weise Einfallstellen vermieden werden, die ansonsten aufgrund mangelnder plastischer Dehnung auftreten.

Nach demselben Prinzip der oben beschriebenen Wirkflächenkompensation entgegen der Rückfederungsrichtung (vgl. Abb. 2-26) können auch die Werkzeugwirkflächen von Folgeoperationen modifiziert werden.

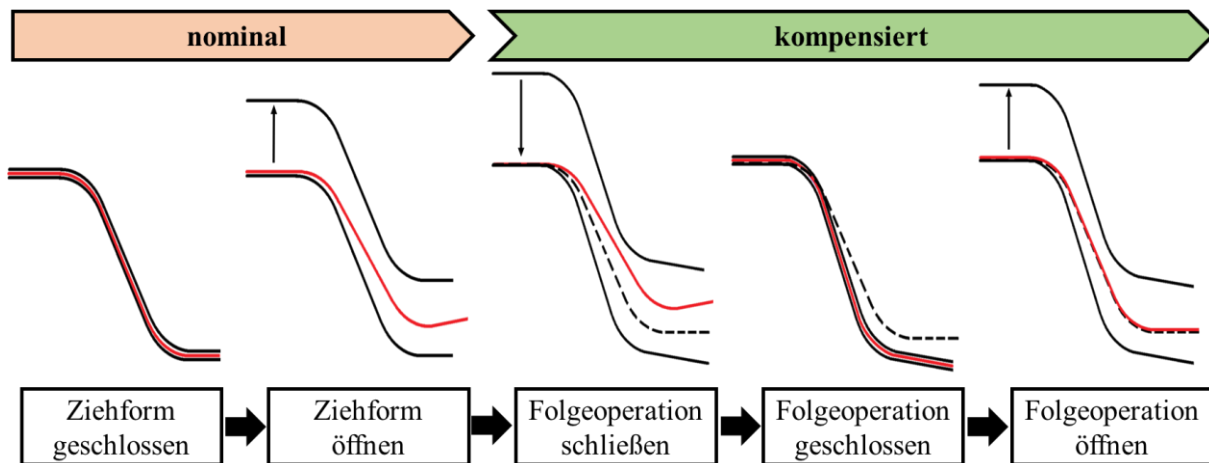


Abb. 2-28: Prinzip der Wirkflächenkompensation einer Folgeoperation (z.B. Nachformen).

Abb. 2-28 zeigt schematisch die Kompensation einer Nachformoperation nach dem Karosserieziehen. Dabei wird das Bauteil (rot) in der kompensierten Folgeoperation so weit entgegen der Rückfederungsrichtung nachgeformt, dass das rückgefederte Bauteil nach Entlastung der nominalen Bauteilgeometrie entspricht. Der wesentliche Unterschied zur oben beschriebenen Wirkflächenkompensation der Ziehanlage besteht darin, dass sich durch die geometrische Anpassung der Folgeoperationen der Spannungszustand im Bauteil verändert, daher spricht man auch von einer Kompensationsmaßnahme mit beabsichtigter Änderung des Spannungszustands.

Eine weitere Kompensationsmaßnahme mit beabsichtigter Änderung des Spannungszustands während der Umformung ist die geometrische Anpassung der Abkantbacken. Dabei werden im Gegensatz zu den bereits vorgestellten Maßnahmen nicht die Spannungsverhältnisse im Bauteilbereich beeinflusst, sondern die Spannungsverhältnisse im Flansch. Abgekantete Bauteile weisen zwar eine deutlich höhere Formstabilität auf, allerdings haben die bei der Abkantung auftretenden Biege- und Membranspannungen erheblichen Einfluss auf das Rückfederungsverhalten der Bauteile. Diese auftretenden Spannungen können mitunter durch folgende Maßnahmen beeinflusst werden:

- Geometrische Veränderung der Biegeradien (Auflageradius Abb. 2-9). Durch die veränderten Biegeradien wird während des Abkantens eine andere Plastifizierung im Flanschbereich erzielt. Bei kleineren Biegeradien entsteht ein höheres Biegemoment im Biegequerschnitt. Aufgrund der höheren Zug- und Druckspannungen entstehen folglich auch höhere Restspannungen (Eigenspannungen) nach der Entlastung (vgl. Abb. 2-10).
- Verwendung eines Faltenhalters während der Abkantung. Durch die Verwendung eines Faltenhalters während der Abkantung werden den auftretenden Biegespannungen zusätzliche Zugspannungen überlagert und die Ausprägung von Falten 1. Art unterbunden.
- Geometrische Veränderung des Backeneingriffs (schälendes Abkanten Abb. 2-29). Bei einem veränderten Backeneingriff, wie z.B. dem schälenden Abkanten, werden zusätzliche tangentielle Spannungen im Flanschbereich eingebracht.

Bei allen drei genannten Maßnahmen wird jeweils der Spannungszustand während der Abkantoperation im Flansch verändert. Ob sich der Einfluss dieser drei genannten Maßnahmen dabei positiv oder negativ auf die Maßhaltigkeit des Bauteils auswirkt, kann bei komplexen Bauteilgeometrien, wie es bei Karosserieanbauteilen häufig der Fall ist, nicht mehr vorausgesagt oder analytisch berechnet werden. Der Einfluss dieser Maßnahmen muss daher im Einzelfall mithilfe von Umformsimulationen untersucht werden. Weitere Kompensationsmethoden der auftretenden Einzelteilrückfederung werden u.a. in [Goe10, Kop16, Rad19, Rol04, Sch15b] diskutiert.

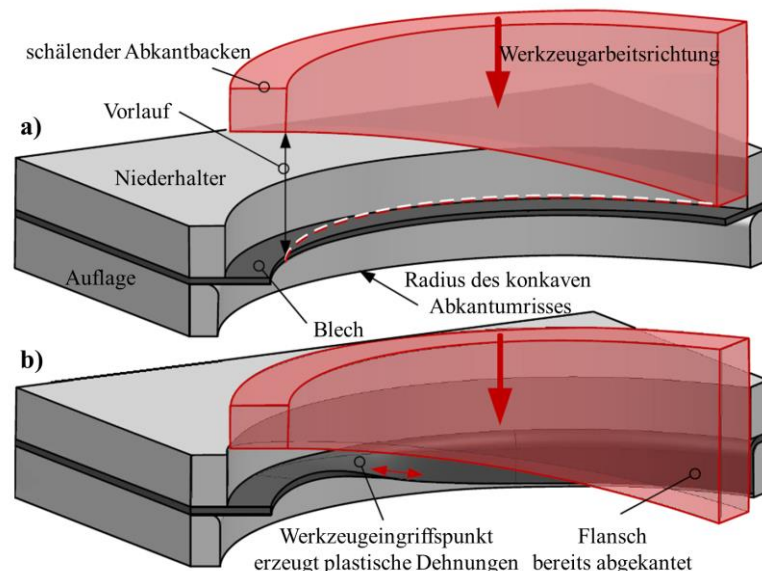


Abb. 2-29: Prinzipdarstellung des schälenden Abkantens an einer konkav gekrümmten Abkantkontur a) vor dem Abkanten und b) während des Abkantens [Kae16].

2.8.2 Kompensationsmaßnahmen in Fügeprozessen von Rohbauanlagen

Im Gegensatz zur rechnerunterstützten Verringerung der Einzelteilrückfederung in der Umformsimulation, erfolgen die Kompensationsmaßnahmen der Fügeprozesse in der Praxis fast

ausschließlich durch manuelles Einstellen der Rohbauanlagen. Im Fügeprozess (punktuelles Fügen) stehen dem Anlagenbediener hierzu folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- Hinzufügen/Entfernen von Spann- und/oder Fügepunkten
- Veränderung der Fügereihenfolge
- Setzen der Spanner-Endpositionen (im Raum)

Beim Spannen der Baugruppe werden die Bauteile in eine definierte Zwangslage zueinander gebracht, in der sie während des Fügens fixiert sind. Dabei werden äußere Spannungen in den ZSB eingebracht, welche bei zu hohen dimensional Einzelteilabweichungen zu plastischen Verformungen führen können. Die Lage und Anzahl der Spann- und Fügepunkte haben daher maßgeblichen Einfluss auf das Rückfederungsergebnis der Baugruppe. Unter Berücksichtigung der Fügeanzugzugänglichkeit kann sich somit eine höhere Anzahl an Spannern vorteilhaft in Bezug auf die Maßhaltigkeit der Baugruppe auswirken. Mit höherer Anzahl von Spannpositionen steigt allerdings auch der Aufwand der manuellen Anlageneinstellung in der Phase des Neuanlaufs eines Fahrzeuges. Außerdem können sich jene Spannungen, welche durch die Spanner in den ZSB eingebracht werden, aufgrund der hohen Temperaturen (bis ca. 190°C) in der nachgelagerten KTL-Trocknung, nachteilig auf die Maßhaltigkeit der Baugruppe auswirken. [Cai06, Lia07] stellen in ihren Arbeiten verschiedene Methoden vor, wie durch eine geeignete Anordnung der Spannelemente und Fügepunkte die Maßhaltigkeit von punktgeschweißten Bauteilen hinsichtlich ihrer Maßhaltigkeit und des Verschleißes der Fügeanzüge optimiert werden kann. Das Einstellen der Fügeanlage zur Kompensation systematischer Maßabweichungen des ZSB erfolgt durch Veränderung der Spannerpositionen im Raum. Dazu wird die Baugruppe mithilfe von Distanzplättchen in eine veränderte Zwangslage während des Fügens gebracht. Abb. 2-30 zeigt diese Art der Rückfederungskompensation systematisch am Beispiel zweier punktuell gefügter Bauteile. Dabei wird die Spannerposition in der Bauteilmitte durch Platzierung von Distanzplättchen in z-Richtung verschoben. In Bezug auf die Maßhaltigkeit der gefügten Baugruppe kann auf diese Weise nur auf bestimmte Bereiche Einfluss genommen werden. Baugruppenbereiche, die nicht durch das Einstellen der Anlage maßlich verbessert werden können, werden entweder in den Einzelteilen oder im folgenden Falzprozess des ZSB kompensiert. In der Regel können diese Maßnahmen erst nach dem Erzeugen der ersten Baugruppen anhand von deren Messberichten abgeleitet und umgesetzt werden. Diese heuristische Vorgehensweise nach dem Trial-and-Error-Prinzip erfordert häufig mehrere zeitaufwendige und kostenintensive Optimierungsschleifen.

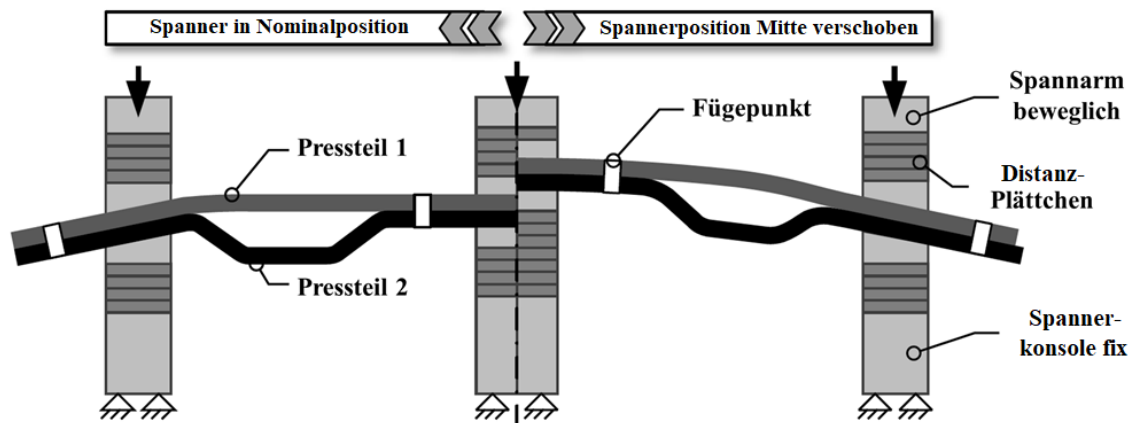


Abb. 2-30: Prinzip der Verlagerung der Spannerpositionen im Raum beim punktuellen Fügen von zwei Pressteilen [Kae16].

2.8.3 Anpassung des Rollfalzprozesses

Rückfederungsbedingte Abweichungen der Baugruppe können im Rollfalzprozess des ZSB nur noch bedingt kompensiert werden. Aus diesem Grund können nur wenige konkrete Analyse- und Verhaltensregeln zur Rückfederungskompensation des ZSB beim Rollfalzen gegeben werden. In der Praxis werden Änderungen der Falzmethode (z.B. Rollenanstellungen, Anzahl Falzbahnen, Rollengeometrien, Rollrichtung) zur Optimierung der Oberflächenqualität hinsichtlich Wellenbildung und Rissen in der Falzschleife des Falzflansches vorgenommen und nicht zur Verbesserung der Maßhaltigkeit des ZSB.

Untersuchungen von [Eck11, Gal03] zeigen, dass die Maßhaltigkeit einer rollgefalzten Baugruppe trotz großer nominaler Bauteilabweichung der Außenhaut hauptsächlich von der deutlich formstabileren Innenbaugruppe (UZSB) bestimmt wird. Aus diesem Grund wurden in diesen Fällen ausschließlich die Ziehanlage des Gerippes sowie der Fügeprozess der Innenbaugruppe kompensiert. Diese Vorgehensweise besitzt jedoch keine pauschale Gültigkeit für flache Zusammenbauten. In Bauteilbereichen, in denen die Innenbaugruppe nur bedingt die Außenhaut unterstützt, können die Abweichungen der Außenhaut und auch der Rollfalzprozess selbst die Rückfederung der Baugruppe beeinflussen (z.B. im Fensterrahmen einer Tür). In der Rollfalzanlage kann zur Verbesserung der Maßhaltigkeit der Baugruppe dann ausschließlich eine Wirkflächenkompensation des Falzbetts entgegen der Rückfederungsrichtung des ZSB (analog der Wirkflächenkompensation einer Ziehanalyse) durchgeführt werden.

2.9 FE-Simulation in der Karosserieentwicklung

Durch die stetige Weiterentwicklung der Softwareprogramme und die steigenden Rechenkapazitäten werden Fahrzeuge heutzutage umfangreich digital abgesichert. Dazu sind verschiedene Simulationssoftwarecodes auf dem Markt. Die Absicherung der Produkt- (Bauteil aus Blech)

und Prozessentwicklung (Herstellung im Presswerk, Fügen im Rohbau) für Anbauteile basiert dabei hauptsächlich auf der FEM. Der Einsatz der FEM zur Absicherung der Maßhaltigkeit von Bauteilen und -gruppen wird im folgenden Kapitel vorgestellt. Die folgenden theoretischen Grundlagen sind auf Basis der Erkenntnisse von Karasovskyy, Owen und Hinton [Kra05, Owe80] abgeleitet und können außerdem [Bat02, Bra07, Wri08] entnommen werden.

2.9.1 Grundlagen der Finite-Elemente-Methode

Für eine wirtschaftliche Auslegung von Karosseriebauteilen und ZSB setzt die Automobilindustrie verstärkt den Fokus auf die FEM-Simulation [Pin14]. Mithilfe verschiedener Softwareprogramme, wie z.B. Pam-Stamp, AutoForm und LS-Dyna, wird heutzutage die fertigungstechnische Herstellbarkeit eines jeden Einzelteils untersucht und der Herstellungsprozess dahingehend optimiert, um Bauteilreißer und die Faltenbildung zu vermeiden sowie rückfederungsbedingte Maßabweichungen zu kompensieren. Die Komplexität der Karosserieherstellungsprozesse verhindert eine geschlossene lösbare Beschreibung in einem analytischen Modell [Sin19]. Mithilfe der FEM können diese technischen Produkte und Fertigungsprozesse allerdings in ein numerisches Ersatzmodell überführt werden [Awi10]. Dazu wird das Strukturvolumen komplexer Geometrien in Teilelemente unterteilt (diskretisiert), welchen Modellbeschreibungen in Form von Ansatzfunktionen (Polynome geringer Ordnung) zugewiesen werden [Sin19]. Das auf diese Weise beschriebene Differentialgleichungssystem kann anschließend numerisch gelöst werden.

Zur Aufstellung des zu lösenden Differentialgleichungssystems wird das Prinzip der virtuellen Arbeit verwendet. Es gilt:

$$\int_{(V)} \sigma : \partial \varepsilon \, dV = \int_{(S)} \sigma \vec{n} \, \partial u \, dS \quad (3)$$

Für den vereinfachten statischen Fall ohne eine Berücksichtigung der Volumenkräfte beschreibt das Prinzip der virtuellen Arbeit das Gleichgewicht zwischen der vom Spannungsfeld σ am Verschiebungsfeld ∂u geleisteten Arbeit innerhalb des Volumens V und der geleisteten Arbeit der Oberflächenkräfte S . Dabei ist $\vec{n}$ der nach außen gerichtete Normalenvektor der Oberfläche und $\partial \varepsilon$ der berechnete Dehnungstensor aus ∂u .

Die Diskretisierung eines deformierbaren Körpers erfolgt in der FEM durch Unterteilung des Volumens in eine endliche Zahl (finite Anzahl) von Elementen, welche an den Elementkanten durch Knoten verbunden sind. Zur Diskretisierung stehen dem Anwender in den kommerziellen FE-Programmen eine Vielzahl von Elementtypen zur Verfügung.

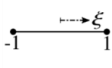
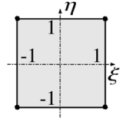
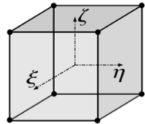
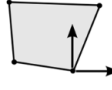
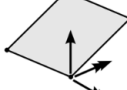
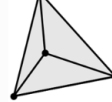
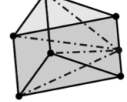
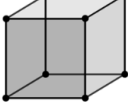
Räumliche Dimension der Elemente 1D-Linienelemente z.B. Balkenelemente 2D-Flächenelemente z.B. Schalenelemente 3D-Volumenelemente z.B. Hexaederelemente	1-D  2-D  3-D 
Anzahl der Knoten eines Elements Dabei bestimmt die Anzahl der Knoten den Ansatzgrad der Polynome. Beispiel eines linearen und eines quadratischen Tetraederelements mit vier bzw. zehn Knoten.	4 Knoten, linear  10 Knoten, quadratisch 
Anzahl der Freiheitsgrade an den Knoten	Scheibe  Platte  Schale 
Geometrische Form von mehrdimensionalen Elementen Übliche Elementtypen in der FEM sind Dreieck- und Viereckelemente bei 2D-Flächenelementen und Tetraeder-, Pentaeder- und Hexaederelemente bei 3D-Volumenelementen.	Tetraeder  Pentaeder  Hexaeder 

Abb. 2-31: Klassifizierung von verschiedenen Elementtypen in der FEM nach [Wag17].

Durch Aufbringen von äußeren Kräften wird der diskretisierte Körper verformt, wodurch sich die Lage der Knoten im Raum ändert. Das dadurch auftretende Verschiebungsfeld $u(X)$ ergibt sich dann aus den einzelnen Knotenverschiebungen u^m und der Formfunktion N_m

$$u(X) = N_m(X) u^m \quad (4)$$

Das zugeordnete virtuelle Verschiebungsfeld $\delta u(X)$ ergibt sich damit analog zu:

$$\delta u(X) = N_m(X) \delta u^m \quad (5)$$

Die Formfunktion N_m ist dabei abhängig vom gewählten Elementtyp (vgl. Abb. 2-31) mit nummeriertem Freiheitsgrad m aller Elementknoten. Bei Verwendung der gleichen Interpolation der Knotenverschiebungen für den Koordinatenvektor, kann dieser beschrieben werden als:

$$x(X) = N_m(X) x^m \quad (6)$$

Die virtuelle Dehnung entspricht dann:

$$\delta \varepsilon(X) = \beta_m(X) \delta u^m \quad (7)$$

mit:

$$\beta_m(X) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial N_m(X)}{\partial X} + \left(\frac{\partial N_m(X)}{\partial X} \right)^T \right] \quad (8)$$

Durch Einsetzen des virtuellen Verschiebungsfeldes (5), des Koordinatenvektors (6) und die virtuelle Dehnung (7) in das zu lösende Gleichungssystem auf Basis des Prinzips der virtuellen Arbeit (3) folgt die schwache Form des Gleichgewichts zu:

$$\delta u^m \int_{(V)} \beta_m : \sigma dV = \delta u^m \int_{(S)} N_m \overrightarrow{t^{appl}} dS \quad (9)$$

Dabei ist $\overrightarrow{t^{appl}}$ der Vektor der applizierten Oberflächenkräfte mit:

$$\overrightarrow{t^{appl}} = \sigma \vec{n} \quad (10)$$

Durch Kürzen von δu^m auf beiden Seiten der Gleichung erhält man das Stoffgesetz im elastoplastischen Bereich:

$$\int_{(V)} \beta_m : \sigma dV = \int_{(S)} N_m \overrightarrow{t^{appl}} dS \quad (11)$$

Das Oberflächenintegral auf der rechten Seite der Gleichung (11) beschreibt nun die aufgebrachten äußeren Kräfte. Betrachtet man nun z.B. die Deformation eines Körpers im elastischen Bereich, kann näherungsweise von einem linearen Werkstoffverhalten ausgegangen werden. Dadurch entsteht ein eindeutig lösbares lineares Gleichungssystem der Form

$$\bar{K} \vec{u} = \vec{p} \quad (12)$$

zur Lösung der Knotenverschiebungen $\vec{u}$ mit der Steifigkeitsmatrix $\bar{K}$ bei einem aufgebrachten Kraftvektor $\vec{p}$. In der Umformtechnik tritt allerdings hauptsächlich eine Kombination aus linearem und nichtlinearem Werkstoffverhalten auf, welches zu nichtlinearen Gleichungssystemen führt, die nicht eindeutig lösbar sind. Zur Berechnung werden daher die Differentialgleichungen des Kräftegleichgewichts für alle Knotenverschiebungen der gesamten Struktur zum betrachteten Zeitpunkt t in folgender Form gelöst [Kle15]:

$$\bar{M} \ddot{u}(t) + \bar{C} \dot{u}(t) + \bar{K} u(t) = p(t) \quad (13)$$

Die Bewegungsgleichung (13) mit der Massenmatrix $\bar{M}$, der Dämpfungsmatrix $\bar{C}$ und der Steifigkeitsmatrix $\bar{K}$ kann bei nichtlinearen Problemen, wie es z.B. bei der Umformung von Karosseriebauteilen der Fall ist, durch direkte Integrationsmethoden, wie z.B. der Differenzenmethode [Bat02] iterativ oder inkrementell gelöst werden. Dabei nutzt man die numerische Integration im Zeitbereich nach Lagrange. Unter der Annahme, dass die Größen $\ddot{u}$, $\dot{u}$ und u zum Zeitschritt i bekannt sind, werden diese für den neuen Zeitschritt $i + 1$ gesucht. In der FE-Simulation geschieht dies näherungsweise mithilfe von sog. explizit dynamischen und impliziten Integrationsverfahren. Im Folgenden soll kurz auf die wesentlichen Unterschiede dieser beiden Zeitintegrationsverfahren eingegangen werden.

2.9.2 Explizit dynamische Zeitintegration

Die beiden Integrationsverfahren lassen sich hauptsächlich durch die Ermittlung des Übergangs vom Zeitschritt i zu $i + 1$ unterscheiden [Kle15]. Bei der explizit dynamischen Zeitintegration wird hierfür der Zustand zum neuen Zeitschritt $i + 1$ auf Basis des dynamischen Gleichgewichts zum Zeitpunkt i berechnet. Dabei werden die Trägheitskräfte und -momente in der Gleichgewichtsbedingung berücksichtigt und zur Berechnung des neuen Zeitschritts $i + 1$ die Bedingungen für den Zeitschritt i verwendet:

$$M_i \ddot{u}_i + C_i \dot{u}_i + K_i u_i = p_i \quad (14)$$

Hierbei wird der Zustand des Zeitschritts $i + 1$ ausschließlich auf Basis des dynamischen Gleichgewichts zum Zeitpunkt i ermittelt. Daraus folgt [Kle15]:

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} M_i + \frac{1}{2\Delta t} C_i \right) u_{i+1} = p_i - \left(K_i - \frac{2}{\Delta t^2} M_i \right) u_i - \left(\frac{1}{\Delta t^2} M_i + \frac{1}{2\Delta t} C_i \right) u_{i-1} \quad (15)$$

Die explizit dynamische Zeitintegration wird somit durch eine hohe Anzahl relativ kleiner Zeitinkremente charakterisiert. Für die Lösung des Gleichungssystems muss ein Stabilitätskriterium (= kritischer Zeitschritt Δt_{krit}) berücksichtigt werden [Bel14]. Im Falle von mechanischen Problemstellungen muss der kritische Zeitschritt kleiner sein als jenes Zeitintervall, welches eine longitudinale Schallwelle der Geschwindigkeit v_s zur Durchquerung der kleinsten geometrischen Elementgröße (charakteristische Länge des betrachteten Systems l_e) benötigt.

$$\Delta t_{krit} \leq \frac{l_e}{v_s} \quad (16)$$

Die FE-Simulation von Umformprozessen ist abhängig von der Dichte ρ und dem Elastizitätsmodul E . Das Stabilitätskriterium lässt sich dazu vereinfacht wie folgt berechnen:

$$\Delta t_{krit} = l_e \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (17)$$

Zur Reduzierung der Rechenzeit wird die Masse der Elemente in den jeweiligen Elementknoten zusammengefasst. Dadurch wird die Massenmatrix in eine Diagonalmatrix überführt und eine numerische Inversion der Massenmatrix vermieden [Aba04]. Außerdem kann der kritische Zeitschritt durch selektive Massenskalierung, d.h. das Hinzufügen von zusätzlicher Masse in den Elementknoten mit geringer Dichte erhöht werden. Die um den Faktor c_M künstlich erhöhte Dichte reduziert die Rechenzeit um den Faktor $c_M^{1/2}$ [Kra01]. Dieser Faktor kann so lange erhöht werden, bis zu große Trägheitseffekte das Ergebnis verfälschen. Explizit dynamische Zeitintegrationsverfahren sind numerisch sehr gut parallelisiert berechenbar und weisen hohe Rechengeschwindigkeiten bei großen Modellen auf und sind daher besonders zur Berechnung

dynamischer Prozesse geeignet. Aus diesen Gründen finden sie häufig Anwendung bei Prozessen mit großer plastischer Verformung, wie dies bei der Crash- oder Umformsimulation der Fall ist [Zha09]. Explizit dynamische Integrationsverfahren in der Blechumformung sind u.a. in den Softwarecodes Abaqus, LS-Dyna und Pam-Stamp 2G implementiert.

2.9.3 Implizite Zeitintegration

In der impliziten Zeitintegration wird die Gleichgewichtsfunktion (13) iterativ zu bestimmten Zeitpunkten innerhalb jedes Zeitinkrements gelöst. Dafür werden zur Berechnung des neuen Zeitschritts $i + 1$ die neu entstehende Steifigkeitsmatrix und der Verschiebungsvektor berücksichtigt sowie die Gleichgewichtsfunktion zum Zeitpunkt $i + 1$ betrachtet [Kle15]:

$$M_{i+1} \ddot{u}_{i+1} + C_{i+1} \dot{u}_{i+1} + K_{i+1} u_{i+1} = p_{i+1} \quad (18)$$

Daraus folgt zur Berechnung der Knotenverschiebung:

$$\left(\frac{6}{\Delta t^2} M_{i+1} + \frac{3}{\Delta t} C_{i+1} + K_{i+1} \right) u_{i+1} = p_{i+1} + M_i \left(\frac{6}{\Delta t^2} u_i + \frac{6}{\Delta t} \dot{u}_i + 2\ddot{u}_i \right) + C_i \left(\frac{3}{\Delta t} u_i + 2\dot{u}_i + \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_i \right) \quad (19)$$

Zur Berechnung der Knotenverschiebung zum Zeitschritt $i + 1$ muss nun die Steifigkeitsmatrix K_{i+1} invertiert werden. Gleichung (19) wird dann iterativ, z.B. durch das Newton-Verfahren gelöst, bis ein vorgegebenes Konvergenzkriterium erfüllt wird. Dafür können zur Lösung je nach Problemstellung jedoch viele Iterationen notwendig sein. Der Vorteil der impliziten Zeitintegration liegt darin, dass nahezu beliebig große Zeitschritte gewählt werden können [Hof12]. Am Ende jeden Zeitschritts befindet sich das System stets im statischen Gleichgewicht. Aus diesem Grund findet die implizite Zeitintegration häufig bei quasi-statischen Vorgängen, wie etwa bei der Rückfederungsberechnung und bei der Simulation des Einlegens der Pressteile in die Werkzeuge, Anwendung [Jen07]. Durch spezielle Kontaktformulierungen wird die implizite Zeitintegration u.a. in AutoForm und INDEED auch in der Blechumformung kommerziell verwendet [Kas92].

2.9.4 Prinzipieller Ablauf einer Blechumformsimulation

Die FE-Simulation dient als zentrale Planungsgrundlage für die Methodenplanung der Einzelteile sowie für die Absicherung der Produktion und bildet heute daher einen festen Bestandteil der Bauteil-, Werkzeug- und Prozessentwicklung in der Karosserieteilefertigung. Mit der virtuellen Produktplanung mithilfe der FE-Simulation lassen sich Durchlaufzeiten der Werkzeugherstellung und auch die Werkzeugeinarbeitung deutlich verkürzen und somit die damit verbundenen Herstellungskosten senken. Die numerische FE-Simulation unterstützt dabei die Bewertung des Umformprozesses zur Methodenentwicklung für einen robusten Herstellungsprozess der Einzelteile. Dafür steht dem Anwender in einem industriellen Umfeld eine genaue und

benutzerfreundliche Oberfläche zur Verfügung [Zub14]. Mithilfe der heutigen FE-Simulationssoftwarecodes, wie z.B. Pam-Stamp, AutoForm und LS-Dyna, kann die Simulation im Preprozessor auf einfache Weise aufgebaut, mit dem Gleichungslöser berechnet und die Ergebnisse anschließend im Postprozessor analysiert werden (vgl. Abb. 2-32).

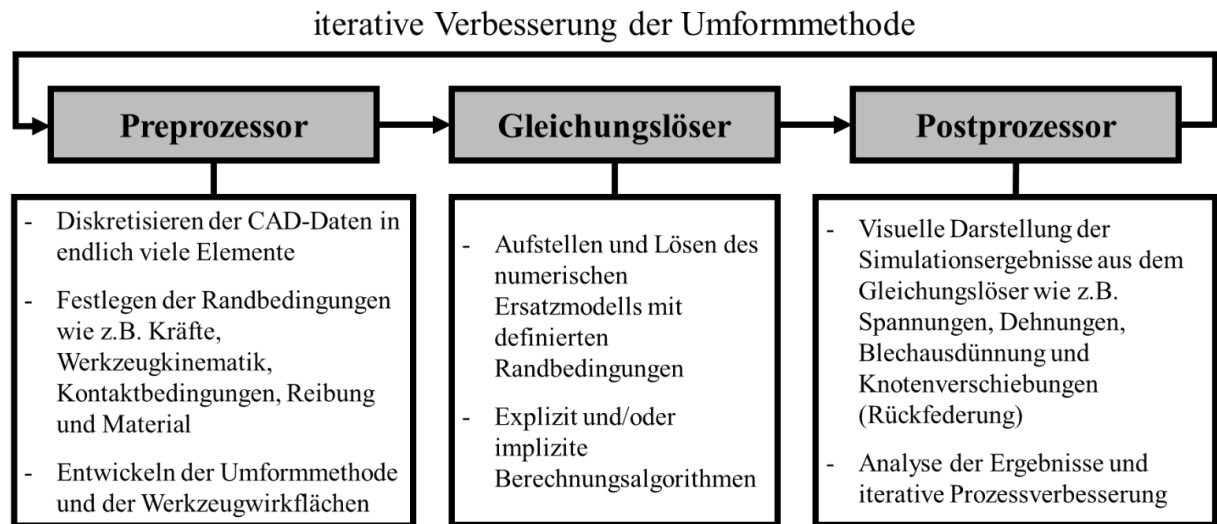


Abb. 2-32: Darstellung der einzelnen Prozessschritte für die robuste Auslegung einer Umformmethode mithilfe der FE-Umformsimulation nach [Klo06].

Dabei werden heute fortschrittlich entwickelte Pre- und Postprozessoren in einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) bereitgestellt. Im Preprozessor erfolgt die Diskretisierung der Bauteile und der Umformwerkzeuge (vgl. Kapitel 2.9.1). Zu Beginn des Simulationsaufbaus stehen jedoch die Geometrien der Umformwerkzeuge oftmals noch nicht zur Verfügung, sodass neben der Umformmethode auch die Werkzeugwirkflächen der einzelnen Prozessschritte im FE-Programm entwickelt und anschließend diskretisiert werden müssen. Anschließend werden der Blechwerkstoff, das Materialverhalten (vgl. Kapitel 2.9.5) sowie relevante Randbedingungen des Umformprozesses, wie z.B. die Kontaktbedingungen zwischen Platine und Werkzeuge, die Reibung, die Werkzeugkinematik und die äußeren Kräfte definiert. Dadurch wird die Umformmethode eines Bauteils oder einer Baugruppe im Preprozessor sukzessive in ein numerisches Ersatzmodell überführt, welches anschließend vom Gleichungslöser mithilfe von impliziten und/oder expliziten Berechnungsalgorithmen [Bel08, Kle12, Rus11] (vgl. Kapitel 2.9.2 und 2.9.3) gelöst wird. Die berechneten Umformsimulationsergebnisse stehen dem Anwender anschließend wieder per GUI im Postprozessor zur Verfügung. Auf Basis der Simulationsergebnisse (z.B. Rückfederungsergebnisse) können dann Prozess- und Bauteiloptimierungen (Kompensationsmaßnahmen) festgelegt und deren Wirksamkeit mittels neuer Simulationsläufe untersucht werden (vgl. Kapitel 2.8). Der Entwicklungsprozess erfolgt dabei in der Regel iterativ anhand festgelegter Bewertungskriterien, wie z.B. Ausdünnung und Rissbildung, Betrag der

Rückfederung (Einhaltung der Bauteiltoleranz) und Oberflächenqualität [Ban10, Roh01, Vol09].

2.9.5 Werkstoffmodellierung in der FE-Simulation

Das Karosserieziehen wird durch ein elasto-plastisches Werkstoffverhalten des Blechwerkstoffes charakterisiert. Im elastischen Bereich kann das Werkstoffverhalten im Spannungs-Dehnungs-Diagramm mithilfe der Hooke'schen Gerade beschrieben werden. Hierbei gilt:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (20)$$

Dabei besteht eine direkte linear-elastische Beziehung zwischen den auftretenden Spannungen und Dehnungen [Doe07, Iss97, Lan90, Mar02]. Die Steigung der Geraden wird als Elastizitätsmodul E bezeichnet. Nach Überschreiten der elastischen Dehngrenze (Streckgrenze) erfolgt eine elastisch-plastische Verformung des Blechwerkstoffes während des Umformprozesses, der Werkstoff beginnt zu fließen. Die Beziehung zwischen den auftretenden Spannungen und Dehnungen können nun nicht mehr linear beschrieben werden, da in diesem Bereich die Spannungen abhängig vom Dehnpfad sind [Doe07, Klo06, Lan75, Mar02, Rus11]. Dieses Verhalten wird in den Stoffgesetzen beschrieben und ist wesentlicher Bestandteil der sogenannten Elasto-Plastizitätstheorie [Doe07]. Diese Stoffgesetze beschreiben, wann das plastische Fließen eines Werkstoffes beginnt (Fließbedingung), welche plastischen Dehnungen sich aufgrund vorgegebener Spannungszustände ergeben (Fließregel) und wie sich die Werkstoffeigenschaften dabei verändern (Verfestigungsregel).

Die Fließbedingung beschreibt den Beginn plastischen Fließens des Werkstoffs und wird auch als Fließkriterium bzw. Fließhypothese bezeichnet. Für den einachsigen Spannungszustand ist das Fließkriterium erfüllt, sobald die wirkende Spannung σ_f die entsprechende werkstoffspezifische Fließspannung k_f erreicht. Dabei gilt:

$$\sigma_f \geq \frac{F}{A} \geq k_f \quad (21)$$

Bei der Umformung von Karosseriebauteilen herrscht allerdings in den meisten Fällen ein mehrachsiger Spannungszustand. Es muss demnach ein Zusammenhang zwischen der Fließspannung k_f und den wirkenden Spannungen σ_i hergestellt werden. Hierfür wird der mehrachsige Spannungszustand in eine fiktive einachsige Vergleichsspannung überführt. Laut der Gestaltänderungsenergie-Hypothese nach von Mises tritt plastisches Fließen dann ein, wenn die Gestaltänderungsarbeit des Fließbeginns des mehrachsigen Spannungszustandes gleich der Gestaltänderungsarbeit unter einachsiger Beanspruchung ist [Mis28]. Dabei wird von einem isotropen Material ausgegangen.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq k_f \quad (22)$$

In der Regel gilt für das Karosserieziehen für die 3. Hauptspannung in Blechdickenrichtung näherungsweise $\sigma_3 = 0$, daraus folgt für die Vergleichsspannung:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1^2]} \leq k_f \quad (23)$$

Für den einachsigen Zugversuch gilt somit:

$$\sigma_v = \sigma_1 \quad (24)$$

Zur Berücksichtigung der Anisotropie von Werkstoffen kann die Fließbedingung u.a. nach [Hil48] angewendet werden:

$$\sigma_{v,Hil48} = \sqrt{\frac{r_{90}\sigma_{11}^2 + r_0\sigma_{22}^2 + r_{90}r_0(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (2r_{45} + 1)(r_{90} + r_0)\sigma_{12}^2}{r_{90}(r_0 + 1)}} \leq k_f \quad (25)$$

Dabei werden die Anisotropiewerte in den Richtungen 0° , 45° und 90° zur Walzrichtung, welche mithilfe des einachsigen Zugversuchs in diesen Richtungen ermittelt werden, einbezogen. Bei hochfesten Stählen und Aluminium werden komplexere Fließbedingungen, wie z.B. jene nach [Hil90] oder nach [Bar89] empfohlen. Dafür werden neben den Werten für die Anisotropie und die Streckgrenze zusätzlich weitere Koeffizienten für die Berechnung der Fließbedingung benötigt. Diese können u.a. mit dem hydraulischen Tiefungsversuch (Bulgetest) [Gol75, Hal09, Pet11a], mit dem Schichtstauchversuch [Ges02, Veg99] oder dem Kreuzzugversuch [Mue96] ermittelt werden. Weitere Fließbedingungen sind u.a. in [Bar89] und [Ban12] beschrieben. Die Fließbedingung kann mithilfe von Fließortkurven im ebenen Spannungsraum dargestellt werden. Die Form und Genauigkeit der modellierten Fließortkurve ist dabei abhängig vom gewählten Modell. Abb. 2-33 zeigt eine Gegenüberstellung von modellierten Fließortkurven und realen Messwerten verschiedener Blechwerkstoffe, wie sie bspw. in Umformsimulationen verwendet werden. Die teilweise großen Abweichungen zwischen den modellierten und den experimentell ermittelten Werten zeigen deutlich, dass die Wahl eines geeigneten Modells für die Beschreibung der Fließortkurve einen erheblichen Einfluss auf die Prognosegenauigkeit der Umformsimulation aufweist.

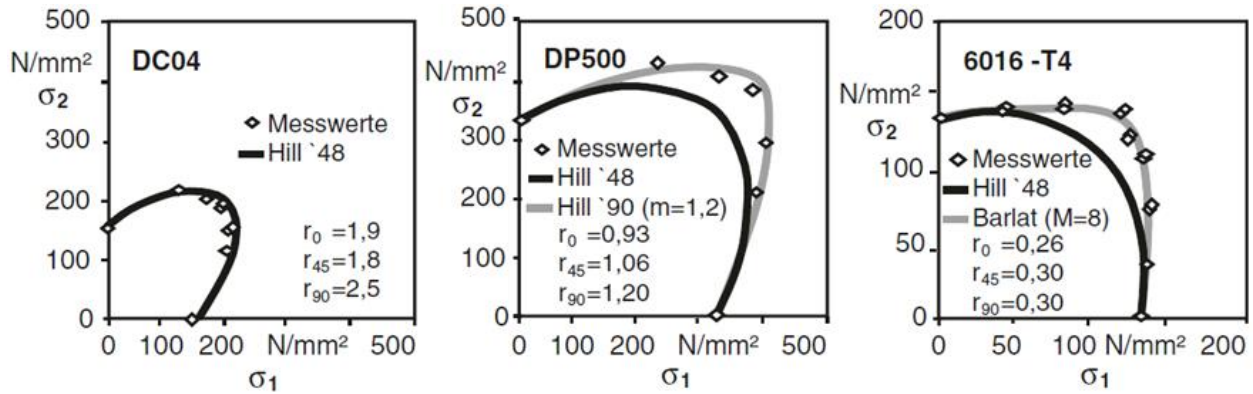


Abb. 2-33: Gegenüberstellung modellierter Fließortkurven und realer Messwerte für verschiedene Blechwerkstoffe [NN04].

Die Fließregel beschreibt nun, welche plastischen Dehnungen sich nach Überschreiten der Streckgrenze bei einem mehrachsigen Spannungszustand ergeben. In diesem Zustand besteht kein linearer Zusammenhang zwischen Dehnung und resultierender Spannung. Die Spannung ist dann abhängig vom sog. Dehnpfad, da nicht jeder Dehnung eindeutig eine Spannung zugeordnet werden kann [Mar02]. Die Beschreibung der Fließregel erfolgt dann mithilfe des plastischen Potentials Q_{plast} (26) oder wird in der Umformsimulation mit der Fließbedingung $F = Q_{plast}$ (27) berechnet. Die Berechnung der Dehnungsinkremente erfolgt durch partielle Ableitung von Q_{plast} (26) oder F (27) nach der Spannung [Rus11]:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{pl} = \lambda \frac{\delta Q_{plast}(\sigma_{ij})}{\delta \sigma_{ij}} \quad (26)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{pl} = \lambda \frac{\delta F(\sigma_{ij}, k_f)}{\delta \sigma_{ij}} \quad (27)$$

Somit ergeben sich die Dehnungsinkremente aus den Normalenrichtungen der ermittelten bzw. für die Umformsimulation aus den Normalenrichtungen der modellierten Fließortkurven.

Beim elasto-plastischen Werkstoffverhalten verändern sich während der Umformung die Werkstoffeigenschaften des Blechs, welche mit der Verfestigungsregel beschrieben werden. Diese werden durch die Grundtypen isotrope, kinematische und anisotrope Verfestigung in idealisierter Weise modelliert. In Abb. 2-34 wird die Abhängigkeit der Folgefließorte der verschiedenen modellierten Verfestigungsregeln schematisch dargestellt. Hierbei sind die ursprünglichen Fließortkurven vor der Umformung (schwarz) sowie die Folgefließortkurven nach der Umformung (grau) dargestellt.

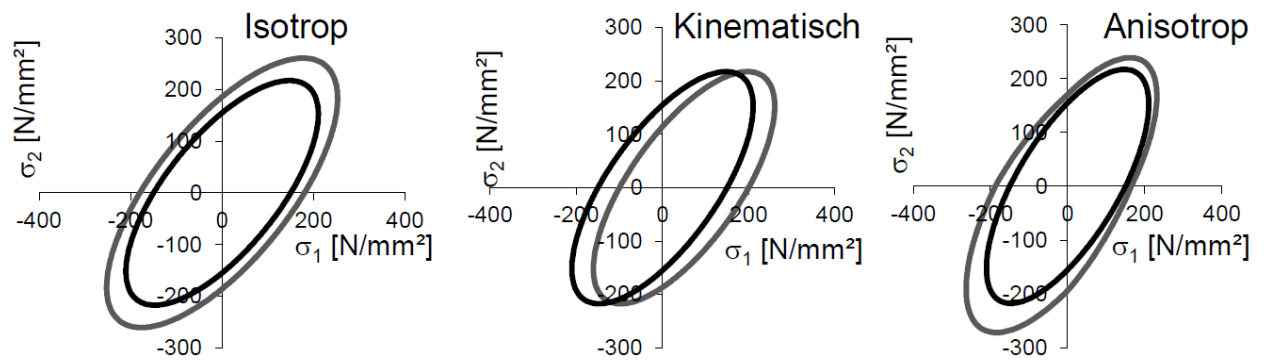


Abb. 2-34: Modellierung der isotropen, kinematischen und anisotropen Verfestigungsregeln [Ges10].

Eine isotrope Verfestigung führt zu einer symmetrischen Aufweitung der Fließortkurve, verursacht durch richtungsabhängige ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) und gleichförmige Kaltverfestigung des Werkstoffes während der Plastifizierung. Bei der kinematischen Verfestigungsregel führt der Bauschinger-Effekt zu einer Verschiebung des Fließortkurvenmittelpunkts. Die anisotrope Verfestigungsregel berücksichtigt die sich verändernde Anisotropie des Werkstoffs bei fortschreitender Plastifizierung. Die beschriebenen idealisierten Verfestigungsregeln charakterisieren das reale Werkstoffverhalten während der Umformung von Karosseriebauteilen jedoch nur bedingt, weshalb häufig eine Kombination dieser Verfestigungsregeln verwendet werden muss [Ges10, Goe10, Sch15c]. Neben dem gewählten Materialmodell hat folglich auch die Wahl bzw. Kombination der Verfestigungsregel einen erheblichen Einfluss auf die Prognosegenauigkeit der Rückfederung in der Umformsimulation.

Das Werkstoffverhalten und dessen Versagen wird in der Umformsimulation durch das sog. Grenzformänderungsdiagramm (FLD) bzw. die Grenzformänderungskurve (FLC) prognostiziert. Sie beschreibt die Formänderung eines Bauteils im ebenen Dehnungsraum, welche ohne Bauteilversagen erzielt werden kann. Dabei ist nicht das Erreichen eines kritischen Spannungsbetrages bis zur Streckgrenze oder der Zugfestigkeit ausschlaggebend, sondern das Erreichen von maximal zulässigen Verhältnissen von Haupt- zu Nebenformänderung φ_1 und φ_2 eines Werkstoffes, welche nicht zu einem Versagen des Werkstoffs führen (Bereich unterhalb der FLC) [Lan75]. Die FLC dient als wichtiges Kriterium zur Bestimmung von Versagen durch Einschnürung oder durch Reißen in der Blechumformung. Dabei wird zwischen theoretischen, experimentellen oder semi-empirischen Methoden zur Ermittlung der FLC unterschieden [Ban12].

Eine exakte Beschreibung der FLC wird mithilfe entsprechender Versuchstechnik experimentell ermittelt. Hierbei hat sich in der Praxis der sog. Marciniak- oder Nakajima-Test nach ISO 12004-1 etabliert. Beim Marciniak-Test wird ein flacher Hohlstempel mit Ziehring und Blech-

halter verwendet [Mar67]. Die verschiedenen Dehnungszustände werden durch unterschiedliche Stempelquerschnittsflächen oder verschiedene Radien an den Probentaillierungen erzeugt [Ban12]. Beim Nakajima-Test wird hingegen ein halbkugelförmiger Stempel verwendet [DIN12004]. Hierbei werden die verschiedenen Dehnungszustände durch Taillierungsvariation der kreisförmigen Proben erzeugt. In der Umformsimulation stellt die FLC das wichtigste Kriterium zur Beschreibung der Umformbarkeit eines Blechwerkstoffs dar.

Zur Reduzierung des versuchstechnischen Aufwands (z.B. durch den Nakajima- oder Marciniak-Test) wird im industriellen Umfeld der Blechumformung häufig ein Modell von Keeler und Goodwin (1967) verwendet, mit dem zur Erstellung der Grenzformänderungskurve im ebenen Dehnungsraum nur die mechanischen Kennwerte (n-Wert und Blechdicke s_0) des Zugversuches benötigt werden [Kee77, Goo68]. Das Modell nach Keeler-Goodwin ergibt sich zu:

$$FLD_0 = s_0 * (0,233 + 0,141339 * n) \quad (28)$$

$$\text{Für } \varphi_2 < 0 \text{ gilt: } \varphi_1 = \ln(FLD_0 + (e^{\varphi_2} - 1) * (4,223 * (e^{\varphi_2} - 1) - 0,6275) + 1) \quad (29)$$

$$\text{Für } \varphi_2 \geq 0 \text{ gilt: } \varphi_1 = \ln\left(FLD_0 + 0,18 * (1 - e^{-5,838 * (e^{\varphi_2} - 1)})\right) \quad (30)$$

Dabei beschreibt FLD_0 den Abstand der FLC zur Nebenformänderungsachse φ_2 im sog. Plane Strain Punkt.

In der FE-Simulation werden die Werkstoffkennwerte in einem numerischen Werkstoffmodell abgebildet. Dazu wird in der Umformsimulation die Fließkurve, die Fließortkurve und ein Versagensmodell (in der Regel die FLC) verwendet. Die Werkstoffkennwerte werden dann in einer sog. Materialkarte in der jeweiligen Simulationssoftware wie etw. LS-Dyna oder AutoForm implementiert (vgl. Abb. 2-35).

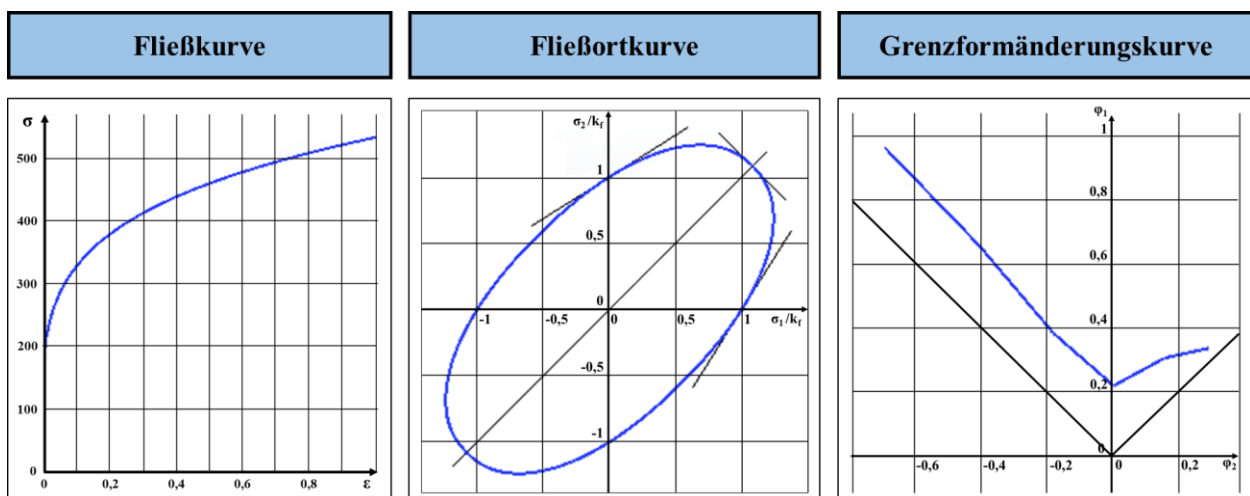


Abb. 2-35: Graphische Darstellung der Materialkarte für den Tiefziehstahl DC04 im Simulationsprogramm AutoForm.

2.9.6 Rückfederungsberechnung in der FE-Simulation

Eine präzise Rückfederungsberechnung bildet die Basis für eine aussagekräftige Prognose über die dimensionale Bauteilqualität von Einzelteilen oder Baugruppen und ist daher von höchster Bedeutung hinsichtlich möglicher Kompensationsmaßnahmen. Zur Untersuchung der Maßhaltigkeit eines Karosserie-ZSB liegt der Fokus dieser Arbeit in der Rückfederungsbewertung der Einzelteilherstellung sowie auf den anschließenden Fügeprozessen. Nach [Wei09] ist das bereits erreichte Genauigkeitsniveau der Rückfederungssimulation von Einzelteilen unter Verwendung von Schalenelementen ausreichend für die Entwicklung einer geeigneten Umformmethode. Der Rückfederungsberechnung wird allerdings weiterhin großes Entwicklungspotenzial hinsichtlich Prognosegenauigkeit zugeschrieben [Goe10, Kra05, Rol04]. Die Ergebnisgenauigkeit und die Herausforderungen in der Modellierung und Berechnung der Rückfederung werden u.a. in [Bur08, Fle09, Hue01, Kra05, Mut05, Roh01, Sch03, Wei09] beschrieben.

Wie bereits in Kapitel 2.1 ausgeführt, führen die im Bauteil wirkenden elastischen Spannungen nach der Entlastung des Bauteils zu einer Spannungsrelaxation und somit zu einer Rückfederung des Bauteils [Mut05]. Diese Rückfederung führt zu geometrischen Abweichungen, welche mithilfe der zur Verfügung stehenden Simulationssoftware berechnet und anschließend analysiert werden soll. In der Praxis werden die gemessenen Abweichungen eines Bauteils oder einer Baugruppe maßgeblich von der Bauteillage - und damit verbunden von der Wirkrichtung der Schwerkraft sowie von dem zuvor definierten Spann- und Fixierkonzept beeinflusst. Diese zugrundeliegenden Rand-, Fixier- und Lagerungsbedingungen können bspw. mit AutoForm in der Rückfederungsberechnung durch verschiedene Ansätze modelliert werden:

- Fixed Boundary Conditions
- Constrained Springback
- Real Measurement

Bei einer Rückfederungsberechnung mit festgelegten Fixed Boundary Conditions (FBC) kann das Bauteilnetz nach der Krafteinwirkung in die gewünschte Bauteillage transformiert werden. Anschließend werden Elementknoten definiert, die in bestimmten Freiheitsgraden eingeschränkt werden. In der Regel sollte das Bauteil dabei statisch bestimmt gelagert sein, damit es während der Rückfederungsberechnung seine Position nicht willkürlich verändern kann oder durch die Einschränkung der Freiheitsgrade der Elementknoten verspannt wird (vgl. 3-2-1 Prinzip; Kapitel 2.7). Die definierten FBC sollten demnach auch dem zuvor definierten RPS entsprechen. Die Berechnung der Rückfederung kann bei Bedarf mit Schwerkrafteinfluss durchgeführt werden, um eine bessere Vergleichbarkeit mit den geometrischen Messdaten des Bau-

teils zu ermöglichen. Nachteilig bei der Definition der FBC ist der Verlust der nominalen Bauteillage im Falle von rückfederungskompensierten Werkzeugwirkflächen, da durch die konstruktive Anpassung der Werkzeugwirkflächen der Ziehanlage (vgl. Kapitel 2.8.1) das Bauteilnetz bei geschlossenen Werkzeugen in den Bereichen der definierten FBC bereits von der Referenzgeometrie abweichen kann. Der Vorteil besteht hierbei im geringen Modellierungsaufwand, der für die Rückfederungsberechnung notwendig ist. Außerdem kann ohne ein definiertes Messkonzept eine erste Aussage über das Rückfederungsverhalten des Bauteils getroffen werden.

Bei einer Berechnung der Rückfederung mithilfe des Ansatzes mit der Bezeichnung *Constrained Springback* kann das Messen auf einer Messvorrichtung mit Aufnahmen, Spannern und Positionierstiften (Einweiser) vereinfacht virtuell abgebildet werden. Die Messaufnahmen und Spannelemente werden dabei als Halbkugeln abgebildet. Auf das Prinzip des Spannsens eines elastischen Bauteils aus Blech mithilfe des *Constrained Springbacks* wird in Kapitel 4.3 näher eingegangen. Durch die Positionierung der Bauteile vor dem Spannen geht die nominale Bauteillage wie beim Einsatz des FBC-Kriteriums hierbei jedoch nicht verloren. Auch bei dieser Methode kann der Schwerkrafteinfluss berücksichtigt werden. Der Modellierungsaufwand ist im Vergleich zum FBC-Kriterium nur geringfügig höher, jedoch bietet es eine deutlich höhere Prognosegenauigkeit. Mithilfe des *Constrained Springbacks* kann ein Spann- und Fixierkonzept entwickelt oder ein vorgegebenes untersucht werden.

Bei dem Ansatz mit der Bezeichnung *Real Measurement*, d.h. der Rückfederungsberechnung mit realistischen Werkzeugwirkflächen wie z.B. Teilformflächen oder anderen Auflageflächen, werden die Kontaktbedingungen zwischen dem Bauteilnetz und den Wirkflächen der Spannelemente berücksichtigt. Analog zu einer realen Messvorrichtung können hierbei zusätzliche Positionierstifte oder Spanner definiert werden. Weiterhin können die korrekte Bauteillage und auch der Schwerkrafteinfluss berücksichtigt werden. Im Vergleich zum *Constrained Springback* Kriterium oder der Rückfederungsberechnung auf Basis des FBC-Kriteriums ist der Modellierungsaufwand bei dieser Methode deutlich höher, bietet jedoch die höchste Prognosegenauigkeit.

Des Weiteren kann die Rückfederung in der FE-Simulation nach Entlastung der Bauteile, z.B. nach dem Öffnen der Umformwerkzeuge, mithilfe einer sog. freien Rückfederung berechnet werden. Abweichend von der Realität werden dabei keinerlei Randbedingungen, wie z.B. die Schwerkraft oder das Spann- und Fixierkonzept für ein Pressteil berücksichtigt. Dies entspricht einer Rückfederung des Bauteils im Raum ohne Schwerkrafteinwirkung. Die freie Rückfeder-

rungsberechnung findet u.a. bei der Berechnung des Rücksprungverhaltens der Bauteile zwischen den einzelnen Operationen Anwendung, bei denen keine definierten Randbedingungen vorherrschen. Die freie Rückfederung dient außerdem zur vereinfachten Prüfung, ob ein rückfederungsbehaftetes Stadienteil grundsätzlich in die Folgeoperation eingelegt werden kann.

2.9.7 FE-Simulation von Fügeprozessen

In den vergangenen Jahren wurden FE-Simulationsmethoden zur numerischen Abbildung von Fügeprozessen des Karosseriebaus entwickelt. Dazu zählen hauptsächlich die Simulation von thermischen Fügeverfahren, wie z.B. das Laserstrahl- und Punktschweißen, sowie die Simulation mechanischer punktueller Fügeverfahren, wie z.B. das Clinchen, das Nieten sowie das Falzen.

Modellierung thermischer Fügeverfahren

Zur Beurteilung der Maßhaltigkeit eines Karosserie-ZSB liegt bei den thermischen Fügeverfahren der Fokus auf der exakten Ermittlung des auftretenden Schweißverzugs. Dazu sind u.a. Arbeiten von [Eck12, Len01, Pap08, Per11, Sch07, Tha11, Ven06] zu nennen. Die Schweißsimulation wird aufgrund der hohen Komplexität laut [Sch07] in drei Kategorien unterteilt:

- Prozesssimulation von stoffschlüssigen Fügeverfahren: Schmelzbadgeometrie, lokales Temperaturfeld, Prozesswirkungsgrad und Prozessstabilität
- Werkstoffsimulation/Mikrostrukturentwicklung: Gefügezustand, Gefügeumwandlung, Härteveränderung und Rissneigung
- Struktursimulation: Strukturtemperaturfeld, Eigenspannungen, Verzug, Strukturfestigkeit und Struktursteifigkeit.

Für die Ermittlung der resultierenden Rückfederung einer geschweißten Baugruppe muss folglich eine Struktursimulation durchgeführt werden. Mit einer Prozesssimulation oder einer Werkstoffsimulation kann der thermische Einfluss des Schweißens auf die Fügeverbindung selbst numerisch untersucht werden und sollen aus diesem Grund an dieser Stelle nicht weiter behandelt werden.

Zur Modellierung einer Struktursimulation im Rahmen einer Schweißsimulation stehen verschiedene Modellierungsansätze zur Verfügung:

- Thermomechanische Modellierungsansätze
- Mechanische Modellierungsansätze

Bei den thermomechanischen Modellierungsansätzen werden die während des Fügevorgangs entstehenden Temperaturfelder numerisch abgebildet. Dazu werden die Bauteile in der Regel

durch Volumenelemente diskretisiert. Anschließend werden auf Basis der transienten Temperaturfelder in der Simulation die thermische Dehnung, die Eigenspannungen und die Verformungen berechnet. Zur Abbildung solcher hohen Gradienten von Temperatur und mechanischen Größen, die während des Fügens entstehen können, wird eine hohe Anzahl an Elementen im Bereich der Fügeverbindungen benötigt. In der Regel werden dazu die Bauteilnetze beider Schweißpartner durch ein sog. „Remeshing“ neu vernetzt. Dabei wird die Anordnung der Elementkanten und Positionen der Knoten im Raum der Schweißpartner so verändert, dass sie in den Fugebereichen deckungsgleich übereinanderstehen. Durch die hohe Anzahl an Elementen und unter Verwendung von Volumenelementen sind verhältnismäßig lange Rechenzeiten zu erwarten, jedoch wird dies aufgrund der hohen Prognosegenauigkeit des Verzugs der entstehenden Baugruppe in Kauf genommen.

Bei mechanischen Modellierungsansätzen werden hingegen keine transienten Vorgänge berücksichtigt. Der Schweißverzug wird stattdessen durch eine mechanische Ersatzlast in den Fügeverbindungen induziert. Dabei wird der während des Schweißens entstehende Verzug in beiden Schweißpartnern auf den Verzug durch das Schrumpfen beim Abkühlen reduziert [Tik05]. Hierfür werden Spannungen und/oder Dehnungen auf die Elemente und Knoten im relevanten Einflussbereich der Fügestellen aufgebracht, um den thermischen Einfluss abzubilden. In der Literatur finden sich dazu zahlreiche lineare und nichtlineare Ansätze [Cam03, Cam04, Ceg97, Cha97, Hu03, Liu95, Mer98, Sel99]. Meist werden ausschließlich rotationssymmetrische Fügepunkte betrachtet und modelliert, wie sie häufig Anwendung im Karosseriebau finden [Cas08, DeP07, Hah02, Hah08, Lee10, Por06, Sch04].

Die Prognosegenauigkeit des Schweißverzugs kann durch den Einsatz von mechanischen Modellierungsansätzen aufgrund des eingesetzten Elementtyps und der Vernachlässigung der transienten Vorgänge im Gegensatz zu thermomechanischen Modellen abnehmen. Der Vorteil mechanischer Modellierungsansätze liegt in einer drastischen Reduktion der Rechenzeit einer Schweißsimulation im Gegensatz zu thermomechanischen Modellierungsansätzen. Außerdem können die Schweißpartner mittels Schalenelementen diskretisiert werden. Dadurch kann die Schweißsimulation direkt mit der Umformsimulation gekoppelt werden, wodurch der Aufbau eines Abschnittes einer PKS ermöglicht wird (vgl. Kapitel 2.9.8).

Simulation mechanischer punktueller Fügeverfahren

Im Gegensatz zu den thermischen Fügeverfahren entsteht bei den mechanischen Fügeverfahren kein Verzug durch lokale Wärmeeinwirkung. Die Beurteilung der Maßhaltigkeit der entstehenden Baugruppe durch die Simulation mechanischer Fügeverfahren wird in Arbeiten von

[Alb10, Alb11, Cai05, Eck12, Kae16] behandelt. Der Einfluss des Fügeverzugs auf den globalen Baugruppenverzug aufgrund lokaler Deformationen in den Fügeverbindungen selbst wird von [Eck12, Kae16] als vernachlässigbar klein bewertet. Die auftretenden Maßabweichungen der Baugruppe resultieren hauptsächlich aus den Maßabweichungen der umgeformten Einzelteile und durch das Spannen dieser Einzelteile in den Fügevorrichtungen. Die Modellierung des Spannprozesses vor dem eigentlichen Fügeprozess stellt daher einen wichtigen Faktor für die Prognosegenauigkeit jeder Fügesimulation (nicht nur mechanischer Fügeverfahren) dar.

Der Spannprozess der Einzelteile kann in der Fügesimulation durch verschiedene Ansätze analog zur Rückfederungsberechnung (Kapitel 2.9.6) modelliert werden:

- Fixieren einzelner Knoten der vernetzten Bauteile (analog FBC)
- Modellierung der Spannwerkzeuge durch Halbkugeln (analog *Constrained Springback*)
- Modellierung der realen Spannwerkzeugwirkflächen (analog *Real Measurement*)

Das Fixieren einzelner Knoten beim Spannprozess bedeutet dabei den geringsten Modellierungsaufwand. Dazu werden einzelne Bauteilknoten in der Nähe der gewünschten Spannerendposition während des Fügens in ihrer Lage im Raum fixiert. Dazu muss kein zusätzlicher Simulationsprozess durchlaufen werden. Dieser Ansatz wird bei der Verwendung nominaler Bauteildaten ohne Umformhistorie verwendet. Rückfederungsbehaftete Einzelteile können allerdings nicht in der gewünschten Spannerendposition zueinander positioniert werden (analog dem Verlust der nominalen Bauteillage bei rückfederungskompensierten Werkzeugwirkflächen, Kapitel 2.9.6). Dabei können keine lokalen Deformationen der Blecheinzelteile im Wirkungsbereich der Spannwerkzeuge berücksichtigt werden.

Zur Positionierung der Einzelteile in der gewünschten Spannerendposition können die Spannwerkzeuge mithilfe von Halbkugeln abgebildet werden. Das Bauteil wird im Wirkungsbereich eines Spanners in die Spannerendposition gezwungen. Dabei können die Bauteile bereits plastisch deformiert werden. Da während des Spannprozesses alle Kontaktbedingungen zwischen den Bauteilen sowie auch die Struktursteifigkeit der Einzelteile berücksichtigt werden müssen, wird der Spannprozess in einem zusätzlichen Simulationsprozess berechnet. Die Spannkkräfte können dann als resultierende Kräfte aus den Knotenverschiebungen berechnet werden. Diese Modellierung des Spannprozesses wird in dieser Arbeit genauer in Kapitel 4.3 beschrieben.

Die Modellierung von wirkflächenbasierten Spannwerkzeugen stellt die umfassendste Methode der hier vorgestellten Ansätze dar und führt gleichzeitig zur relativ höchsten Prognosegenauigkeit. Dazu werden die Spannwerkzeuge als ideal-starre Werkzeuge in der Fügesimulation abgebildet. Die Spannwerkzeuge werden dann analog zu einer Umformsimulation mit definierten Kontaktbedingungen unter Berücksichtigung der lokalen Bauteilflächen geschlossen (vgl.

Spannprozess Abb. 2-36). Dieser Ansatz bildet den Spannprozess realitätsnah ab, jedoch ist die Berechnung und die Modellierung der Spannerkinematik relativ komplex und aufwendig.

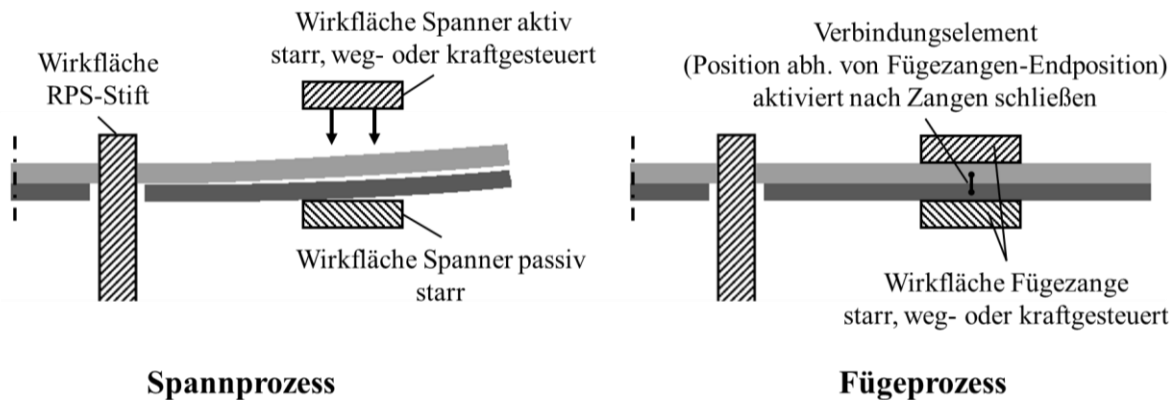


Abb. 2-36: Prinzip der wirkflächenbasierten Modellierung von Spann- und Fügeprozessen nach [Eck12].

Analog zur Spannprozesssimulation wird auch die Simulation eines punktuellen Fügeprozesses mithilfe von knotenbasierten, kräftebasierten sowie wirkflächenbasierten Ansätzen modelliert. Auch Mischformen sind möglich. Der wesentliche Unterschied zur Spannprozesssimulation bildet die zusätzliche Modellierung von Fügeverbindungen zwischen den Einzelteilen der Baugruppe im Wirkungsbereich der Fügewerkzeuge. Eine detailgetreue Modellierung von Fügepunkten eines Karosserie-ZSB ist aufgrund der großen Anzahl der Fügepunkte sowie des relativ hohen Modellierungs- und Berechnungsaufwands sehr zeitintensiv [Sta09]. Aus diesem Grund werden die Fügeverbindungen durch Ersatzmodelle abgebildet. Dadurch können heutzutage bereits alle Fügepunkte an einer Fahrzeugkarosserie vereinfacht berücksichtigt werden.

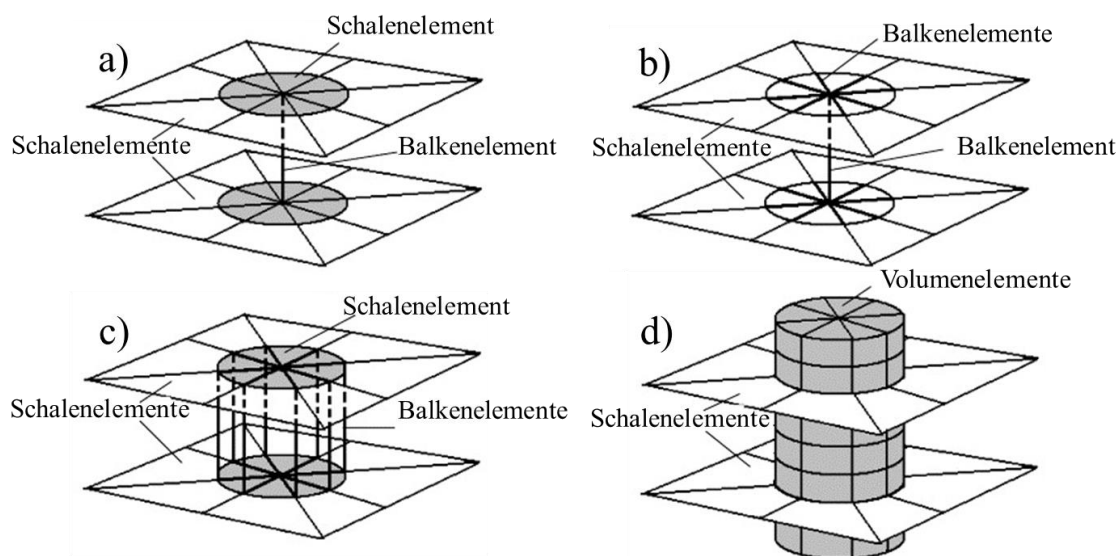


Abb. 2-37: Modellierung von Verbindungselementen für Fügepunktersatzmodelle nach [Den04]: a) Einfachbalken-Modell, b) Speichenbalken-Modell, c) Mehrfachbalken-Modell und d) Volumen-Modell.

Abb. 2-37 zeigt verschiedene Fügepunktersatzmodelle zur Verbindung von Schalenelementen, wie sie in der Umformsimulation verwendet werden. Vor- und Nachteile sowie verschiedene

Anwendungsfälle der einzelnen Fügepunktersatzmodelle werden in [Den04] diskutiert. Ein Balkenelement als Verbindungselement (Abb. 2-37a, b und c) muss jeweils mit einem Knoten aus beiden Bauteilnetzen verbunden sein. Für eine definierte Endposition der Fügeworkzeuge im geschlossenen Zustand (vgl. Fügeprozess Abb. 2-36) müssen die Bauteilnetze der Fügepartner aus diesem Grund vorher durch ein Remeshing angepasst werden. Ein Volumenelement als Verbindungselement (Abb. 2-37d) kann hingegen direkt an ein Schalenelement ohne zusätzliches Remeshing angebunden werden [Mem05].

Falzsimulation eines Karosserie-ZSB

Bei der Falzsimulation liegt der Fokus hauptsächlich in der Absicherung der Prozessparameter, wie beispielsweise des Flanschöffnungswinkels und der Rollenzustellung sowie des beim Falzen entstehenden Falzverlusts sowie auf der Beurteilung der Falzqualität, wie z.B. die Faltenbildung und die Rissbildung im Falzflansch. Dazu wurden verschiedene Arbeiten, unter anderem von [Buc11, Eck11, Eis12, Jon06, Sve02, Thu08] veröffentlicht. Diese Erkenntnisse wurden bereits in verschiedenen Softwareprogrammen, wie z.B. AutoForm, Pam-Stamp und LS-Dyna erfolgreich umgesetzt. Durch die Weiterentwicklung der Computerprozessoren und der damit verbundenen höheren Rechenleistung und -genauigkeit wurden diese Softwareprogramme in den letzten Jahren stetig erweitert [Neu14]. Für eine Beurteilung der Maßhaltigkeit von konventionellen PKW-Anbauteilen unter Berücksichtigung aller Einzelteile und aller Prozessschritte ist derzeit allerdings noch keines der Softwareprogramme geeignet. Lediglich die Verkettung einer klassischen Umformsimulation mit einer anschließenden Falzsimulation eines Innenteils mit einem Beplankungsteil lässt heute sich wirtschaftlich darstellen. Dabei lassen sich durch den Einsatz der Falzsimulation schon heute Änderungsschleifen von Schneid- und Abkantwerkzeugen einsparen. Eine Methodenentwicklung für den Falzprozess zur Auswertung von Roll- und Maschinenfalzergebnissen ist bisher jedoch nur in AutoForm auf Basis einer anwenderfreundlichen GUI umgesetzt.

2.9.8 Prozesskettensimulation im Karosseriebau

Die Notwendigkeit der simulativen Abbildung von Fügeprozessen zur Absicherung der Qualität von Karosseriezusammenbauten wurde bereits von einer Vielzahl von Autoren erkannt [Alb16, Eck12, Kae16, Rol04]. Dies zeigt auch der Trend in der Weiterentwicklung moderner Umformsimulationsprogramme, wie z.B. AutoForm, Pam-Stamp und LS-Dyna durch Implementierung der entwickelten Methoden aus genannten Arbeiten in die Softwarecodes. Für eine durchgängige Betrachtung und Absicherung des Herstellungsprozesses eines ZSB aus Blecheinzelteilen müssen die bereits vorgestellten Simulationsmethoden verkettet werden.

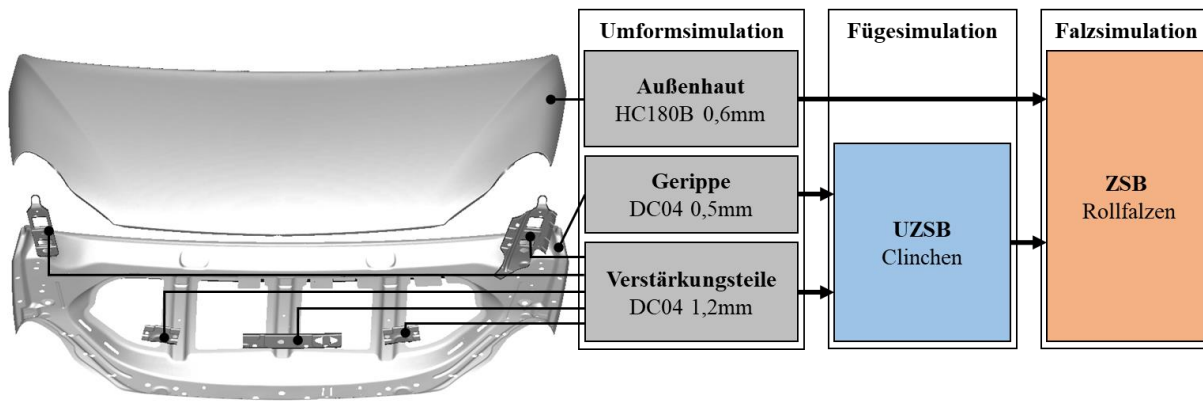


Abb. 2-38: Prinzip der Prozesskettensimulation einer Motorhaube.

Wie bereits erwähnt, sind die heute am Markt verfügbaren Simulationsprogramme nicht alle für die Durchführung der einzelnen Simulationsschritte (Umformprozess der Einzelteile, punktuell Fügen des UZSB und Roll- oder Backenfalten des ZSB) geeignet. Aus diesem Grund wurden während der letzten Jahre verschiedene Algorithmen entwickelt, um die Simulationsergebnisse zwischen den verschiedenen Softwarecodes übertragen zu können. Jeder FE-Simulationscode nutzt jedoch eine spezifische Diskretisierung, weshalb sich die entstehenden Netze hauptsächlich in Form, Größe und Definition der Elemente voneinander unterscheiden (vgl. Abb. 2-31). Schalenelemente eignen sich besonders für die Verkettung der Umformsimulation mit einer Fugesimulation und finden entweder in Form von Dreieck- oder Viereckschalenelemente mit verschiedenen Kantenlängen Anwendung. Je nach Anwendungsfall und Simulationsprogramm erfolgt die Elementdefinition zur Abbildung der skalaren und tensoriellen Ergebnisgrößen über Integrationspunkte über der Elementdicke und über sog. „Gauss-Punkte“ (Integrationspunkte in der Elementebene).

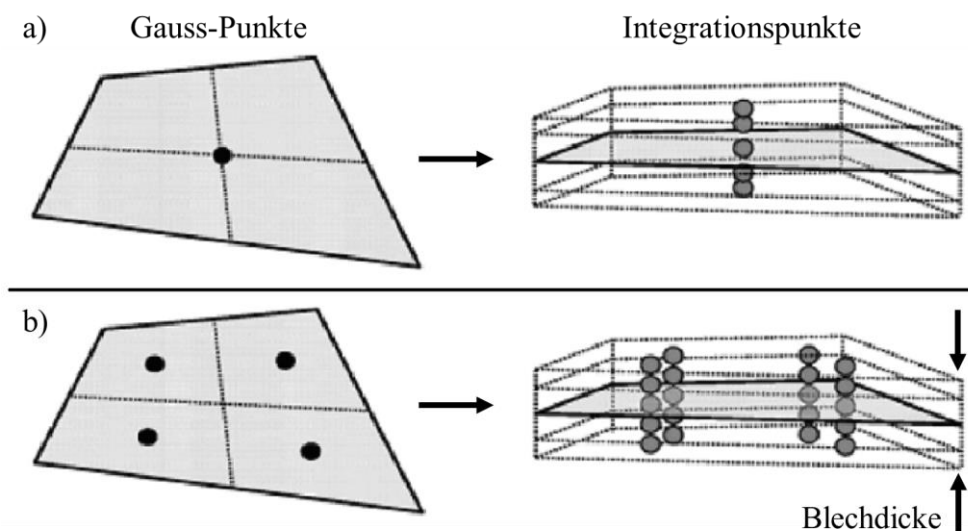


Abb. 2-39: Unterschiedliche Elementdefinition eines Viereck-Schalenelementes in der FE-Simulation durch a) 1 Gauss-Punkt und b) vier Gauss-Punkte nach [Ste12].

Bisher existieren nur begrenzte Schnittstellen zwischen den Simulationsprogrammen. Jede Datenübertragung von Ergebnisgrößen zwischen verschiedenen FE-Simulationsprogrammcodes ist deshalb mit Daten- oder Genauigkeitsverlust verbunden [Lec09, Pet11b, Wie10a].

In [Pet11b] wurden prinzipielle Fehler des Daten-Mappings bei der Übertragung von Bauteilzuständen aus einem Umformmodell auf ein Schweißmodell eines S-förmig gebogenen Hutprofils aus AlMgSi und HC340LA mit jeweils 1mm Blechdicke untersucht. Dabei stellte er fest, dass das Daten-Mapping einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf den Betrag und die Richtung der Rückfederungsberechnung zeigt. [Pap08] führt in seiner Arbeit eine PKS für die Herstellung einer B-Säule als ZB durch, bestehend aus den Einzelteilsimulationen des Innenteils mit AutoForm (Karosserieziehen) und des Außenteils mit LS-Dyna (Warmumformung) und anschließender Fügesimulation der beiden Blechformteile mittels Sysweld (Widerstandspunktschweißen). Den Einfluss des Daten-Mappings bewertet er dabei nicht. Dabei wurde eine Prognosegenauigkeit von 0,25mm unter Berücksichtigung und 0,6mm ohne Berücksichtigung der Umformhistorie der Einzelteile erzielt.

Zur Vermeidung von Datenverlusten müssen grundsätzlich Ansätze ohne Daten-Mapping verfolgt werden, wie z.B. jene in [Eck12, Gov12, Sch15a]. In [Gov12] wurden an einer Versuchsbaugruppe aus drei verschiedenen Hutprofilen aus Dualphasenstahl (DP600) das Spannen und Fügen durch Widerstandspunktschweißen der Einzelteile nach dem Umformen mit LS-Dyna untersucht. Die Spann- und Fügezangenkontaktflächen bildete er in der Simulation in seiner Arbeit durch starre Wirkflächen ab. Die Fügeverbindungen bildete er punktuell unter Vernachlässigung des Wärmeeintrags mittels Balkenelementen ab. Mittels einer durchgängigen Nutzung eines FE-Simulationscodes konnte ein Datenverlust durch Daten-Mapping vermieden werden. Die erzielten Prognosegenauigkeiten der simulierten Rückfederung zum gemessenen Bauteil lagen zwischen 0mm im Bereich der Bauteilaufnahmen und 4mm in den Fügeflanschen. Auch [Eck12] verfolgte die Verkettung von einzelnen Simulationsmethoden ohne Daten-Mapping in Pam-Stamp an einer Versuchsbaugruppe aus Aluminium. Dabei zeigte seine Arbeit eine Möglichkeit auf, wie ein Ersatzmodell einer Fügeverbindung (ideal starrer Balken-Konnektor) erweitert werden kann, um den Spannungseintrag der Fügeverbindung (Clinchen, Stanznieten) in die Bauteilstruktur zu berücksichtigen. Spann- und Fügeprozess modellierte er hierbei mit wirkflächenbasierten Werkzeugen (vgl. Abb. 2-36).

[Sch15a] entwickelte ein Modell für eine gekoppelte Simulation von Spannprozess und Schweißverzug von Karosserieanbauteilen mit Pam-Stamp. Dabei bildete er den Wärmeeintrag durch ein mechanisches Ersatzmodell ab, welches mittels eines experimentellen Verfahrens kalibriert wurde. Die Abbildung der Spannwerkzeuge erfolgte analog zu [Eck12]. Die Verbindung

der Bauteile stellte er durch ideal starre Konnektorelemente (Balkenelemente) her, die alle gleichzeitig innerhalb eines Zeitschritts über die gesamte Schweißnahtlänge aktiviert wurden. Eine mechanische Ersatzlast konnte anschließend in der Wärmeeinflusszone (auch innerhalb eines Zeitschritts) analog zu [Eck12] eingebracht werden. Diese mussten ebenfalls mittels Praxisversuchen ermittelt bzw. kalibriert werden.

In [Kae16] wurde ein durchgängiger Herstellungsprozess von der Einzelteilherstellung bis zum fertig gefalzten ZSB von Anbauteilen am Beispiel einer Motorhaube untersucht. Dabei führte er die Umformsimulation ebenso wie das Kleben und Clinchen des UZSB mit AutoForm durch. Das anschließende Rollfalzen erfolgte hingegen mit dem Simulationsprogramm LS-Dyna. Da AutoForm und LS-Dyna unterschiedliche Diskretisierungen verwenden, musste das in AutoForm berechnete Netz des Bauteils aus Dreiecks-Schalenelementen durch Remeshing in quadratische Schalenelementtypen für LS-Dyna überführt und die Ergebnisse mittels Daten-Mapping auf das neue Netz übertragen werden. In den Fügesimulationen wählte er zur Einsparung von Rechenzeit ein gröberes Netz als in der Umformsimulation. Dafür verwendete er den Preprozessor ANSA. Außerdem empfiehlt er eine freie Rückfederungsberechnung in AutoForm, da beim Daten-Mapping auf die Übertragung der im Pressteil herrschenden Eigenspannungen verzichtet wird. Dabei konnten lediglich skalare Größen wie Blechausdünnung und plastische Vergleichsdehnung aus der Umformsimulation übertragen werden. Die Rückfederung berechnete er im Gleichgewichtszustand ohne Zwangsbedingungen (z.B. durch Spanner oder Schwerkrafteinfluss). Zur Verbesserung der Prognosequalität verwendet [Kae16] zusätzlich aufbereitete Bauteilnetze aus optisch gescannten Einzelteilen. In seiner Arbeit wurden die Spanner und Clinchzangen (vergleichbar zu [Eck12]) als starre Werkzeuge modelliert, die sequentiell geschlossen und geöffnet werden. Die Clinchverbindung stellte er durch ein Volumenelement nach dem Schließen der Zange her. Im Gegensatz zur Vorgehensweise der Arbeiten von [Eck12] und [Sch15a] musste durch den Einsatz des Volumenelements das Netz im Bereich der Fügeverbindung nicht zusätzlich verfeinert werden (kein zusätzliches Remeshing), da das Verbindungselement nicht zwingend an Knoten des FE-Netzes gekoppelt sein musste. Der Wärmeeintrag durch das Schweißen berücksichtigt er in seiner Arbeit nicht. Die Falzmethode entwickelte er mithilfe von AutoForm und hat die dabei abgeleitete Falzbahn mit entsprechenden Rollenanstellwinkeln mit einem eigens entwickelten Programm in LS-Dyna übertragen. Die Kopplung der Simulationsschritte und die dafür verwendeten Programme sind in Abb. 2-40 dargestellt.

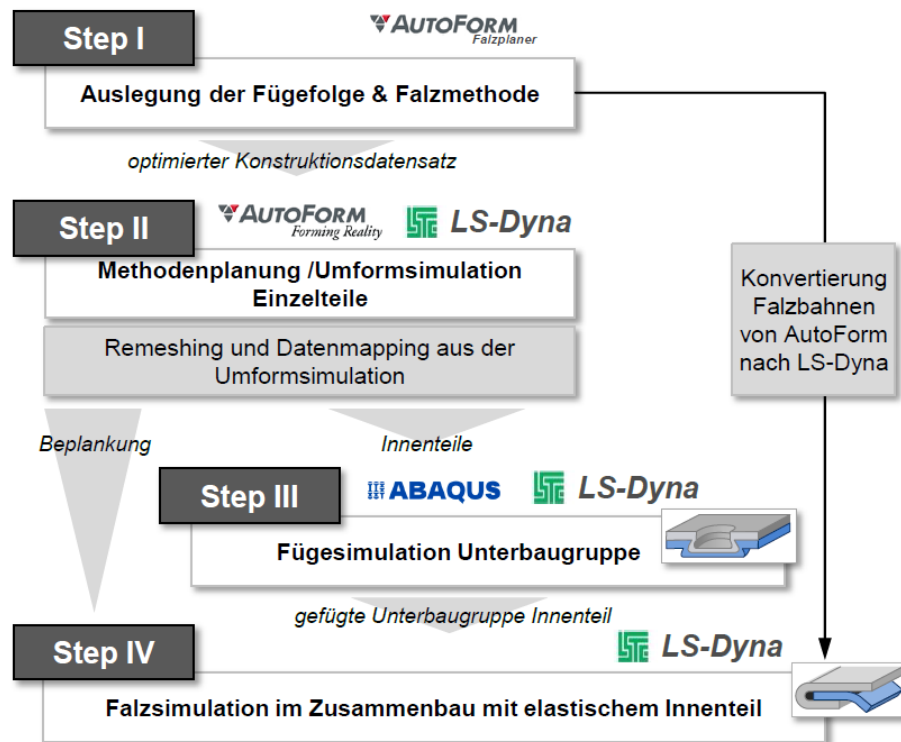


Abb. 2-40: Zeitliche Abfolge der einzelnen Simulationsschritte bei der durchgängigen Prozesssimulation eines Karosserie-ZSB aus Blecheinzelteilen nach [Kae16].

Basierend auf dem Rückfederungsergebnis des ZSB konnte er eine rückwärtsgerichtete Kompensationsmethode ableiten. Mithilfe dieser Methode realisierte er eine iterative Kompensation der Einzelteile und des Spannprozess in der PKS und analysierte deren Einfluss auf die Maßhaltigkeit des ZSB.

2.10 Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments

Die statistische Versuchsplanung ist eine wichtige Methode zur effizienten Planung und Auswertung von Versuchsreihen und wird universell in allen Ingenieursdisziplinen eingesetzt [Sie17]. Die statistische Versuchsplanung liefert zahlreiche Möglichkeiten zur Ermittlung eines geeigneten Versuchsumfangs und dessen Auswertung. Im folgenden Kapitel werden die für diese Arbeit relevanten und verwendeten Methoden der statistischen Versuchsplanung vorgestellt.

2.10.1 Vollständige faktorielle Versuchspläne

Vollständige faktorielle Versuchspläne dienen zur Modellbildung eines linearen Verhaltens des zu betrachtenden Versuchsumfangs. Dazu werden die Eingangsvariablen k auf mindestens zwei Stufen variiert. Eine Stufe beschreibt dabei, welchen Wert eine Eingangsvariable annehmen kann. Die Anzahl der durchzuführenden Versuche berechnet sich wie folgt [Kle16]:

$$\text{Anzahl Versuche} = \text{Anzahl Stufen}^k \quad (31)$$

Ein sog. „vollständig faktorieller 2^4 Versuchsplan“ besteht demnach aus 4 Eingangsvariablen, die jeweils auf zwei (Extremwert-) Stufen variiert werden (vgl. Werte X und O in Tabelle 2-3). Somit wären insgesamt 16 Versuche, sog. Faktorstufenkombinationen notwendig.

	2 ⁴ Plan			
	2 ³ Plan			
	2 ² Plan			
Versuch	A	B	C	D
1	O	O	O	O
2	X	O	O	O
3	O	X	O	O
4	X	X	O	O
5	O	O	X	O
6	X	O	X	O
7	O	X	X	O
8	X	X	X	O
9	O	O	O	X
10	X	O	O	X
11	O	X	O	X
12	X	X	O	X
13	O	O	X	X
14	X	O	X	X
15	O	X	X	X
16	X	X	X	X
	Faktor (Eingangsgrößen)			

Tabelle 2-3: Prinzipieller Aufbau vollständig faktorieller Versuchspläne.

Der Vorteil von vollfaktoriellen Versuchsplänen liegt darin, dass neben allen auftretenden Effekten auch alle Wechsel- und Mehrfachwechselwirkungen bestimmt werden können [Wie10b]. Bei steigender Anzahl von möglichen Eingangsvariablen und Stufen, wie es beispielsweise in der Umformsimulation der Fall ist, steigt allerdings auch der Versuchsumfang. Außerdem lassen sich die Prozesse in der Simulation nicht mehr direkt analysieren und in einen linearen Zusammenhang bringen. Zur Reduktion des Versuchsaufwands zur Untersuchung von nichtlinearen Zusammenhängen, wie dies bspw. in der Analyse der Robustheit von Blechumformprozessen der Fall ist, werden die Methoden der stochastischen Analyse angewandt [Emr13]. Dazu gehören u.a. die sog. „Samplingverfahren“, wie es beispielsweise die Monte-Carlo-Methode darstellt.

2.10.2 Stochastische Analyse

Die Monte-Carlo-Methode

Mit der Monte-Carlo-Methode können nichtlineare mathematische oder physikalische Probleme numerisch gelöst werden. Die von Enrico Fermi entwickelte Idee und von John von Neumann benannte Methode nach der Spielbank von Monte Carlo, generiert auf Basis der Wahrscheinlichkeitstheorie eine beschränkte Anzahl an Zufallsexperimenten. Dabei wird für

jeden Modellparameter innerhalb eines festgelegten Bereichs und einer angenommenen Verteilungsfunktion eine Anzahl zufälliger Stichproben entnommen, mit denen die Modellsimulation durchgeführt wird. In der Modellanalyse wird anschließend mithilfe stochastischer Methoden und statistischer Kennwerte ein Zusammenhang zwischen den Eingangsparametern und den Ergebnissen aus der Modellsimulation ermittelt. In der Modellanalyse von Umformsimulationen oder Robustheitsuntersuchungen in der Blechumformung, kommen u.a. lineare und quadratische Regressionen, Splineansätze, künstliche neuronale Netze und das sog. Kriging zum Einsatz [Cre90, Kle16, Mat63]. Demnach ist die Wahl der Analysemethode abhängig von der Modellkomplexität, dem Berechnungsaufwand und der geforderten Aussagegenauigkeit.

Abb. 2-41 zeigt schematisch die Anwendung der Monte-Carlo-Methode zur Ermittlung der Kreiszahl π :

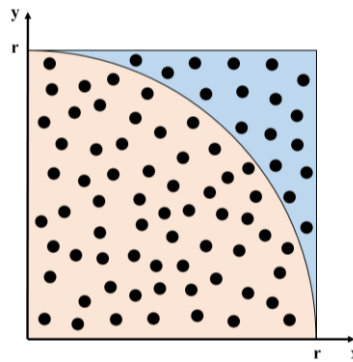


Abb. 2-41: Anwendung der Monte-Carlo-Methode zur Ermittlung der Kreiszahl π .

Die Fläche A eines Kreises wird mit

$$A = \pi \frac{r^2}{4} \quad (32)$$

beschrieben. Daraus folgt die Kreiszahl π mit

$$\pi = 4 \frac{A}{r^2} \quad (33)$$

In diesem Beispiel werden insgesamt 80 zufällige Punkte im festgelegten Quadrat mit der Fläche r^2 erzeugt. Anschließend werden die Punkte im eingeschlossenen Viertelkreis gezählt. Somit ergibt sich für die Näherung der Kreiszahl π zu:

$$\pi \approx 4 * \frac{\text{Anzahl Punkte im Viertelkreis}}{\text{Anzahl Punkte Gesamt}} = 4 * \frac{63}{80} = 3,15 \quad (34)$$

Mit der Anzahl der zufällig generierten Punkte steigt auch die Genauigkeit der stochastisch näherungsweise berechneten Kreiszahl π . In Bezug auf die statistische Versuchsplanung zur

Analyse komplexer physikalischer Problemstellungen, wie der Simulation von Umformprozessen, ist eine hohe Anzahl an benötigten Stichproben aufgrund langer Rechenzeiten ungeeignet. Zur Verringerung der Faktorstufenkombinationen in diesem Anwendungsfall werden sog. reduzierte Varianten der Monte-Carlo-Methode, wie z.B. die Latin-Hypercube-Methode, verwendet.

Die Latin-Hypercube-Methode

Die von McKay, Conover und Beckman [Mck79] entwickelte Latin-Hypercube-Methode (LHC) ist eine reduzierte Variante der Monte-Carlo-Methode. Sie kommt dabei mit einer um den Faktor 12 reduzierten Anzahl an Faktorstufenkombinationen im Vergleich zur konventionellen Monte-Carlo-Methode aus, bei ähnlicher Genauigkeit [Wil06]. Die mathematischen Grundlagen können u.a. aus [Ima81a, Ima81b, Wys98] entnommen werden. Bei der LHC werden theoretische Verteilungen der zu betrachtenden Eingangsvariablen angenommen und in N Intervalle mit gleicher Wahrscheinlichkeit unterteilt. Dabei sei die Anzahl der Intervalle N gleich der Anzahl der durchzuführenden Versuche. Anschließend wird eine kumulative Wahrscheinlichkeit aus jedem Intervall als Stichprobe entnommen, wobei für jede Variable die gleiche Anzahl an Stichproben entnommen wird (vgl. Abb. 2-42). Im Gegensatz zur Monte-Carlo-Methode erfolgt auf diese Weise keine zufällige, sondern eine systematische Auswahl der Parameter. Anschließend werden die einzelnen Stichproben über eine sog. Permutation, wie z.B. das Pairing-Verfahren, hin zu einem Versuchsplan kombiniert [Wys98]. [Emr13] verwendet die LHC bspw. bei der Bestimmung der Robustheit eines Ziehvorgangs von Blechbauteilen aufgrund von streuenden Eingangsgrößen wie etwa die Werkstoffeigenschaften des verwendeten Blechwerkstoffs.

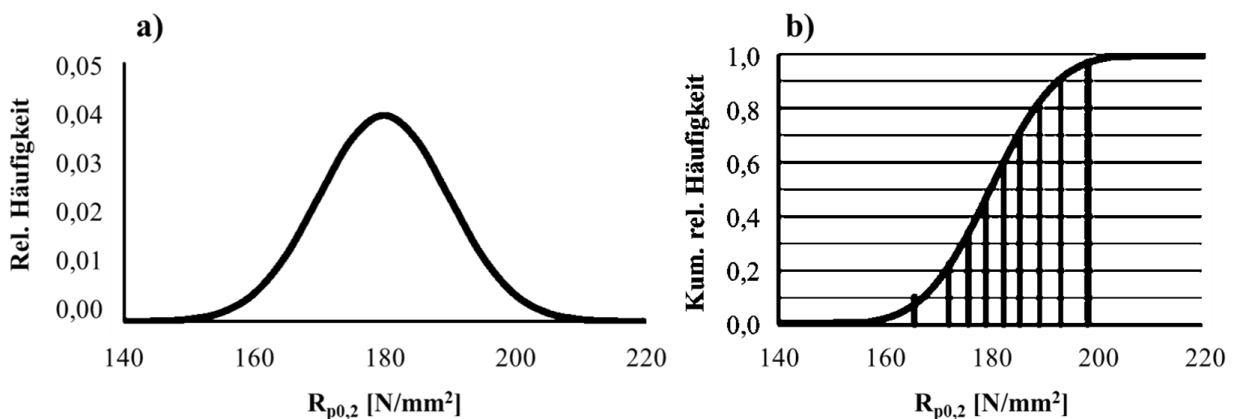


Abb. 2-42: Beispiel für a) eine Verteilungsfunktion der Streckgrenze eines Tiefziehstahls und b) kumulierte Verteilungsfunktion mit Einteilung in $N = 10$ Intervalle [Emr13].

Dabei kombiniert [Emr13] die einzelnen Variablenstichproben mithilfe des Restricted Pairing Algorithm von Iman und Conover [Ima82]. Durch diese Art der Permutation können real existierende Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen gefunden und berücksichtigt werden. Zur Ermittlung der Zusammenhänge zwischen den Eingangsparametern und den Ergebnissen der Modellsimulationen werden in der Modellanalyse die gewonnenen Daten und Kennwerte mittels Interpolation in ein Ersatz- oder auch in ein Meta-Modell überführt. Mithilfe dieses Ersatzmodells kann anschließend das zugrundeliegende Problem auch für vorher nicht getestete, bzw. neue Werte der Eingangsvariablen gelöst werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird dazu das räumliche Interpolationsverfahren Kriging verwendet, welches im folgenden Kapitel vorgestellt wird.

2.10.3 Meta-Modellbildung zur Modellanalyse mittels Kriging-Verfahren

Das Kriging-Verfahren gehört zu den räumlichen, linearen Interpolationsverfahren. Der ursprünglich vorgestellte statistische Ansatz für den Bergbau von [Kri51] wurde u.a. von G. Matheron weiterentwickelt [Mat63]. Inzwischen steht das Kriging-Verfahren für eine Vielzahl von Schätzverfahren, die zur Prognose eines zugrundeliegenden räumlichen Zufallsprozesses $Z = Z(x_i)$ mit einem linearen Schätzer, also einem gewichteten Mittel der gemessenen Beobachtungen, dienen. Interpolationsverfahren beruhen laut de Lange auf der Annahme, dass Ähnlichkeiten zwischen räumlich benachbarten Werten existieren [Del13]. Daher haben räumlich nahe beieinanderliegende Messpunkte eine höhere Abhängigkeit (Gewichtung) als weiter entfernte. Außerdem berücksichtigt das Kriging-Verfahren eine Korrelation der ermittelten Messpunkte zur Verbesserung der Gewichtung. Damit wird zusätzlich die Stetigkeit zwischen zwei Messwerten einbezogen.

Die Basis für das Kriging-Verfahren bildet das sog. Variogramm. Es ist ein Maß für die räumliche Abhängigkeit für n verschiedene Messpunkte $x_{i=1...n}$ im betrachteten Messbereich D . Die Idee der Variogrammermittlung basiert auf der Annahme, dass die räumliche Beziehung zweier Messpunkte nicht von ihren absoluten Positionen im Raum, sondern von ihrer relativen Lage zueinander abhängt, also ihrem Abstandsvektor $\vec{h}$ [Wac98]. Von der Variogrammermittlung hängt deshalb entscheidend die Güte der Interpolation am unerprobten Ort x_0 ab [Hin03]. Dabei seien $z(x_1)$ bis $z(x_n)$ die Messwerte der ortsunabhängigen Beobachtungsvariable an den Orten x_1 bis x_n . Sie beschreiben den Zustand des Messgebietes an den Punkten $z(x_i)$ und bilden die tatsächlichen Werte der Zufallsvariablen $Z(x_i)$ einer Zufallsfunktion:

$$Z = Z(x); x \in D \quad (35)$$

Zur Herstellung eines räumlichen Zusammenhangs zweier Zufallsvariablen $Z(x_i)$ und $Z(x_j)$ an den Orten x_i und x_j wird der Abstandsvektor $\vec{h} = x_i - x_j$ im sog. Semi-Variogramm $\gamma(h)$ beschrieben [Arm98]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x_i) - Z(x_j)] \quad (36)$$

Das Semi-Variogramm $\gamma(h)$ ist ein Maß für die räumliche Abhängigkeit der beiden Zufallsvariablen und gibt die Streuung der Differenzen zwischen zwei Zufallsvariablen mit dem Abstandsvektor $\vec{h}$ an. Es wird angenommen, dass mit zunehmendem Abstand zwischen zwei Zufallsvariablen auch die räumliche Abhängigkeit abnimmt. Die Erstellung des Semi-Variogramms erfolgt durch „Schätzen“ des räumlichen Zusammenhangs der vorliegenden Messdaten. Dafür werden aus allen erprobten Messdaten die jeweiligen Abstandsvektoren $\vec{h}$ bestimmt und anschließend in ein experimentelles Semi-Variogramm mittels eines Variogrammschätzers $\hat{\gamma}(h)$ erstellt (vgl. Abb. 2-43).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2|N(h)|} * \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_j)]^2 \quad (37)$$

Der klassische Variogrammschätzer $\hat{\gamma}(h)$ nach Gleichung (37) von G. Matheron fasst dabei Punktepaaire innerhalb einer festgelegten Abstandsklasse zusammen, da davon ausgegangen werden kann, dass nur wenige beobachtete Messwerte denselben Abstandsvektor haben. Dabei beschreibt $N(h)$ die Anzahl der Datenpaare mit dem Abstand h zueinander [Mat63].

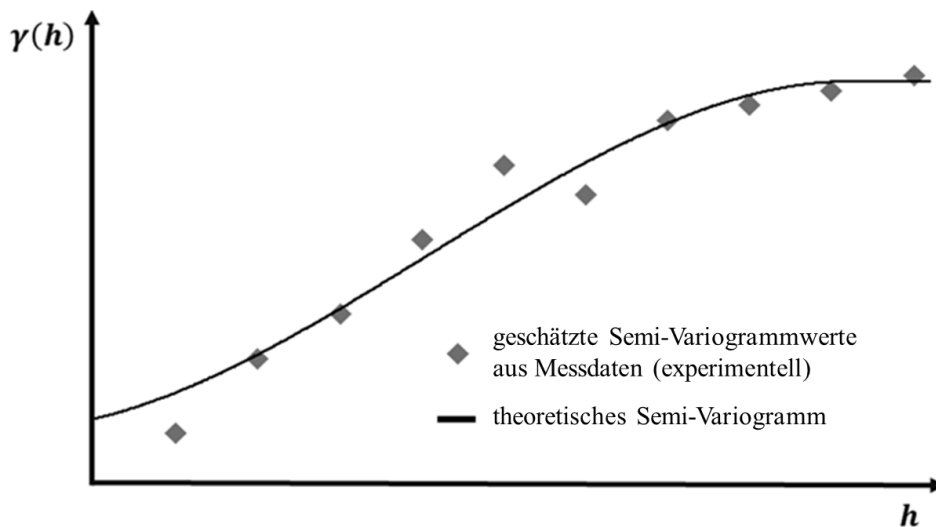


Abb. 2-43: Interpolation des theoretischen Semi-Variogramms aus den geschätzten Semi-Variogrammwerten der erprobten Messdaten.

Aus den geschätzten Semi-Variogrammwerten der erprobten Messdaten wird anschließend ein theoretisches Semi-Variogramm (vereinfacht Variogramm) interpoliert. Da davon ausgegangen

wird, dass das experimentell ermittelte Variogramm die Abhängigkeit des gesamt zu untersuchenden Werteraumes D widerspiegelt, müssen für den Anwendungsfall ausreichend viele Messdaten vorliegen. Das Kriging-Verfahren schätzt nun die Werte der Zufallsvariablen $Z^*(x_0)$ und die Varianz des Messfehlers σ^* (Kriging-Varianz) am unerprobten Ort x_0 aus den bekannten Messwerten x_i der Zufallsvariablen $Z(x_i)$ mithilfe einer gewichteten linearen Kombination dieser Werte ab:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z(x_i) \quad (38)$$

$$\sigma^* = 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_0) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i - x_j) - \gamma(0) \quad (39)$$

Der grundlegende Gedanke des Krigings-Verfahrens beruht nun darauf, dass die Gewichtungsfaktoren λ_i und λ_j so bestimmt werden, dass die Kriging-Varianz minimiert wird. Dafür werden die Gewichtungsfaktoren für den Wert Z am jeweiligen Messpunkt mithilfe des erstellten Variogramms berechnet. Dabei sollen die Schätzwerte erwartungstreu sein, d.h., dass die Differenz zwischen den geschätzten und den wahren Werten an den erprobten Messpunkten im Mittel möglichst klein, bestenfalls null werden:

$$E[Z(x_i) - Z^*(x_i)] = 0 \quad (40)$$

Beim vorgestellten Kriging-Verfahren mit einem linearen Schätzer werden die Mittel der erprobten Messpunkte wie folgt gewichtet:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (41)$$

Daraus ergibt sich die Extremwertaufgabe $\sigma^* = \min$ mit der Bedingung (41). Diese kann durch partielle Ableitung nach den Gewichtungsfaktoren λ_i und λ_j und unter Einführung eines Lagrange Faktors in ein eindeutig lösbares, lineares Gleichungssystem überführt werden. Die Zufallsvariable des unerprobten Ortes (Erwartungswert) kann dann mit den berechneten Gewichtungsfaktoren ermittelt werden.

2.11 Zusammenfassung und Diskussion des Standes der Technik

Im vorgestellten Stand der Technik wurde zunächst der allgemeine Karosserieherstellungsprozess einer konventionellen Karosseriebaugruppe aus Blecheinzelteilen vorgestellt. Die den Herstellungsprozess von Karosseriebaugruppen betreffenden Fertigungsverfahren wurden an-

schließlich vertiefend erläutert. Bei der Einzelteilherstellung wurde dabei auf das Karosserieziehen und die anschließenden Folgeprozesse im Presswerk sowie die dabei auftretenden Versagensfälle eingegangen. Bei den darauffolgenden Fügeprozessen im Rohbau wurden die punktuellen Fügeverfahren sowie das Falzen erläutert.

Die Hauptursache für Maßabweichungen von Einzelteilen oder ZSB liegen in der elastischen werkstoffbedingten Rückfederung der Bauteile begründet, welche nach der Entlastung durch das Öffnen der Werkzeuge auftritt. Zur Beurteilung der Maßhaltigkeit von Einzelteilen und von ZSB wurden taktile und optische Messverfahren vorgestellt und bewertet. Die mithilfe solcher Messverfahren ermittelten Abweichungen der Einzelbauteile zu deren Soll-Geometrie werden anschließend in der Praxis durch verschiedene Maßnahmen kompensiert. Die zahlreichen Möglichkeiten zur Kompensation der Einzelteile im Presswerk sowie zur Kompensation der Maßabweichungen, welche ihren Ursprung in den Fügeprozessen im Rohbau haben, wurden vorgestellt und diskutiert.

Anschließend wurde auf den prinzipiellen Aufbau der FE-Simulation des Umform- sowie des Fügeprozesses bei der Einzelteilfertigung eingegangen, und deren Relevanz bei der digitalen Absicherung der Bauteil- und Baugruppenqualität verwiesen. Dabei zählt die Umformsimulation von Einzelteilen aus Blech seit vielen Jahren zum Stand der Technik und stellt ein unverzichtbares Werkzeug in der Produkt- und Werkzeugauslegung von Umformbauteilen, respektive von Umformwerkzeugen dar [Hof12]. Weitere Einsatzgebiete der FE-Programme in der Blechumformung sind heute Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen. Die Robustheitsanalysen werden derzeit in zwei Anwendungsgebieten eingesetzt. Das sind zum einen die Berechnung von Ausschuss und Instabilitäten und zum anderen die Überprüfung der Robustheit von Optimierungsergebnissen [Emr13]. Dabei werden heutzutage bspw. die Streuung und Sensitivität der Rückfederung bei schwankenden Eingangsparametern untersucht [Hei08, Kae16] sowie Optimierungsberechnungen durchgeführt, in denen bspw. eine Beschnittkurve automatisch ausgelegt werden kann. Das bedeutet, dass nach aktuellem Stand der Technik mithilfe von Sensitivitäts- oder Robustheitsanalysen bisher kein Einfluss auf die Maßhaltigkeit eines ZSB mit dem Ziel der nahezu vollständigen Kompensation der Rückfederung genommen werden kann.

Zur Simulation von thermischen Schweißprozessen stehen heute verschiedene kommerzielle Programme zur Verfügung, wie z.B. Sysweld und Simufact.welding. Diese Programme können zwar die Mikrostruktur, den Wärmeeintrag und die dabei entstehenden Wärmespannungen und Verzüge aufgrund des Wärmeeintrags näherungsweise abbilden, weisen jedoch in der Modellerstellung und in der benötigten Rechenzeit zahlreiche Nachteile auf. Ein weiterer Nachteil

liegt darin, dass die Diskretisierung der Bauteile bei den genannten Programmen durch Volumenelemente erfolgt. Zur Verkettung der Umformsimulation mit der Schweißsimulation ist dieser Ansatz daher unbrauchbar, da die Umformsimulation der Einzelteile in der Regel mit Schalenelementen erfolgt. Für einen pragmatischen Einsatz müssen daher relativ viele Vereinfachungen getroffen werden. Zur Untersuchung der Maßhaltigkeit einer punktuell gefügten Baugruppe empfiehlt sich aus genannten Gründen eine Struktursimulation auf Basis von Schalenelementen. Dazu wurden verschiedene thermische und mechanische Modellierungsansätze vorgestellt. Die Wahl des Modellierungsansatzes bestimmt dabei zum einen den Aufwand für die Modellerstellung, die Rechenzeit der Schweißsimulation und zum anderen die Prognosegenauigkeit des Schweißverzugs.

Konventionelle Anbauteile von PKW-Karosserien werden üblicherweise durch einen UZSB verstärkt (vgl. Abb. 2-3). Dieser besteht in der Regel aus einem großen Innenteil und mehreren kleinen Verstärkungsteilen. Als häufigste Fügemethode solcher UZSB werden punktuelle Fügeverfahren wie etwa das Widerstandspunktschweißen oder Clinchen eingesetzt. Hierzu wurden verschiedene Arbeiten der letzten Jahre vorgestellt und deren Ansatz zur numerischen Beschreibung der Fügeprozesse diskutiert. Die Fügesimulation eines UZSB erfolgt in der Regel mit der Abbildung des Spannprozesses und des anschließenden Fügeprozesses. Zur Modellierung dieser Prozesse wurden in Kapitel 2.9 verschiedene Ansätze und Methoden vorgestellt und diskutiert. Die bisherigen Arbeiten fokussieren sich dabei meist auf die Abbildung der Fügeverbindung selbst, welche primär im Fokus aktueller Forschungsarbeiten steht, vernachlässigen jedoch den Einfluss des Verzuges einzelner Fügeverbindungen auf die Maßhaltigkeit der gesamten Baugruppe. Nur wenige Arbeiten berücksichtigen diesen Einfluss des Fügens auf die gesamte Baugruppe [Eck12, Kae16, Pap08, Sch15a]. Der Forschungsschwerpunkt liegt in diesen Arbeiten auf der FE-Modellierung einer Prozesskette zur Kopplung mehrerer Herstellungsprozesse. Dazu wurden verschiedene Ansätze zur Verkettung der Simulation einzelner Prozessschritte erläutert. Die Hauptproblematik dieser PKS besteht derzeit in der Verwendung mehrerer verschiedener Simulationsprogrammcodes und dem damit verbundenen, hohen Modellierungsaufwand. Dies setzt ein umfangreiches Fachwissen mit dem Umgang der einzelnen Programme voraus. Als weiterer Nachteil ist an dieser Stelle der Datenverlust beim Daten-Mapping zwischen den Simulationsprogrammen zu nennen, wodurch die Prognosegenauigkeit der PKS deutlich sinkt. Aus dem aktuellen Stand der Technik geht hervor, dass es derzeit keine Möglichkeit gibt, den Herstellungsprozess eines ZSB numerisch in einem einzigen Softwarecode von der Einzelteilsimulation bis zur Falzsimulation abzubilden. Durch die Anwendung verschiedener Softwareprogramme müssen derzeit die Bauteilnetze bei einem Programmwechsel

durch ein Remeshing aufbereitet werden und die Ergebnisse auf das neue Bauteilnetz übertragen werden.

Abschließend wurden im Stand der Technik ausgewählte Methoden der statistischen Versuchsplanung zur Erstellung und Analyse verschiedener Variantensimulationen vorgestellt. Dabei wurde explizit auf die stochastische Analyse mittels LHC-Methode und das Kriging-Verfahren eingegangen. Die LHC-Methode wird in dieser Arbeit zur Erstellung eines Versuchsplans zur gezielten Modifikation der Werkzeugwirkflächen der Ziehoperation des Innenteils eingesetzt. Sie ist zur numerischen Untersuchung der nichtlinearen Blechumformung geeignet bei einer um den Faktor 12 reduzierten Anzahl an Faktorstufenkombinationen im Vergleich zur konventionellen Monte-Carlo-Methode. Dadurch wird der Versuchsaufwand zur Erstellung und Berechnung verschiedener Variantensimulationen erheblich reduziert. Mithilfe des Kriging-Verfahrens sollen anschließend die Rückfederungsergebnisse der dabei entstehenden Variantensimulationen der PKS in ein Meta-Modell überführt (vgl. Kapitel 7.3) werden.

Auf Basis dieser Diskussion und Bewertung des aktuellen Standes der Technik auf diesem Gebiet und dem hierbei hergeleiteten wissenschaftlichen Defizit wird im folgenden Kapitel die Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit abgeleitet.

3 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

3.1 Problemstellung

Der Einsatz der Umformsimulation dient heutzutage hauptsächlich zur qualitativen Absicherung des umformtechnischen Herstellungsprozesses von Einzelteilen aus Blech im Presswerk. Im Fokus steht dabei die Versagensprognose des Bauteils, die Robustheitsanalyse des Umformprozesses und die dimensionale Bewertung des Blechbauteils aufgrund rückfederungsbedingter Maßabweichungen. Auf Basis der Ergebnisse aus der Umformsimulation können Maßnahmen abgeleitet werden, welche durch geometrische Veränderungen der entsprechenden Werkzeuge zur Verbesserung der Maßhaltigkeit dieser Einzelteile führen [Haa11, Rol04, Sch12]. Im Wesentlichen wird die dimensionale Maßhaltigkeit eines ZSB durch die dimensionale Maßhaltigkeit der einzelnen Komponenten bestimmt. Idealerweise würde durch das Fügen von Einzelteilen, die alle innerhalb ihrer festgelegten Toleranz liegen, ein maßhaltiger ZSB resultieren. In der Praxis führen jedoch maßhaltige Einzelteile keineswegs zu einem maßhaltigen ZSB. Maßliche Abweichungen des ZSB resultieren aus den Spann- und Fügeprozessen sowie den Eigenspannungen der Einzelteile im Verbund. Zur Bewertung der Maßhaltigkeit von ZSB bedarf es somit auch der Berücksichtigung aller der Einzelteilherstellung nachfolgenden Fügeprozesse im Rohbau. In Rahmen dieser Arbeit werden dafür das Fügen eines UZSB aus Verstärkungsteilen mit einem großen Innenteils via Clinchen und das anschließende Rollfalzen dieser Baugruppe mit einem abgekanteten Außenhautteil berücksichtigt.

Auf Basis einer Bewertung der Maßhaltigkeit aller entstehenden Einzelteile und Unterbaugruppen während des Herstellungsprozess der Versuchsbaugruppe werden heute in der Praxis sog. Kompensationsstrategien festgelegt, welche die Reduzierung der Maßabweichungen dieses ZSB zum Ziel haben. Diese Kompensationsstrategien umfassen Maßnahmen zur Optimierung der Werkzeugwirkflächen der Umformwerkzeuge der Einzelteile, der Anlageflächen der Fügeprozesse der Einzelteile zum UZSB sowie des Falzens des UZSB mit der Außenhautbeplanung zum fertigen ZSB. Die Maßnahmen dieser Kompensationsstrategie werden sequentiell festgelegt und umgesetzt (vgl. Abb. 3-1 Standardprozess). Eine Prüfung der Maßhaltigkeit des Werkstücks bzw. der Umformzwischenschritte erfolgt hierbei nach dem jeweiligen Prozessschritt in Form eines geometrischen Vergleichs zwischen der aktuellen Geometrie und der Nominalgeometrie. Die Bewertung dieses geometrischen Vergleichs erlaubt anschließend Rückschlüsse zu möglichen Maßnahmen, welche zur Anpassung der Werkzeuggeometrie (Wirkflächenkompensation) bzw. zur Anpassung des jeweiligen Fügeprozesses (Veränderung der Spann- und Fügepositionen, Fügereihenfolge, Falzbahnen, Rollenanstellungen, etc.) führen. In der Praxis erfolgt der Entwicklungsprozess der Einzelteile bei verschiedenen Zulieferern und

nur teilweise beim Fahrzeughersteller selbst. Dadurch erfolgt die Umsetzung von Kompensationsmaßnahmen zur Erreichung der maßlichen Toleranz der Einzelbauteile und Baugruppen oftmals unabhängig voneinander und damit ohne den Erkenntnisgewinn aus umgesetzten Maßnahmen der Folge- bzw. der vorgelagerten Prozessschritte. Dies bedeutet, dass bereits verfolgte Kompensationsstrategien zu einem späteren Zeitpunkt, etwa beim Fügen des UZSB, neu festgelegt werden müssen, da trotz maßhaltiger Einzelteile der durch den Fügeprozess entstehende UZSB dennoch außerhalb der maßlichen Toleranz liegen kann. Das Erreichen der Maßhaltigkeit der vollständig gefügten Baugruppe ist zum einen sehr kosten- und zeitintensiv und kann zum anderen aufgrund der bereits physisch vorliegenden Werkzeuge technisch nicht mehr umsetzbar sein. Umfangreiche Kompensationsmaßnahmen zu diesem Entwicklungszeitpunkt führen daher bisweilen zu einer Neuanfertigung des betreffenden Werkzeugs und damit zu enormen Mehrkosten. Die Festlegung entsprechender Kompensationsmaßnahmen ist daher unbedingt vor Fertigstellung der Werkzeugkonstruktion festzulegen. Dabei muss ein Grundlegendes Verständnis der lokalen und globalen Steifigkeit eines ZSB geschaffen werden. Wie verhalten sich bspw. Maßabweichung von Einzelteilen auf die Maßhaltigkeit des ZSB? Welche Kompensationsstrategie ist umsetzbar und gleichzeitig zielführend? Welche Struktureffekte und Wechselwirkungen entstehen während der gesamten Herstellungsprozesskette? Diese Fragen bilden das Kernthema dieser Arbeit und führen zur Motivation und Zielsetzung der Arbeit.

3.2 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Auf Basis der oben genannten Vorgehensweise zur Kompensation von Maßabweichungen eines ZSB gelingt es aufgrund der erkannten, signifikanten Defizite dieser Methodik heutzutage in der Praxis nicht, eine wirtschaftliche numerische Abbildung des Herstellungsprozesses sicherzustellen. Die genannten Arbeiten von [Eck12, Gov12, Kae16, Sch15a, Zub14] bilden daher erste zielführende Ansätze zur simulativen Abbildung der Verkettung mehrerer Herstellungsprozesse im Karosseriebau. Diese Verkettung von CAx-Systemen ist notwendig, um eine zielführende Kompensationsstrategie im Entwicklungsprozess eines Einzelteils oder einer Baugruppe aus Blech festlegen und verfolgen zu können. Dadurch kann die notwendige Durchlaufzeit der Baugruppe bis zu einem maßhaltigen ZSB erheblich reduziert werden (vgl. Angestrebter Prozess Abb. 3-1). Die Arbeit von [Kae16] beinhaltet hierbei einen neuen pragmatischen Ansatz für eine anwendungsnahe Simulationsmethodik, die alle Herstellungsprozesse von Klappen- und Anbauteilen im Rohbau abbildet. Seine vorgeschlagene Methodik liefert auf Basis des Rückfederungsergebnis des ZSB eine rückwärtsgerichtete Kompensation der Einzelteile. Die Ansätze der genannten Arbeiten werden sukzessive in kommerziell erhältliche FE-Codes eingebunden. Dennoch ermöglicht derzeit kein Simulationsprogramm eine vollständige

PKS des Herstellungsprozesses einer komplexen Baugruppe aus mehreren Blechbauteilen in einem Softwareprogramm. Zur Berücksichtigung aller Herstellungsprozesse werden beispielsweise beim Ansatz nach [Kae16] verschiedene FE-Codes verwendet, um den gesamten Prozess mit dem Fokus auf die Rückfederungsberechnung des ZSB abzubilden. Beim hierfür notwendigen Wechsel zwischen den verwendeten Softwareprogrammen werden die Simulationsergebnisse üblicherweise mittels Daten-Mapping übertragen, was u.U. zu erheblichem Datenverlust führen kann und sich somit negativ auf die Prognosegenauigkeit auswirkt (vgl. Kapitel 2.9.8). Neben den hohen Investitionskosten für verschiedene Lizenzen der verwendeten Programme ist diese Vorgehensweise auch mit einem hohen Modellierungsaufwand verbunden. Demnach existiert heute keine Möglichkeit, eine durchgängige PKS ohne ein Daten-Mapping zwischen mehreren Simulationsprogrammen durchzuführen und daraus eine „vorwärts gerichtete Kompensationsstrategie“ zur Verbesserung der Maßhaltigkeit eines Karosserie-ZSB abzuleiten.

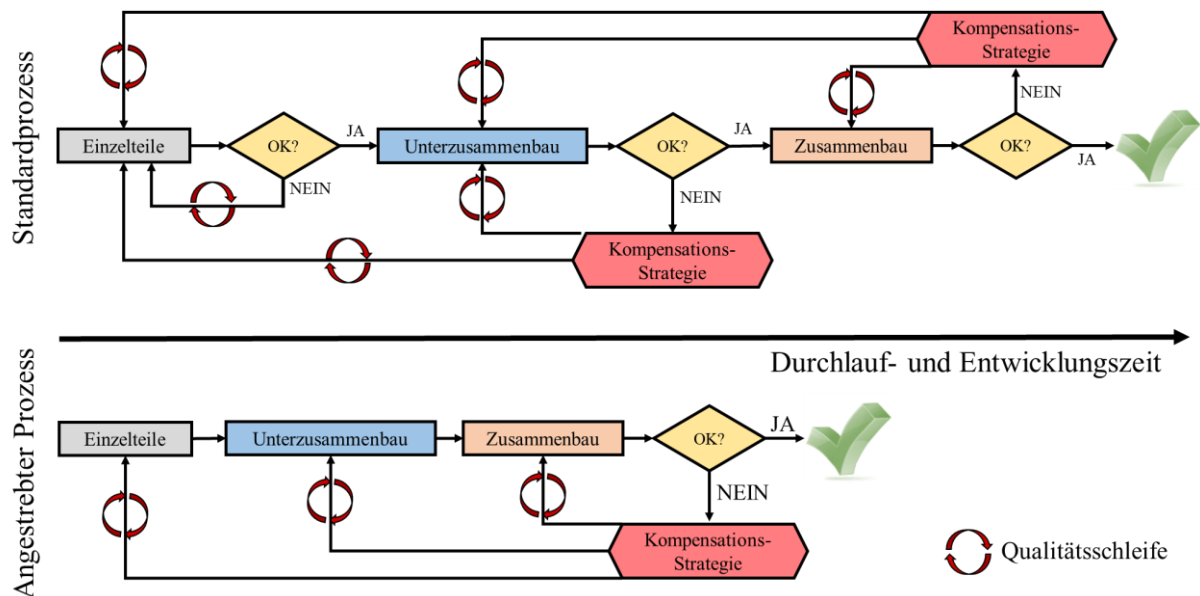


Abb. 3-1: Vergleich der Durchlauf- und Entwicklungszeit des angestrebten Prozesses zur Herstellung eines maßhaltigen ZSB gegenüber dem heutigen Standardprozess in der Automobil- und Zulieferindustrie.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, eine durchgängige PKS aufzubauen, welche ohne ein Daten-Mapping auskommt und mit der sich der Einfluss von Maßabweichungen der Einzelteile auf die Maßhaltigkeit des finalen ZSB untersuchen lässt. Hierbei soll die PKS ausschließlich mithilfe eines einzigen FE-Codes aufgebaut werden können, sodass auf einen Wechsel des Simulationsprogramms verzichtet werden kann. Das zu entwickelnde Simulationsmodell soll auf Basis mehrerer Pressteile, die zunächst zu einem UZSB und anschließend mit einem Beplankungsteil zum finalen ZSB gefügt werden, auch auf andere Baugruppen übertragbar sein. Dabei soll die gesamte Umformhistorie der Einzelteilmontage sowie der Fügeoperationen berücksichtigt werden. Mit Hilfe dieses Ansatzes zur Realisierung einer durchgängigen PKS soll eine

Kompensationsstrategie zur gezielten Verbesserung der dimensionalen Bauteilqualität der Blechbaugruppen erarbeitet und untersucht werden.

Auf Basis dieser PKS soll als zentrales Element dieser Arbeit eine neuartige, vorwärtsgerichtete Methodik zur virtuellen Kompensation von Maßabweichungen an Einzelteilen entwickelt werden, welche das Ziel eines maßhaltigen ZSB verfolgt. Im Gegensatz zu konventionellen Methoden (vgl. Kapitel 2.8), die iterativ einzelne gemessene oder simulierte Abweichungen kompensieren (rückwärtsgerichtete Methoden), soll mit der neuen Methode die Analyse des Rückfederungsverhaltens eines ZSB in allen Prozessen und Bauteilen der Herstellung ermöglicht werden (vorwärtsgerichtete Methode). Der wesentliche Vorteil dieser neuen Kompensationsmethode besteht darin, eine stochastische Einflussanalyse der Simulations- und Prozessparameter auf die Rückfederung des ZSB zeitlich vor der konstruktiven Auslegung der Betriebsmittel Umformwerkzeuge und Fügevorrichtungen durchführen zu können. Auf diese Weise können die Struktursteifigkeit eines ZSB untersucht werden und Einzelteile bzw. Prozessparameter identifiziert werden, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Maßhaltigkeit der Baugruppe zeigen. Die neue Methodik soll die Anfertigung kostenintensiver Prototypwerkzeuge sowie die manuelle Prozess- und Werkzeugoptimierung weitestgehend nach angestrebtem Prozessschema (vgl. Abb. 3-1 unten) reduzieren.

3.3 Vorgehensweise und Versuchsplanung

Zum Aufbau einer möglichst durchgängigen PKS zur Abbildung des Herstellungsprozesses des ZSB Motorhaube des Opel Adam (Modelljahr 2013-2019, vgl. Abb. 2-3) ohne Daten-Mapping musste zunächst ein kommerziell erhältlicher FE-Code erweitert werden. Dafür wurden von der Firma AutoForm zwei verschiedene Beta-Versionen zur Verfügung gestellt und im Rahmen dieser Arbeit verwendet. In der ersten Version „AutoForm^{plus} Assembly R7.1 Beta“ können punktuelle Fügeverfahren inklusive des Spannprozesses und unter Berücksichtigung mehrerer elastischer Einzelteile (und deren Umformhistorie) modelliert und berechnet werden. Die zweite Version „AutoForm^{plus} Forming R7.1 Beta“ stellt eine Weiterentwicklung des aktuell verfügbaren „AutoForm HemPlanners“ dar. Diese Version erlaubt die virtuelle Abbildung des Falzprozesses einer Außenhautbeplankung mit einem zuvor gefügten UZSB unter Berücksichtigung der Umformhistorie aller Einzelteile. In Verbindung mit der eigentlichen Umformsimulation konnten auf diese Weise alle relevanten Herstellungsprozesse des untersuchten ZSB abgebildet werden, ohne zwischen mehreren FE-Codes verschiedener Anbieter wechseln zu müssen. Dadurch wurde es möglich, aus den Ergebnissen der Füge- und der Umformsimulation der

Einzelteile neben skalaren Größen, wie etwa die Blechausdünnung und die plastische Vergleichsdehnung, nun auch tensorielle Größen, wie etwa die Eigenspannungen für die Bewertung zu berücksichtigen.

Zur quantitativen Bewertung der Prognosegenauigkeit der bereitgestellten Software wird anhand eines seriennahen Herstellungsprozesses der Versuchsbaugruppe in Kapitel 4 eine PKS aufgebaut und mittels realer Bauteilversuche abgesichert. Zur gezielten Untersuchung von Maßabweichungen des ZSB dient dazu eine vorhandene Rollfalzanlage am Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart. Diese Anlage erlaubt eine Untersuchung des Falzprozesses unter Laborbedingungen und ermöglicht eine gezielte Veränderung von prozessbeeinflussenden Parametern sowie eine Bewertung der daraus resultierenden Rückfederungsergebnisse des ZSB. Derartige Untersuchungen sind aufgrund des hohen Automatisierungsgrades in der Serienproduktion in einem Automobilwerk so nicht möglich.

Mithilfe der modellierten PKS aus Kapitel 4 wird anschließend numerisch der Einfluss von bauteiltypischen dimensional Abweichungen von Verstärkungsteilen auf die Maßhaltigkeit des ZSB untersucht (Kapitel 5). Dazu werden die Verstärkungsteile zunächst numerisch gezielt mit zusätzlichen Umformsimulationen deformiert. Abschließend werden verschiedene PKS durchgeführt mit Kombinationen aus Gut- und Schlechteilen der Verstärkungsteile und der Einfluss auf die Rückfederung des ZSB analysiert. Dadurch können Struktureffekte und Wechselwirkungen von Verstärkungsteilen in Großteilen untersucht und die lokale sowie globale Steifigkeit des ZSB analysiert werden.

Auf Basis der Ergebnisse der in Kapitel 5 durchgeführten Simulationen wird anschließend ein geeigneter Versuchsaufbau für das reproduzierbare Einbringen der Abweichungen in die Verstärkungsteile aus der laufenden Produktion hergeleitet (vgl. Kapitel 6). Die hierdurch entstehenden Schlechteile der Verstärkungskomponenten werden dann in festgelegten Kombinationen gemeinsam mit Gutteilen dem Serienfügeprozess des UZSB zugeführt, vermessen und mit den jeweilig korrespondierenden Simulationsergebnissen verglichen. Anschließend werden diese UZSB-Varianten mithilfe der Versuchsrollfalzanlage mit den Außenhautbauteilen zum fertigen ZSB gefügt, erneut vermessen und mit den Simulationsergebnissen der PKS abgeglichen. Dadurch können alle Simulationsschritte in mehreren Varianten einzeln überprüft und die Ergebnisse aus Kapitel 5 bestätigt werden. Mit diesen Erkenntnissen lassen sich anschließend Bauteile bzw. Bauteilbereiche oder Prozessparameter identifizieren, die maßgeblich das Rückfederungsverhalten des ZSB beeinflussen.

In Kapitel 7 wird anschließend zuerst die neuartige Kompensationsmethode in allgemeiner Form vorgestellt, mit der die dimensionale Bauteilqualität eines ZSB analysiert und verbessert

werden kann und anschließend am Beispiel einer Wirkflächenkompensation der Ziehstufe des Innenteils angewandt. Der Kerngedanke dieser Methode bildet die Verknüpfung der stochastischen Analyse (vgl. Kapitel 2.10.2) mit der in Kapitel 4 modellierten PKS. Diese Verknüpfung wird bspw. bereits in der Robustheitsanalyse von Umformprozessen angewandt [Emr13]. Dadurch kann ein Meta-Modell für das Rückfederungsverhalten des ZSB entwickelt werden, mit dem anschließend diejenigen Optimierungswerte im Herstellungsprozess identifiziert werden können, die zur geringsten Abweichung des ZSB führen. Im Fall des untersuchten ZSB sind diese Optimierungswerte die Modifikationswerte der Ziehanalge des Innenteils. Mit der stochastischen Analyse werden verschiedene Varianten der PKS nach einem definierten Versuchsplan berechnet. Hierzu wurden in Kapitel 6 einzelne Bereiche der Ziehstufe des Innenteils festgelegt. Diese Bereiche werden netzbasiert nach dem erstellten Versuchsplan geometrisch innerhalb festgelegter Grenzen modifiziert und jeweils die Rückfederung des ZSB mit einer PKS berechnet. Auf diese Weise entsteht eine statistische Analyse der Rückfederungsergebnisse des ZSB bei zugehörigen Modifikationswerten der Ziehstufe des Innenteils. Diese Auswertung wird anschließend mit dem räumlichen Interpolationsverfahren Kriging in ein Meta-Modell überführt (vgl. Kapitel 2.10.3). Dieses Meta-Modell stellt schließlich ein Ersatzmodell der durch die Modifikation der Ziehstufe des Innenteils verursachte Rückfederung des ZSB dar. Mit diesem Modell kann dann ohne erneute Berechnung einer PKS das Rückfederungsergebnis des ZSB für beliebige Werte (innerhalb der festgelegten Grenzen) der Wirkflächenmodifikation ermittelt werden. Dieses Meta-Modell wird letztendlich zur Ermittlung derjenigen Modifikationswerte verwendet, die zur minimalen Maßabweichung des ZSB führen. Mit diesen ermittelten Werten werden dann zur Wirksamkeitsprüfung der vorgestellten Methode erneut die einzelnen Wirkflächenbereiche der Ziehoperation des Innenteils modifiziert und mit einer PKS die Rückfederung des ZSB berechnet. Abschließend wird die Übertragbarkeit der vorgestellten Methode auf andere Anwendungsfälle bewertet.

4 Aufbau einer durchgängigen Prozesskettensimulation

Die Modellierung einer durchgängigen PKS bildet die Grundlage aller in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sowie für die Ableitung einer Methodik zur virtuellen Kompensation von Einzelteilen aus Blech mit dem Ziel eines maßhaltigen ZSB. Dazu werden zunächst die in der Simulation abzubildenden Herstellungsschritte des untersuchten Motorhauben-ZSB (vgl. Abb. 2-3) vorgestellt, die in der PKS berücksichtigt werden:

- Umformsimulation aller Einzelteile der Serienproduktion
- Fügesimulation (Clinchen) des UZSB auf der Serienfügeanlage
- Falzsimulation (Rollfalzen) des ZSB auf der Versuchsfalzzelle

Abb. 4-1 zeigt die zur numerischen Abbildung des Herstellungsprozesses der untersuchten Motorhaube notwendige Verkettung der einzelnen Simulationsschritte.

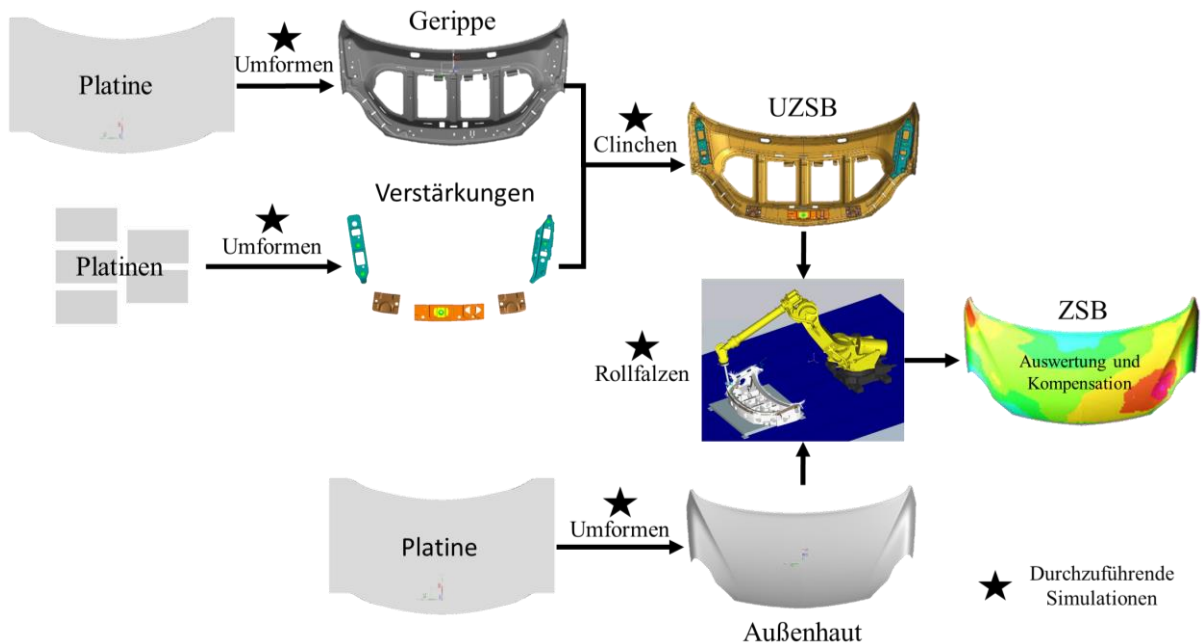


Abb. 4-1: Verkettung der einzelnen Simulationen am Beispiel des untersuchten Motorhauben-ZSB.

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Versuchsbaugruppe besteht aus mehreren Einzelteilen, namentlich sind diese die Außenhautbeplankung, das Innenteil (auch Gerippe genannt) sowie die fünf Verstärkungsteile. Die Verstärkungsteile der genannten Motorhaube sind die beiden Pufferverstärkungen links und rechts, die Schlossverstärkung sowie die beiden Scharnierverstärkungen links und rechts. Während im regulären Entwicklungsprozess einer Baugruppe die Umformmethoden für die Werkzeuge neu entwickelt werden müssen, entfällt dieser Schritt an dieser Stelle. Die Problematik besteht im vorliegenden Fall darin, dass die einzelnen Werkzeuge lediglich bis zu einem gewissen Fertigungsstand mittels Umformsimulationen entwickelt

wurden. Die im Werkzeugbau anschließend durchgeführte manuelle Überarbeitung der Wirkflächen wurde weder in der Umformsimulation berücksichtigt, noch finden sich diese Änderungen im CAD-Datensatz der jeweiligen Werkzeugdaten wieder. Dabei wurden die Werkzeugwirkflächen im Rahmen der Rückfederungskompensation teilweise überfräst und manuell eingearbeitet (tuschiert). Diese Änderungs- und Kompensationsmaßnahmen in den Werkzeugen werden in der betrieblichen Praxis heute oftmals aus Aufwandsgründen nicht mehr in die Flächendaten der Werkzeugwirkflächen zurückgeführt (z.B. durch Scannen der Werkzeugoberflächen). Aus diesem Grund muss zunächst der Ist-Zustand der Serieneinzelteile in der Umformsimulation abgebildet werden. Dazu werden zuerst die rückfederungsbedingten Bauteilabweichungen aller Serieneinzelteile einzeln ermittelt (vgl. Kapitel 4.1), welche als Referenz für die Umformsimulationen der Einzelteile (vgl. Kapitel 4.2) dienen. Anschließend wird der Serienfügeprozess des UZSB in der Fügesimulation abgebildet (vgl. Kapitel 4.3) und mit einem Bauteilsan aus der Serienproduktion abgeglichen. Zur gezielten Untersuchung von Maßabweichungen des ZSB wird in Kapitel 4.4 dann eine seriennahe Versuchsfalzzelle konzipiert und unter Laborbedingungen betrieben. Derartige Untersuchungen sind aufgrund des hohen Automatisierungsgrades in der Serienproduktion in einem Automobilwerk so nicht möglich. Anschließend wird der konzipierte Falzprozess in der Falzsimulation modelliert und mit einem Bauteilsan der Versuchsfalzzelle abgeglichen.

Alle durchgeführten Simulationen werden auf einer Rechenmaschine mit 32.0 GB Arbeitsspeicher und einem Prozessor des Typs Intel® Core™ i7-4800MQ CPU, welcher mit einer Taktfrequenz von 2.70 GHz arbeitet, durchgeführt. Die Umformsimulationen der Einzelteile werden mit der Software AutoForm[^]plus R7 durchgeführt. Zur Fügesimulation des UZSB und der anschließenden Falzsimulation unter Berücksichtigung mehrerer elastischer Einzelteile werden neue Test-Versionen der Firma AutoForm verwendet (vgl. Abb. 4-2). Auf die Funktionsweise des jeweiligen Programms und den Aufbau der Simulationsmodelle wird in Kapitel 4.3 bzw. 4.4 eingegangen.



Abb. 4-2: Verwendete Software zur Modellierung der Prozesskette des Herstellungsprozesses der untersuchten Motorhauben von der Umformsimulation der Einzelteile bis zur Falzsimulation des ZSB.

4.1 Ermittlung der rückfederungsbedingten Bauteilabweichungen der Serienteile

4.1.1 Rückfederungsbedingte Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile

Verstärkungskomponenten für Anbauteile, wie etwa für den untersuchten ZSB Motorhaube, stellen aus Sicht des Automobilherstellers meist Zukaufteile dar und werden in der Regel von Lieferanten bezogen. Die Qualität der bezogenen Bauteile wird durch entsprechende maßliche Toleranzen während der der Fahrzeugkonstruktionsphase festgelegt. Dabei sind die Funktionsflächen, wie z.B. die Anbindungsflächen zu benachbarten Bauteilen, in der Regel enger toleriert als Freiformflächen. Diese festgelegten Toleranzen haben einen erheblichen Einfluss auf die Komplexität und den Aufwand der Werkzeugeinarbeitung sowie auf die Qualitätsabsicherung während der Teilefertigung. Zur Ermittlung der rückfederungsbedingten Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile wurden daher für den Abgleich der Umformsimulation (vgl. Kapitel 4.2.1) jeweils eine taktile Messreihe aus der laufenden Serienproduktion durchgeführt und ausgewertet. Abb. 4-3 zeigt repräsentativ eine solche Auswertung am Beispiel der Scharnierverstärkung rechts unter Berücksichtigung der Maßabweichung an 12 Messpunkten zur Ermittlung der globalen Formabweichung.

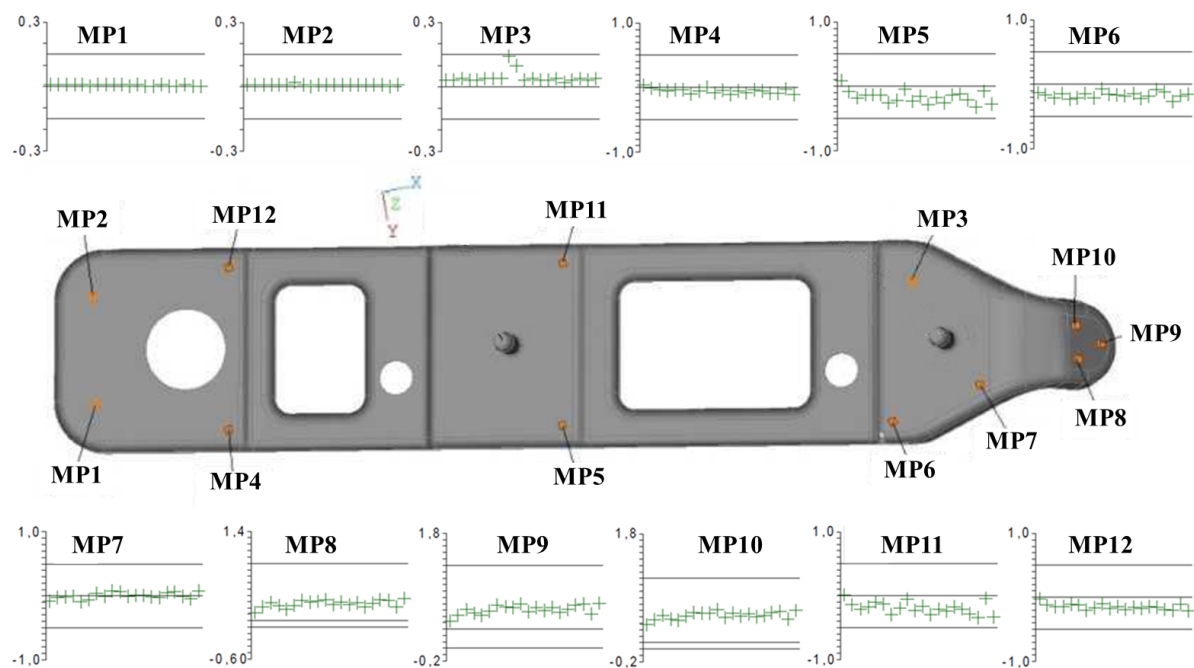


Abb. 4-3: Messbericht zur Ermittlung rückfederungsbedingter Bauteilabweichungen der Scharnierverstärkung rechts mithilfe taktile Messung von 20 Bauteilen.

Die gemessenen Formabweichungen dieses Bauteils in den jeweiligen Messpunkten werden durch grüne Markierungen innerhalb der korrespondierenden Toleranzgrenzen im Messbericht dargestellt. Ein außerhalb der Toleranzgrenzen liegender Messpunkt wird rot angezeigt (vgl.

Anhang 9.1). Betrachtet man die Messergebnisse dieses Berichts (vgl. Abb. 4-3), so erkennt man, dass alle gemessenen Maßabweichungen der Scharnierverstärkung rechts innerhalb der festgelegten Toleranzgrenzen lagen. Das trifft auch bei den Messungen (vgl. Anhang 9.1) der anderen Verstärkungsteile bis auf zwei Ausreißer in der Scharnierverstärkung links (vgl. Abb. 9-2, MP6 und MP7) zu. Aus diesem Grund konnte von einer robusten Bauteilfertigung und -qualität aller angelieferten Verstärkungsteile ausgegangen werden. Als Referenz zum Abgleich der Simulationsergebnisse der Umformsimulationen der Verstärkungsteile (vgl. Kapitel 4.2.1) werden aus diesem Grund die nominalen Bauteildaten der Verstärkungsteile mit festgelegten Toleranzgrenzen in den einzelnen Messpunkten verwendet.

4.1.2 Rückfederungsbedingte Bauteilabweichungen der Außenhaut und des Gerippes

Für die Ermittlung der Bauteilabweichungen der Einzelteile der Außenhaut und denen des Gerippes wurden aus der laufenden Serienproduktion erneut jeweils zehn Bauteile entnommen und auf der entsprechenden Messaufnahme mithilfe eines Streifenprojektionscanners der Firma GOM (ATOS Triple Scan) gescannt und digitalisiert (vgl. Abb. 4-4).

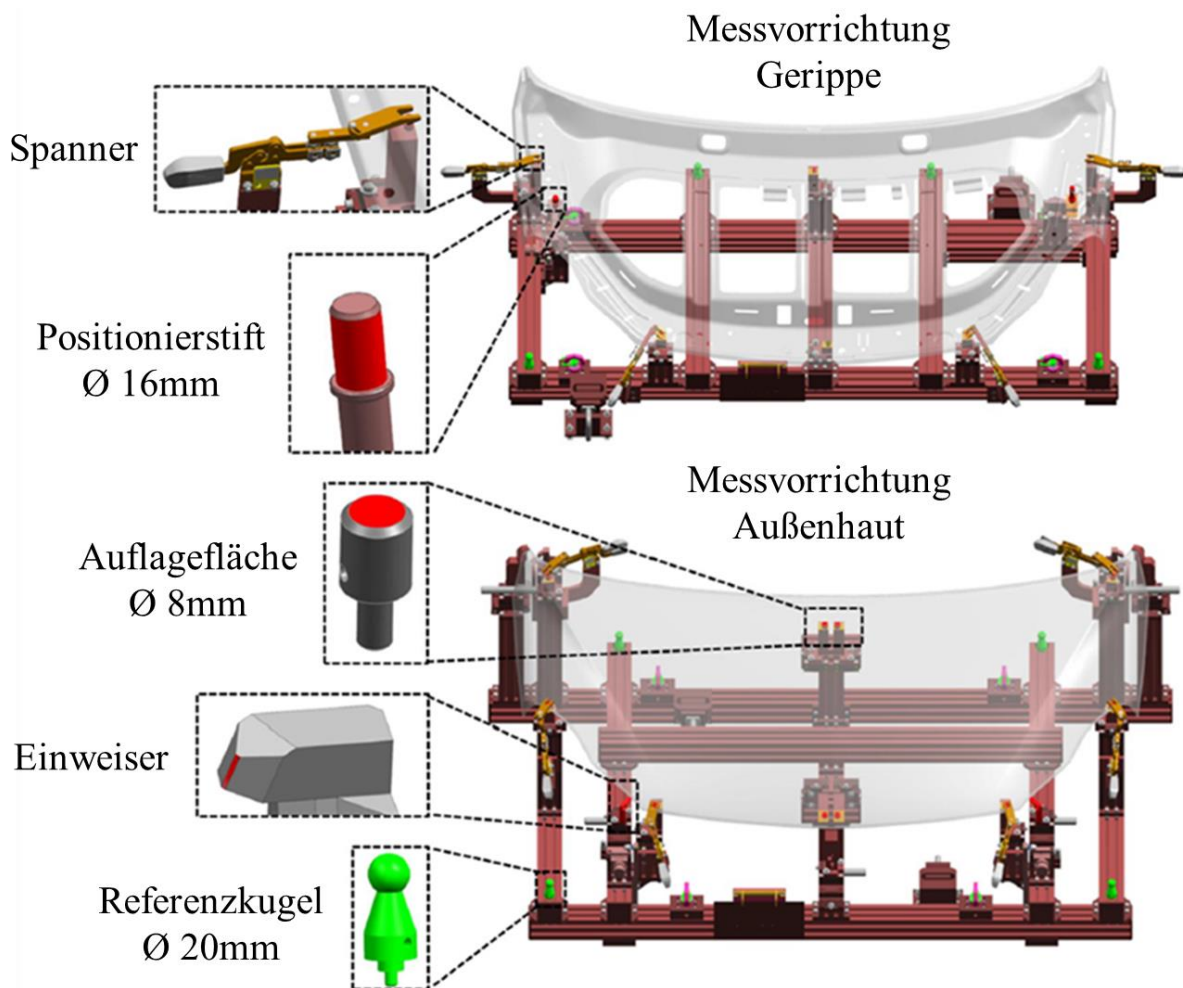


Abb. 4-4: Messvorrichtungen für das Gerippe und die Außenhautbeplankung.

Die entsprechenden Messprogramme wurden bereits im Vorfeld zur Qualitätsabsicherung der Serienproduktion erstellt und konnten für die Messreihen im Rahmen dieser Arbeit uneingeschränkt verwendet werden. Für einen Abgleich mit den Simulationsergebnissen wurden die Bauteile jedoch entgegen der Vorgehensweise im Serienprozess, bei dem ein definiertes Spannkonzzept zur Vermessung der Bauteile verwendet wird, ohne ein Spannen des Bauteils gemessen. Dadurch wurden durch die Spanner zusätzlich eingebrachte äußere Zwangskräfte vermieden und damit die Anzahl der einflussnehmenden Parameter reduziert. Das Gerippe wurde in der Messvorrichtung auf sechs Auflageflächen positioniert und mit zwei Positionierstiften in x- und y-Richtung ausgerichtet. Die Außenhaut wurde aufgrund der geringeren Bauteilsteifigkeit im Vergleich zum Gerippe auf zehn Auflageflächen positioniert und mithilfe von Anschlagflächen (Einweiser) in x- und y-Richtung ausgerichtet (vgl. n-2-1-Prinzip, Abb. 2-21 rechts).

Mithilfe der an den Messvorrichtungen angebrachten Referenzkugeln konnten die gescannten Bauteilnetze für einen Vergleich zur Sollgeometrie anschließend mithilfe der Software in das Fahrzeugkoordinatensystem positionsgenau ausgerichtet und transformiert werden. Zur Darstellung der prozess- und materialbedingten Schwankungen der Maßabweichungen des Gerippes wurden insgesamt 48 Messpunkte ausgewertet. Diese wurden spiegelbildlich entlang der Fahrzeuglängsachse auf den CAD-Daten definiert.

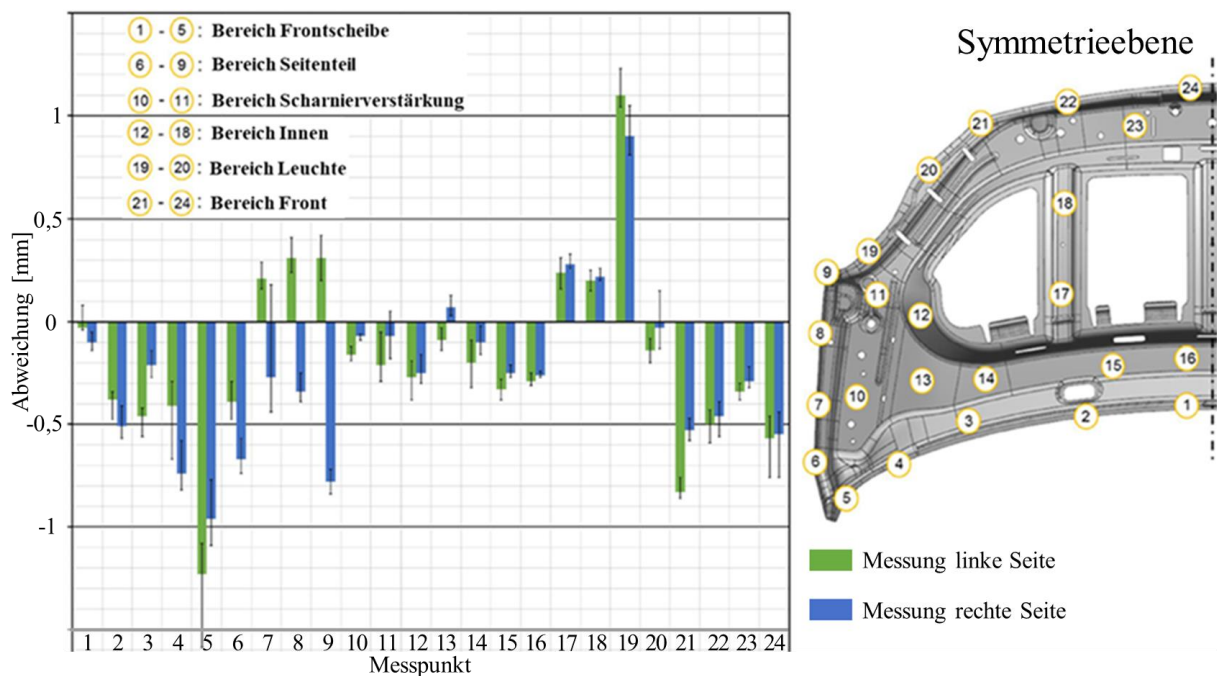


Abb. 4-5: Messpunkte und Auswertung der produktions- und materialbedingten Maßabweichungen für das Einzelteil ‚Gerippe‘.

Die Auswertung erfolgte über die jeweils in den Messpunkten bestimmten Maßabweichungen über jeweils zehn Bauteile und wurden als grüne Balken für die linke Bauteilhälfte und blaue

Balken der rechten Bauteilhälfte dargestellt. Als zusätzliche Information wurden die Minimal- und Maximalwerte der gemessenen Maßabweichungen an den jeweiligen Messpunkten angezeigt. Diese Streuung lieferte einen Anhaltspunkt über die produktions- und materialbedingten Maßabweichungen der Bauteile und kann als Referenz für den Abgleich der Simulationsergebnisse (vgl. Kapitel 4.2.2) berücksichtigt werden. Bei dem Bauteil Gerippe lag die maximale Streuung der gemessenen Maßabweichungen demnach für die insgesamt zehn untersuchten Bauteile bei maximal 0,6 mm in Messpunkt 7. Eine wichtige Erkenntnis aus der Auswertung dieses Messberichts bildete die Tatsache, dass sich die rückfederungsbedingten Maßabweichungen der linken Seite nicht symmetrisch zur denen der rechten Seite zeigten. In den Messpunkten 7,8,9 und 13 lag die Richtung der Abweichung der linken zur rechten Bauteilseite in unterschiedlichen Richtungen. Aus diesem Grund darf in der Umformsimulation des Gerippes (vgl. Kapitel 4.2.2) zur Reduzierung der Rechenzeit für vergleichbare Rückfederungsergebnisse keine Symmetrieebene definiert werden.

Analog zum Gerippe wurden die Maßabweichungen der Außenhautbeplankung an insgesamt 60 Messpunkten betrachtet.

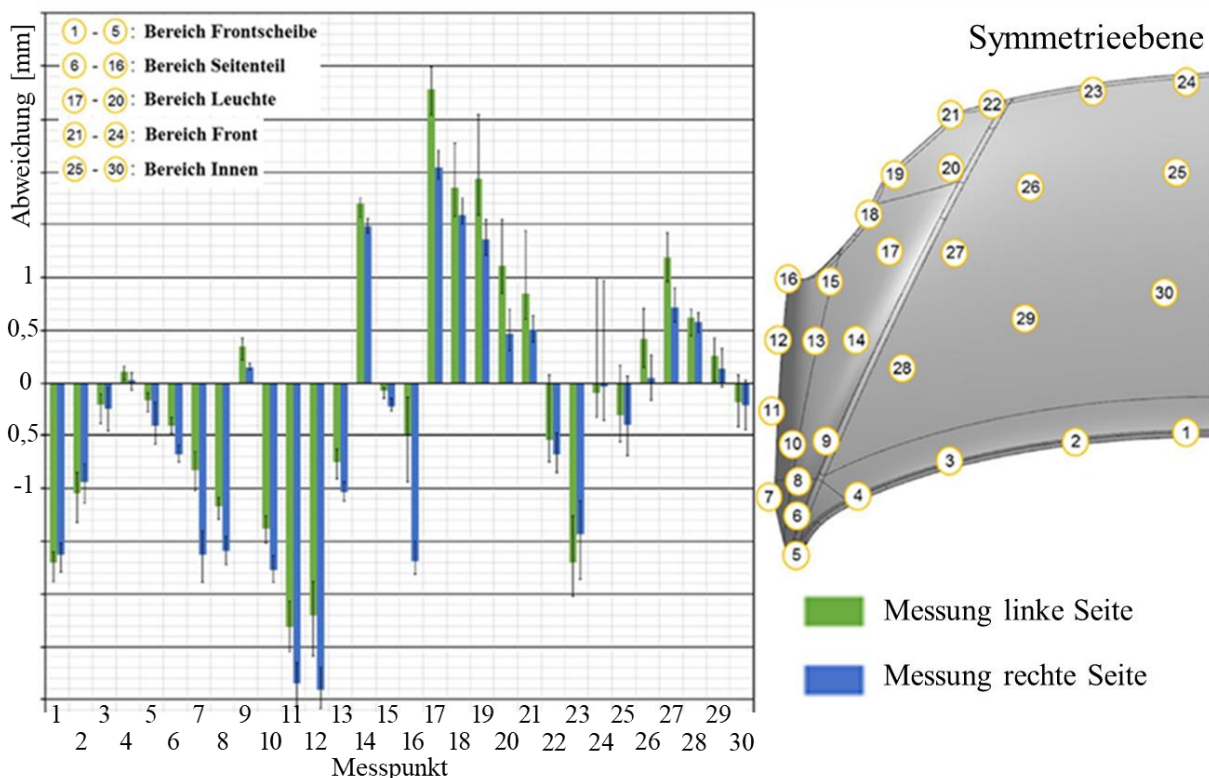


Abb. 4-6: Messpunkte und Auswertung der produktions- und materialbedingten Maßabweichungen für das Einzelteil 'Außenhautbeplankung'.

Bei der Außenhautbeplankung betrug die maximale Streuung der gemessenen Maßabweichungen bei 1,3 mm im Frontbereich in Messpunkt 24 sowohl auf der linken Seite als auch auf der

rechten Seite. Der höhere Betrag der prozess- und materialbedingten Schwankungen kann durch die geringere Formstabilität des Bauteils erklärt werden. Wie auch beim Gerippe muss aufgrund der teilweise unsymmetrischen Rückfederungsergebnisse der linken und der rechten Seite auf die Definition einer Symmetrieebene in der Umformsimulation der Außenhaut (vgl. Kapitel 4.2.2) verzichtet werden.

Auf Basis der jeweils zehn vermessenen Bauteile wurde anschließend mithilfe der Software GOM Inspect Professional ein gemitteltetes Netz sowohl für das Gerippe als auch für die Außenhaut erstellt. Die Software berechnet dabei ein gemitteltetes Netz aus allen gescannten Einzelbauteilnetzen, die in Abb. 4-7 sind. Dabei wurden die gescannten Oberseiten der Bauteile jeweils zur Oberseite der nominalen CAD-Daten verglichen.

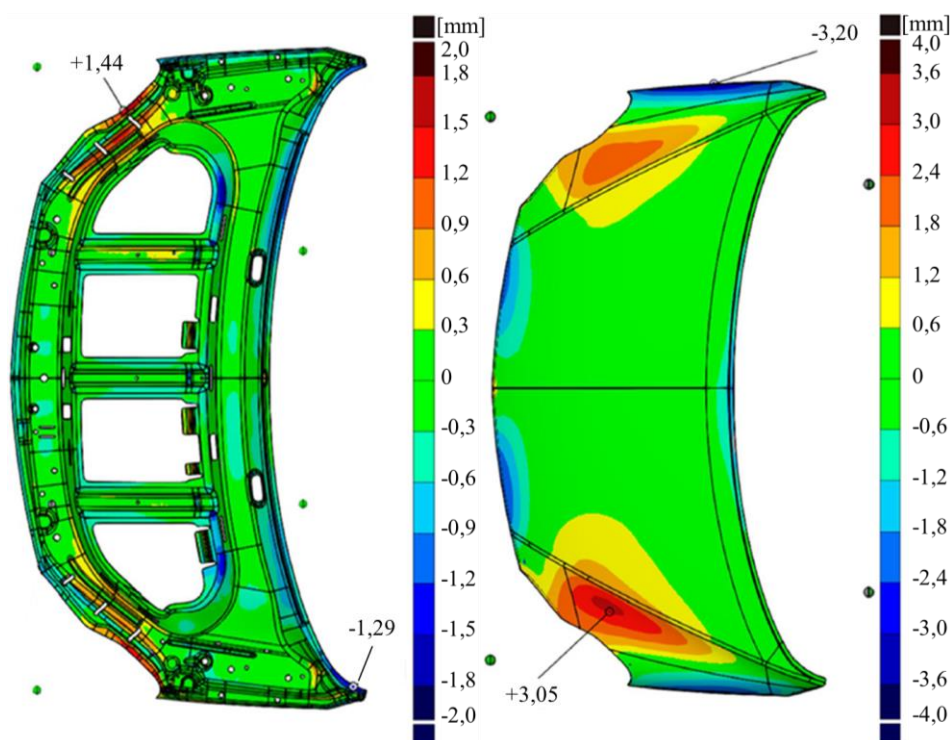


Abb. 4-7: Vergleich der Maßabweichung zwischen dem gemittelten Netz des Bauteilscans und der CAD-Sollgeometrie des ‚Gerippes‘ (links) und der ‚Außenhautbeplankung‘ (rechts).

Diese Netze stellen somit das durchschnittliche Rückfederungsverhalten des jeweiligen Bauteils aus ca. 10 Scans dar und bilden hier die Referenz zum Abgleich der Umformsimulation der beiden Einzelteile Gerippes und Außenhaut (vgl. Kapitel 4.2.2).

4.2 Umformsimulation der Einzelteile

4.2.1 Umformsimulation der Verstärkungsteile

Die Verstärkungsteile werden in der Praxis häufig von Lieferanten bezogen, welche die jeweiligen Umformmethoden der Bauteile mithilfe von Umformsimulationen in Eigenverantwortung absichern, ehe die Werkzeuge konstruiert und hergestellt werden. Diese Simulationen werden

oftmals mit unterschiedlichen FE-Codes durchgeführt und standen für die Bearbeitung der Thematik dieser Arbeit nicht zur Verfügung. Da für die vorliegende Arbeit die gewählten Simulationsparameter, wie etwa die Wahl des Reibungskoeffizienten, die Wahl des Elementtyps für die Diskretisierung der Werkzeugwirkflächen etc., für alle Bauteile gleich sein müssen, werden für alle Verstärkungsteile die jeweiligen Umformsimulationen erneut durchgeführt. Die hier verwendeten Verstärkungsteile des untersuchten Motorhauben-ZSB wurden allesamt mithilfe von Folgeverbundwerkzeugen unter Verwendung eines Tiefziehstahl mit einer Blechdicke von 1,2 mm der Güte DC04 gefertigt. Hierbei erfolgt der Teiletransport zur nächsten Operationsstufe mittels eines Trägerstreifens, welcher durch einen entsprechenden Beschnitt des verwendeten Blechbandes erzeugt wird. Da die Bauteile in der Realität während der Umformung im Werkzeug in jeder Operation ihre Ausrichtung bzgl. des globalen Werkzeugkoordinatensystems ändern, werden zur Vereinfachung des Simulationsmodells die Koordinatensysteme der einzelnen Operationen in das globale Fahrzeugkoordinatensystem transformiert. Dadurch bleibt die relative Ausrichtung der Bauteile für die nachfolgenden Fügesimulationen erhalten und das Umformergebnis kann direkt, ohne weitere Koordinatensysteminformationen, exportiert und in die jeweilige Fügesimulation übertragen werden. Wegen der verhältnismäßig hohen Eigensteifigkeit der Verstärkungsteile nach der formgebenden Umformoperation (vgl. OP20, Abb. 4-8) wurde für eine weitere Vereinfachung des Modells sowohl auf eine Rückfederungsberechnung nach jeder Operation als auch auf das Einlegen der Bauteile unter Schwerkrafteinwirkung in den Folgeoperationen verzichtet. Diese Vereinfachung wurde mit einem Vergleich einer Simulation, bei der die Rückfederung nach jeder Operation und das Einlegen unter Schwerkrafteinwirkung berücksichtigt, abgesichert. Für den Abgleich der Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen der realen Referenzbauteile (vgl. Kapitel 4.1) wurde nach der letzten Operation eine freie Rückfederungsberechnung durchgeführt. Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, werden als Referenz für die berechneten Rückfederungsergebnisse mittels der Umformsimulation der Verstärkungsteile die nominalen Bauteildaten mit festgelegten Toleranzgrenzen in den einzelnen Messpunkten verwendet. (vgl. Abb. 4-3 und Anhang 9.1).

Umformsimulation der Pufferverstärkungsteile links und rechts

Die sog. Pufferverstärkungsteile werden links-rechts-fallend im Folgeverbundwerkzeug gefertigt, d.h. beide Bauteile werden im selben Werkzeug gefertigt. Die beiden Bauteile werden innerhalb des Werkzeugs in der letzten Operationsstufe mittels eines Trennschnitts voneinander getrennt. Da es derzeit noch nicht möglich ist, die Rückfederungsberechnung beider Bauteile in einem gemeinsamen Simulationsmodell gleichzeitig durchzuführen, wird vor der Rückfederungsberechnung die Umformsimulation angehalten und beide Pufferverstärkungen jeweils in

separate Simulationsmodelle überführt. Dies bedeutet, dass die Umformsimulation derart aufgebaut wird, dass beide Bauteile analog zum realen Prozess im selben Werkzeug bis hin zum Trennschnitt verbunden bleiben. Vor der Simulation des Trennschnitts und der darauffolgenden Rückfederungsberechnung wird dann ein sogenanntes „Restart-File“ erzeugt. Auf dessen Basis können dann anschließend beide Bauteile separat in voneinander unabhängige Simulationsmodelle überführt und die Rückfederung spezifisch berechnet werden.

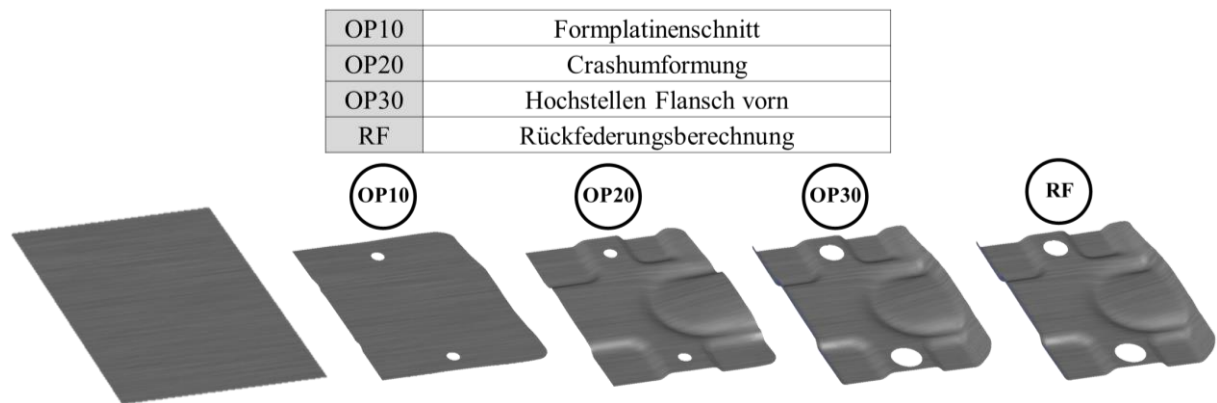


Abb. 4-8: Simulationsmethode der Pufferverstärkung links.

Die Simulationenmethoden für die Pufferverstärkungen wurden mit 4 Operationen festgelegt. Nach dem Platinenschnitt in OP10 werden die Bauteile in einer Crashoperation in OP20 umgeformt. Bei der Crashumformung erfolgt die Formgebung des Bauteils durch ein Werkzeugober- und -unterteil ohne die Verwendung eines Blechhalters. Anschließend wird der Flansch vorne hochgestellt und gelocht (OP30). Abschließend erfolgt eine freie Rückfederungssimulation der Bauteile (vgl. Abb. 4-8). Die Simulationsergebnisse der Rückfederungsberechnung der Pufferverstärkungen links und rechts sind in Abb. 4-9 dargestellt.

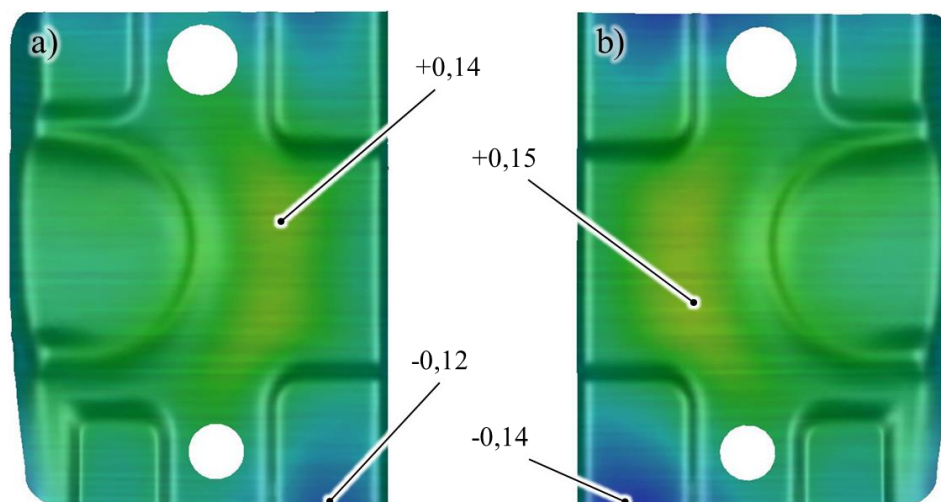


Abb. 4-9: Ergebnisse der Rückfederungssimulation der Pufferverstärkung a) links und b) rechts in [mm].

Die Maßhaltigkeit der Pufferverstärkung links wich auf Basis der Rückfederungssimulation von der Nominalgeometrie zwischen $-0,12\text{ mm}$ und $+0,14\text{ mm}$ ab und entsprach damit den festgelegten Toleranzgrenzen der Serienbauteile. Bei der Pufferverstärkung rechts ergab sich eine Maßabweichung zwischen $-0,14\text{ mm}$ und $+0,15\text{ mm}$, diese Werte „lagen innerhalb“ der festgelegten Toleranzgrenzen, sodass die Simulationen dieser Verstärkungsteile weitgehend mit den realen Rückfederungswerten übereinstimmten.

Umformsimulation der Schlossverstärkung

Die Schlossverstärkung wurde als einfachfallendes Teil, ebenfalls in einem Folgeverbundwerkzeug gefertigt. Da bei diesem Teil eine Rechteckplatine als Platinengeometrie verwendet wurde, war es nicht notwendig, den Platinenschnitt in der Umformsimulation explizit abzubilden.

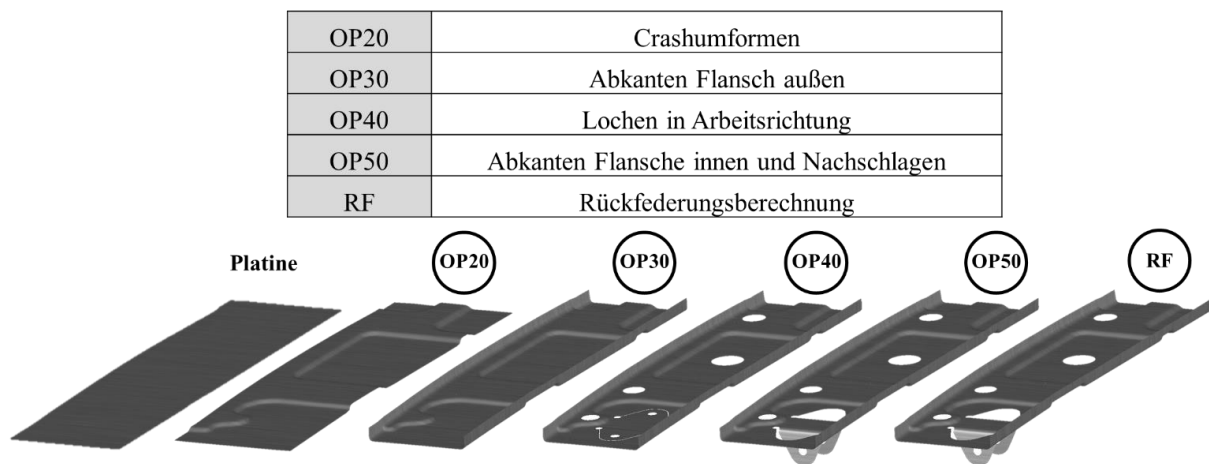


Abb. 4-10: Umformmethode zur Fertigung der Schlossverstärkung.

Der Umformprozess dieses Verstärkungsteils umfasste vier Operationen, wobei die Formgebung in einer Crashumformoperation in OP20 erfolgte, ehe die Flansche außen in OP30 abgeknippt wurden. In OP40 erfolgte das Lochen in Arbeitsrichtung des Beschnitts der Innenflansche, welche anschließend in OP50 abgeknippt wurden. Außerdem wurden die Anschlussflächen in dieser Operation nachgeschlagen und anschließend eine freie Rückfederung berechnet. Eine Besonderheit der Schlossverstärkung bildeten die abgestellten Flansche mit den Fanglöchern für das Verriegeln der Motorhaube (vgl. OP50 in Abb. 4-10). Wie in Abb. 4-11 vergrößert dargestellt, wurden die abgestellten Flansche in der späteren Fügeoperation durch entsprechende Aussparungen im Gerippe zunächst hindurchgeführt und mittels Falzen mit der Außenhaut gefügt. Diese „Durchdringung“ der Bauteile führte in der Fugesimulation (vgl. Kapitel 4.3) zu Kontaktdefinitionsproblemen, weshalb die Flansche für die Fugesimulation virtuell entfernt wurden.

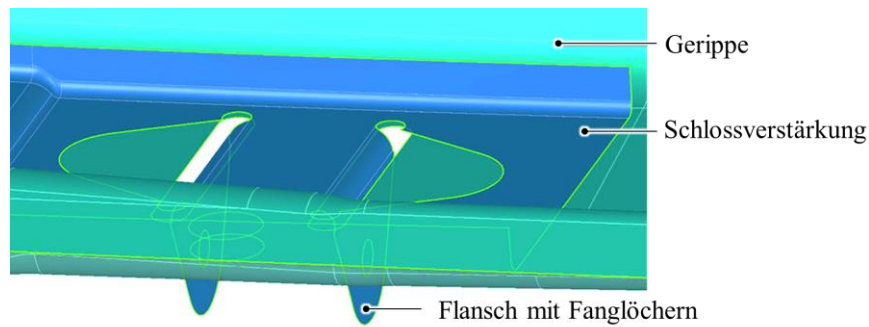


Abb. 4-11: Durchdringung der Flansche der Schlossverstärkung und des Gerippes.

Das Entfernen der Flansche könnte jedoch zu einer veränderten Rückfederung des Bauteils führen und somit auch die Rückfederung des späteren UZSB bzw. ZSB beeinflussen. Um diesen Einfluss zu prüfen, wurde zunächst ein Vergleich der Rückfederung des Verstärkungsteils mit Flanschen und ohne Flansche durchgeführt (vgl. Abb. 4-12).

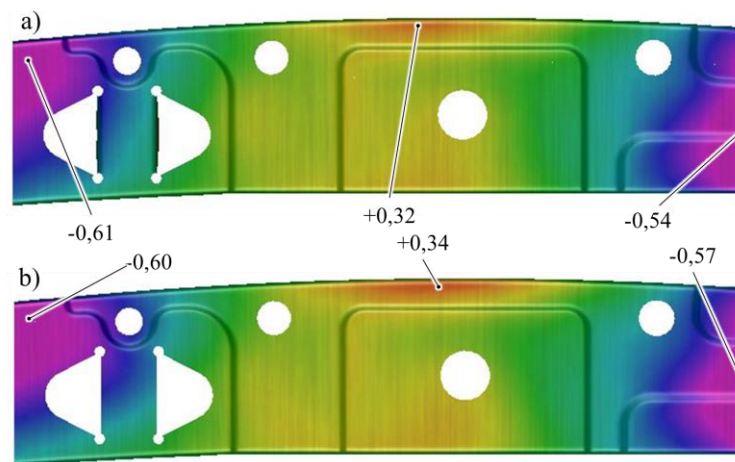


Abb. 4-12: Rückfederungsergebnisse der Werkzeugwirkflächen a) mit abgekanteten Flanschen und b) ohne Flansche in [mm].

Der Vergleich der Rückfederungsergebnisse der Schlossverstärkung mit und ohne Flansche zeigte deutlich, dass zwischen diesen Ergebnissen keine nennenswerten Abweichungen festgestellt werden konnten und somit keine Verfälschung der Ergebnisse zu erwarten ist, wenn diese weggelassen werden. Der Betrag der Rückfederung dieses Bauteils lag im Bereich von -0,60 mm bis +0,34 mm und damit außerhalb der festgelegten Toleranzgrenzen in den Seitenbereichen, sodass eine virtuelle Kompensation der Werkzeugwirkflächen in der Umformsimulation erforderlich war. Analog zur real durchgeführten Kompensation des Serienwerkzeugs wurden deshalb in der Umformsimulation die Wirkflächen der Nachschlageoperation (vgl. OP50, Abb. 4-10) kompensiert. Dazu wurden die Werkzeugwirkflächen der OP50 in der Umformsimulation mit einem Kompensationsfaktor 1 (vgl. Formel (1), S.28) entgegen der berech-

neten Rückfederung (vgl. Abb. 4-12 b) angepasst. Eine anschließende Rückfederungssimulation des gesamten Umformprozesses der Schlossverstärkung prognostizierte Maßabweichungen zwischen -0,16 mm bis zu +0,23 mm (vgl. Abb. 4-13 b), sodass nunmehr die Abweichungen innerhalb der festgelegten Toleranzgrenzen lagen (vgl. Kapitel 4.1.1).

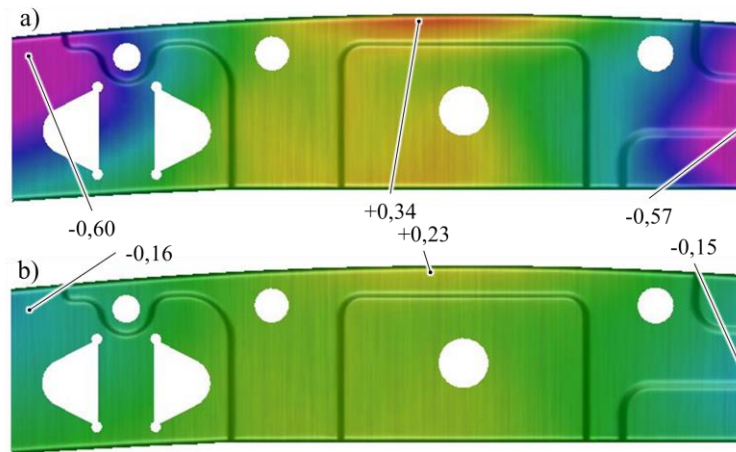


Abb. 4-13: Rückfederungsergebnis der Schlossverstärkung a) vor und b) nach Kompensation der OP50 in [mm].

Umformsimulation der Scharnierverstärkung rechts

Die Simulation des Umformprozesses der Scharnierverstärkung rechts wurde in 7 einzelnen Operationen umgesetzt.

OP10	Formplatinenschnitt
OP20	Crashumformen
OP30	Abstellen Flansch vorn und lochen
OP40	Abkanten außen
OP50	Abkanten innen und lochen
OP60	Nachformen Flansch vorne und kalibrieren
RF	Rückfederungsberechnung

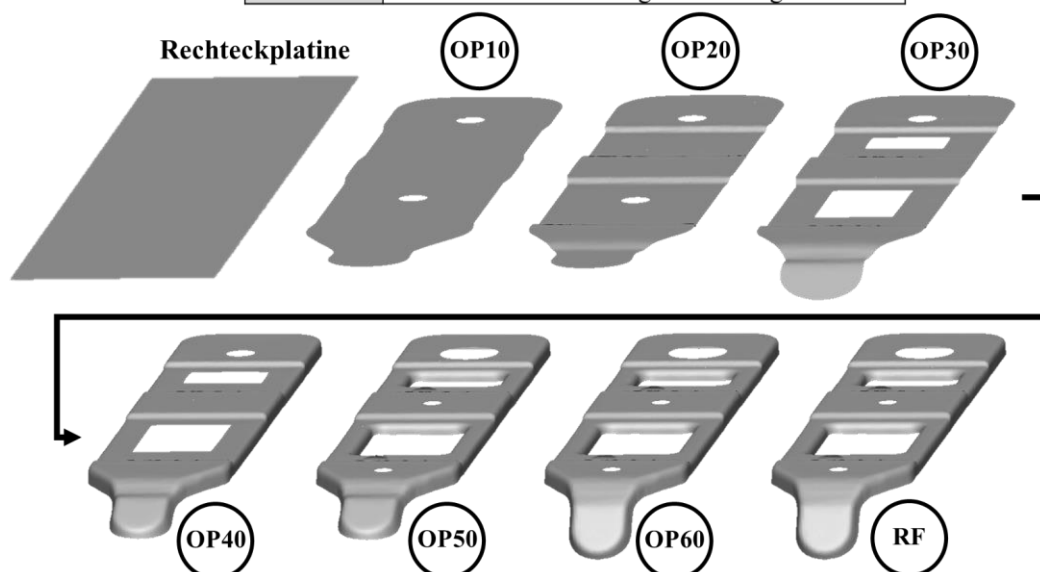


Abb. 4-14: Umformmethode der Fertigung der Scharnierverstärkung rechts.

Ausgehend von einer Rechteckplatte wurde diese zunächst in OP10 zu einer Formplatte beschnitten und für die Sicherstellung der korrekten Bauteillage in den einzelnen Operationen wurden zwei Löcher eingebracht, welche ein korrektes Einlegen des Bauteils mithilfe von Positionierstiften in jede Stufe erlaubten. Nach der Crashumformung in OP20 wurde in OP30 der Flansch vorne abgestellt, und dieser in OP40 abgekantet. Ehe dieser in OP60 mittels Schiebern auf die Fertigform nachgeformt wurde, erfolgte in OP50 das Abkanten der Innenflansche und eine weitere Lochoperation (vgl. Abb. 4-14).

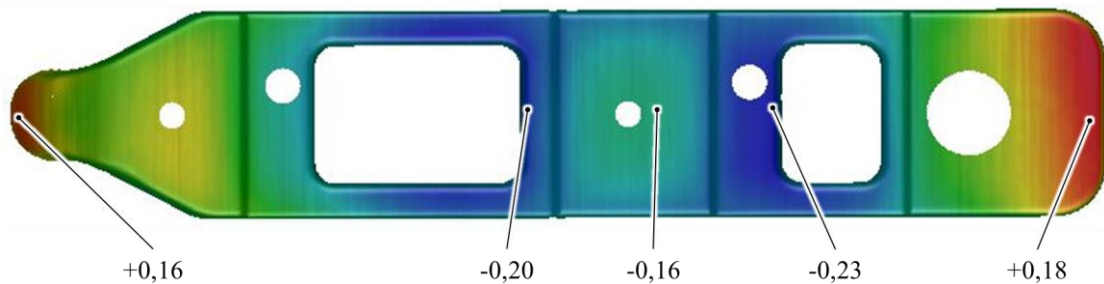


Abb. 4-15: Rückfederungsergebnis Scharnierversränkung rechts in [mm].

Die Ergebnisse der Umform- und Rückfederungssimulation zeigten gegenüber der nominalen Werkzeuggeometrie maximale Maßabweichungen der Scharnierversränkung rechts von -0,20 mm bis hin zu +0,18 mm, sodass dieses Bauteil gerade noch innerhalb der festgelegten Toleranzgrenzen lag (vgl. Kapitel 4.1.1) und somit keine Kompensationsmaßnahme erforderlich wurde.

Umformsimulation der Scharnierversränkung links

Die Scharnierversränkung links weicht geometrisch und in ihrer Größe und Gestalt von der Scharnierversränkung rechts ab (vgl. Abb. 4-16). Durch die veränderte Bauteilgeometrie wird die Steifigkeit beim Arretieren der geöffneten Motorhaube erhöht.

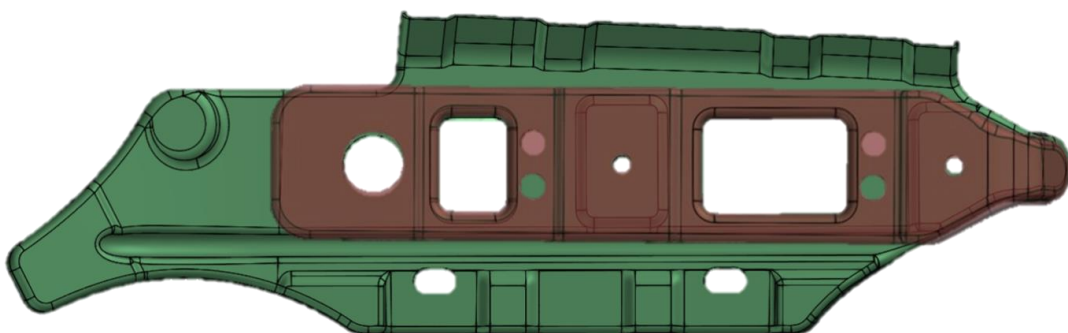


Abb. 4-16: Bauteilvergleich Scharnier links (grün) zu Scharnier rechts (rot).

Aufgrund der deshalb erforderlichen zusätzlichen Operation des Hochstellens des seitlichen Flansches (vgl. Flansch Abb. 4-16 oben) und der deutlichen geometrischen Abweichung zur Bauteilgeometrie Scharnierversränkung rechts, konnten die beiden Bauteile nicht im selben

Werkzeug, wie dies bei den Pufferverstärkungen der Fall war, gefertigt werden. Die Simulation der Scharnierverstärkung links wurde daher in einem separaten Werkzeug und auch mithilfe eines eigenständigen Simulationsmodells umgesetzt.

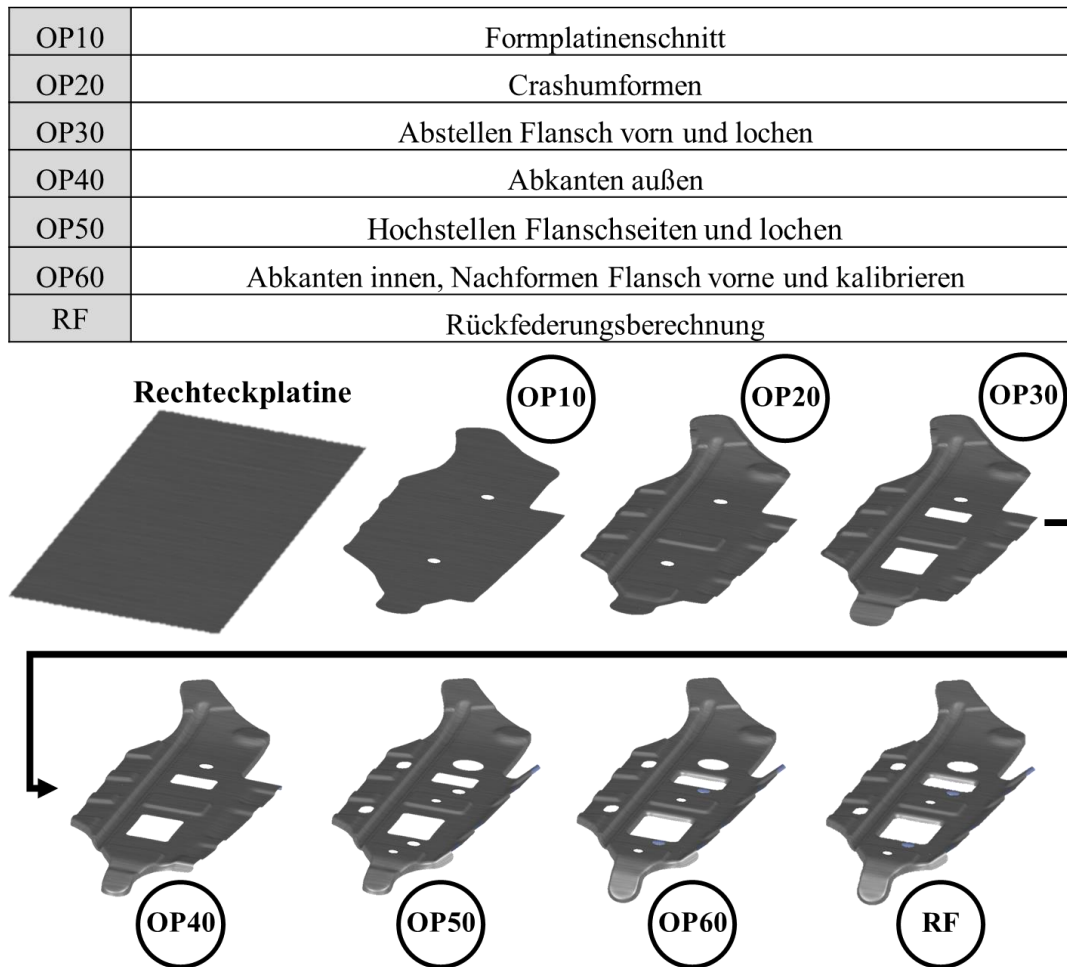


Abb. 4-17: Umformmethode der Fertigung des Folgeverbundwerkzeugs der Scharnierverstärkung links.

Unter Berücksichtigung der festgelegten Bauteiltoleranz mussten auch für dieses Bauteil die Werkzeugwirkflächen virtuell in der Umformsimulation kompensiert werden, da die maximalen Maßabweichungen (vgl. Abb. 4-18 a) mit nominalen Werkzeugwirkflächen außerhalb der festgelegten Toleranzgrenzen lagen. Analog zur durchgeführten Kompensation der Wirkflächen der Schlossverstärkung wurden deshalb in der Umformsimulation der Scharnierverstärkung links die Wirkflächen der OP60 angepasst (vgl. Abb. 4-17). Dazu wurden die Werkzeugwirkflächen ihrer OP60 in der Umformsimulation mit einem Kompensationsfaktor 1 (vgl. Formel (1), S.28) entgegen der berechneten Rückfederung (vgl. Abb. 4-18 a) angepasst. Nach der Kompensation lagen die maximalen Maßabweichungen der Scharnierverstärkung links bei -0,24 mm bis hin zu +0,20 mm und damit innerhalb der festgelegten Toleranzgrenzen (vgl. Kapitel 4.1.1).

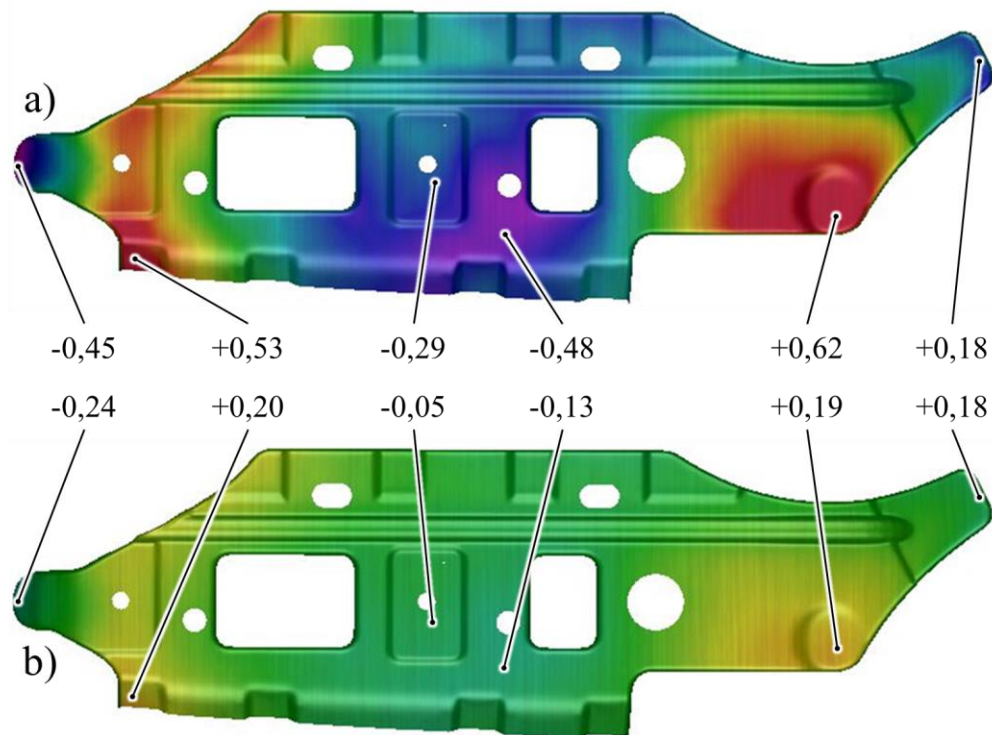


Abb. 4-18: Rückfederungsergebnis Scharnierverstärkung links a) vor und b) nach der Kompensation der OP60 in [mm].

4.2.2 Umformsimulation der Außenhautbeplankung und des Gerippes

Für den Abgleich der Rückfederungsergebnisse der Umformsimulationen der Außenhautbeplankung und des Gerippes wurden jeweils gemittelte Netze aus vermessenen Bauteilscans erstellt (vgl. Kapitel 4.1.2). Diese Netze stellen das durchschnittliche Rückfederungsverhalten des jeweiligen Bauteils aus der Serienproduktion dar und werden als Referenz für den Abgleich der simulierten Rückfederungsberechnungen verwendet. Wie aus den Vergleichen dieser Netze mit der jeweiligen nominalen CAD-Geometrie hervorgeht (vgl. Abb. 4-7), weisen die vermessenen Bauteile erhebliche Maßabweichungen auf. Diese werden mit der bereits durchgeführten Einarbeitung und Kompensation der Werkzeuge zur Verbesserung der Maßhaltigkeit des ZSB in der Serienproduktion begründet. Für den Abgleich der simulierten zu den realen Rückfederungsergebnisse werden daher in den Umformsimulationen der Außenhautbeplankung und des Gerippes die kompensierten Wirkflächendaten der Fräsdaten verwendet. Die Einarbeitung der Werkzeuge wird anschließend in der Simulation näherungsweise durch einen Abgleich des jeweiligen Platinenkanteneinzugs der Ziehstufe durch Anpassung der Ziehseckengeometrien abgebildet.

Umformsimulation der Außenhautbeplankung

Die Herstellung der Außenhautbeplankung erfolgte in einem Stufenwerkzeugsatz bestehend aus vier Einzelwerkzeugen, die auf einer mechanischen Pressenstraße betrieben wurden. Im

Unterschied zur Umformsimulation der Verstärkungsteile wurden in diesem Fall die einzelnen Umformoperationen der Außenhautbeplankung (OP20 – OP50) nicht in das Fahrzeugkoordinatensystem transformiert, sondern in das Werkzeugkoordinatensystem. Das Ziehteil konnte somit unter Berücksichtigung des korrekten Schwerkraftvektors virtuell in die jeweilige Nachfolgeoperation "eingelegt" werden. Als weiterer Unterschied zu den Simulationsberechnungen der Verstärkungsteile erfolgte in diesem Zusammenhang die Berechnung der freien Rückfederung zwischen den einzelnen Operationsschritten stets eine freie Rückfederungssimulation. Ausgehend von einer Formplatte erfolgte zunächst in OP20 die Simulation der Ziehoperation. In OP30 erfolgte ein Beschneiden und ein Lochen, in OP40 ein Beschneiden und ein Abkanten im Front- und Scheibenbereich und in OP50 erfolgte schließlich das Abkanten in den Seitenbereichen mithilfe von Schiebereinsätzen. Am Ende der Umformsimulation wurde das Bauteil schließlich in die Fahrzeuglage geschwenkt, damit die Wirkrichtung der Schwerkraft in der Simulation mit der realen Bauteillage auf der Messvorrichtung (vgl. Abb. 4-4) übereinstimmten. Diese Rückfederungsberechnung wurde mit einem *Real Measurement* (vgl. Kapitel 2.9.6) auf den Wirkflächen der Messvorrichtung durchgeführt (vgl. Abb. 4-4).

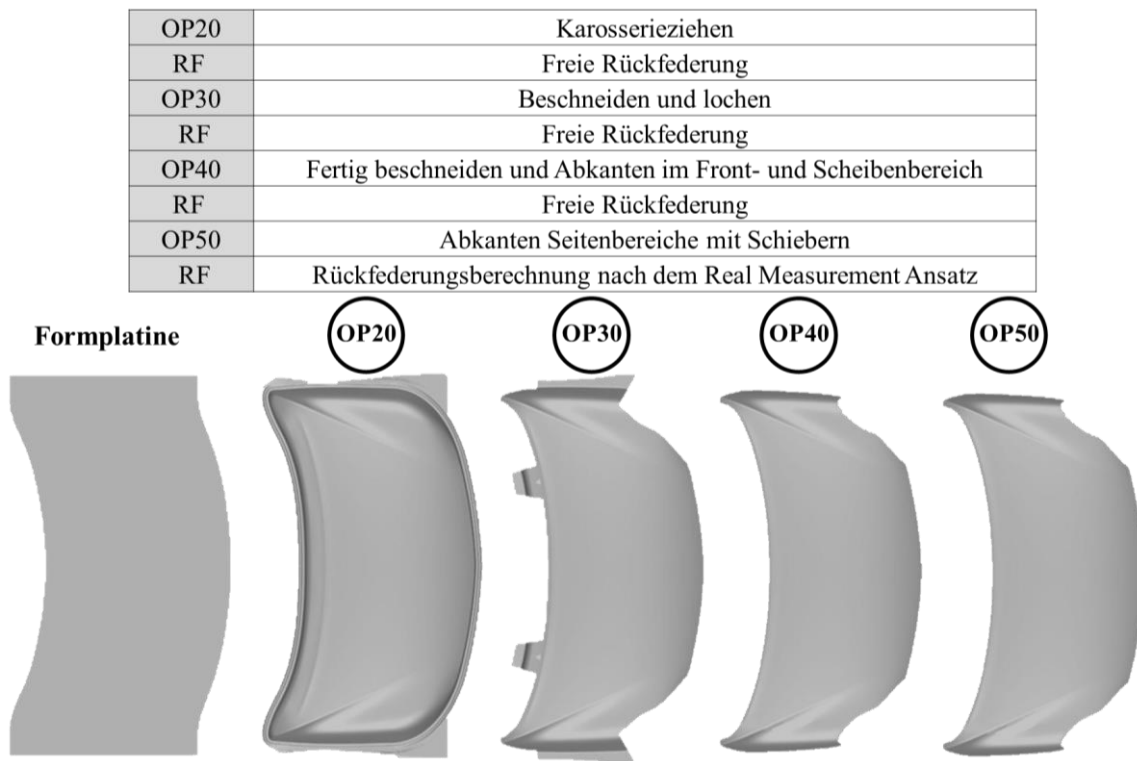


Abb. 4-19: Grafische Darstellung der Umformmethode für die Außenhautbeplankung.

Für den Abgleich des Platinenkanteneinzugs der Außenhautbeplankung zwischen Umformsimulation und Realteil nach dem Karosserieziehen (OP20) wurde der Platinenkanteneinzug eines Ziehteils aus der realen Produktion vermessen. Hierfür wurde der Platinenkanteneinzug manuell am realen Bauteil in insgesamt 30 Punkten gemessen und anschließend auf Basis dieser

Daten eine Zielkurve im CAD generiert und auf der Blechhalterwirkfläche übertragen. Diese Kurve diente nun näherungsweise zur Abbildung der Werkzeugeinarbeitung der Serienwerkzeuge. Der Platinenkanteneinzug der Umformsimulation wurde anschließend über die Variation der Ziehsickengeometrien solange angepasst, bis er mit dem Platinenkanteneinzug des gemessenen Ziehteils mit einer Toleranz von $\pm 0,2\text{mm}$ übereinstimmte. In der Realität erfolgt die Anpassung der Ziehsicken meist im Rahmen der Werkzeugeinarbeitung, die durch diese virtuellen Maßnahmen nachgebildet wurde. Für die manuelle Anpassung der Ziehsicken in der Simulation wären dazu viele Optimierungsschleifen der Ziehsickengeometrien in der OP20 notwendig gewesen. Eine automatisierte Anpassung bzw. Veränderung der Ziehsickengeometrien, um den realen Platinenkanteneinzug in der Simulation nachzubilden, bietet die Software AutoForm-Sigma^{®plus}. Mithilfe einer definierten sog. „Reduction-Strategy“ können dabei diejenigen Ziehsickengeometrien automatisch ermittelt werden, welche zur geringsten Abweichung des simulierten Platinenkanteneinzugs zur erzeugten Zielkurve aus dem gemessenen Ziehteil führen. Diese „Reduction-Strategy“ der Ziehsickengeometrien wurde für die Außenhautbeplankung und das Gerippe verwendet und wird im Folgenden kurz erläutert.

Im vorliegenden Fall wurde mit einer Ziehsickengeometrie zur Erzeugung einer höheren Rückhaltekraft begonnen. Die initiale virtuelle Ziehsickengeometrie entsprach hierbei den Fräsdaten des realen Werkzeugherstellungsprozesses. Durch Veränderung der Geometrieparameter (vgl. Abb. 4-20) wurde die Rückhaltekraft nun automatisch in der Simulation solange variiert, bis der angestrebte Platinenkanteneinzug mit einem Konvergenzkriterium (=maximal erlaubte Abweichung der Zielkurve zum simulierten Platinenkanteneinzug) von $0,5\text{mm}$ erreicht wurde. Dazu führte die Software mehrere Variantensimulationen mit veränderten Geometrieparametern durch und interpolierte die Ergebnisse in ein Meta-Modell.

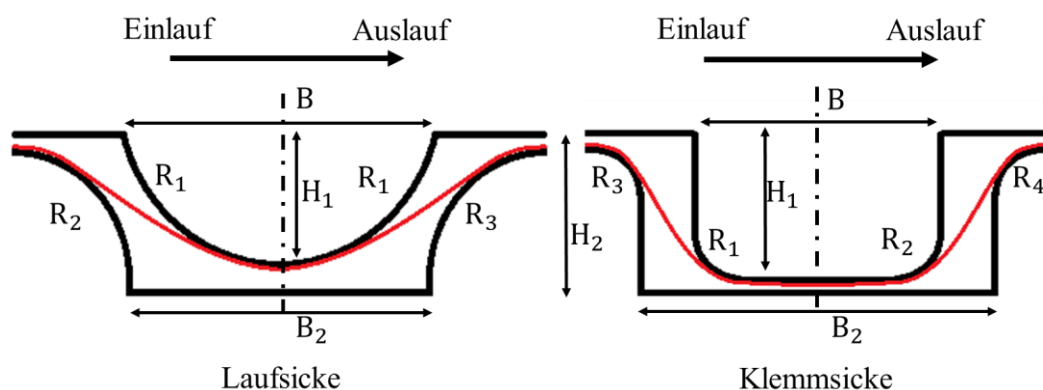


Abb. 4-20: Schematische Darstellung der verwendeten Ziehsickengeometrie und deren Geometrieparameter.

In der Software standen hierfür zwei Varianten der Ziehsickengeometrien (vgl. Abb. 4-20) zur Verfügung, welche folgende geometrische Anpassungsmöglichkeiten zur Variation der Rückhaltekräfte ermöglichten.

Für Klemmsicken:

- Ziehsickenhöhe H_1
- Einlaufradius Ziehsicke R_1
- Auslaufradius Ziehsicke R_2
- Einlaufradius Ziehsickennut R_3
- Auslaufradius Ziehsickennut R_4

Für Laufsicken:

- Ziehsickenhöhe H_1
- Radius Ziehsicke R_1
- Einlaufradius Ziehsickennut R_2
- Auslaufradius Ziehsickennut R_3

Diese beiden unterschiedlichen Ausführungen der Ziehsicken entsprachen der bei Opel eingesetzten Ziehsickenvarianten und unterschieden sich in der maximal erreichbaren Rückhaltekraft zur kontrollierten Steuerung des Platinenkanteneinzugs. Dabei gilt grundsätzlich:

Rückhaltekraft Klemmsicke > Rückhaltekraft Laufsicke

Eine Klemmsicke mit $R_1 = R_2 = H_1$ entspricht einer Laufsicke mit entsprechender Höhe. Unabhängig von der gewählten Ziehsickengeometrie führt eine Erhöhung der Ziehsickenhöhe und eine Verkleinerung der Ein- bzw. Auslaufradien zu einer höheren Rückhaltekraft. Da die Vielfalt an Anpassungsmöglichkeiten eine hohe Anzahl an zu berechnenden Iterationen bedeutete, wurden folgende Einschränkungen für die o.g. Reduction-Strategy der Ziehsicken festgelegt:

- Die Breite B_1 aller Ziehsicken beträgt stets 10 mm (vgl. konstante Größe Abb. 4-21)
- Die Nutbreite B_2 aller Ziehsicken beträgt stets den Wert der Ziehsickenbreite B_1 zzgl. Platinenblechdicke + 0,2 mm
- Die Nuttiefe H_2 aller Ziehsicken beträgt stets den Wert der Ziehsickenhöhe H_1 zzgl. Platinenblechdicke + 0,2 mm
- Die Ziehsickenhöhe H_1 der Klemmsicken beträgt stets 5 mm
- Symmetrie zwischen Einlauf- und Auslaufradius der Klemmsicken ($R_1 = R_2$)
- Der minimale Einlauf- bzw. Auslaufradius (R_3 bzw. R_4) der Ziehsickennut bei Klemmsicken beträgt 1,5 mm
- Der Ein- und Auslaufradius (R_2 und R_3) der Laufsicken beträgt stets 3 mm
- Die Ziehsickenhöhe H_1 der Laufsicken kann in 1 mm Schritten zwischen $H_1=1 \dots 5$ mm verändert werden

- Die Ziehsicken- bzw. Ziehsickennutradien der Klemmsicken können in 0,5 mm Schritten zwischen $R_1 \dots R_4 = 1,5 \dots 5$ mm verändert werden

Folglich wurde bei diesem Ansatz die Rückhaltekraft beim Einsatz von Laufsicken ausschließlich über die Ziehsickenhöhe H_1 beeinflusst. Bei Klemmsicken konnte die Rückhaltekraft durch Erhöhung der Ziehsicken- bzw. Ziehnutradien (R_1 , R_3 und R_4) und die die Variation der Ziehsickenhöhe H_1 gesteuert werden (vgl. anpassbare Größen Abb. 4-21).

Als Optimierungsgrundlage für die AutoForm-Sigma^{®plus} Simulation diente die zuvor generierte Zielkurve des Platinenkanteneinzugs. Für die Anpassung des Platinenkanteneinzugs in der Simulation wurden insgesamt 20 Iterationen berechnet und als Konvergenzkriterium wurde der Grenzwert von 0,5 mm maximaler Abweichung zur Zielkurve des Platinenkanteneinzugs festgelegt. Das Ergebnis dieser Simulation bei einer Restabweichung von etwa 0,3 mm gegenüber der Zielkurve ist in Abb. 4-21 dargestellt.

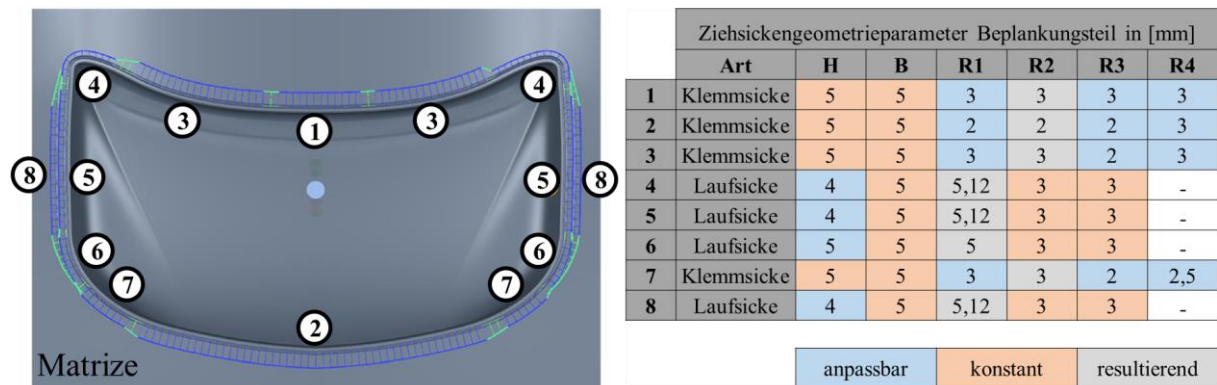


Abb. 4-21: Simulativ ermittelte Ziehsickengeometrieparameter des Beplankungsteils zum Erreichen der aus dem Realwerkzeug ermittelten Platinenkanteneinzüge rundum.

Abb. 4-21 rechts zeigt die mithilfe dieser Methode ermittelten Ziehsickengeometrien (vgl. Abb. 4-20) für die Außenhautbeplankung zum Abgleich des Platinenkanteneinzugs der Ziehstufe des Serienwerkzeugs. Dabei wurden die in der o.g. Reduction-Strategy variierten Ziehsickengeometrien blau eingefärbt (anpassbar) und die vorher festgelegten orange (konstant). Die grau hinterlegten Ziehsickengeometrien resultierten dann aus den restlichen Werten. Für die AutoForm-Sigma Berechnung wurde zur Rechenzeitreduzierung ausschließlich die Ziehoperation OP20 berücksichtigt, da zur Erhöhung der Ergebnisgenauigkeit mit geometrischen Ziehsicken gerechnet wurde. Das gesamte Simulationsmodell inklusive aller Folgeoperationen wurde anschließend mit den ermittelten Ziehsickenparameter erneut berechnet und das Ergebnis der Rückfederungssimulation den Messergebnissen der realen Bauteilscans gegenübergestellt (Abb. 4-22). Im Frontbereich der Außenhautbeplankung zeigt der Bauteilscan eine ausgepräg-

tere Rückfederung als die Umformsimulation (mit orangenen Pfeilen angezeigt). Das Simulationsprogramm prognostizierte an dieser Stelle eine geringere Rückfederung im Vergleich zum gemittelten realen Bauteilscan. In diesem Bauteilbereich lag die maximale Abweichung von 1,2 mm gegenüber dem realen Messwert. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Simulation exakt an derselben Bauteilposition eine relativ hohe Streuung in den Ergebnissen bei Verwendung unterschiedlicher Ziehsickengeometrieparameter von maximal 1,3 mm prognostizierte (vgl. Abb. 4-6).

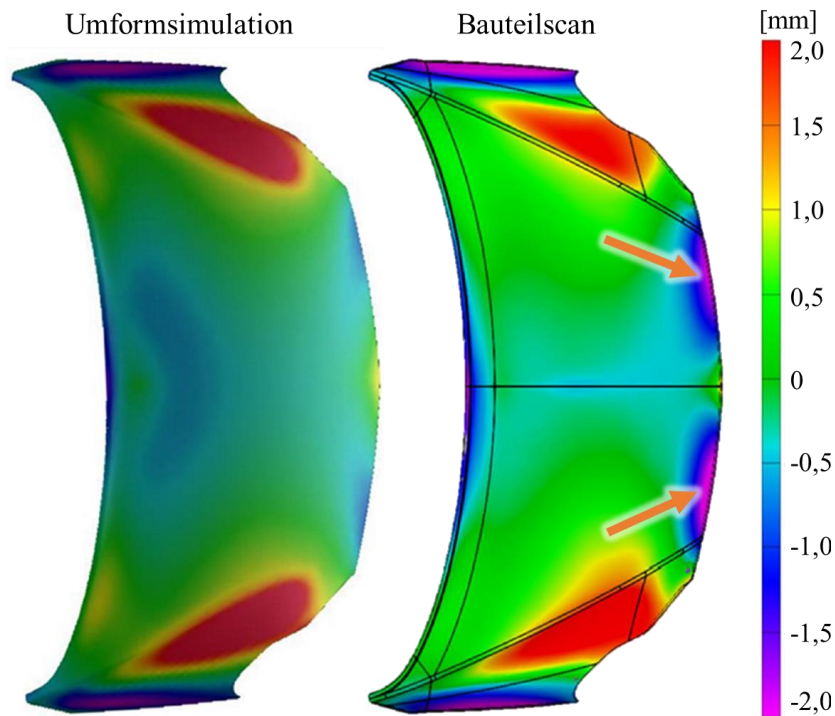


Abb. 4-22: Gegenüberstellung der Rückfederungsergebnisse der Umformsimulation (links) und des Bauteilscans (rechts) der Außenhautbeplankung.

Die angezeigte maximale Abweichung von 1,2 mm liegt innerhalb dieser Streuung. In allen anderen Bauteilbereichen kann eine sehr gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit denen der Messreihe erzielt werden, wodurch das Ergebnis als hinreichend genau betrachtet werden kann.

Umformsimulation des Gerippes

Für den Vergleich der Ergebnisse der Umformsimulation des Gerippes mit den gescannten Bauteilnetzen (vgl. Abb. 4-7 links) wurde das Simulationsmodell des Gerippes zunächst unter Berücksichtigung aller Folgeoperationen aufgebaut. Dazu wurde, wie bei der Außenhaut auch, das Ziehteil in jede Werkzeugstufe unter Schwerkrafteinfluss virtuell eingelegt und nach der jeweiligen Operation anschließend eine freie Rückfederung berechnet. Am Ende der Simulation wurde das Bauteil in die Fahrzeuglage geschwenkt und die Rückfederungsberechnung unter Berücksichtigung der Auflagepunkte der Messaufnahme durchgeführt (vgl. Abb. 4-4).

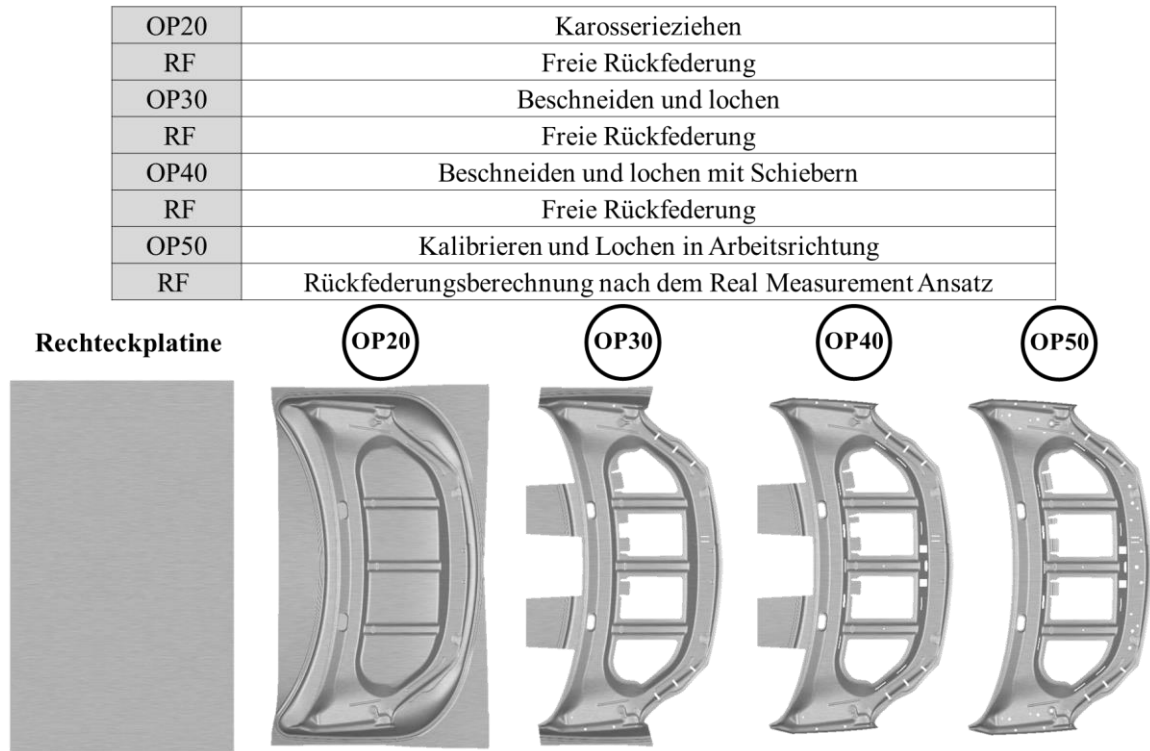


Abb. 4-23: Grafische Darstellung der Umformmethode für das Gerippe.

Analog zur Außenhautbeplankung wurden auch hier zum Vergleich der Simulationsergebnisse mit denen aus der realen Messung die Platinenkanteneinzüge nach der Ziehoperation (OP20) messtechnisch erfasst und die Ziehsickenparameter in der Umformsimulation mithilfe von AutoForm-Sigma^{®plus} ermittelt.

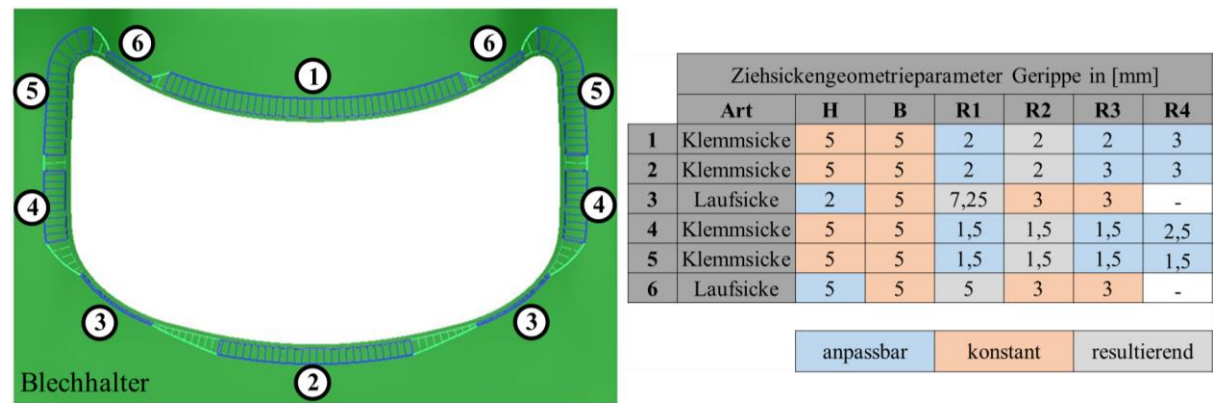


Abb. 4-24: Simulativ ermittelte Ziehsickengeometrieparameter des Gerippes zum Erreichen der aus dem Realwerkzeug ermittelten Platinenkanteneinzüge rundum.

Das gesamte Simulationsmodell inklusive aller Folgeoperationen wurde anschließend mit den ermittelten Geometrieparametern der Ziehsicken erneut berechnet und das Ergebnis der Rückfederungssimulation den Messergebnissen der realen Bauteilscans gegenübergestellt.

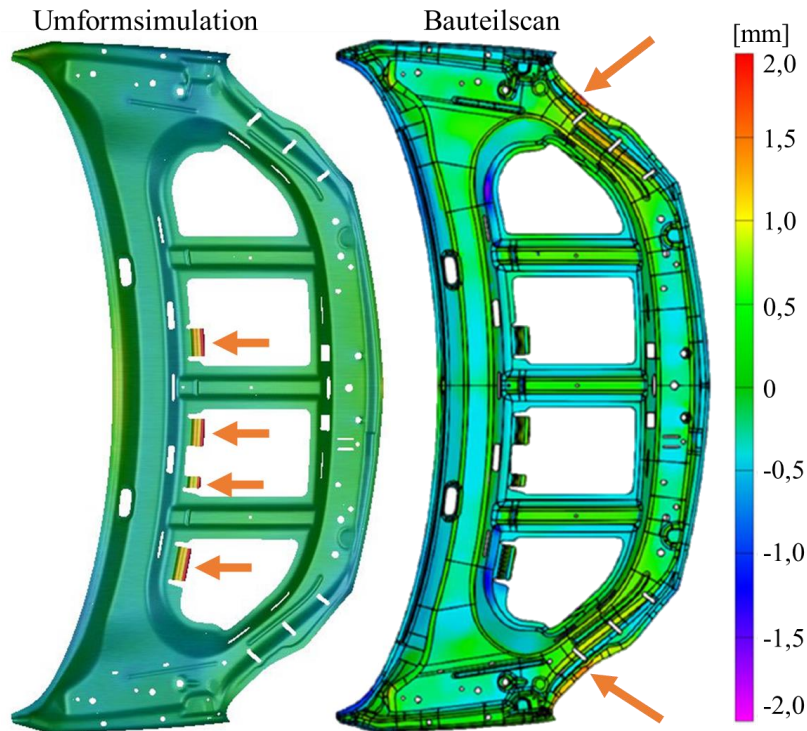


Abb. 4-25: Gegenüberstellung der Rückfederungsergebnisse der Umformsimulation (links) und des Bauteilschans (rechts) des Gerippes.

Die maximalen Abweichungen zwischen der Umformsimulation und dem gemittelten Netz der Bauteilschans (vgl. Kapitel 4.1) sind mit orangefarbenen Pfeilen markiert (vgl. Abb. 4-25). Diese lokalen Bereiche des Gerippes weisen eine maximale Abweichung von 1,6 mm auf. Ohne Berücksichtigung dieser lokalen Bereiche liegt die maximale Abweichung zwischen der Umformsimulation und dem gemittelten Netz der Bauteilschans des Gerippes bei 0,45 mm, sodass der Realprozess bis auf die lokalen Bereiche hinreichend genau abgebildet wurde und auf weitere Anpassungen der Simulationsparameter verzichtet werden konnte.

Durch den Abgleich der Umformsimulationen der Verstärkungsteile, des Gerippes und der Außenhautbeplankung mit den ermittelten Bauteilabweichungen der Serienteile konnte für die nun folgende Füg simulation des UZSB sichergestellt werden, dass die Rückfederung der Einzelteile richtig abgebildet wurden. Die Füg simulation des UZSB des untersuchten Motorhauben-ZSB wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

4.3 Füg simulation des Unterzusammenbaus

Das Simulationsmodell der Fügeoperation des UZSB wurde mithilfe des Softwareprogramms AutoForm^{plus} Assembly R7.1 Beta aufgebaut und berechnet. Mit dieser Assembly Version können mehrere elastische Bauteile im selben Simulationsmodell punktuell gefügt werden. Das Programm ermöglicht dafür auch die Berücksichtigung der Umformsimulationsergebnisse der Einzelteile ohne ein zusätzliches Daten-Mapping oder ein erneutes Vernetzen (Remeshing) der

Werkzeugwirk- und der Bauteilflächen. Dadurch kann ein höherer Modellierungsaufwand für das Remeshing und der durch das Daten-Mapping verursachte Informationsverlust bei der Übertragung vermieden werden (vgl. Kapitel 2.9.8). Neben der berechneten Blechausdünnung und der plastischen Dehnung der Bauteile konnten auf diese Weise auch die im Pressteil herrschenden Eigenspannungen übertragen werden. Dadurch konnten unter anderem auch physikalische Randbedingungen, wie etwa das Positionieren des Bauteils auf einer Auflage, die Nutzung von Spannern und Stiften, sowie die Schwerkraft aus der Rückfederungsberechnung der Einzelteile mitberücksichtigt werden (vgl. *Real Measurement* Ansatz, Kapitel 2.9). Analog zur Absicherung der Umformsimulationen der Einzelteile erfolgte auch an dieser Stelle ein Vergleich der Ergebnisse der Fugesimulation des UZSB mit realen Messergebnissen aus dem Serienprozess.

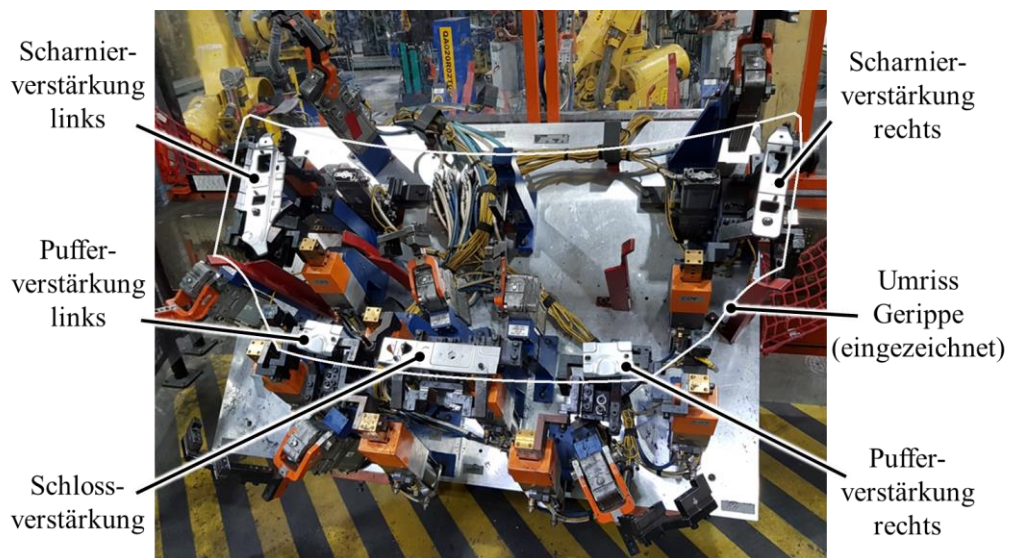


Abb. 4-26: Einlegen der Verstärkungsteile in die Serienfügeanlage.

Hierbei wurden zunächst die Verstärkungsteile in jeweils zuvor definierte Positionen der Fügeanlage eingelegt. Danach wurde das Gerippe auf die Verstärkungsteile positioniert. Die definierte Ausrichtung der Verstärkungsteile erfolgte mithilfe von je zwei Positionierstiften, das Gerippe wurde mit insgesamt drei Positionierstiften ausgerichtet. Anschließend wurden die Spanner simultan geschlossen und die Bauteile in einer definierten Zwangslage fixiert. Der darauffolgende Fügeprozess erfolgte in zwei Schritten. Im ersten Fügeschritt wurden einzelne Fügepunkte durch Clinchen gesetzt, wodurch die Baugruppe vorfixiert wurde (vgl. Fügepunkte 1-14, Abb. 4-27). Im zweiten Schritt wurde der UZSB schließlich ebenfalls mittels clinchen dann vollständig gefügt (vgl. Fügepunkte 15-29, Abb. 4-27). Beim Fügen eines UZSB hat die Spann- und Fügereihenfolge (vgl. Abb. 4-27) bzw. die Position der Spann- und Fügepunkte einen erheblichen Einfluss auf die Maßhaltigkeit der Baugruppe. Aus diesem Grund wurde die

Reihenfolge und Position der Spann- und Fügepunkte in der Simulation entsprechend des Fügeprozesses der Serienproduktion modelliert. Der gesamte Fügeprozess in der Serienanlage wurde somit inklusive des Einlegens der Bauteile, des Schließens der Spanner sowie des Fügens durch Clinchen in der Simulation vollständig abgebildet.

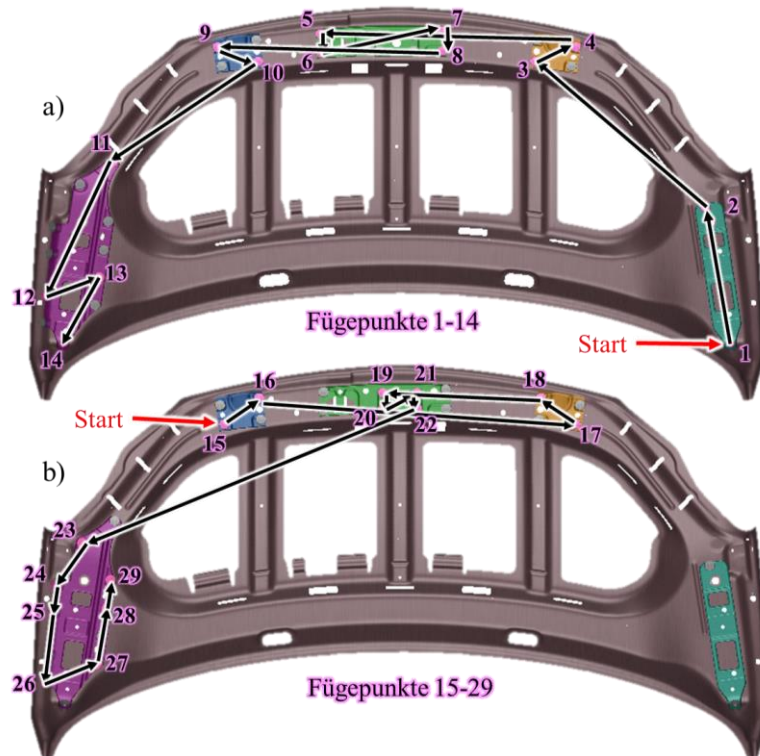


Abb. 4-27: Sequentielle Fügeabfolge für das Clinchen des UZSB a) Fügepunkte 1-14 b) Fügepunkte 15-29.

Zur Abbildung des Fügeprozesses verfügt die GUI der AutoForm^{plus} Assembly R7.1 Beta derzeit über drei Stufen zum Aufbau der Fügesimulation. Diese sind im Softwarecode wie folgt benannt und werden im Anschluss beschrieben:

1. „Import und Plan Stage“:

- Einlesen von nominalen CAD-Daten der Einzelteile, der Koordinatensysteme und der Punktkoordinaten für die Fügepunkte, der Spannpunkte, der Positionierstifte sowie der Aufnahmepunkte der Messaufnahme
- Zuordnung von berechneten Simulationsergebnissen aus der Umformsimulation zu den eingelesenen CAD-Daten der Einzelteile mithilfe von ASM-Files

2. „Process Stage“:

- Festlegen der Koordinatentransformationen für den Fügeprozess und für die Rückfederungsberechnung (vgl. Abb. 4-28)
- Definition von Positionierstiften

- Definition des Spannkonzpts (Spannpositionen, Spannreihenfolge, einseitige oder doppelseitige Spanner vgl. Abb. 4-29)
- Festlegen der Fügepunkte und der Fügereihenfolgen (sequentielles und simultanes Fügen)
- Festlegen der Randbedingungen für die Rückfederungsberechnung (Nach den Ansätzen Freie Rückfederung, FBC oder *Constrained Springback*, vgl. Kapitel 2.9.6)

3. „Evaluation Stage“:

- Auswertung der Rückfederung
- Auswertung der auftretenden Spannkkräfte

Der Aufbau der Füg simulation erfolgt zunächst anhand von nominalen CAD-Daten der Einzelteilbauteile in Fahrzeuglage. Dadurch ist bereits die korrekte Zusammenbaulage der Bauteile zueinander gewährleistet. Zusätzlich können prozessrelevante Daten, wie etwa Koordinatentransformationssysteme oder Füge- und Spannpunkte (falls vorhanden) eingelesen werden. Diese können allerdings auch direkt in der GUI anhand der nominalen Bauteildaten abgeleitet werden. Mithilfe der eingelesenen und abgeleiteten Daten kann nach Zuordnung der Materialkarten und Blechdicken bereits der gesamte Fügeprozess aufgebaut und schließlich berechnet werden. Mit dieser ersten Berechnung werden allerdings noch keine Umformsimulationsergebnisse der Einzelteile, d.h. die Umformhistorie dieser Bauteile, berücksichtigt. Im Entwicklungsprozess der Füg simulation können anschließend zur Verbesserung der Genauigkeit diese nominalen CAD-Daten der Bauteile durch berechnete Umformergebnisse ausgetauscht werden, um die realen Spannungsverhältnisse in den Bauteilen und deren Einfluss auf den Fügeprozess möglichst präzise modellieren zu können. Diese werden in Form der zuvor erwähnten ASM-Files aus der Umformsimulation der Einzelteile importiert (vgl. Kapitel 4.2).

Die Füg simulation berücksichtigt im Wesentlichen das Einlegen der Bauteile unter Schwerkrafteinwirkung, das Spannen der Baugruppe, das Fügen der Baugruppe und die Rückfederungsberechnung der Baugruppe unter Schwerkrafteinwirkung. Zur Berücksichtigung des korrekten Schwerkraftvektors während des Einlegens der Einzelteile und der anschließenden Rückfederungsberechnung, werden sog. Koordinatentransformationen der Bauteile- bzw. Baugruppe durchgeführt. Dabei werden die Bauteile zunächst aus der Fahrzeuglage in das Koordinatensystem der Serienfügeanlage gebracht und anschließend gespannt und gefügt. Anschließend wird die gefügte Baugruppe in das Koordinatensystem der Messaufnahme transformiert und die Rückfederungsberechnung durchgeführt (vgl. Abb. 4-28).

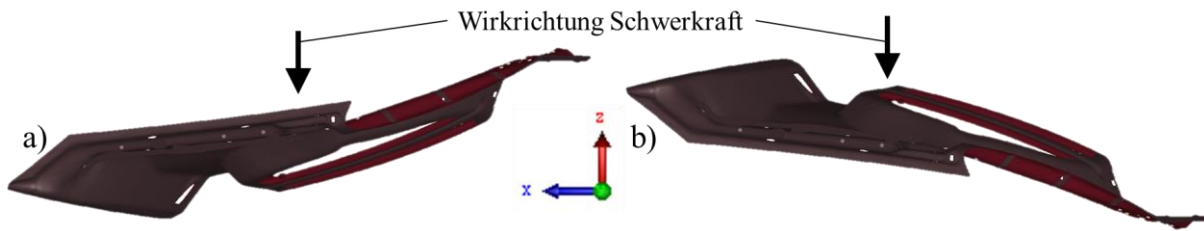


Abb. 4-28: Berücksichtigte Wirkrichtung der Schwerkraft in der Fügesimulation für das a) Einlegen, Spannen, Fügen und die b) Rückfederungsberechnung.

Das Spannen der Baugruppe nachdem die Bauteile virtuell unter Schwerkrafteinfluss eingelegt wurden erfolgt dabei nach folgendem Prinzip:

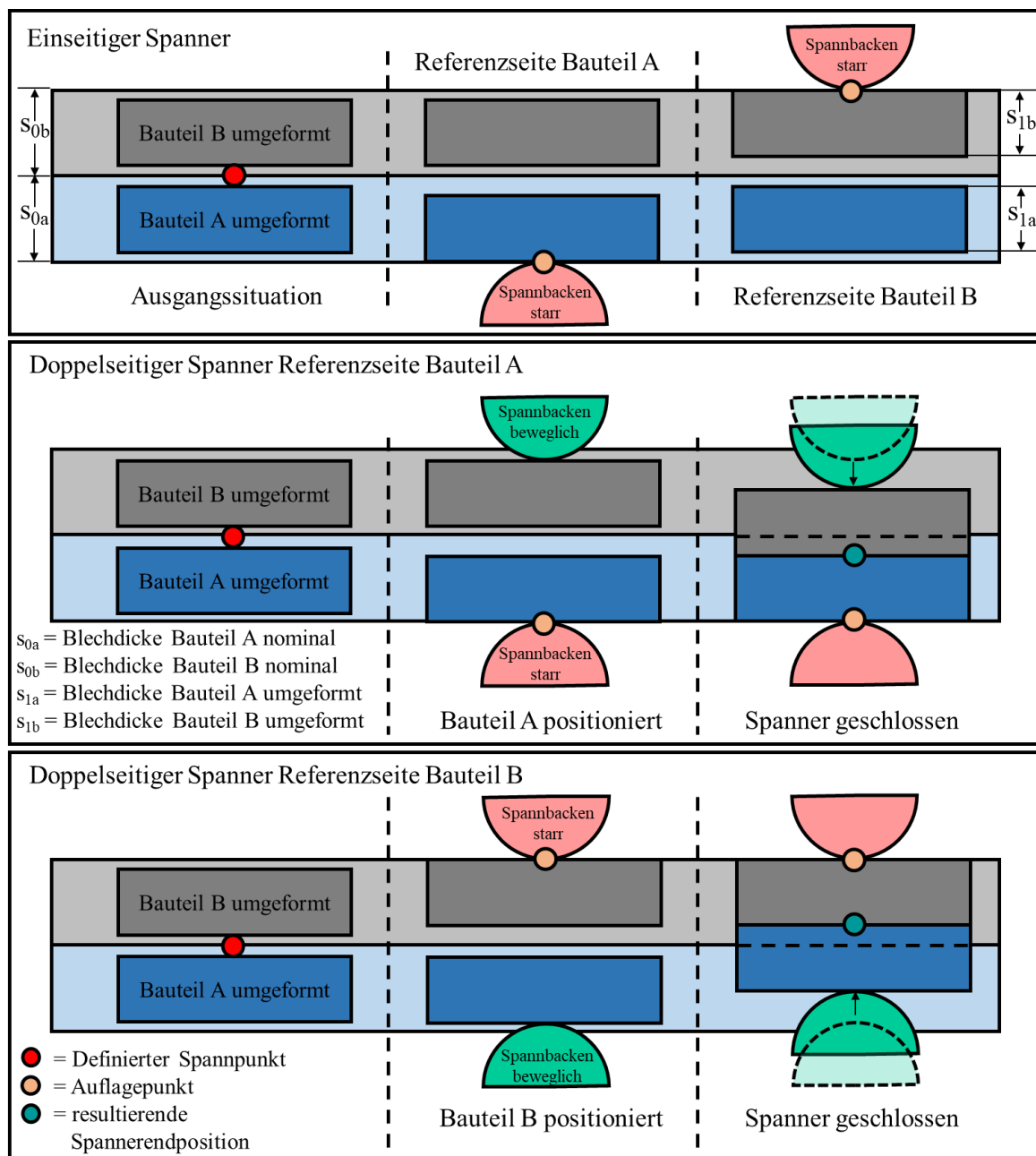


Abb. 4-29: Beeinflussung der Bauteilpositionierung unter dem Einsatz von einseitigen und doppelseitigen Spannern und verschiedener Referenzseiten in der Fügesimulation.

Die Spanner werden in der Füg simulation wirkflächenbasiert (vergleichbar zu Arbeiten von [Gov12, Kae16, Sch15]) abgebildet. Im verwendeten Softwarecode werden die Spannerwirkflächen vereinfacht durch Halbkugeln dargestellt (vgl. Spannbacken, Abb. 4-29), wobei zwischen einseitigen bzw. doppelseitigen Spannern unterschieden wird. Dabei entspricht ein einseitiger Spanner einem Anschlag oder einer Auflagefläche in der Fügeanlage und ist immer starr. Doppelseitige Spanner besitzen einen starren Spannbacken, sowie einen beweglichen Spannbacken, der translatorisch in der Simulation geschlossen wird. Die Spannungspunkte werden auf Basis der nominalen CAD-Daten der Einzelteile abgeleitet und liegen jeweils auf den Kontaktflächen zwischen zwei Bauteilen (vgl. definierter Spannungspunkt, Abb. 4-29). Die CAD-Daten zweier Bauteile entsprechen dabei den hellorangenen bzw. hellblauen Blechen mit Ausgangsblechdicke s_{0a} bzw. s_{0b} . Für die richtige Modellierung der Spannsituation wird eine Referenzseite definiert. Die starren Spannbacken werden entsprechend der Auswahl dieser Referenzseite auf der Außenseite der CAD-Daten des ausgewählten Bauteils erzeugt (vgl. Auflagepunkt, Abb. 4-29). Bei Berücksichtigung der Einzelteilsimulationsdaten und die dadurch resultierenden Blechdickenänderungen während des Umformens können deshalb die Positionen der Bauteile zueinander nach dem Spannprozess variieren und damit die Ausgangssituation für das Fügen der Bauteile beeinflussen. Abb. 4-29 zeigt dies am Beispiel einer angenommenen Blechdickenreduktion in der Spannstelle beider Bauteile. Dadurch sind die Blechdicken der umgeformten Bauteile s_{1a} und s_{1b} kleiner als die Ausgangsblechdicken der nominalen Bauteildaten s_{0a} und s_{0b} . Das entsprechende Bauteil wird im ersten Schritt an den starren Backen verschoben (vgl. Bauteil positioniert, Abb. 4-29), da der Auflagepunkt auf Basis der Ausgangsblechdicke abgeleitet wird. Beim Spannen der Bauteile wirkt sich die Dickendifferenz somit in Abhängigkeit vom Spannertyp (einseitig/doppelseitig) und der gewählten Referenzseite auf die Endposition der gespannten Bauteile aus.

Das Spannen der Baugruppe erfolgt in der AutoForm^{plus} Assembly R7.1 Beta ausschließlich simultan. Die virtuelle Abbildung einer sog. „Klavierspanntechnik“, bei der einzelne Spanner während des Fügens geöffnet und anschließend wieder geschlossen werden, ist nicht abbildbar. Bei Verwendung von einseitigen Spannern können sich die Bauteile allerdings, wie im realen Prozess auch, von den starren Spannbacken abheben. Das Positionieren und Spannen der Bauteile erfolgt über eine Knotenverschiebung der Bauteilnetze in einem definierten Suchbereich um die Halbkugel. Aus diesem Grund wird eine zusätzliche Rückfederungsberechnung unter Berücksichtigung des Schwerkraftvektors (vgl. Abb. 4-28 a) nach dem Positionieren durchgeführt. Die Translationsrichtungen der beweglichen Spannbacken werden von der Elementnor-

malenrichtung der eingelesenen CAD-Daten abgeleitet. Das Schließen der Spanner erfolgt unter Berücksichtigung der Blechdickenänderungen beider Bauteile bis eine Berührsituation gefunden wurde. Dabei können die Bauteile im Wirkungsbereich des Spanners deformiert werden.

Das Spannen der Baugruppe wurde im Fall des untersuchten Motorhauben-UZSB in drei Schritten berechnet:

1. Positionierung der Bauteile mit Positionierstiften auf den starren Spannbacken
2. Rückfederungsberechnung
3. Simultanes Schließen der beweglichen Spannbacken (bei doppelseitigen Spannern)

Zur Positionierung der Verstärkungsteile wurden einseitige Spanner als Auflagen und jeweils zwei Positionierstifte analog der Fügeanlage (vgl. Abb. 4-26) definiert. Auf diese Weise wurden auch die Positionierstifte und die Auflagen des Gerippes festgelegt, sodass alle Bauteile in definierter Lage zueinander positioniert werden konnten.

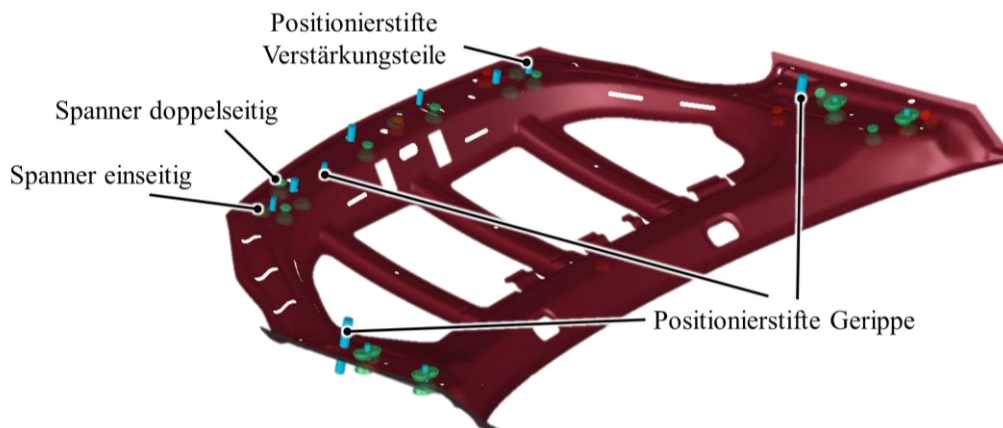


Abb. 4-30: Schematische Darstellung des Spannens des UZSB in der Fügevorrichtung und in der Fügesimulation.

Im anschließenden Fügeprozess des UZSB wurden die Fügwerkzeuge des Clinchens ebenfalls wie ein doppelseitiges Spannelement durch Halbkugeln mit einem starren und einem translatorischen Fügeelement virtuell abgebildet. Im Unterschied zum Spannprozess (vgl. Abb. 4-29) wird im Fügeprozess nach dem Schließen der Fügezange ein zusätzliches Verbindungselement erzeugt, welches die beiden Bauteile nach dem Öffnen miteinander verbindet. Auf diese Weise wird der resultierende Fügepunkt simuliert (vgl. Abb. 4-31). Dabei verhalten sich die resultierenden Fügepunktendpositionen bei geschlossener Fügezange unter Berücksichtigung der lokalen Blechdickenreduktion beider Bauteile analog zu denen der Spannerendpositionen (vgl. resultierende Spannerendposition, Abb. 4-29). Im Gegensatz zu den Spannern können die Fügepunkte nicht ausschließlich simultan, sondern auch sequentiell in einer festgelegten Reihen-

folge gesetzt werden. Bei einer simultanen Berechnung der Fügepunkte werden zur Vereinfachung alle Fügeelemente gleichzeitig geschlossen und entsprechende Verbindungselemente erzeugt.

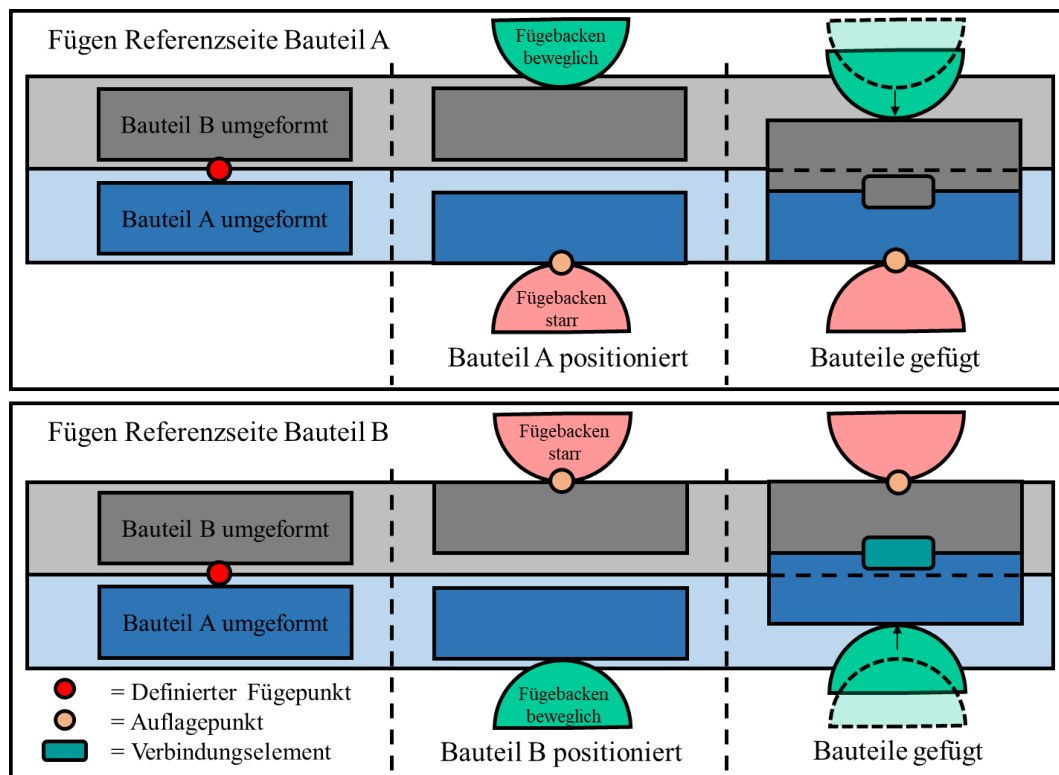


Abb. 4-31: Fügeprinzip bei Anwendung verschiedener Referenzseiten und Generierung eines Verbindungselementes (rechte Spalte) nach dem Fügevorgang.

Anschließend wird eine weitere Rückfederungsberechnung unter Verwendung neu definierter Randbedingungen durchgeführt, bei der alle im Fügeprozess definierten Spann- und Fügeelemente sowie alle Positionierstifte entfernt werden und somit nicht mehr wirksam sind. Bei einer sequentiellen Fugesimulation hingegen wird jeder Punkt einzeln in einer festgelegten Reihenfolge gesetzt und nach jedem Fügepunkt eine separate Rückfederungsberechnung durchgeführt. Dabei bleiben jedoch die Spannelemente und Positionierstifte bis zur finalen Rückfederungsberechnung als Randbedingungen bestehen. Da die Fügepunkte in der Fügeanlage ebenfalls in einer zuvor festgelegten Reihenfolge eingebracht werden, wurde zum Aufbau der Fugesimulation des untersuchten UZSB ein analoger sequentieller Prozess definiert (vgl. Abb. 4-27). Hierfür wurden in der GUI die nach festgelegtem Spann- und Fügekonzept der Serienanlage als einseitige und als doppelseitige Spanner (Clamps) sowie als Fügepunkte (Joins) definiert. Die Software erkennt dabei automatisch, welche Bauteile sich im Wirkungsbereich der jeweiligen Punkte auf Basis von deren festgelegten Koordinaten befinden. Über einen Parameter ΔN können zusätzlich die Endpositionen der Spann- und Fügepunkte analog zum Vorgehen beim manuellen Einstellen der Fügeanlage im Serienprozess angepasst werden (vgl. Kapitel 2.8). Im

initialen Aufbau der Fugesimulation wurden die Endpositionen der Spann- und Fügepunkte nominal belassen ($\Delta N = 0$). Die Fügefolge wurde dann, angelehnt an den Serienprozess, in zwei Schritten umgesetzt. Punktuelle Fügeverfahren wie das Widerstandspunktschweißen induzieren neben den mechanischen Deformationen der Fügezange zusätzliche thermische Spannungen durch Wärmeeinbringung während des Schweißprozesses. Der dabei entstehende Verzug kann in der Assembly Version durch ein mechanisches Ersatzmodell berücksichtigt werden, indem definierte Dehnungen im Wirkungsbereich der Fügezange induziert werden (vgl. Kapitel 2.9.7). Dabei wird der Verzug selbst auf den Vorgang des Schrumpfens des Werkstoffs beim Abkühlen des Fügepunkts reduziert. Da beim Clinchen der Baugruppe aber ausschließlich mechanische Spannungen in die Bauteile eingebracht werden, wird darauf an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

Unabhängig von der Art des vorliegenden Punktfügeverfahrens werden die Fügeverbindungen selbst durch neu entwickelte Koppelemente abgebildet. Ein solches Koppelement verbindet jeweils die 3 Knoten des Dreieckschalenelements des oberen Bauteilnetzes mit den 3 Knoten des Dreieckschalenelements des unteren Bauteilnetzes durch Stabelemente im Kontaktbereich beider Bauteile. Dadurch werden jeweils 3 translatorische Freiheitsgrade der Bauteilnetze zueinander eingeschränkt. Zusätzlich werden die 3 rotatorischen Freiheitsgrade der jeweiligen Knoten zueinander eingeschränkt. Diese Verbindungselemente werden unter Berücksichtigung der Blechdickenreduktion bei geschlossenen Fügebacken erzeugt. Der Vorteil hierbei liegt darin, dass die Bauteilnetze vorher nicht in einem weiteren Inkrement aufeinander angepasst werden müssen (kein Remeshing), wie es bspw. bei der vorgestellten Methode von [Eck12] der Fall ist. Auf diese Weise lässt sich ein durch das Daten-Mapping auftretender Daten- und Genauigkeitsverlust (vgl. Kapitel 2.9.8) vermeiden. Nach dem Fügeprozess wurde die Baugruppe wieder in das Fahrzeugkoordinatensystem transformiert (zur Berücksichtigung der Schwerkraftwirkrichtung in der Messvorrichtung) und eine Rückfederungsberechnung durchgeführt. Anschließend konnten neben der Rückfederung auch die während des Spannens auftretenden Kräfte in den Spannbacken ausgewertet werden. In einer Übersicht können in der GUI auf diese Weise Spanner identifiziert werden, welche eine definierte maximal zulässige Spannkraft überschreiten. In diesem Fall sollte das Spann- und Fixierkonzept des UZSB überarbeitet werden. Zum bestmöglichen Abgleich des simulierten Rückfederungsergebnisses mit Bauteilen aus der Produktion wurde das Rückfederungsmodell nach dem Prinzip des *Constrained Springback* verwendet (vgl. Kapitel 2.9). Analog zur Konstellation der realen Serienmessaufnahme des

UZSB und ZSB wurden dazu im *Constrained Springback* Simulationsmodell die vier Aufnahmekugeln der Serienmessaufnahme (vgl. Abb. 4-41) als einseitige Spanner definiert. Die beiden Positionierstifte wurden direkt in der GUI erzeugt.

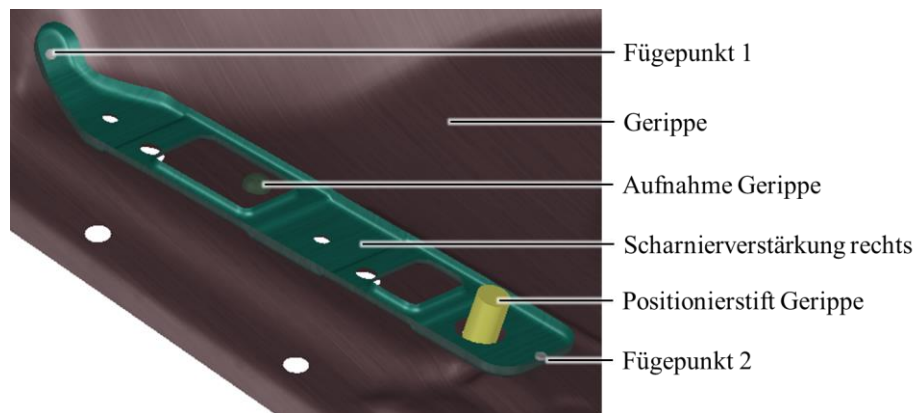


Abb. 4-32: Prinzipieller Simulationsaufbau nach Prinzip des *Constrained Springback* zur Berechnung der Rückfederung des UZSB nach der Füg simulation.

Anschließend wurde das rückgefederte Bauteilnetz des Innenteils aus der Füg simulation und ein gescanntes Bauteilnetz aus der Produktion mithilfe der Software GOM Inspect mit den nominalen CAD-Daten des Innenteils verglichen und beide Ergebnisse gegenübergestellt (vgl. Abb. 4-33).

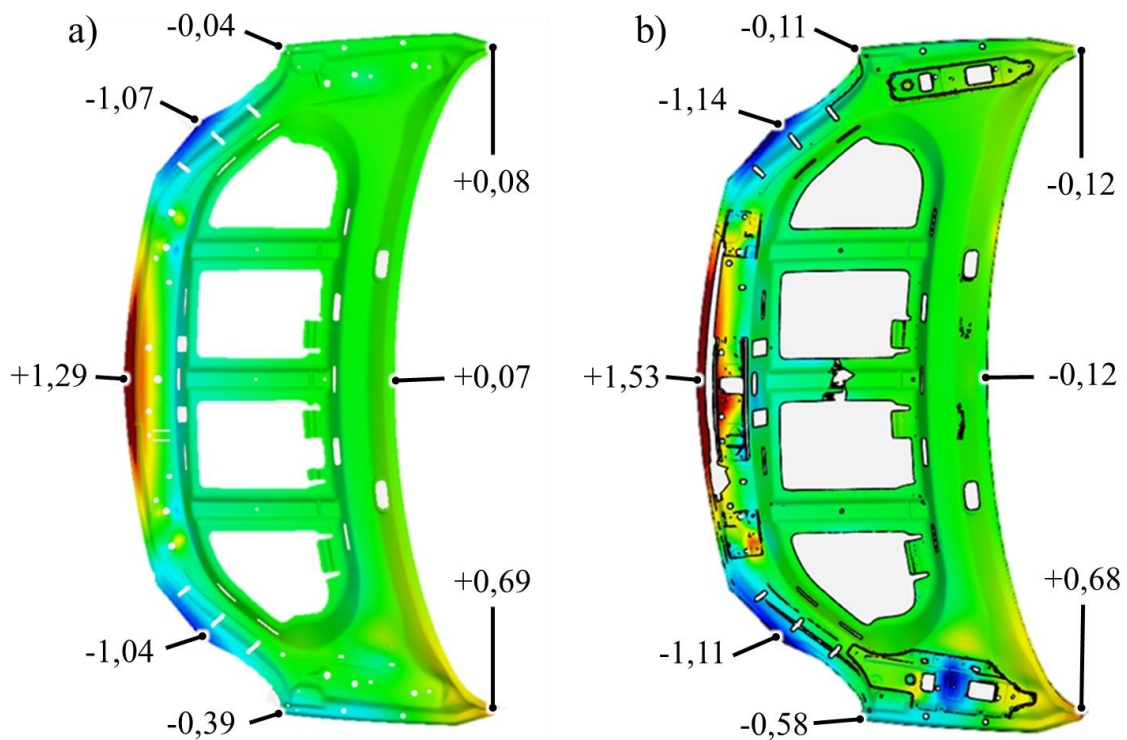


Abb. 4-33: Gegenüberstellung der Rückfederungsergebnisse des UZSB mit allen Verstärkungsteilen aus der a) Füg simulation (ohne Darstellung der Verstärkungsteile) und dem b) realen Bauteilscan mithilfe der Serienmessaufnahme.

Beim Vergleich der Ergebnisse aus der Fügesimulation mit den Messwerten des Scans konnte eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt werden. Die Tendenz der Rückfederungsrichtung wurde dabei in nahezu allen Bauteilzonen zufriedenstellend abgebildet. Der Betrag der Rückfederung wurde in der Simulation im Durchschnitt lediglich um etwa 15% unterschätzt, sodass an dieser Stelle auf eine weitere Optimierung des Fügeprozesses verzichtet wurde. Das Ergebnis der Fügesimulation des UZSB kann anschließend wie auch die zuvor eingelesenen Simulationsergebnisse der Einzelteilumformung als ASM-File für die Falzsimulation des ZSB exportiert werden.

4.4 Falzsimulation des Zusammenbaus

Wie bereits in Kapitel 4 beschrieben werden reale Versuchsbedingungen angestrebt, die einen Abgleich aller durchgeführten Simulationsschritte (vgl. Abb. 4-1) mit den Herstellungsprozessen der Versuchsbaugruppe ermöglichen. Dazu wird in diesem Kapitel eine Versuchsfalzzelle konzipiert und unter Laborbedingungen betrieben mit der sich Maßabweichungen des ZSB analysieren lassen. Anschließend wird der konzipierte Falzprozess in der Falzsimulation modelliert und mit einem Bauteilscan der Versuchsfalzzelle abgeglichen.

4.4.1 Aufbau einer seriennahen Versuchsfalzzelle

Die Versuchsfalzzelle am Institut für Umformtechnik bestand aus einem Industrieroboter mit angebundenem Falzkopf und einem Falzbett mit aufgelegtem Niederhalter (vgl. Abb. 4-34).

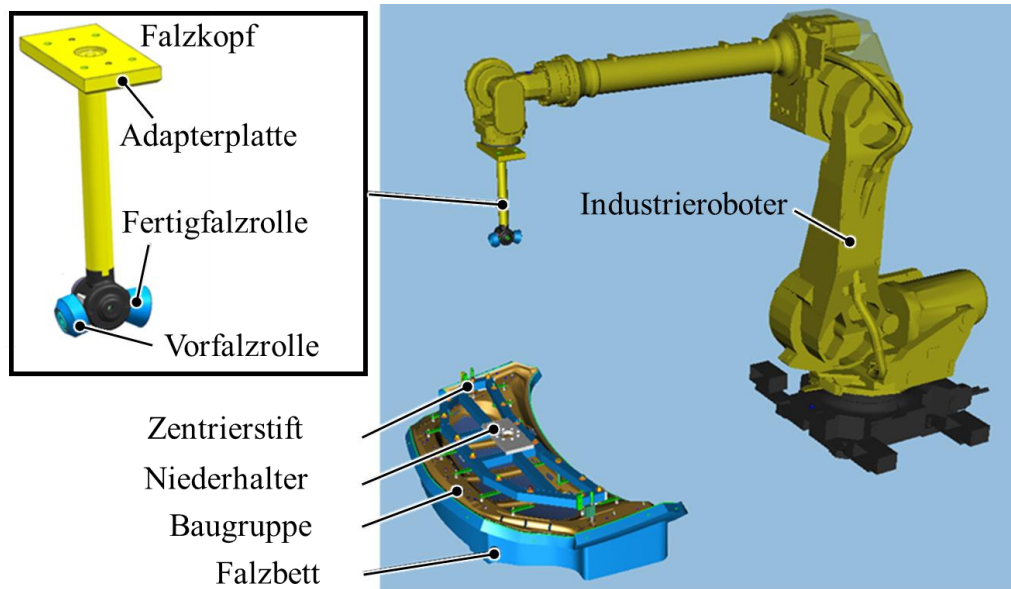


Abb. 4-34: Versuchsaufbau zum Rollfalzen des untersuchten Motorhauben-ZSB unter Laborbedingungen.

Der verwendete Falzkopf wurde mit einer Vor- und einer Fertigfalzrolle analog der im Serienbetrieb eingesetzten Konstellation versehen. Die Anbindung des Falzkopfes an den verfügbaren

Industrieroboter R-2000iA der Firma Fanuc wurde über eine eigens hierfür angefertigte Adapterplatte realisiert. Die Vorgehensweise beim Falzen mithilfe der Falzzelle im Laborbetrieb erfolgte schrittweise durch manuelles Einlegen und Ausrichten der Komponenten. Zunächst wurde die Außenhautbeplankung mit schwenkbaren Anschlägen in das Falzbett eingelegt. Das Schachteln des UZSB mit der Außenhaut erfolgte manuell im Falzbett selbst. Anschließend wurde der Niederhalter mithilfe von Zentrierstiften auf das Gerippe des UZSB positioniert. Da das Eigengewicht des Niederhalters nicht hoch genug war, um die Baugruppe ausreichend zu verspannen, wurden die Eckbereiche mechanisch fixiert, um ein Verrutschen während des Falzprozesses zu verhindern (vgl. Abb. 4-37).

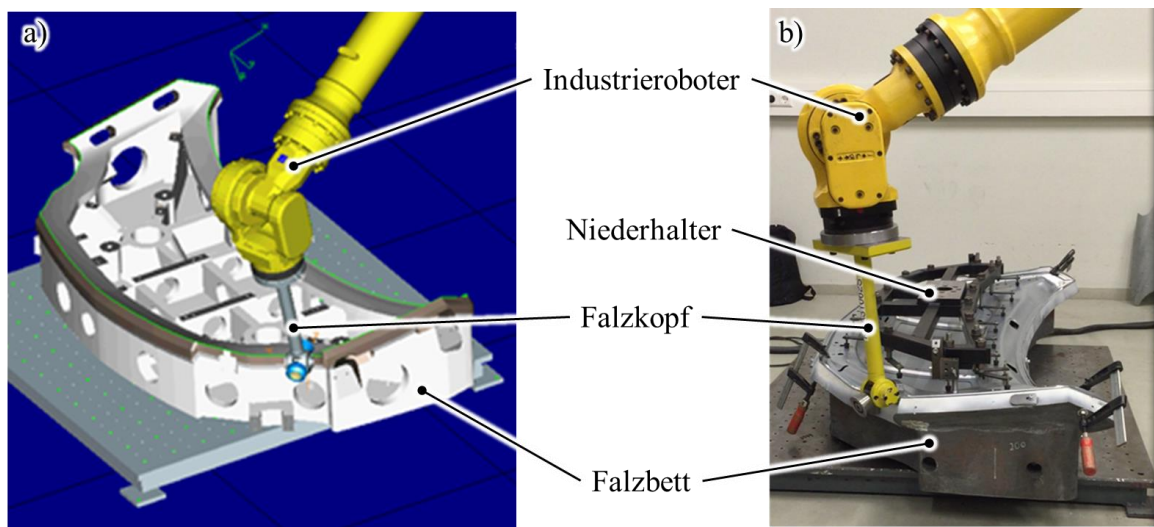


Abb. 4-35: a) Virtueller Falzprozess des ZSB (in Tecnomatix Process Simulate) sowie b) realer Prozess in der Versuchszelle.

Im Unterschied zum Produktionsprozess mit zwei parallel arbeitenden Falzrobotern wurde beim Versuchsaufbau im Labor lediglich mit einem Roboter gefalzt. Dazu wurde mit der Siemens PLM Software Tecnomatix Process Simulate der Falzprozess mithilfe der zur Verfügung stehenden CAD-Daten aufgebaut (Offlineprogrammierung). Hierbei wurde die Position des Roboters relativ zum Falzbett erfasst und im Programm hinterlegt, sodass der ZSB ohne den Einsatz eines Drehtisches kollisionsfrei gefalzt werden konnte. Die Falzbahn wurde anschließend auf Basis der Geometrie des Falzbettumrisses abgeleitet und die Roboterkinematik auf Basis der technologisch erforderlichen Rollenanstellwinkel und der Arbeitsrichtung definiert. Der ZSB wurde im Versuchsaufbau analog zum Serienprozess in drei Falzoperationen gefügt, zwei Vorfalzoperationen mithilfe der Vorfalzrolle sowie einer finalen Fertigfalzoperation mithilfe der Fertigfalzrolle (vgl. Abb. 4-36). Dabei wurde die Vorfalzrolle bei der Vorfalzoperation1 mit 60° Restöffnungswinkel im Uhrzeigersinn entlang des Falzbettumrisses geführt. An-

schließlich wurde die Vorfalzrolle auf 30° Restöffnungswinkel angestellt und gegen den Uhrzeigersinn entlang des Falzbettumrisses zurückgeführt (Vorfalzen2). Schließlich wurde der Falzkopf gedreht und der Flansch mithilfe der Fertigfalzrolle im Uhrzeigersinn geschlossen (Fertigfalzen).

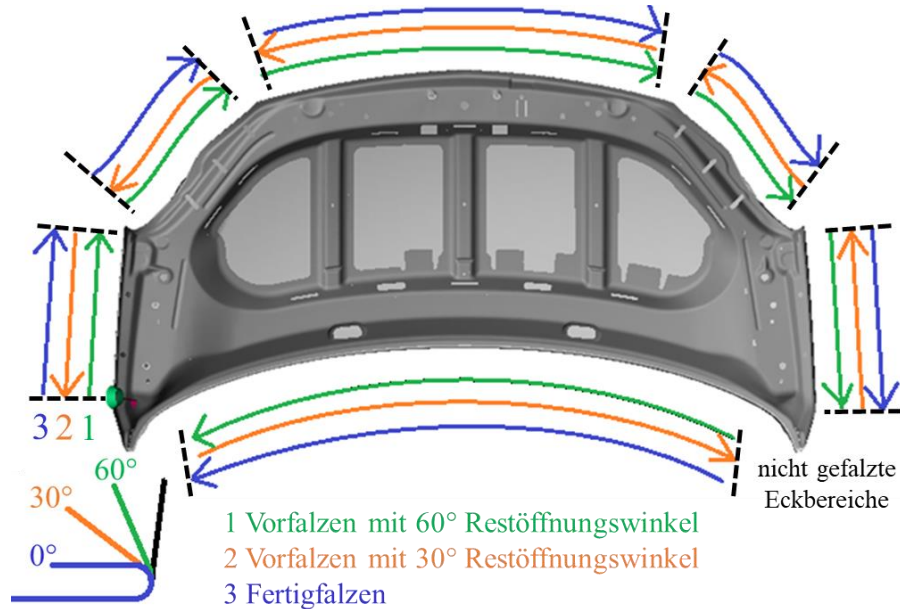


Abb. 4-36: Falzprozess im Versuchsaufbau mit den Operationen Vorfalzen1, Vorfalzen2 und Fertigfalzen.

Für die Umsetzung eines stetigen Übergangs des Flansches musste der Falzkopf während des Falzprozesses in den Eckbereichen abgesetzt und an der nächstmöglichen Position wieder an den abgekanteten Flansch der Außenhaut angestellt werden. Außerdem musste eine Kollision mit dem Niederhalter vermieden werden. Die offline programmierte Falzbahn wurde anschließend online in der Falzzone implementiert (Teachen des Falzpfades), indem diese in die Steuerung des Industrieroboters übertragen wurde. Anschließend wurden die Roboterkinematik mithilfe der Handsteuerung entlang des Falzbettumrisses zunächst ohne Baugruppe geprüft und mögliche Abweichungen zu den CAD-Daten oder Ungenauigkeiten des Roboters manuell nachprogrammiert.

Um den Falzflansch rundum vollständig zu schließen und eine feste Verbindung des ZSB sicherstellen zu können, musste ein definierter Druck auf den Flansch mithilfe der Falzrollen aufgebracht werden. Dieser Druck ist von der Auslenkung des Roboterarms, der Winkelstellung der Rotationsachsen und der Steifigkeit des Roboters abhängig. Daher musste in jenen Bereichen, in denen das Rückstellmoment des Flansches größer ist als der durch die ursprünglich festgelegte Falzbahn generierte Druck, nachjustiert werden, um den Falzflansch vollständig umzulegen. Für diese Nachjustierung musste die zu falzende Baugruppe in das Falzbett eingelegt werden, um den Widerstand des Flansches mit zu berücksichtigen und um eine Kollision

des Falzkopfs mit dem Falzbett zu vermeiden. Dieser Schritt erfolgte daher nicht während des oben erwähnten Teachens, sondern zu einem späteren Zeitpunkt mit eingelegter Baugruppe.

4.4.2 Aufbau der Falzsimulation

Der Versuchsaufbau der Falzzelle muss nun in die Falzsimulation überführt werden. Dazu wurde ebenfalls ein Softwarecode von der Firma AutoForm entwickelt und bereitgestellt. Diese Softwareversion AutoForm^{plus} Forming R7.1 Beta ermöglicht die Berücksichtigung multipler elastischer Innenteile, deren Umformung in Kapitel 4.2 und Fügeoperationen in Kapitel 4.3 beschrieben wurden. Die Funktionalität im Aufbau der Falzmethode und der Auswertung ist dabei an die HemPlanner-Software angelehnt, welche bereits innerhalb von AutoForm^{plus} R7 integriert wurde.

Für den Aufbau der Falzsimulation wurde der in Kapitel 4.4.1 beschriebene Falzprozess der Versuchsfalzzelle unter Laborbedingungen herangezogen und der Falzvorgang in der Simulation modelliert.

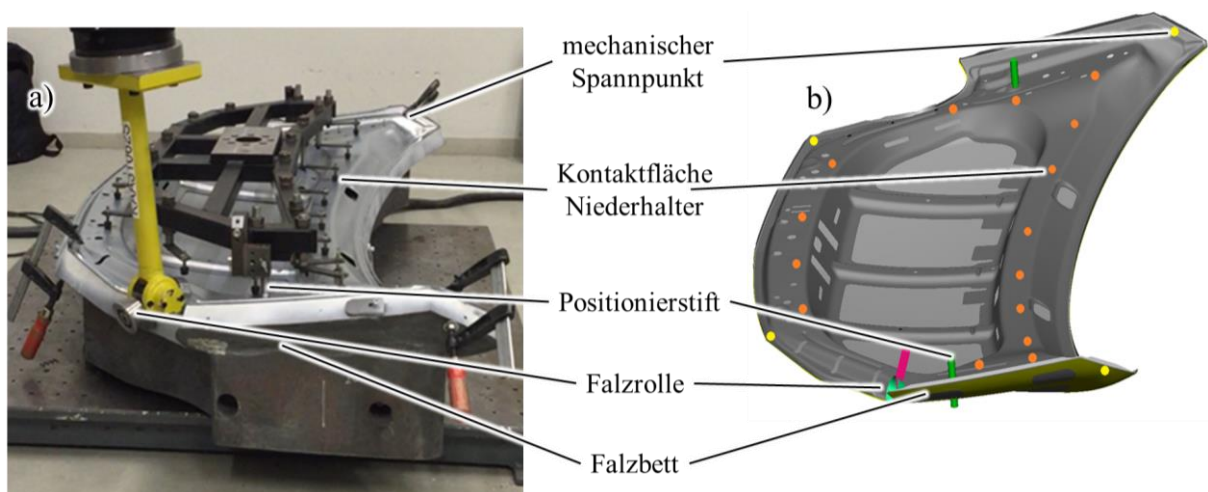


Abb. 4-37: Überführung des Falzprozesses von a) der Versuchsfalzzelle in b) die Falzsimulation.

Die Kontaktflächen des aufgelegten Niederhalters wurden in der Simulation als einzelne, einseitig wirkende Spannungspunkte definiert, die mit einer Kraft von jeweils 20N auf den UZSB in Schwerkraftwirkrichtung wirken (dargestellt als orangefarbene Punkte Abb. 4-37 b). Dabei wurde das Eigengewicht des Niederhalters auf die insgesamt 15 Auflagepunkte homogen verteilt. Analog dazu wurden die Spannungspunkte der mechanischen Spannungspunkte abgeleitet (gelbe Punkte Abb. 4-37 b), die in Falzbett-Normalen-Richtung auf den UZSB mit jeweils 50N wirken. Die Wirkung der Flächenpressung der Auflagepunkte des Niederhalters und der mechanischen Spannungspunkte wurde somit durch eine Kraftwirkung auf einzelne Elementknoten der Bauteilnetze modelliert. Die Positionierstifte dienen zur definierten Positionierung des Niederhalters auf dem ZSB.

Die Vor- und Fertigfalzrolle wurden analog der realen Rollengeometrien des Falzkopfs modelliert und in der Simulation abgebildet (vgl. Abb. 4-38).

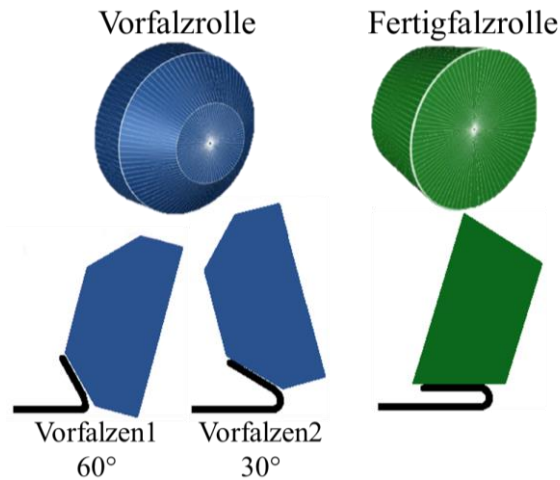


Abb. 4-38: Abgeleitete Rollengeometrien und Anstellwinkel in der Falzsimulation des ZSB.

Zur Definition der Falzbahn wurde der Falzflansch in sechs Bereiche segmentiert. Durch diese Segmentierung kann die Falzkopfkinematik beim Eintauchen und Absetzen in den Eckbereichen adäquat modelliert werden.

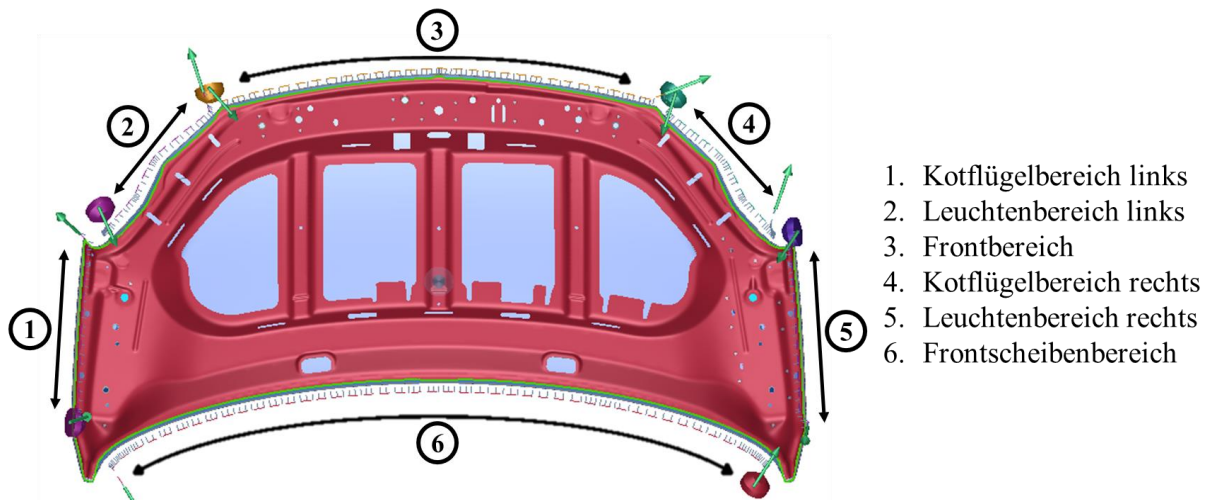


Abb. 4-39: Einteilung der Flanschbereiche für die Bahnplanung des Falzkopfes.

Im Vergleich zu den Umformsimulationen der Einzelteile und der Fügesimulation des UZSB benötigt die Simulation des Rollfalzens des ZSB die höchste Rechenzeit, da für dieses Modell eine sehr hohe Anzahl an Elementen notwendig ist und zur Abbildung der inkrementellen Umformung beim Rollfalzen viele Zeitschritte berechnet werden müssen. Zur Rechenzeitverkürzung wurden aus diesem Grund alle sechs Flanschbereiche gleichzeitig gefalzt und nicht wie im realen Prozess an der Versuchsanlage umlaufend die Bereiche nacheinander sequentiell gefügt (vgl. Abb. 4-36). Das entspricht somit einem Falzprozess mit sechs gleichzeitig arbeitenden Falzrobotern. Durch diese Vereinfachung wurde die Rechenzeit um ca. 40% verkürzt. Auf

diese Weise konnte die gleiche Ergebnisqualität wie beim Falzprozess mit einem arbeitenden Falzroboter erreicht werden. Diese Vorgehensweise konnte somit ohne Einschränkungen im Rahmen dieser Arbeit angewandt werden.

Die Falzbahn wurde in der GUI virtuell vom räumlichen Verlauf der Außenkante des Falzbetts abgeleitet. Die Abbildung der Rollenkinematik bzw. Falzbahn wurde unter Verwendung zweier Koordinatensysteme realisiert (vgl. Abb. 4-40), deren Notwendigkeit im Folgenden kurz dargestellt wird.

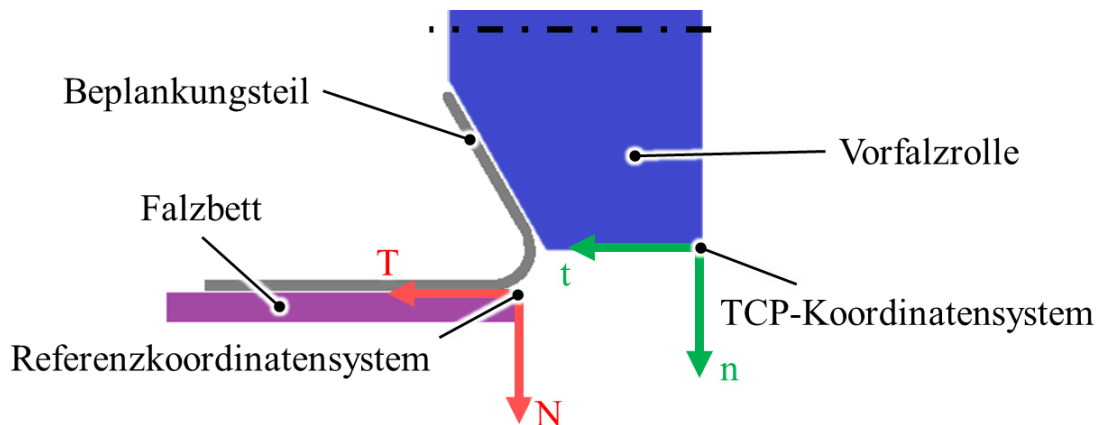


Abb. 4-40: Umsetzung der Rollenkinematik in der Falzsimulation mit Referenz- und TCP-Koordinatensystem.

Der Restöffnungswinkel und die Rollenanstellung am Flansch entlang einer Falzbahn wird global über das Referenzkoordinatensystem festgelegt. Der Ursprung des Referenzkoordinatensystems liegt deshalb direkt auf der Falzbahn und verläuft tangential zum Oberflächenverlauf des Falzbetts. Über die Definition von Stützpunkten auf der Falzbahn kann die Rollenanstellung und der Restöffnungswinkel nun anschließend lokal über das TCP-Koordinatensystem der Falzrolle angepasst werden. Auf diese Weise kann der Falzauslauf und -einlauf in den Eckbereichen realitätsnah modelliert und die Zustellung der Falzrolle zum Ausgleich des Falzverlusts lokal angepasst werden.

Die Rückfederungsberechnung wird in der Softwareversion AutoForm^{plus} Forming R7.1 Beta mithilfe der Definition verschiedener FBC realisiert (vgl. Kapitel 2.9.6). Diese Zwangsbedingungen wurden analog zu den an der Serienmessaufnahme entsprechenden Auflageflächen, Positionierstifte und Auflagekugeln modelliert (vgl. Abb. 4-41). Dafür wurden Translationen von Knotenelementen des Gerippes in den Bereichen der Auflageflächen und -kugeln in der virtuellen Messaufnahme in z-Richtung und in unmittelbarer Nähe der Positionierstifte in x-, y- und z-Richtung eingeschränkt.

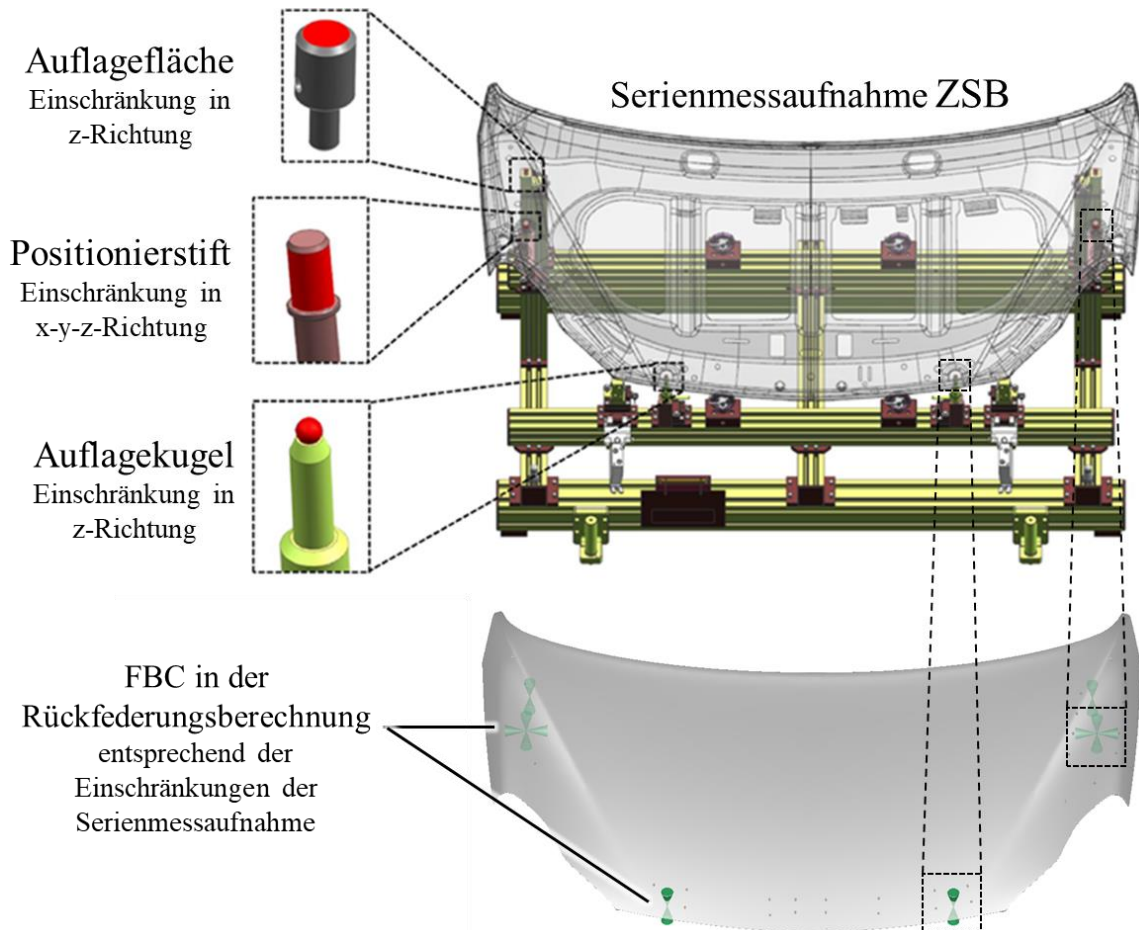


Abb. 4-41: Messaufnahme des ZSB aus der Serienproduktion (oben) sowie das entsprechende virtuelle Abbild (unten).

Die Abfolge in der Fugesimulation beinhaltet folgende Einzelschritte:

- Einlegen der Außenhaut unter Schwerkrafteinwirkung in das Falzbett
- Einlegen des USZB unter Schwerkrafteinwirkung und unter Berücksichtigung der Randbedingungen der Positionierstiften in die Außenhaut (Schachteln)
- Spannen der Baugruppe in den zuvor festgelegten Spannungspunkten
- Falzen der Baugruppe in allen Flanschbereichen gleichzeitig in drei aufeinanderfolgenden Schritten (Vorfalzen 1 mit 60° Restöffnungswinkel, Vorfalzen 2 mit 30° Restöffnungswinkel und Fertigfalzen)
- Rückfederungsberechnung in Fahrzeuglage unter Berücksichtigung der Schwerkraft und der Lagerungsbedingungen der virtuellen Messaufnahme

4.4.3 Abgleich des Rückfederungsergebnisses des ZSB aus der Falzsimulation mit einer gescannten Versuchsbaugruppe

Zum Abgleich des Rückfederungsergebnisses des ZSB aus der vorgestellten Falzsimulation mit einer gescannten Versuchsbaugruppe wurde ein USZB aus der Serienfertigung entnommen und

unter Laborbedingungen auf der Versuchsanlage im Labor mit einer Außenhaut gefalzt. Anschließend wurde dieser ZSB mithilfe der Serienmessaufnahme optisch vermessen und das Rückfederungsergebnis mit der Falzsimulation verglichen. Die Gegenüberstellung dieses Vergleichs ist in Abb. 4-42 dargestellt. Ausgesparte Flächenbereiche im Bauteilscan des ZSB (Abb. 4-42 b) wurden im robotergeführten Messprogramm nicht vom Streifenprojektionsscanner erfasst. Die Auswertung der Rückfederung erfolgte hauptsächlich am Umriss der Baugruppenkontor zur Einhaltung der Einbautoleranzen zu anderen Baugruppen in der Karosserie.

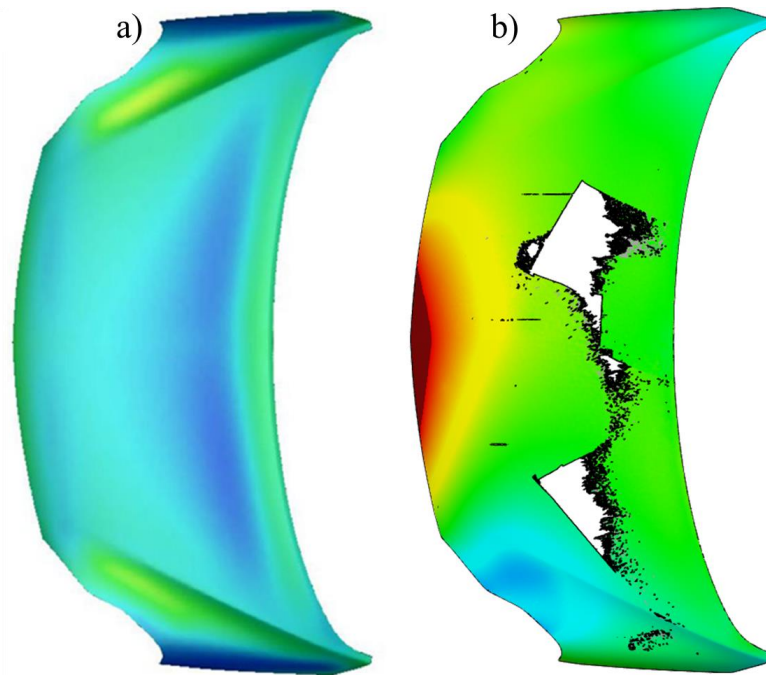


Abb. 4-42: Gegenüberstellung der Rückfederungsergebnisse des ZSB aus der a) Falzsimulation und dem b) Scan der optischen Vermessung des ZSB.

In der jeweiligen Auswertung der Rückfederung des ZSB konnte keine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Falzsimulation und dem Bauteilscan festgestellt werden. Der gescannte ZSB zeigte deutliche Abweichungen zum Rückfederungsergebnis der Falzsimulation. Da die zuvor berechneten Rückfederungsergebnisse der Einzelteile und des UZSB in Betrag und Richtung sehr gut mit den jeweiligen Bauteilmessungen übereingestimmt haben, sind die deutlichen Abweichungen offensichtlich aus dem Blickwinkel der Rollfalzsimulation zu analysieren und zu bewerten.

Wie in Abb. 4-43 dargestellt, zeigte das Ergebnis der Falzsimulation des ZSB ein qualitativ ähnliches Rückfederungsverhalten wie das Ergebnis der Rückfederungsberechnung der Außenhautbeplankung. Der Einfluss der Innenbaugruppe (UZSB) auf die Maßhaltigkeit des ZSB wurde dabei jedoch nicht sichtbar und lässt einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Gesamtrückfederungsergebnis des gefalzten ZSB vermuten.

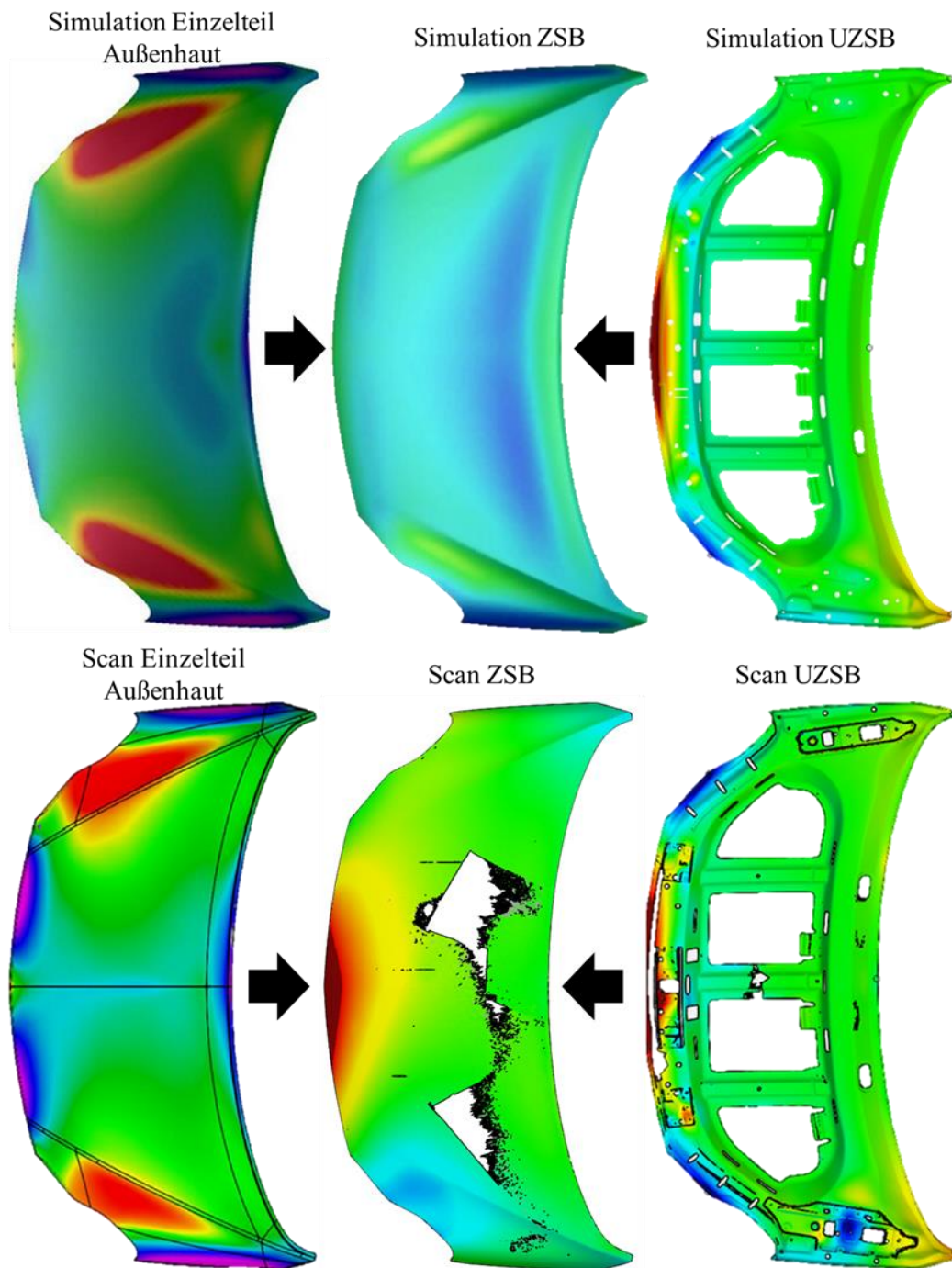


Abb. 4-43: Gegenüberstellung der jeweiligen Rückfederungsergebnisse der Einzelteile Außenhaut, ZSB und UZSB (v.l.n.r.) aus der PKS (oben) und den Bauteilscans (unten).

Dieses Ergebnis erscheint jedoch auf Basis von Erfahrungswerten aus der Praxis nicht plausibel, was wiederum die gescannten Bauteile bestätigt haben. Die Rückfederung des realen ZSB zeigte hingegen eine qualitativ ähnliche Rückfederungstendenz wie der UZSB. Die Simulation hingegen zeigte einen tendenziell der Außenhaut zurechenbaren Einfluss. Der Einfluss der Einzelteilrückfederung der Außenhaut war hier kaum sichtbar. Das lässt darauf schließen, dass sich das Außenhautteil wie in der Arbeit von [Kae16] an die formstabilere Innenbaugruppe anlegt.

Für die Untersuchung der Abweichung der Rückfederungsergebnisse des simulierten ZSB wurde jeweils eine Baugruppe mit und eine Baugruppe ohne Verstärkungsteile auf der Versuchsfalzzelle gefertigt und optisch vermessen. Anschließend wurden stichprobenartig die Flanschlängen in definierten Schnitten (vgl. Abb. 4-44 rechts) gemessen und mit den Simulationsergebnissen verglichen (Tabelle 4-1).

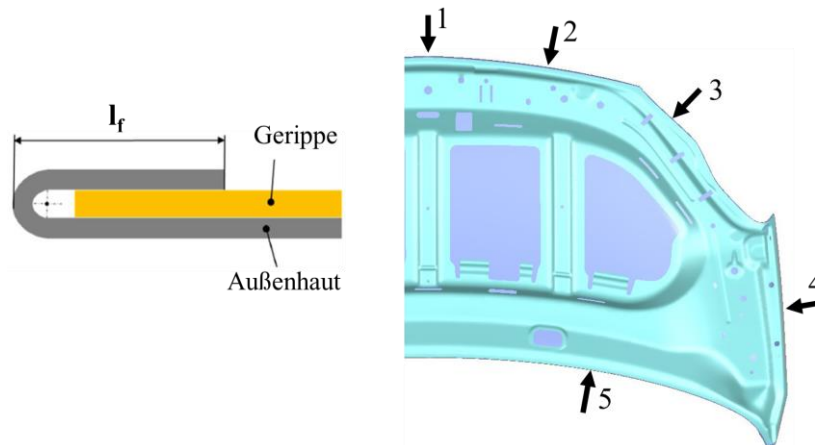


Abb. 4-44: Festlegung von Bauteilschnitten für die Flanschlängenauswertung eines ZSB mit und ohne Verstärkungsteilen.

Messpunkt	ZSB Versuch ohne Verstärkungsteile	ZSB Versuch mit Verstärkungsteilen	ZSB Simulation mit Verstärkungsteilen
1	3,44mm	3,48mm	3,90mm
2	7,21mm	7,15mm	7,31mm
3	7,60mm	7,63mm	7,45mm
4	6,80mm	6,89mm	7,20mm
5	6,69mm	6,64mm	7,00mm

Tabelle 4-1: Auswertung der Flanschlängen des ZSB nach dem Falzen in der Simulation und in den Versuchen.

Der Vergleich der Flanschlängen zeigte eine sehr gute Übereinstimmung des realen ZSB aus der Versuchsanlage zur Falzsimulation. Der Unterschied der Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung des Einflusses der Verstärkungen und denen ohne diese ist vernachlässigbar klein. Demnach haben die Verstärkungsteile keinen maßgeblichen Einfluss auf die Ausbildung der Flanschlängen. Tendenziell sind die in der Simulation berechneten Flanschlängen zwar etwas größer, konnten aber aufgrund der geringen Abweichung zu den realen Messergebnissen als Ursache für die erhebliche Abweichung der Falzsimulation zum gescannten ZSB offensichtlich ausgeschlossen werden.

Bei der Versuchsdurchführung konnte jedoch festgestellt werden, dass sich der Abstand der Außenkante des Gerippes zur Innenkante des abgekanteten Außenhautteils im geschachtelten Zustand nach Auflegen des Niederhalters verändert (vgl. Abstand **a** Abb. 4-45). Durch das Ei-

gengewicht des Niederhalters und das Verspannen der Baugruppe auf dem Falzbett wurde dieser Abstand verringert. Nach dem Falzprozess wurde beim anschließenden Öffnen der Spannzangen und Abheben des Niederhalters bereits ein deutliches Rückfederungsverhalten der Innenbaugruppe sichtbar. Dabei wurde der Umriss des gefalzten Außenhautteils kaum beeinträchtigt. Dieses Verhalten lässt darauf schließen, dass sich die Innenbaugruppe nach Entlastung trotz geschlossenem Falzflansch relativ zur Außenhaut verschieben kann. Dieses Verhalten führte in den Bauteilversuchen zu einer Vergrößerung des Abstands a der Außenkante des Gerippes zur Innenkante des abgekanteten Außenhautteils.

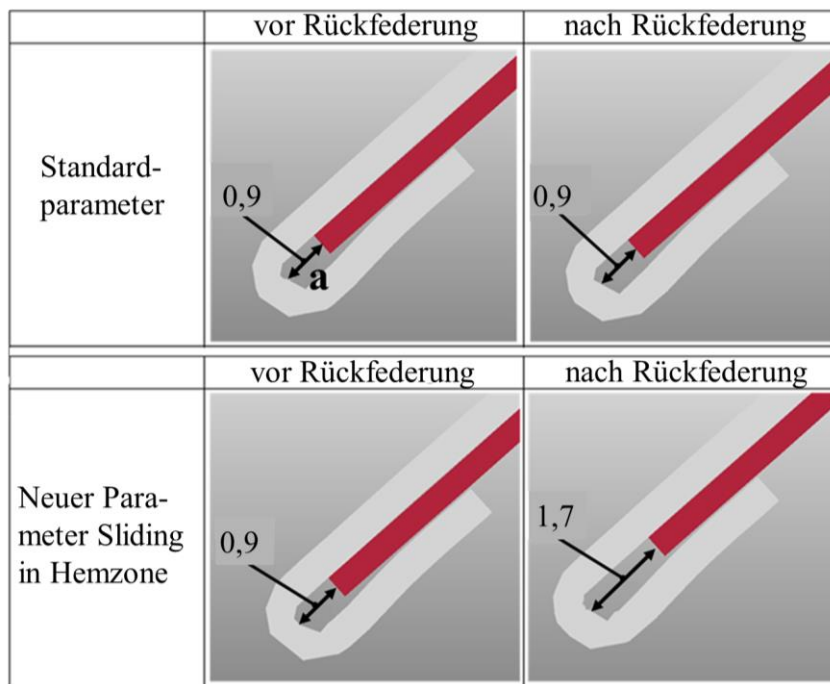


Abb. 4-45: Abstand der Außenkante des Innenteils zum Innenradius des Falzes mit Standardparameter (oben) und neu eingeführtem Parameter ‚Sliding in Hemzone‘ (unten).

Das beschriebene Spannen und Entspannen der Baugruppe auf der Versuchsanlage entspricht den beiden Zuständen vor und nach der Rückfederungsberechnung in der Falzsimulation. Bei der Erstellung der Baugruppenschnitte fiel in der Falzsimulation allerdings auf, dass dieser Abstand vor und nach der Rückfederungsberechnung konstant blieb (vgl. Abstand a bei Standardparameter AutoForm R7 Abb. 4-45 oben). In der Falzsimulation wurde demnach die Verschiebung der Innenbaugruppe innerhalb der Falzschlaufe verhindert. Diese Bewegungseinschränkung wird von der Software nach dem Fertigfalzen automatisch über Zwangsbedingungen hergestellt (vgl. Abb. 4-46 a). Da in der Baugruppe dadurch im Überlappungsbereich des Flansches mit der Innenbaugruppe eine starre Verbindung erzeugt wird, wirkt sich der Einfluss der Rückfederung des Außenhautteils deutlich stärker auf die Maßhaltigkeit des ZSB aus, als dies in der Realität der Fall war.

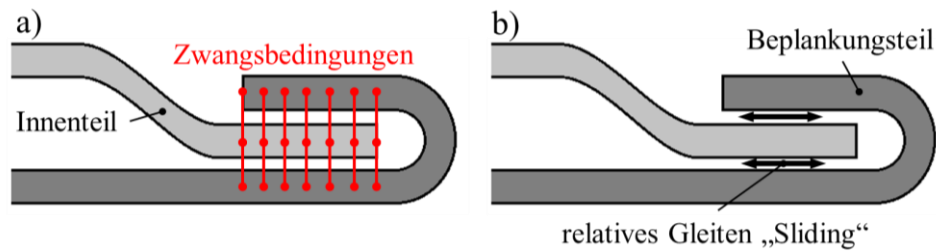


Abb. 4-46: a) Erzeugen von Zwangsbedingungen im Flanschbereich nach dem Fertigfalzen in der Simulation bei verwendetem Standardparameter und b) neuem Parameter ‚Sliding in Hemzone‘.

In Zusammenarbeit mit der Firma AutoForm konnte mit diesen Erkenntnissen ein neuer Simulationsparameter ‚Sliding in Hemzone‘ in der Falzsimulation eingeführt werden, der das Erzeugen solcher Zwangsbedingungen nach dem Fertigfalzen unterdrückt. Dadurch kann sich der UZSB im Falz während der Rückfederungsberechnung verschieben (vgl. Abstand a bei neuem Parameter ‚Sliding in Hemzone‘ Abb. 4-45 unten).

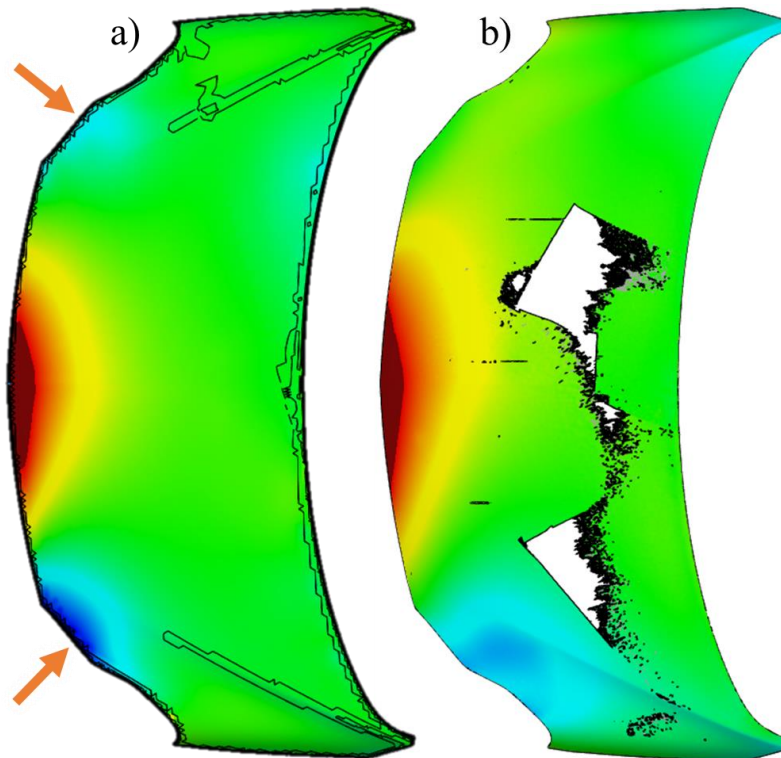


Abb. 4-47: Gegenüberstellung der Rückfederungsergebnisse des ZSB aus der a) Falzsimulation mit neuem Simulationsparameter ‚Sliding in Hemzone‘ und dem b) Bauteilsan.

Das Ergebnis der Rückfederungsberechnung der Falzsimulation stimmt unter Verwendung des neuen Parameters sehr gut mit den realen Messwerten in Betrag und Richtung überein. Lediglich in den Kantenbereichen der Leuchten (orangefarbene Pfeile Abb. 4-47) sind geringe Unterschiede ($\sim 0,4\text{mm}$) zu erkennen. Im Fall der untersuchten Baugruppe konnte somit durch die Einführung des neuen Simulationsparameters eine deutlich verbesserte Übereinstimmung der vorgestellten Falzsimulation und damit der gesamten PKS mit den gescannten Bauteilen erzielt

werden. Trotz der Einführung des neuen Parameters in der Falzsimulation bleibt fraglich, ob das gänzliche Entfallen der Zwangsbedingungen von gefalztem Beplankungsteil zum UZSB für andere Karosseriezusammenbauten zu vergleichbar guten Ergebnissen führt.

4.5 Zusammenfassung des Aufbaus einer durchgängigen Prozesskettensimulation

Den Anspruch dieses Kapitels bildete der Aufbau einer durchgängigen PKS auf Basis mehrerer Pressteile, die zunächst zu einem UZSB und anschließend mit einem Beplankungsteil zum finalen ZSB gefügt werden. Dabei sollte die PKS ohne ein Remeshing der Bauteilnetze zwischen den einzelnen Simulationsschritten und den damit verbundenen Informationsverlust aufgrund des Daten-Mappings auskommen. Entsprechend den genannten Anforderungen konnte in diesem Kapitel am Beispiel des Motorhauben-ZSB des Opel Adam (Modelljahr 2013-2019) eine solche PKS entwickelt werden. In der Modellierung der PKS wurden dazu im Rahmen dieser Arbeit der Herstellungsprozess der Serieneinzelteile, des UZSB der Serienfügeanlage sowie des ZSB auf einer Versuchsfalzzelle berücksichtigt. Dazu wurden zunächst die rückfederungsbedingten Bauteilabweichungen der Serieneinzelteile ermittelt (vgl. Kapitel 4.1), welche als Referenz für die Absicherung der Umformsimulationen der Einzelteile (vgl. Kapitel 4.2) dienen. Dabei konnte eine gute Übereinstimmung der simulierten Rückfederungsergebnisse der Einzelteile mit den Referenzmessungen der realen Bauteile gezeigt werden. Anschließend wurde der Fügeprozess der Serienfügeanlage mithilfe einer neuen Software der Firma AutoForm modelliert und mit einem gescannten UZSB der Serienproduktion abgeglichen (vgl. Kapitel 4.3). Da das verwendete Softwareprogramm auf Basis desselben FE-Codes beruht, konnten neben der berechneten Blechausdünnung und der plastischen Dehnung der Bauteile auch die in den Pressteilen herrschenden Eigenspannungen aus der Umformsimulation übertragen werden. Die berechneten Rückfederungsergebnisse des UZSB stimmten dabei sehr gut mit dem gescannten UZSB der Serienproduktion überein. Analog zur Fügesimulation wurde danach der ZSB in der Falzsimulation mit einer neuen Software modelliert (vgl. 4.4). Dabei konnte zunächst keine Übereinstimmung der realen Rückfederung des ZSB mit der Rückfederungsberechnung der Simulation festgestellt werden, da das Simulationsmodell das Entlastungsverhalten des UZSB im Überlappungsbereich der Falzschlaufe nicht richtig prognostiziert hat. Für eine realistische Berechnung der Rückfederung musste aus diesem Grund ein neuer Simulationsparameter eingeführt werden, mit dem dieses Verhalten richtig abgebildet werden konnte. Dadurch wurde eine deutliche verbesserte Übereinstimmung der berechneten Rückfederung der Falzsimulation und somit der gesamten PKS erzielt. Die angewandten Methoden zur Modellierung der PKS sind allgemein auf andere ZSB wie bspw. Türen und Klappen übertragbar.

Auf Basis der guten Prognosegenauigkeit der Rückfederung kann mithilfe der modellierten PKS nun im nächsten Kapitel der Einfluss von Bauteilabweichungen der Einzelteile auf die Maßhaltigkeit des ZSB untersucht werden.

5 Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile

Mithilfe der vorgestellten PKS soll grundsätzlich die Möglichkeit gegeben sein, große Maßabweichungen der in Kapitel 4.2 vorgestellten Einzelteile und deren Einfluss auf den ZSB numerisch untersuchen zu können, um eine wirtschaftliche Optimierung des Fertigungsprozesses der Fügeoperationen des UZSB bzw. des ZSB zu ermöglichen. Dadurch können Struktureffekte und Wechselwirkungen von Verstärkungsteilen in Großteilen untersucht und die lokale sowie globale Steifigkeit eines ZSB analysiert werden. Auf diese Weise lassen sich später lokale Bauteilbereiche der Einzelteile identifizieren (vgl. Kapitel 6.3), die mithilfe der neuen Kompensationsmethode (vgl. Kapitel 7) zur Verbesserung der Maßhaltigkeit des ZSB angepasst werden sollen.

Wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben, wurde die hier betrachtete Baugruppe in der Serienproduktion des Opel Adam gefertigt. Dafür wurden die Einzelteile kontinuierlich hinsichtlich deren Maßhaltigkeit und Robustheit gegenüber prozessbeeinflussenden Parametern (schwankende Werkstoffkennwerte, Produktionseinflüsse, Bedienereinfluss, etc.) geprüft. Entsprechende Robustheitsschriebe aus der Produktion in Form von stichprobenartigen Messberichten können Anhang 9.1 entnommen werden. Somit kann von einer hohen Bauteilqualität der Einzelteile ausgegangen werden. Da auf die Maßhaltigkeit der realen Außenhautbeplankung und des Gerippes in den Werkzeugen aufgrund der laufenden Produktion kein Einfluss genommen werden konnte, musste ein alternativer Weg umgesetzt werden, um den Einfluss solcher Maßabweichungen überprüfen zu können. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel numerisch mithilfe der PKS der Einfluss von Maßabweichungen der Verstärkungsteile auf das Rückfederungsergebnis des ZSB untersucht und anschließend in Kapitel 6 mittels realer Bauteilversuche abgesichert.

5.1 Versuchsplanung und Durchführung

Im Hinblick auf die Untersuchung des Einflusses dimensionaler Abweichungen einzelner Verstärkungsteile auf die Maßhaltigkeit des ZSB, werden die Verstärkungsteile zunächst mithilfe einer Umformsimulation reproduzierbar deformiert. Für die gezielte Verformung der Verstärkungsteile werden diese nach der Rückfederungsberechnung der Einzelteilumformsimulation (vgl. Kapitel 4.2.1) nachträglich mithilfe einer weiteren Umformsimulation deformiert. In diesen nachgeschalteten Simulationen werden Bauteilabweichungen derart erzeugt, dass diese außerhalb der festgelegten Formtoleranzen liegen sowie in einem Versuchswerkzeug zur Absicherung mittels realer Bauteilversuche (vgl. Kapitel 6.1) möglichst ähnlich abgebildet werden

können. Anschließend werden Fugesimulationen des UZSB bzw. ZSB mit Kombinationen aus nachträglich deformierten Verstärkungsteilen (Schlechtteilen) mit nichtdeformierten Gutteilen berechnet. Dazu wird mithilfe eines vollfaktoriellen Versuchsplans (vgl. Kapitel 2.10.1) der Umfang der durch die PKS abzubildenden Simulationskombinationen festgelegt (Tabelle 5-1).

Kombination	Puffer links	Puffer rechts	Schloss	Scharnier links	Scharnier rechts	
1	O	O	O	O	O	nur Gutteile
2	X	O	O	O	O	
3	O	X	O	O	O	
4	O	O	X	O	O	
5	O	O	O	X	O	1 Schlechtteil, 4 Gutteile
6	O	O	O	O	X	
7	X	X	O	O	O	
8	X	O	X	O	O	
9	X	O	O	X	O	2 Schlechtteile, 3 Gutteile
10	X	O	O	O	X	
11	O	X	X	O	O	
12	O	X	O	X	O	
13	O	X	O	O	X	
14	O	O	X	X	O	
15	O	O	X	O	X	
16	O	O	O	X	X	
17	X	X	X	O	O	3 Schlechtteile, 2 Gutteile
18	X	X	O	X	O	
19	X	X	O	O	X	
20	X	O	X	X	O	
21	X	O	X	O	X	
22	X	O	O	X	X	
23	O	X	X	X	O	
24	O	X	X	O	X	
25	O	O	X	X	X	4 Schlechtteile, 1 Gutteil
26	O	X	O	X	X	
27	X	X	X	X	O	
28	X	X	X	O	X	
29	X	X	O	X	X	nur Schlechtteile
30	X	O	X	X	X	
31	O	X	X	X	X	
32	X	X	X	X	X	

Tabelle 5-1: Vollfaktorieller Versuchsplan für die PKS zur Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile.

Nominale Gutteile der Verstärkungsteile werden in Tabelle 5-1 als „O“, Schlechtteile als „X“ markiert. Die rot umrandeten Kombinationen werden später mit realen Bauteilversuchen abgesichert (vgl. Kapitel 6). Bei insgesamt fünf Verstärkungsteilen mit je zwei Varianten (Gut- und Schlechtteil = 2 Stufen) werden also insgesamt $2^5=32$ Kombinationen mit der vorgestellten PKS berechnet (vgl. Formel (31), Seite 56). Folglich werden mit der in Kapitel 4 modellierten PKS alle möglichen ZSB-Kombinationen bestehend aus Gut- und Schlechtteilen der Verstärkungsteile berechnet. Dazu werden folgende Maßabweichungen numerisch in die Verstärkungsteile eingebracht

Durchbiegung in der Bauteilmitte (Kapitel 5.1.1)

- Scharnierverstärkung links
- Scharnierverstärkung rechts

- Schlossverstärkung

Bauteilverdrehung (Kapitel 5.1.2)

- Pufferverstärkung links
- Pufferverstärkung rechts

und die Rückfederungsergebnisse des ZSB der jeweiligen Kombination analysiert. Das Rückfederungsergebnis der Kombination 1 in Tabelle 5-1 (ausschließlich Gutteile) wurde bereits in Kapitel 4.4 vorgestellt und dient als Referenz, der alle anderen Rückfederungsergebnisse der Kombinationen 2-32 gegenübergestellt werden. Auf diese Weise lässt sich direkt der Einfluss einer oder mehrerer Schlechteile auf die Maßhaltigkeit des ZSB analysieren. Die in diesem Kapitel durchgeführte Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile folgt dabei folgendem Prozessablauf:

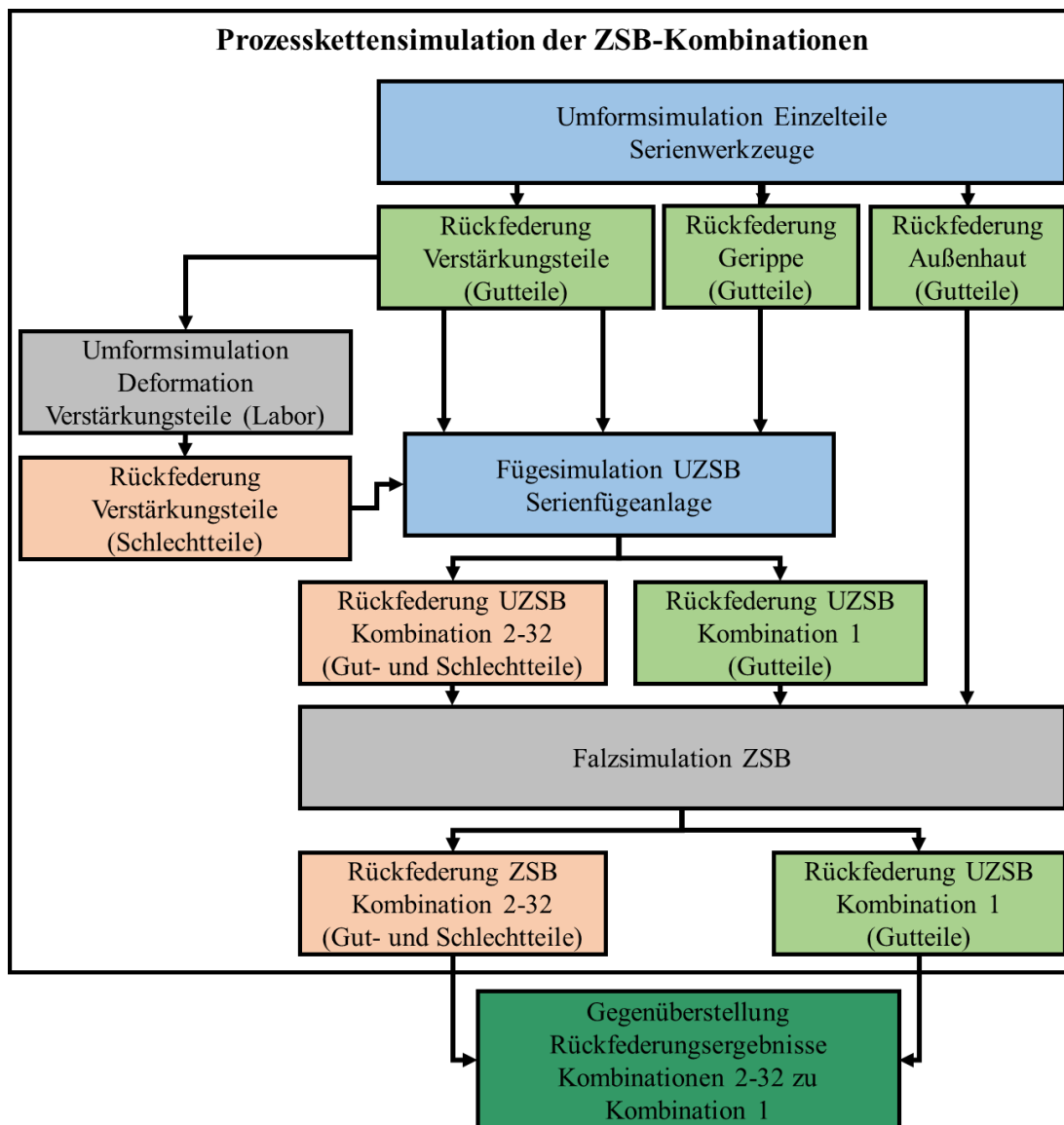


Abb. 5-1: Prozessablauf zur numerischen Untersuchung des Einflusses von Maßabweichungen der Verstärkungsteile auf den ZSB.

Wie in Abb. 5-1 dargestellt, können nun die aus den Simulationen der nominalen Gutteile (markiert als O in Tabelle 5-1) und der deformierten Schlechteile der Verstärkungen (markiert als X in Tabelle 5-1) erzeugten Rückfederungsergebnisse in Form von ASM-Files in das Simulationsmodell des Fügeprozesses importiert werden. Das ASM-File der Einzelteilsimulation mit dem Rückfederungsergebnis des Gerippes wird ebenfalls in das neue Modell importiert und für die anschließende Fügesimulation verwendet. Anschließend wird das Rückfederungsergebnis des UZSB zusammen mit dem Rückfederungsergebnis der Außenhaut (jeweils in Form eines ASM-Files) in die Falzsimulation übertragen und die Rückfederung des ZSB berechnet. Zur Erfassung statistischer Kennwerte werden am ZSB zur Bewertung der Rückfederung insgesamt 42 Messpunkte festgelegt. Diese liegen auf dem umlaufenden Flanschbereich des Gerippes (vgl. Abb. 5-2) und sind angelehnt an das Messprinzip der Serienmessung. Diese Messpunkte werden später auch bei der Vorstellung einer neuen Kompensationsmethode als Grundlage für die Meta-Modellbildung (vgl. Kapitel 7.3) verwendet.

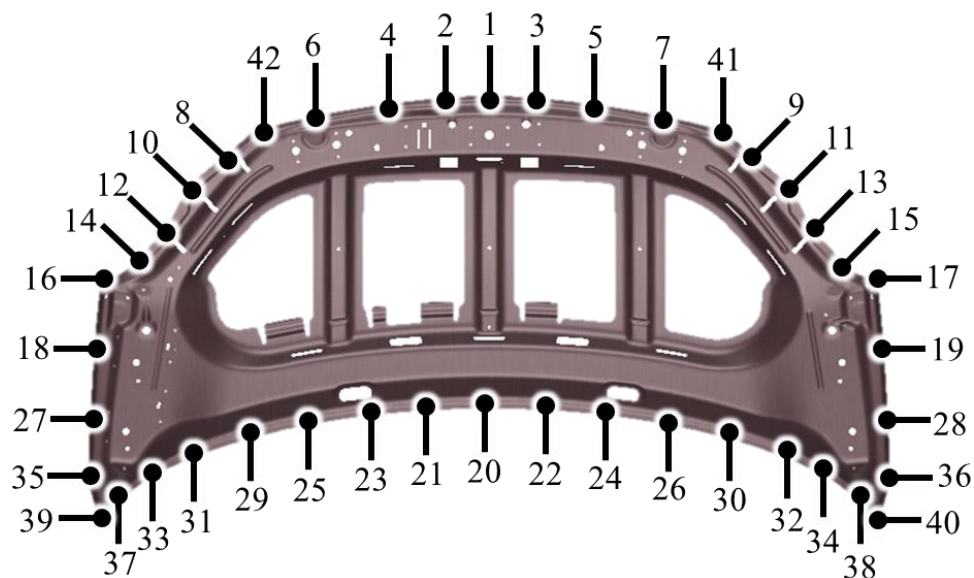


Abb. 5-2: Definierte Messpunkte für die Erfassung statistischer Kennwerte zur Charakterisierung der Maßhaltigkeit des ZSB (ohne Darstellung der Verstärkungsteile und der Außenhaut).

5.1.1 Erzeugen einer definierten reproduzierbaren Bauteildurchbiegung

Für die Erzeugung einer Durchbiegung der beiden Scharnierverstärkungen und der Schlossverstärkungen wurden die Bauteile auf einer Werkzeugaufnahme mittels zweier Spanner fixiert und mithilfe eines Stempels in ihrer Mitte plastisch verformt. Die Verstärkungen wurden dabei mit zwei Stiften zentriert, sodass trotz der Verformung die spätere Einlegeposition in der Serienfügestation sichergestellt werden konnte. Dadurch konnte eine geometrische Abweichung erzeugt werden, ohne die Einlegeposition in der Rohbauanlage zu verändern.

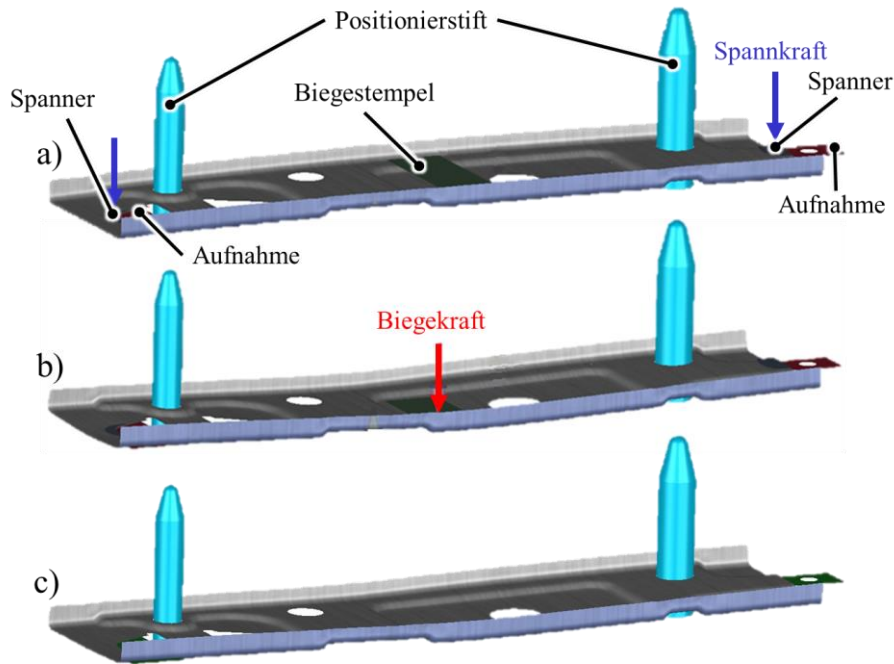


Abb. 5-3: Simulationsschritte für das Verbiegen der Schlossverstärkung: a) Spanner schließen, b) deformieren mit Stempel und c) Rückfederungsberechnung [Sch17].

Mithilfe der Simulation wurde die benötigte Eindringtiefe des Stempels zur Erzeugung einer plastischen Verformung außerhalb der festgelegten Bauteiltoleranzen ermittelt, die im späteren Versuchswerkzeug (vgl. Kapitel 6.1) umgesetzt werden soll.

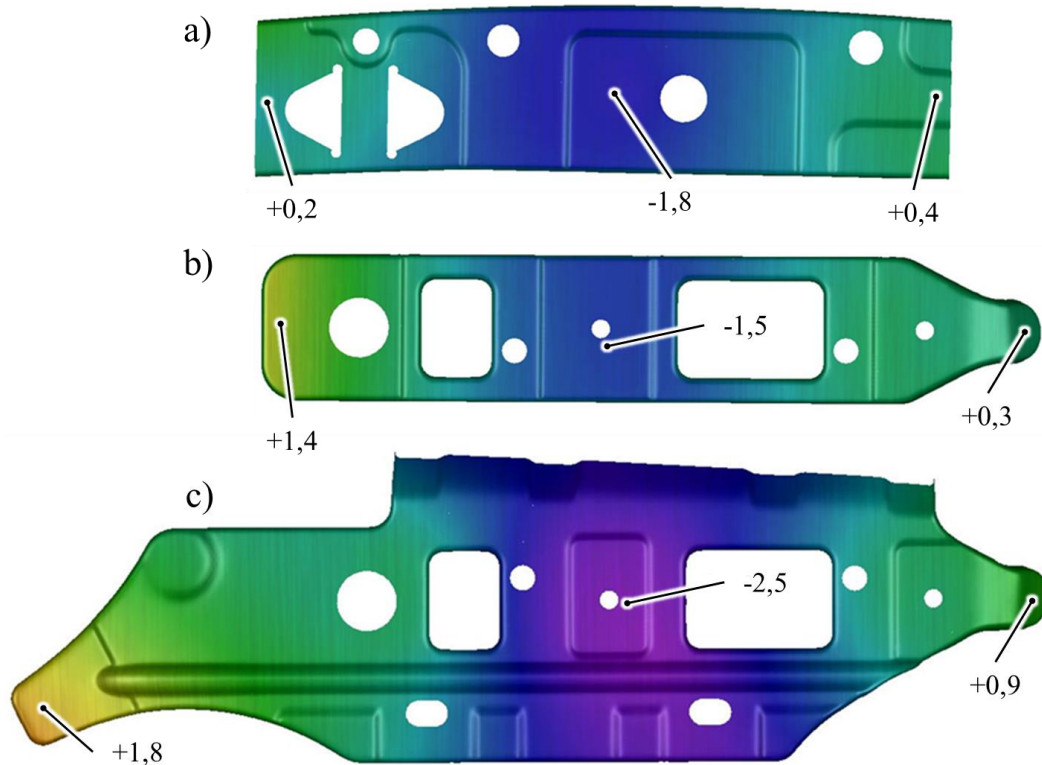


Abb. 5-4: Simulationsergebnisse der Biegedeformation der a) Schlossverstärkung, der b) Scharnierverstärkung rechts und der c) Scharnierverstärkung links (Abweichung zur Nominalgeometrie in [mm]).

Bei einer Eindringtiefe von 4 mm betrug die bleibende plastische Verformung der Scharnierverstärkung links in der Mitte 2,5 mm. Für die Scharnierverstärkung rechts betrugen die erzielten Abweichungen 1,5 mm und bei der Schlossverstärkung etwa 1,8 mm. Damit konnte bei diesen Verstärkungsteilen die gleiche Eindringtiefe des Stempels von 4 mm gewählt werden, um die erzeugten Bauteilabweichungen außerhalb der festgelegten Formtoleranzen zu erzeugen (vgl. Kapitel 4.1).

5.1.2 Erzeugen einer definierten reproduzierbaren Bauteilverdrehung

Die Erzeugung einer Verdrehung der beiden Pufferverstärkungen wurde nach ähnlichem Prinzip erzeugt, wie dies bei der Erzeugung einer plastischen Bauteildurchbiegung erfolgte. Die Bauteile wurden an zwei gegenüberliegenden Positionen gespannt (Abb. 5-5 a) und mittels Kraftaufbringung durch zwei Stempel am freien Bauteilrand deformiert (Abb. 5-5 b und c). Durch die außermittige Krafteinleitung wurde hierbei das Bauteil tordiert. Auch hierbei gewährleisteten zwei Positionierstifte das später reproduzierbare Einlegen der Bauteile in die Fügung.

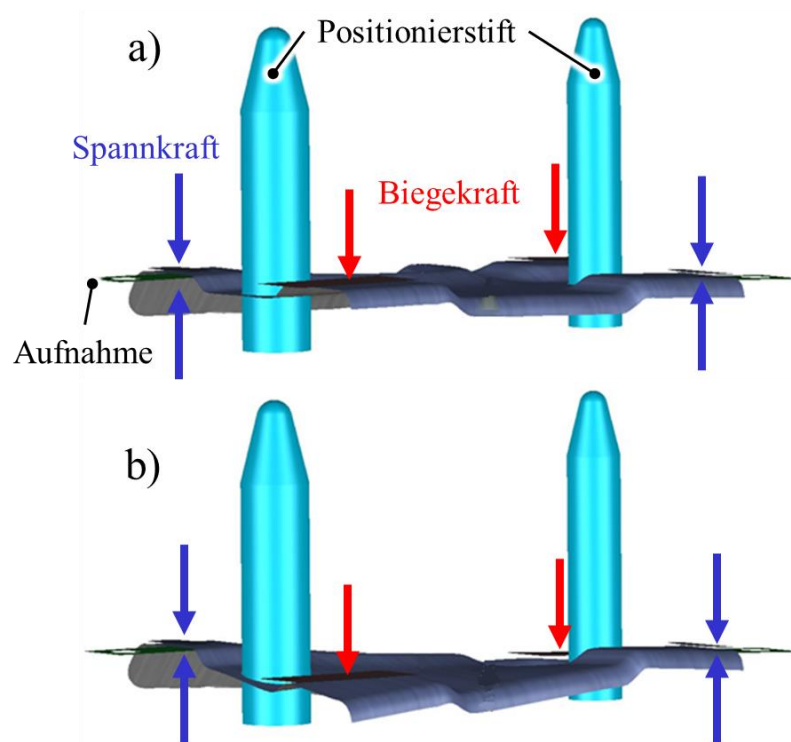


Abb. 5-5: Simulationsschritte für das Verdrehen der Pufferverstärkung links: a) Spanner schließen und b) deformieren mit Biegestempeln.

Nach der Rückfederung resultierte die eingebrachte Deformation in eine plastische Verdrehung der Bauteile. Bei einer Eindringtiefe von 4 mm wurden nach der Rückfederung Abweichungen von bis zu maximal 2,6 mm bei der Pufferverstärkung links bzw. 2,4 mm bei der Pufferverstärkung rechts erzeugt.

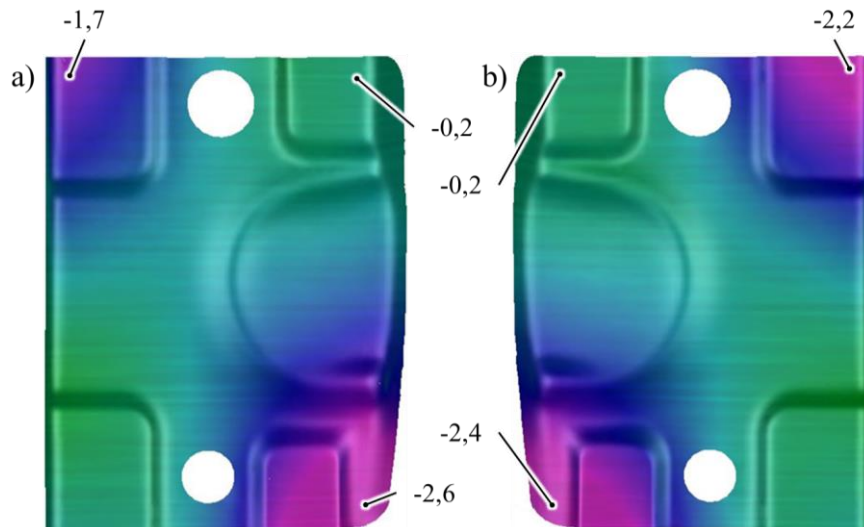


Abb. 5-6: Simulationsergebnisse der plastischen Verdrehung der Pufferverstärkung a) links und b) rechts (Abweichung zur Nominalgeometrie).

5.2 Auswertung der Variantensimulationen

Für die Auswertung der Variantensimulationen lag das Simulationsergebnis der Kombination 1 (Tabelle 5-1) unter Verwendung von ausschließlich Gutteilen bereits vor und wurde mit einem Bauteilscan abgesichert (vgl. Abb. 4-47). Gemäß der vorgestellten Versuchsplanung (vgl. Kapitel 5.1) wurden bei den restlichen ZSB-Kombinationen die jeweiligen Verstärkungsteile durch Schlechtteile ausgetauscht und mithilfe der aufgebauten PKS im Rahmen der virtuellen Abbildung des Herstellungsprozesses der Baugruppe berechnet. Für die Auswertung der Simulationen wurden alle berechneten Rückfederungsergebnisse der Kombinationen analysiert und die Rückfederung in den zuvor festgelegten Messpunkten (vgl. Abb. 5-2) ausgewertet. Die Ergebnisse wurden jeweils der Kombination 1 gegenübergestellt und mit dieser verglichen, da diese Variante die Soll-Geometrien aller Einzelbauteile aufweist (vgl. Kapitel 4.4.3). Positive Maßabweichungen stellen bei der gewählten Darstellung eine Rückfederung aus der Zeichenebene heraus dar, negative ein Einfallen in die Zeichenebene hinein. In allen folgenden Abbildungen sind die verwendeten Schlechtteile in der jeweiligen Kombination mit einem roten „O“ in der Teileübersicht links oben gekennzeichnet, nicht gekennzeichnete Verstärkungsteile sind hingegen Gutteile. Die dargestellten Maßabweichungen beschreiben stets die lokale Abweichung gegenüber den Messwerten der Kombination 1.

Auswertung Kombination 2 – Verwendung einer deformierten Pufferverstärkung links

Bei der Untersuchung der Kombination 2 wurde die Pufferverstärkung links durch ein deformiertes Bauteil (Schlechtteil) ersetzt (markiert durch ein rotes O in Abb. 5-7 links oben), die restlichen Verstärkungsteile sind Gutteile.

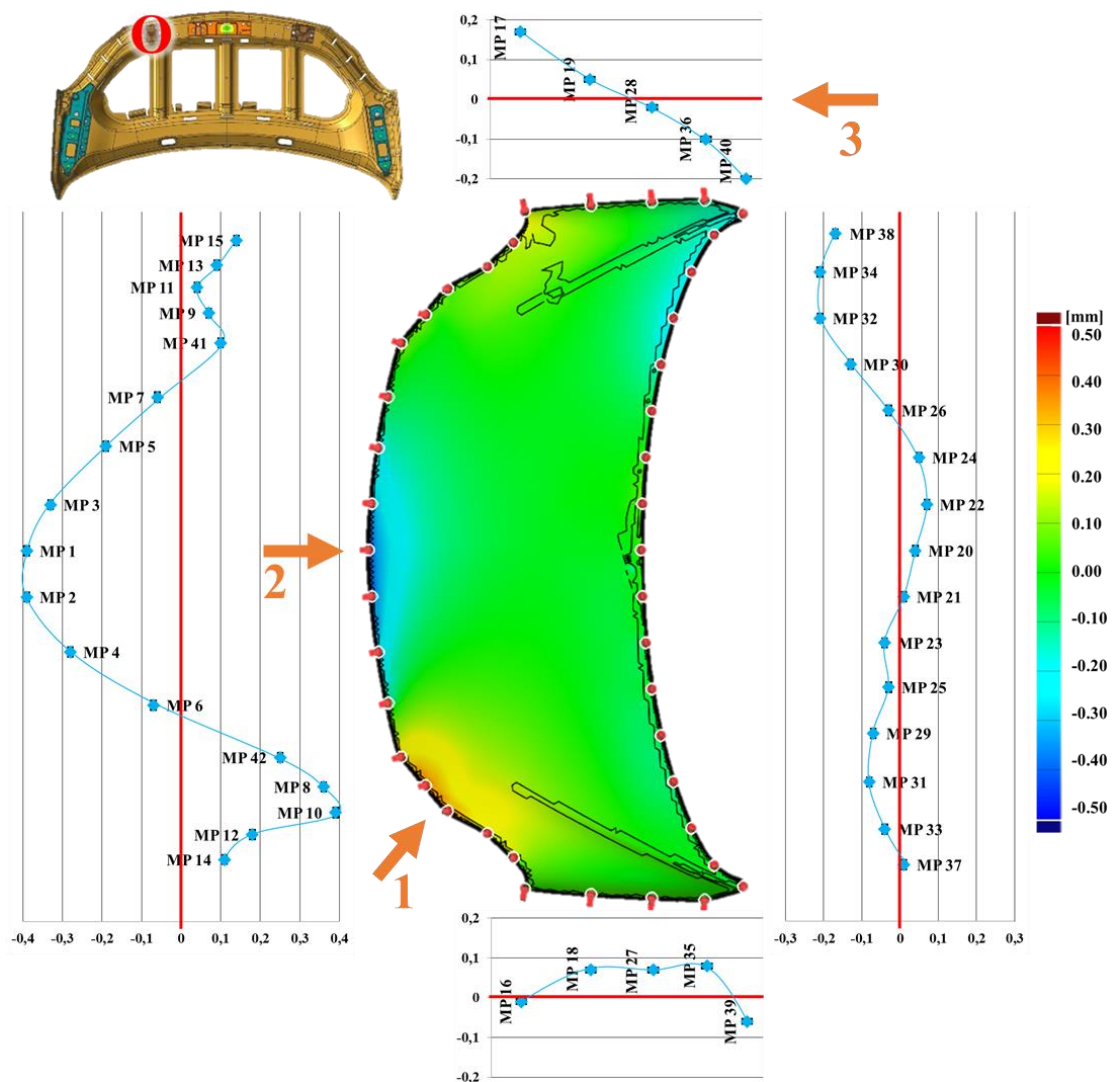


Abb. 5-7: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 2.

Die Verdrehung der im Verhältnis zum ZSB geometrisch kleinen Pufferverstärkung links wirkt sich nach Abb. 5-7 offensichtlich merklich auf die Maßhaltigkeit des ZSB aus. Neben der Auffederung des linken Leuchtenbereichs (orangefarbener Pfeil 1), führt das Schlechtteil zu einem Einfallen des Frontbereichs (orangefarbener Pfeil 2) sowie zu einer leichten Verkipfung der rechten Kotflügelbereichs (orangefarbener Pfeil 3). Somit wurden neben dem direkten Kontaktbereich des Verstärkungsteils mit dem UZSB offensichtlich auch andere Bereiche des ZSB von der Maßabweichung der Pufferverstärkung links beeinflusst. Die durch die deformierte Pufferverstärkung links verursachten Abweichungen des ZSB liegen im Bereich von $\pm 0,4$ mm.

Auswertung Kombination 3 – Verwendung einer deformierten Pufferverstärkung rechts

Der Einfluss der deformierten Pufferverstärkung rechts in Kombination 3 ist im Frontbereich (orangefarbener Pfeil 1, Abb. 5-8) und im rechten Leuchtenbereich (orangefarbener Pfeil 2) sichtbar.

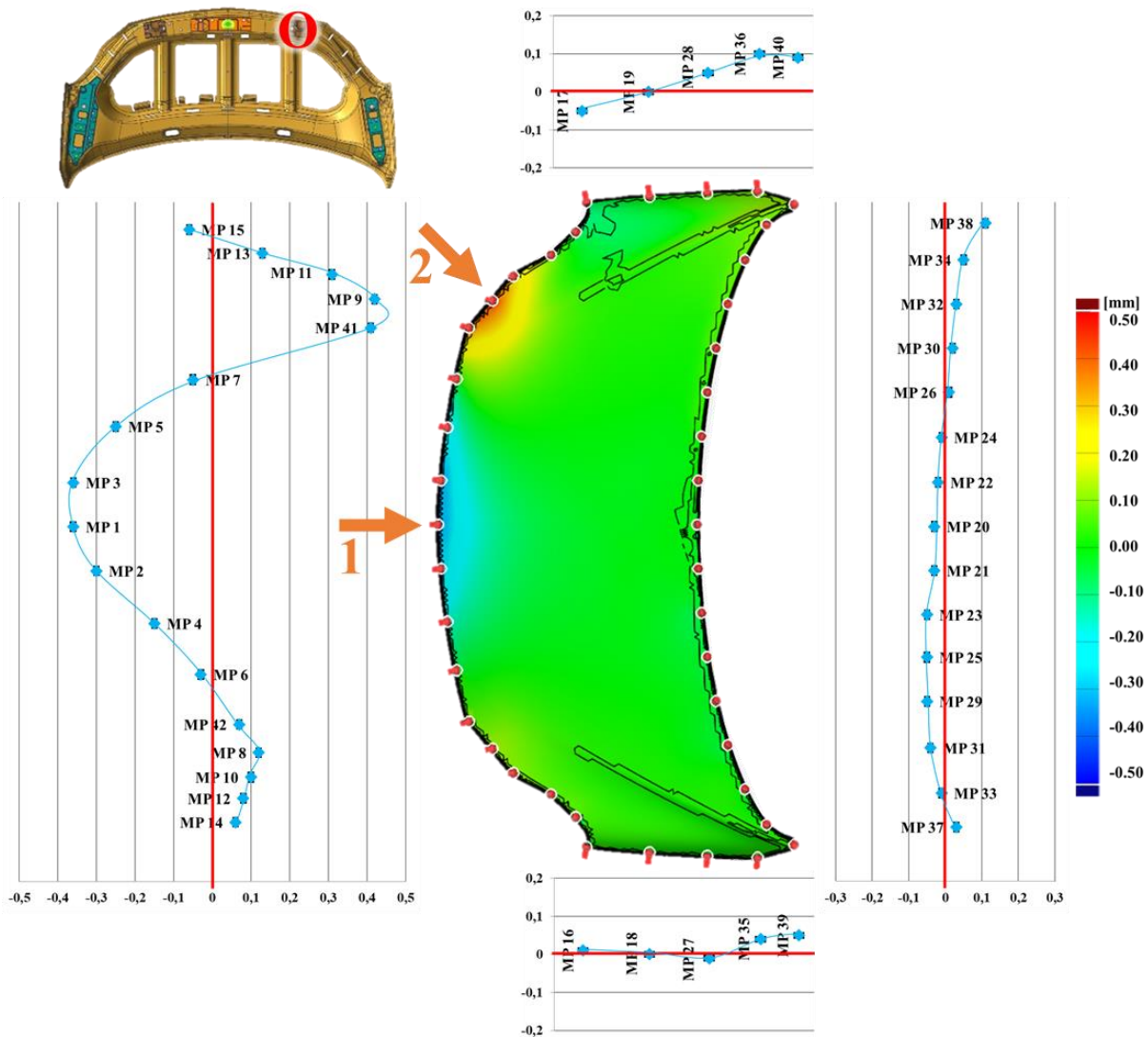


Abb. 5-8: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 3.

Hierbei sind sowohl Betrag als auch Richtung der Rückfederung in den beeinflussten Bereichen vergleichbar zu denen der Kombination 2. Im Unterschied dazu zeigt die Abweichung der Pufferverstärkung rechts jedoch keine Verkipfung im rechten Kotflügelbereich vergleichbar zur Verkipfung im linken Kotflügelbereich bei der Pufferverstärkung links (orangefarbener Pfeil 3, Abb. 5-7). Die Ursache des unterschiedlichen Einflusses lässt sich an dieser Stelle nicht eindeutig auf das asymmetrische Rückfederungsverhalten des ZSB (vgl. Abb. 4-47), auf die Fügereihenfolge oder auf den Falzprozess selbst zurückführen. Die durch die deformierte Pufferverstärkung rechts verursachten Abweichungen des ZSB liegen im Bereich von + 0,4 mm und - 0,5 mm.

Auswertung Kombination 4 – Verwendung einer deformierten Schlossverstärkung

Die Maßabweichungen der fehlerhaften Schlossverstärkung zeigen keinen signifikanten Einfluss auf das Rückfederungsverhalten des ZSB im Frontbereich im Vergleich zur Referenz (Kombination 1). Die Auswertung zeigt allerdings eine Verkipfung des Übergangs des rechten Kotflügelbereichs (orangefarbener Pfeil 1, Abb. 5-9). Somit wurde nicht der direkte Kontaktbereich des Verstärkungsteils mit dem UZSB von der Maßabweichung der Schlossverstärkung beeinflusst, sondern ausschließlich andere Bereiche des ZSB.

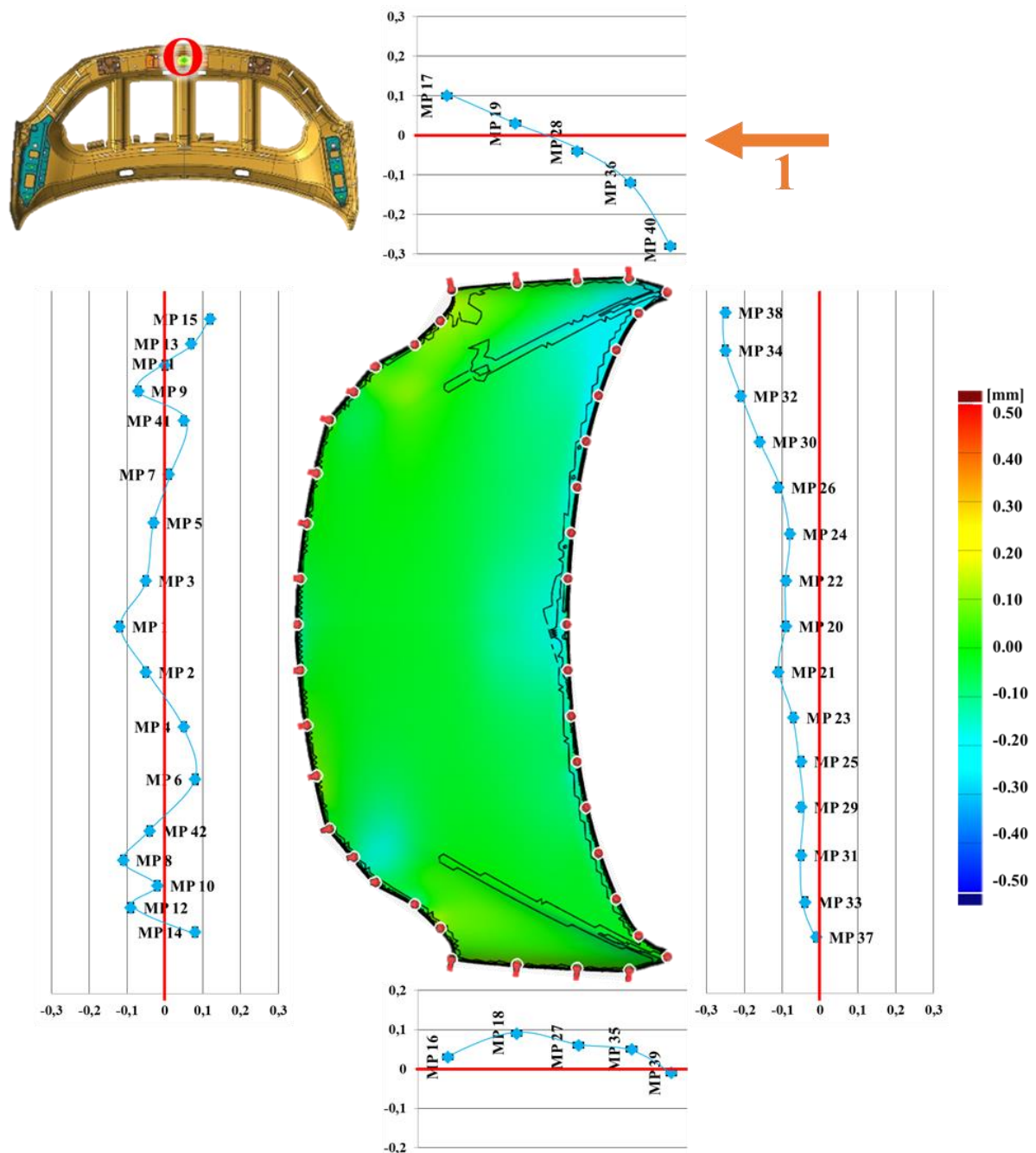


Abb. 5-9: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 4.

Die durch die deformierte Schlossverstärkung verursachten Abweichungen des ZSB liegen im Bereich von + 0,1 mm und - 0,3 mm.

Auswertung Kombination 5 – Verwendung einer deformierten Scharnierverstärkung links

Durch die Verwendung einer deformierten Scharnierverstärkung links in Kombination 5 wird hauptsächlich der linke Kotflügelbereich des ZSB beeinflusst.

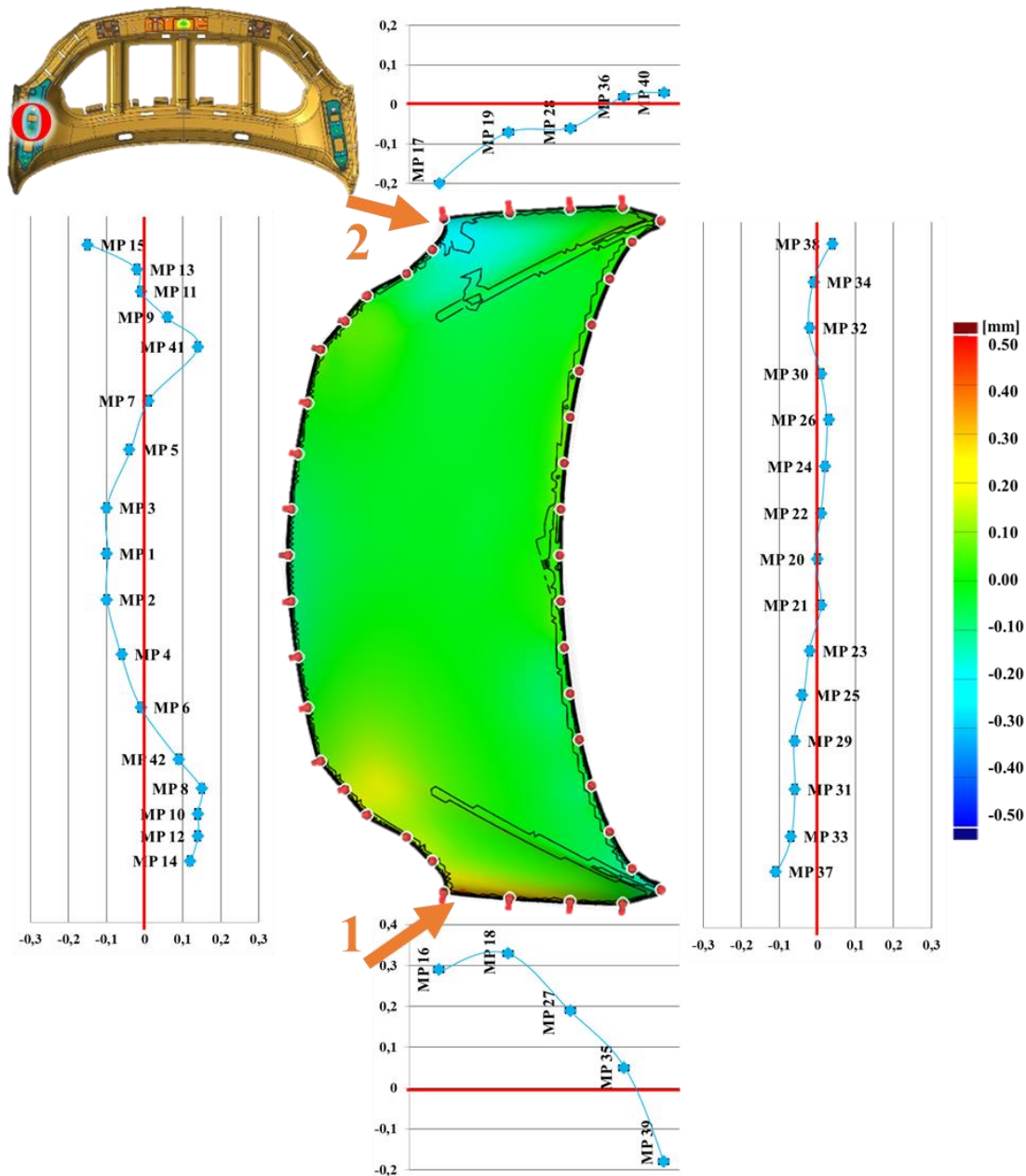


Abb. 5-10: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 5.

Hierbei wird der Übergang zum linken Leuchtenbereich angehoben (orangefarbener Pfeil 1, Abb. 5-10) und dadurch der linke Seitenbereich verkippt. Zusätzlich fällt der ZSB an derselben Position auf im rechten Kotflügelbereich leicht ein (orangefarbener Pfeil 2), wodurch eine leichte Verdrehung des gesamten ZSB resultiert. Der Front- und Scheibenbereich der Baugruppe werden nicht merklich beeinflusst. Die durch die deformierte Scharnierverstärkung links verursachten Abweichungen des ZSB liegen im Bereich von + 0,3 mm und - 0,2 mm.

Auswertung Kombination 6 – Verwendung einer deformierten Scharnierverstärkung rechts

Im Gegensatz zur Scharnierverstärkung links hat eine Durchbiegung der deutlich kleineren Scharnierverstärkung rechts so gut wie keinen Einfluss auf die Rückfederung des ZSB.

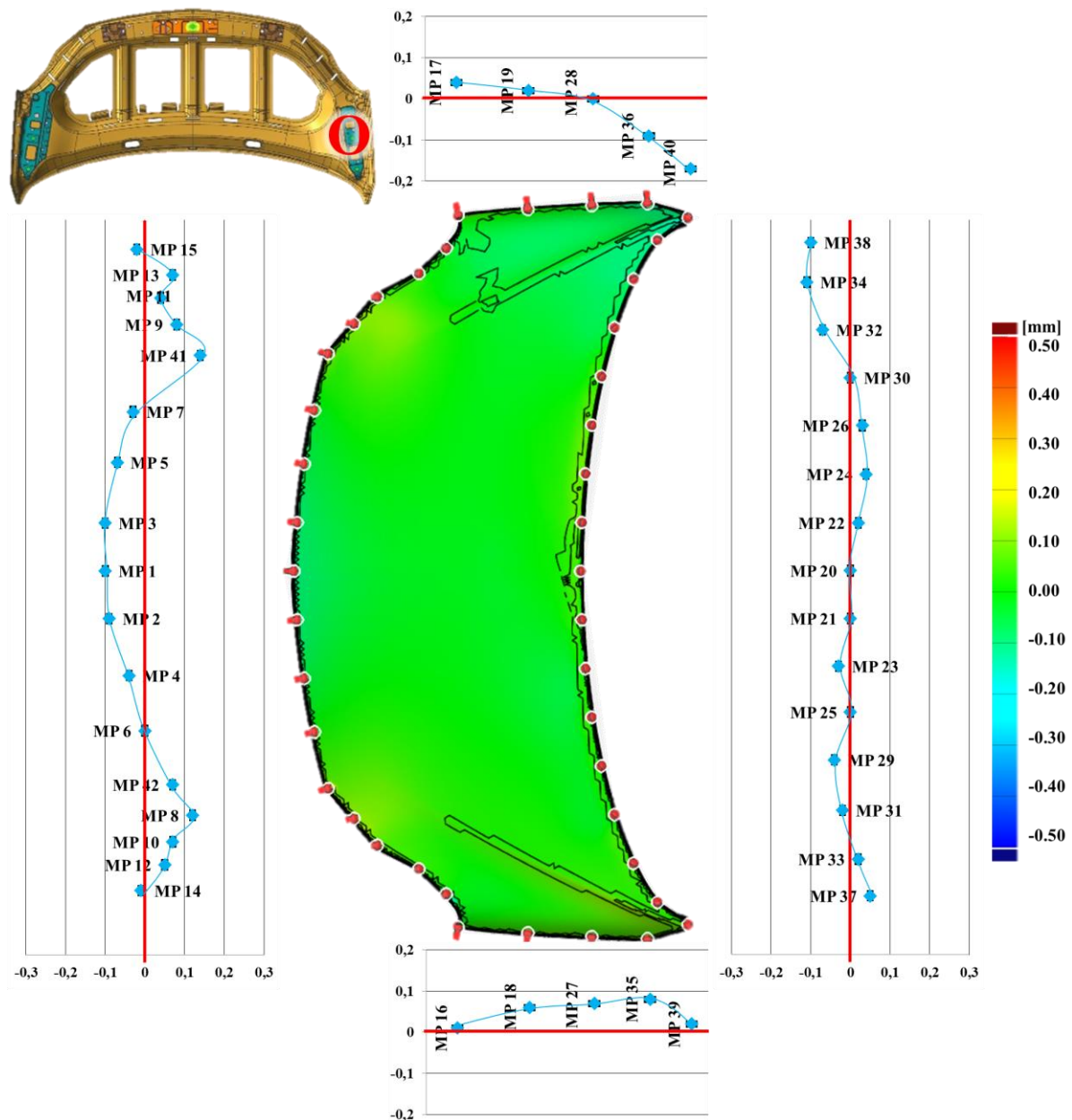


Abb. 5-11: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 6.

Die Scharnierverstärkung rechts ist lediglich mithilfe zweier Clinchpunkte mit dem Gerippe verbunden, wodurch das Bauteil in der Mitte keinen Kontakt zum Gerippe aufweist. Dadurch werden bis auf eine leichte Verkipfung im rechten Kotflügelbereich keine signifikanten Spannungen in den USZB durch die Abweichung in der Scharnierverstärkung rechts eingebracht. Die durch die deformierte Scharnierverstärkung rechts verursachten Abweichungen des ZSB liegen im Bereich von + 0,1 mm und - 0,2 mm.

Auswertung Kombination 7 – Verwendung von deformierten Pufferverstärkungen links und rechts

Bei der Kombination 7 wird der Einfluss der deformierten rechten als auch der linken Pufferverstärkung auf die Maßhaltigkeit des ZSB untersucht.

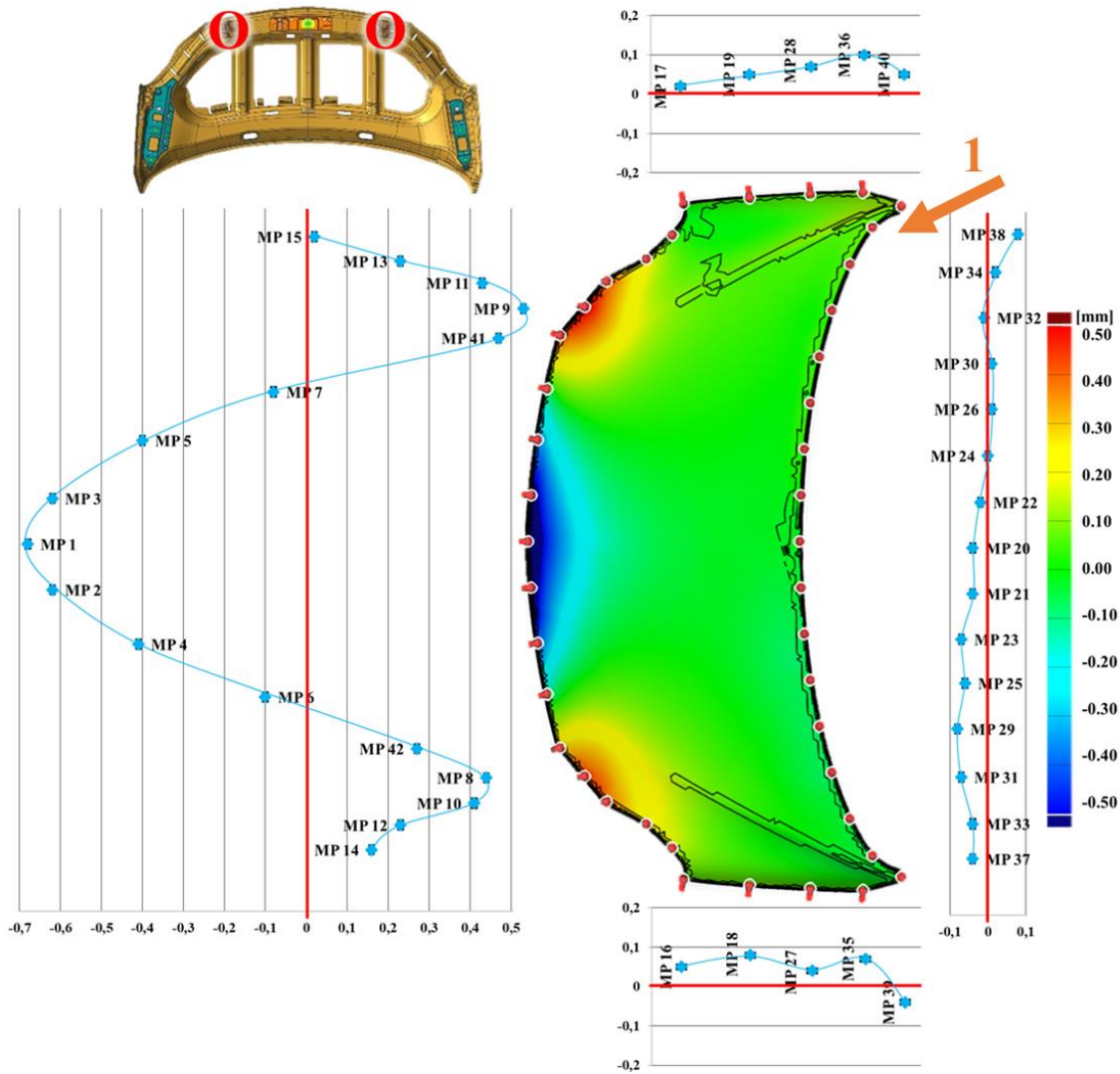


Abb. 5-12: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 7.

Die durch die beiden deformierten Pufferverstärkungen verursachten Abweichungen des ZSB liegen im Bereich von + 0,5 mm und - 0,7 mm. Wie bereits in den Kombinationen 2 und 3 sichtbar, wirken sich die deformierten Pufferverstärkungen hauptsächlich auf den jeweiligen Leuchten- und den Frontbereich aus. Dabei überlagern sich die Einflüsse der beiden Verstärkungsteile auf die Maßhaltigkeit des ZSB nahezu exakt. Durch das manuelle Aufsummieren der ermittelten Abweichungen in den jeweiligen Messpunkten aus Kombination 2 (nur

Pufferverstärkung links deformiert) und Kombination 3 (nur Pufferverstärkung rechts deformiert) werden nahezu gleiche Werte berechnet wie in Kombination 7 (beide Pufferverstärkungen deformiert) simuliert wurde.

Zur Verdeutlichung werden in Tabelle 5-2 die simulierten Abweichungen der Messpunkte aus Kombination 2 und Kombination 3 manuell addiert und anschließend die Differenz zu den simulierten Abweichungen der Kombination 7 gebildet. Der Absolutwert dieser errechneten Differenz gibt Aufschluss darüber, ob diese simple Betrachtung eine hinreichend genaue Annäherung an die simulierten Abweichungen bildet. Für eine Bewertung dieser Betrachtung werden Abweichungen größer 0,2 mm in der Tabelle rot markiert (vgl. Tabelle 5-3).

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,36	0,07	0,39	0,04	0,18	0,09	0,11	0,14	-0	0,17	0,07	0,05	0,04	0,01
Simulation Kombination3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,12	0,42	0,1	0,31	0,08	0,13	0,06	-0,1	0,01	-0,1	0	0	-0	-0
Kombination2+Kombination3	-0,8	-0,7	-0,7	-0,4	-0,4	-0,1	-0,1	0,48	0,49	0,49	0,35	0,26	0,22	0,17	0,08	0	0,12	0,07	0,05	0,01	-0
Simulation Kombination7	-0,7	-0,6	-0,6	-0,4	-0,4	-0,1	-0,1	0,44	0,53	0,41	0,43	0,23	0,23	0,16	0,02	0,05	0,02	0,08	0,05	-0	-0
Differenz absolut	0,07	0,07	0,07	0,02	0,04	0	0,03	0,04	0,04	0,08	0,08	0,03	0,01	0,01	0,06	0,05	0,1	0,01	0	0,05	0,02

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination2	0,07	-0	0,05	-0	-0	0,07	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0	-0,2	0,08	-0,1	0,01	-0,2	-0,1	-0,2	0,1	0,25
Simulation Kombination3	-0	-0,1	-0	-0,1	0,01	-0	0,05	-0,1	0,02	-0	0,03	-0	0,05	0,04	0,1	0,03	0,11	0,05	0,09	0,41	0,07
Kombination2+Kombination3	0,05	-0,1	0,04	-0,1	-0	0,06	0,03	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	0,12	0	0,04	-0,1	-0	-0,1	0,51	0,32
Simulation Kombination7	-0	-0,1	0	-0,1	0,01	0,04	0,07	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0	0,02	0,07	0,1	-0	0,08	-0	0,05	0,47	0,27
Differenz absolut	0,07	0,02	0,04	0,02	0,03	0,02	0,04	0,04	0,12	0,05	0,17	0,01	0,18	0,05	0,1	0,08	0,14	0,03	0,16	0,04	0,05

Tabelle 5-2: Vergleich aufsummierter Abweichungen in mm der Kombination 2 und Kombination 3 im Vergleich zur simulierten Abweichung der Kombination 7 in den betrachteten Messpunkten in [mm].

Die absolute Differenz zeigt eine hohe Übereinstimmung der prognostizierten Abweichungen der Kombination 7 zu den aufsummierten Abweichungen, welche ausschließlich auf Basis der beiden Simulationen der Kombinationen 2 und 3 erfolgte. Die größten Abweichungen mit einer maximalen Ungenauigkeit von 0,18 mm in den Messpunkten 32, 34 und 40 liegen im Übergang des rechten Kotflügelbereichs zum Frontscheibenbereich (orangefarbener Pfeil 1, Abb. 4-12). Somit kann für diese Kombination rechnerisch eine quantitative Aussage über das Rückfederungsverhalten des ZSB aus den Einflüssen der einzelnen Bauteilabweichungen getroffen werden. Im Durchschnitt können die Abweichungen mit einer Genauigkeit von 0,06 mm rechnerisch ermittelt werden. Im Zuge der weiteren Auswertungen werden nun die aufsummierten Abweichungen aus den Kombinationen 2-6 (nur ein Verstärkungsteil deformiert) mitbetrachtet

und jeweils den simulierten Abweichungen der entsprechenden Kombination gegenübergestellt. Auf diese Weise lässt sich bestimmen ob dieses vereinfachte Vorgehen auch auf andere Bauteilkombinationen übertragbar ist.

Auswertung Kombination 16 – Verwendung von deformierten Scharnierverstärkungen links und rechts

Bei der Kombination 16 wird der gleichzeitige Einfluss beider deformierter Scharnierverstärkungen untersucht.

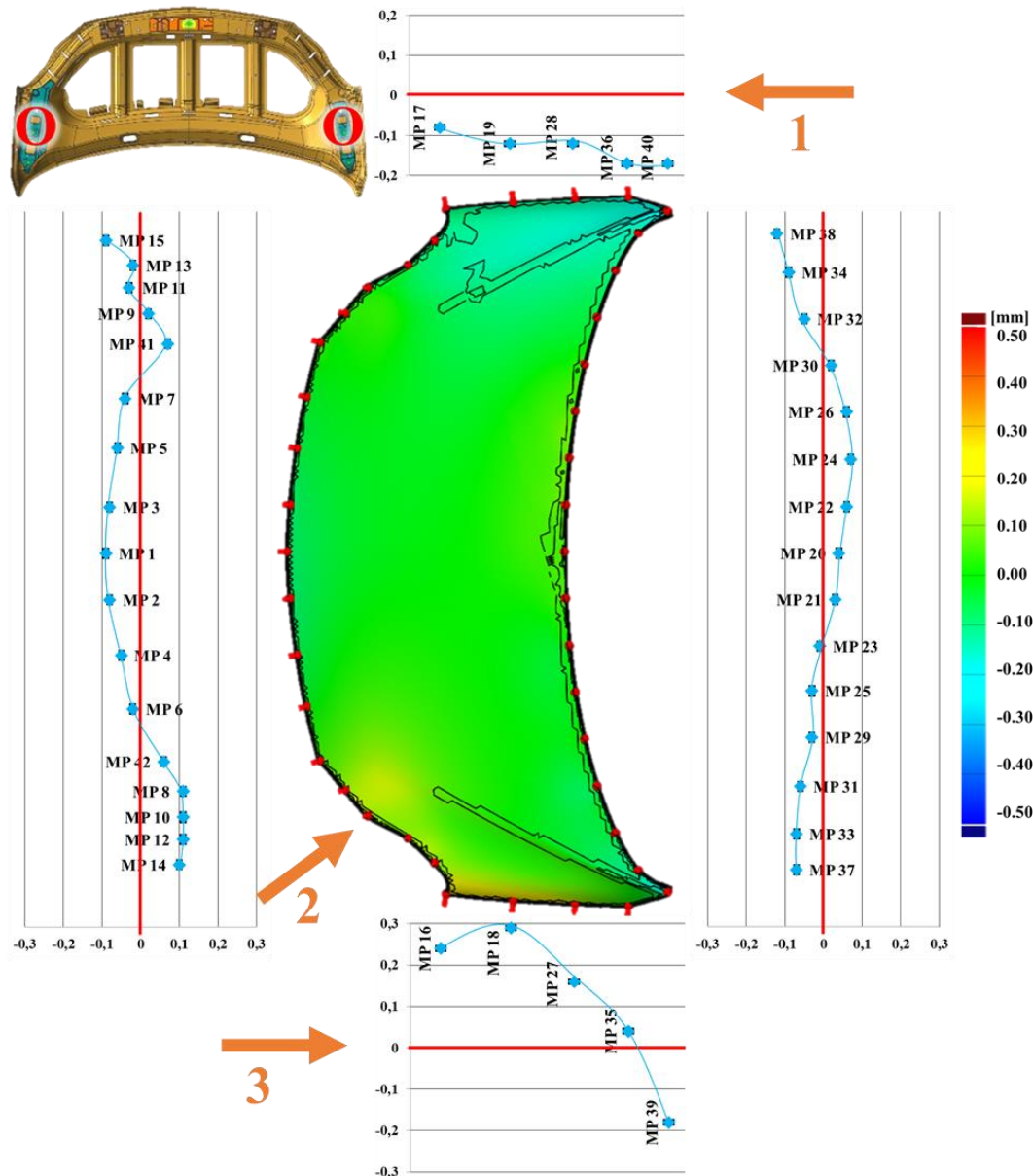


Abb. 5-13: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 16.

Auch hier überlagern sich die Spannungen der deformierten Einzelteile im Verbund. Die Verkipfung im rechten Kotflügelbereich (verursacht durch die rechte Scharnierverstärkung) wird dabei von der Verdrehung (verursacht durch die linke Scharnierverstärkung) in diesem Bereich

zwar kompensiert, resultiert aber in einem Einfallen des gesamten Bereichs (orangefarbener Pfeil 1, Abb. 5-13). Der linke Leuchtenbereich wird angehoben (orangefarbener Pfeil 2) und der linke Kotflügelbereich verkippt leicht (orangefarbener Pfeil 3). Die durch die beiden deformierten Scharnierverstärkungen verursachten Abweichungen des ZSB liegen im Bereich von + 0,3 mm und - 0,2 mm.

Diesen Einfluss der beiden deformierten Scharnierverstärkungen auf die Maßhaltigkeit des ZSB bestätigt auch in diesem Fall die bereits in der Kombination 7 erfolgte Aufsummierung der Einzelergebnisse. In diesem Fall werden die beiden Untersuchungen der Kombination 5 (nur Scharnier links deformiert) und der Kombination 6 (nur Scharnier rechts deformiert) den hier prognostizierten Abweichungen der Kombination 16 (beide Scharnierverstärkungen deformiert) gegenübergestellt. Hierbei liegt die maximale Ungenauigkeit der Ergebnisse bei 0,20 mm im Übergang des Frontbereichs zum rechten Leuchtenbereich im Messpunkt 41.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0	0,01	0,15	0,06	0,14	-0	0,14	-0	0,12	-0,2	0,29	-0,2	0,33	-0,1	0	0,01
Simulation Kombination6	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0,1	0	-0	0,12	0,08	0,07	0,04	0,05	0,07	-0	-0	0,01	0,04	0,06	0,02	0	0
Kombination5 + Kombination6	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0	-0	0,27	0,14	0,21	0,03	0,19	0,05	0,11	-0,2	0,3	-0,2	0,39	-0,1	0	0,01
Simulation Kombination16	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0	0,11	0,02	0,11	-0	0,11	-0	0,1	-0,1	0,24	-0,1	0,29	-0,1	0,04	0,03
Differenz absolut	0,11	0,11	0,12	0,05	0,05	0,01	0,02	0,16	0,12	0,1	0,06	0,08	0,07	0,01	0,08	0,06	0,08	0,1	0,07	0,04	0,02

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination5	0,01	-0	0,02	-0	0,03	0,19	-0,1	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0	0,05	0,02	-0,1	0,04	-0,2	0,03	0,14	0,09
Simulation Kombination6	0,02	-0	0,04	0	0,03	0,07	0	-0	0	-0	-0,1	0,02	-0,1	0,08	-0,1	0,05	-0,1	0,02	-0,2	0,14	0,07
Kombination5 + Kombination6	0,03	-0,1	0,06	-0	0,06	0,26	-0,1	-0,1	0,01	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,13	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	0,28	0,16
Simulation Kombination16	0,06	-0	0,07	-0	0,06	0,16	-0,1	-0	0,02	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,04	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	0,07	0,06
Differenz absolut	0,03	0,04	0,01	0,01	0	0,1	0,06	0,07	0,01	0,02	0,04	0,02	0,03	0,09	0,1	0,01	0,06	0,02	0,03	0,21	0,1

Tabelle 5-3: Vergleich aufsummierter Abweichungen in mm der Kombination 5 und Kombination 6 im Vergleich zur simulierten Abweichung der Kombination 16 in den betrachteten Messpunkten in [mm].

Im Durchschnitt können die Abweichungen für die Kombination 16 mit einer Genauigkeit von 0,06 mm rechnerisch ermittelt werden. Insgesamt liegt die durchschnittliche Genauigkeit der rechnerischen Abweichung über alle Kombinationen mit jeweils zwei deformierten Verstärkungsteilen (Kombination 7 bis Kombination 16) bei 0,08 mm. Die hier nicht gezeigten Einzelauswertungen können Anhang 9.2 entnommen werden. Damit lässt sich die vereinfachte Aufsummierung der Abweichungen auf alle Bauteilkombinationen mit jeweils zwei deformierten Verstärkungsteilen anwenden. Das bedeutet im Fall der untersuchten Baugruppe, dass für

einzelne abweichungsbehaftete Verstärkungsteile jeweils nur eine PKS durchgeführt werden muss und die daraus resultierenden Abweichungen des ZSB für alle weiteren Kombinationen rechnerisch ermittelt werden können. In Hinblick auf die Variantenerstellung zur Ableitung eines Meta-Modells (vgl. Kapitel 7.3) kann auf diese Weise auf eine Vielzahl von durchzuführenden PKS verzichtet werden.

Auswertung Kombination 18 – Verwendung von deformierter Pufferverstärkung links, Pufferverstärkung rechts und Scharnierverstärkung links

Die Abweichungen der beiden Pufferverstärkungen beeinflussen den Frontbereich und den jeweiligen Leuchtenbereich vergleichbar zu Kombination 7 (orangefarbene Pfeile 1, Abb. 5-14).

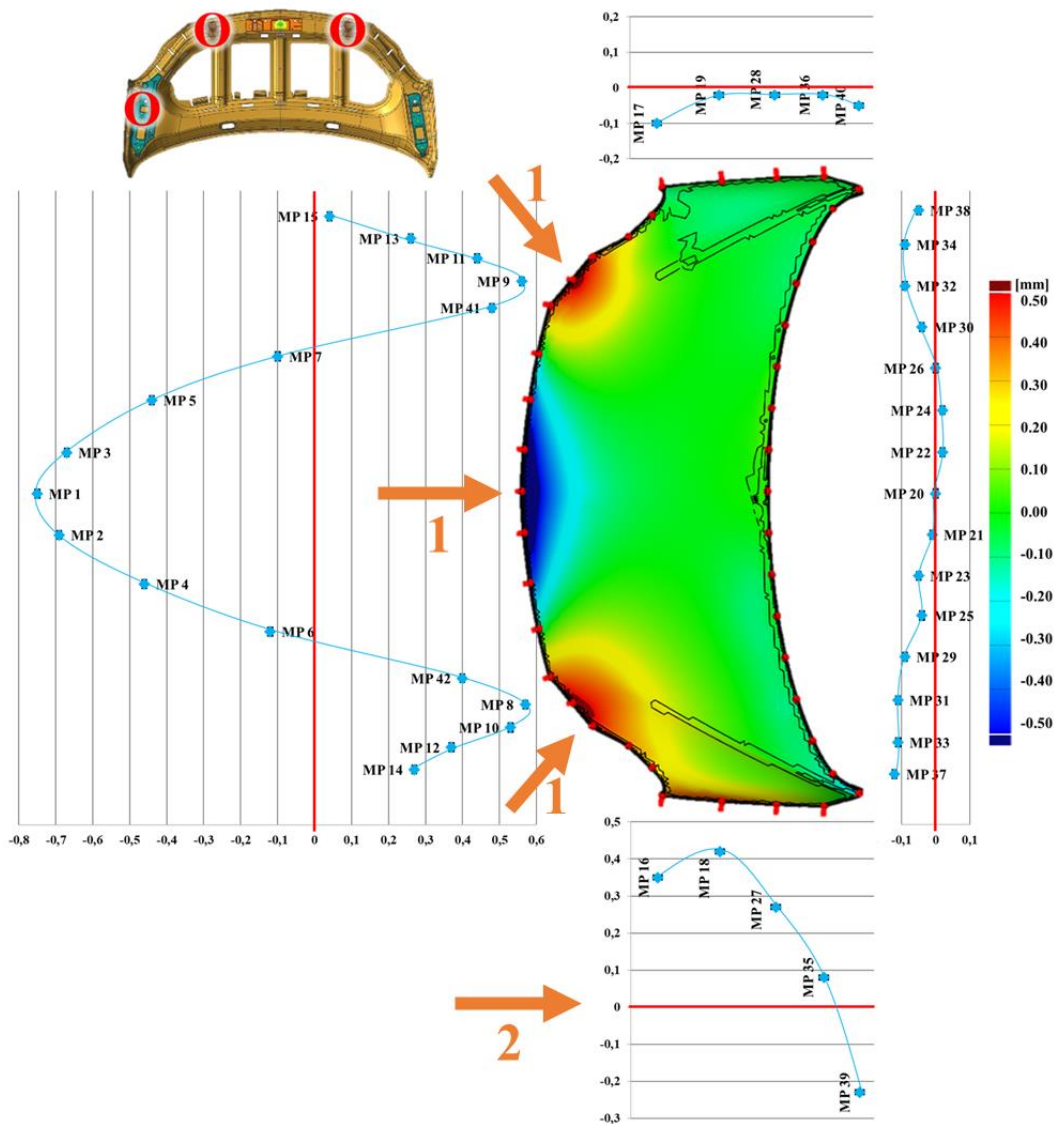


Abb. 5-14: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 18.

Die mittels Durchbiegung in der Mitte deformierte Scharnierverstärkung links verursacht zudem vergleichbar zu Kombination 5 eine Verdrehung des linken Kotflügelbereichs (orange-farbener Pfeil 2). Die durch die beiden deformierten Pufferverstärkungen und der Scharnierverstärkung links verursachten Abweichungen des ZSB liegen im Bereich von + 0,6 mm und - 0,8 mm.

Auch für Kombination 18 mit insgesamt drei deformierten Verstärkungsteilen kann eine sehr gute Übereinstimmung der rechnerischen Abweichungen aus den jeweiligen Einzelbetrachtungen erreicht werden. Die maximale Ungenauigkeit beträgt hierbei 0,17 mm im rechten Leuchtenbereich im Messpunkt 41. Im Durchschnitt können die Abweichungen mit einer Genauigkeit von 0,05 mm durch die vereinfachte Addition der Einzelergebnisse ermittelt werden.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,36	0,07	0,39	0,04	0,18	0,09	0,11	0,14	-0	0,17	0,07	0,05	0,04	0,01
Simulation Kombination3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,12	0,42	0,1	0,31	0,08	0,13	0,06	-0,1	0,01	-0,1	0	0	-0	-0
Simulation Kombination5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0	0,01	0,15	0,06	0,14	-0	0,14	-0	0,12	-0,2	0,29	-0,2	0,33	-0,1	0	0,01
Kombination2+ Kombination3+ Kombination5	-0,9	-0,8	-0,8	-0,5	-0,5	-0,1	-0,1	0,63	0,55	0,63	0,34	0,4	0,2	0,29	-0,1	0,29	-0,1	0,4	-0	0,01	-0
Simulation Kombination18	-0,8	-0,7	-0,7	-0,5	-0,4	-0,1	-0,1	0,57	0,56	0,53	0,44	0,37	0,26	0,27	0,04	0,35	-0,1	0,42	-0	0	-0
Differenz absolut	0,1	0,1	0,12	0,03	0,04	0,01	0	0,06	0,01	0,1	0,1	0,03	0,06	0,02	0,11	0,06	0,02	0,02	0	0,01	0

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination2	0,07	-0	0,05	-0	-0	0,07	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0	-0,2	0,08	-0,1	0,01	-0,2	-0,1	-0,2	0,1	0,25
Simulation Kombination3	-0	-0,1	-0	-0,1	0,01	-0	0,05	-0,1	0,02	-0	0,03	-0	0,05	0,04	0,1	0,03	0,11	0,05	0,09	0,41	0,07
Simulation Kombination5	0,01	-0	0,02	-0	0,03	0,19	-0,1	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0	0,05	0,02	-0,1	0,04	-0,2	0,03	0,14	0,09
Kombination2+ Kombination3+ Kombination5	0,06	-0,1	0,06	-0,1	0,01	0,25	-0	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2	0,17	0,02	-0,1	-0	-0,2	-0,1	0,65	0,41
Simulation Kombination18	0,02	-0,1	0,02	-0	0	0,27	-0	-0,1	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,08	-0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	0,48	0,4
Differenz absolut	0,04	0,06	0,04	0,08	0,01	0,02	0,01	0,09	0,06	0,07	0,11	0,01	0,08	0,09	0,04	0,05	0,03	0,04	0,03	0,17	0,01

Tabelle 5-4: Vergleich aufsummierter Abweichungen in mm der Kombinationen 2, 3 und 5 im Vergleich zur simulierten Abweichung der Kombination 18 in den betrachteten Messpunkten in [mm].

Somit liefert die vorgestellte Vereinfachung offensichtlich auch für insgesamt drei abweichungsbehaftete Verstärkungsteile eine hinreichend genaue Annäherung an die simulierten Abweichungen des ZSB.

Auswertung Kombination 25 – Verwendung von deformierter Scharnierverstärkung links, Scharnierverstärkung rechts und Schlossverstärkung

Die Auswertung der Kombination 25 zeigt den kumulierten Einfluss der Durchbiegung beider Scharnierverstärkungen sowie den der Schlossverstärkung. Dabei entsteht im ZSB im linken und rechten Kotflügelbereich eine Verkipfung (orangefarbene Pfeile 1, Abb. 5-15) sowie eine leichte Einfallstelle im mittleren Frontbereich (orangefarbener Pfeil 2).

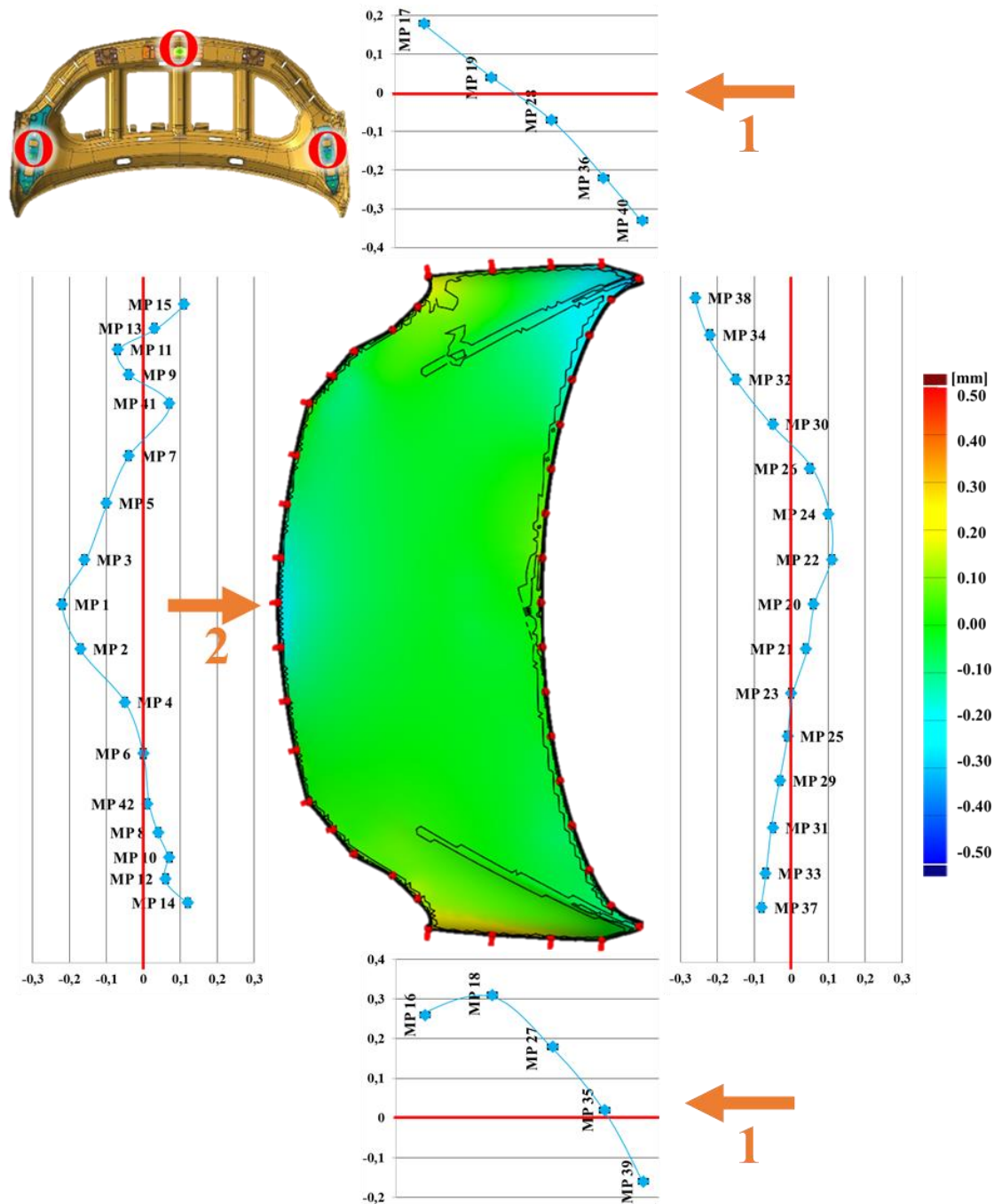


Abb. 5-15: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 25.

Die durch die beiden deformierten Pufferverstärkungen verursachten Abweichungen des ZSB liegen im Bereich von $\pm 0,3$ mm. Diese sind im Vergleich zu den entstehenden Abweichungen

durch den Einsatz der deformierten Pufferverstärkungen (Verdrehung) in der Kombination 18 deutlich geringer. Die rechnerische Summierung der Abweichungen aus den Kombinationen 4, 5 und 6 in Tabelle 5-5 zeigt eine gute Übereinstimmung zu den Abweichungen der hier untersuchten Kombination 25. Die maximalen Ungenauigkeiten liegen in Messpunkt 17 mit 0,24 mm im rechten Kotflügelbereich sowie mit 0,25 mm im Frontbereich Messpunkt 41 (rot markiert in Tabelle 5-5).

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	-0	0,08	0,01	-0,1	-0,1	-0	0	-0,1	0,07	0,08	0,12	0,03	0,1	0,09	0,03	-0,1	-0,1
Simulation Kombination5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0	0,01	0,15	0,06	0,14	-0	0,14	-0	0,12	-0,2	0,29	-0,2	0,33	-0,1	0	0,01
Simulation Kombination6	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0,1	0	-0	0,12	0,08	0,07	0,04	0,05	0,07	-0	-0	0,01	0,04	0,06	0,02	0	0
Summe Kombinationen	-0,3	-0,2	-0,3	-0,1	-0,1	0,07	-0	0,16	0,07	0,19	0,03	0,1	0,12	0,19	-0,1	0,33	-0,1	0,48	-0	-0,1	-0,1
Simulation Kombination25	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	0	-0	0,04	-0	0,07	-0,1	0,06	0,03	0,13	0,1	0,26	0,18	0,31	0,04	0,06	0,04
Differenz absolut	0,1	0,07	0,09	0	0,05	0,07	0,02	0,12	0,11	0,12	0,1	0,04	0,09	0,06	0,15	0,07	0,24	0,17	0,06	0,15	0,14

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,06	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0	-0,3	0,05	-0,1	-0	-0,3	-0	-0,3	0,05	-0
Simulation Kombination5	0,01	-0	0,02	-0	0,03	0,19	-0,1	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0	0,05	0,02	-0,1	0,04	-0,2	0,03	0,14	0,09
Simulation Kombination6	0,02	-0	0,04	0	0,03	0,07	0	-0	0	-0	-0,1	0,02	-0,1	0,08	-0,1	0,05	-0,1	0,02	-0,2	0,14	0,07
Summe Kombinationen	-0,1	-0,1	-0	-0,1	-0,1	0,32	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,3	-0,1	-0,4	0,18	-0,2	-0,1	-0,3	-0,2	-0,4	0,33	0,12
Simulation Kombination25	0,11	0	0,11	0	0,05	0,19	-0,1	-0	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	0,03	-0,2	-0,1	-0,3	-0,2	-0,4	0,08	0,01
Differenz absolut	0,17	0,12	0,13	0,09	0,1	0,13	0,03	0,12	0,11	0,08	0,15	0,02	0,15	0,15	0,03	0,01	0,04	0,01	0,07	0,25	0,11

Tabelle 5-5: Vergleich aufsummierter Abweichungen in mm der Kombinationen 4, 5 und 6 im Vergleich zur simulierten Abweichung der Kombination 25 in den betrachteten Messpunkten.

Im Durchschnitt können die Abweichungen für Kombination 25 mit einer Genauigkeit von 0,10 mm rechnerisch ermittelt werden. Insgesamt liegt die durchschnittliche Genauigkeit der rechnerischen Abweichung über alle Kombinationen mit jeweils drei deformierten Verstärkungsteilen (Kombination 17 bis Kombination 26) bei 0,10 mm und ist damit vergleichbar mit der Genauigkeit bei zwei deformierten Verstärkungsteilen (0,08 mm). Damit liefert die vorgestellte Vereinfachung auch für insgesamt drei abweichungsbehaftete Verstärkungsteile eine hinreichend genaue Annäherung an die simulierten Abweichungen des ZSB.

Auswertung Kombination 29 – Verwendung von deformierter Scharnierverstärkung links, Scharnierverstärkung rechts, Pufferverstärkung links und Pufferverstärkung rechts

Im Vergleich zur Kombination 18 wird die Rückfederung von der Kombination 29 durch die zusätzlich deformierte Scharnierverstärkung rechts kaum beeinflusst. Damit zeigt die Verwendung der deformierten Scharnierverstärkung rechts über alle Kombinationen hinweg den geringsten Einfluss auf die Maßhaltigkeit des ZSB. Die durch die deformierten Verstärkungsteile verursachten Abweichungen des ZSB liegen im Bereich von + 0,5 mm und - 0,7 mm.

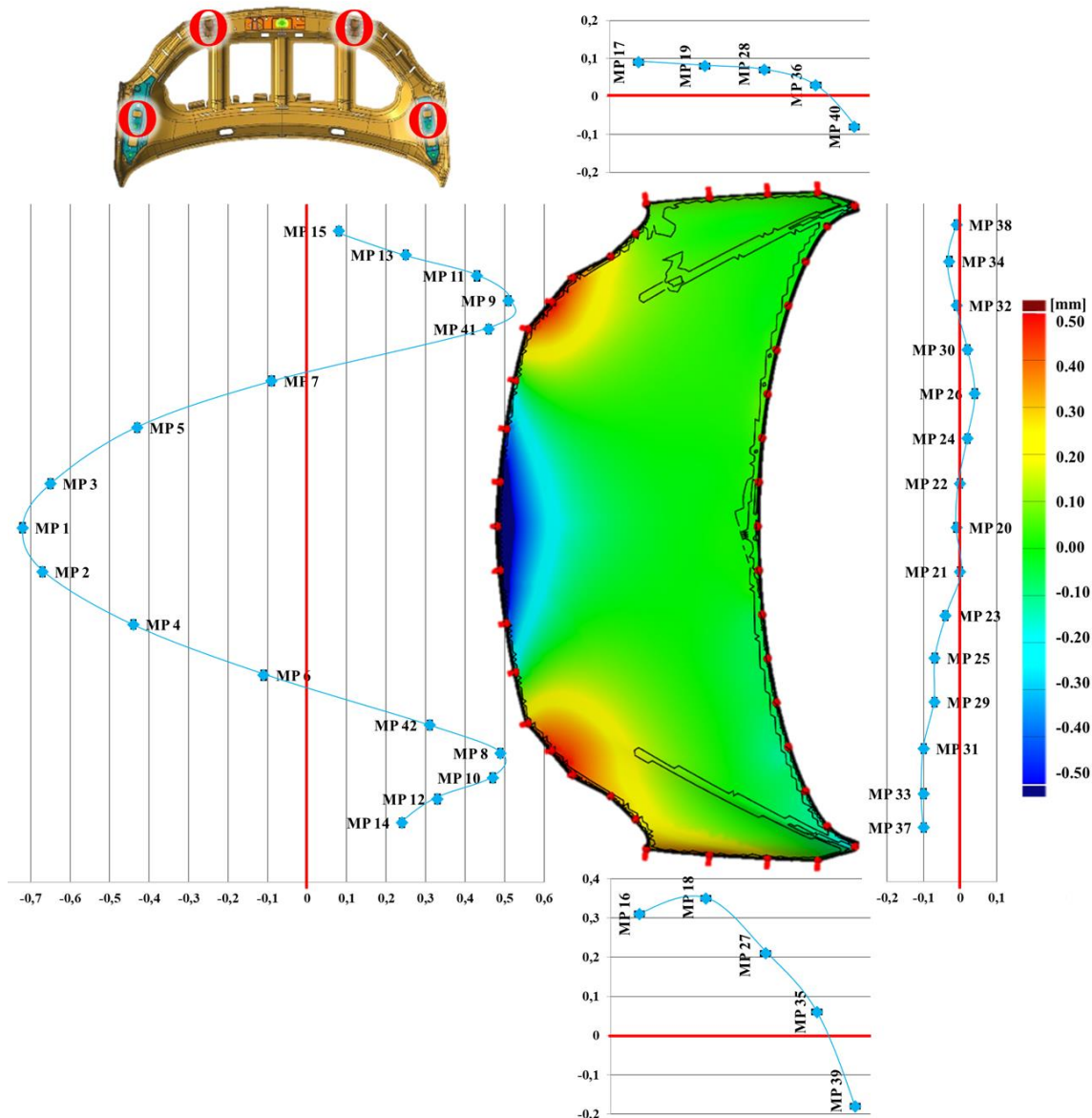


Abb. 5-16: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 29.

Der Vergleich der rechnerisch aufsummierten Abweichungen aus den Kombinationen 2, 3, 5 und 6 zu den simulierten Abweichungen aus der Kombination 29 unter Berücksich-

tigung von insgesamt vier deformierten Bauteilen zeigt im Gegensatz zu den anderen Vergleichen eine höhere Abweichung in den einzelnen Messpunkten. Die maximale Ungenauigkeit liegt auch hier im Messpunkt 41 und beträgt 0,32 mm.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,36	0,07	0,39	0,04	0,18	0,09	0,11	0,14	-0	0,17	0,07	0,05	0,04	0,01
Simulation Kombination3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,12	0,42	0,1	0,31	0,08	0,13	0,06	-0,1	0,01	-0,1	0	0	-0	-0
Simulation Kombination5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0	0,01	0,15	0,06	0,14	-0	0,14	-0	0,12	-0,2	0,29	-0,2	0,33	-0,1	0	0,01
Simulation Kombination6	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0,1	0	-0	0,12	0,08	0,07	0,04	0,05	0,07	-0	-0	0,01	0,04	0,06	0,02	0	0
Summe Kombinationen	-1	-0,9	-0,9	-0,5	-0,6	-0,1	-0,1	0,75	0,63	0,7	0,38	0,45	0,27	0,28	-0,1	0,3	-0	0,46	0	0,01	-0
Simulation Kombination29	-0,7	-0,7	-0,7	-0,4	-0,4	-0,1	-0,1	0,5	0,51	0,47	0,43	0,33	0,25	0,25	0,07	0,31	0,09	0,36	0,08	-0	0
Differenz absolut	0,22	0,21	0,23	0,09	0,12	0,01	0,04	0,25	0,12	0,23	0,05	0,12	0,02	0,03	0,16	0,01	0,13	0,1	0,08	0,02	0,01

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination2	0,07	-0	0,05	-0	-0	0,07	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0	-0,2	0,08	-0,1	0,01	-0,2	-0,1	-0,2	0,1	0,25
Simulation Kombination3	-0	-0,1	-0	-0,1	0,01	-0	0,05	-0,1	0,02	-0	0,03	-0	0,05	0,04	0,1	0,03	0,11	0,05	0,09	0,41	0,07
Simulation Kombination5	0,01	-0	0,02	-0	0,03	0,19	-0,1	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0	0,05	0,02	-0,1	0,04	-0,2	0,03	0,14	0,09
Simulation Kombination6	0,02	-0	0,04	0	0,03	0,07	0	-0	0	-0	-0,1	0,02	-0,1	0,08	-0,1	0,05	-0,1	0,02	-0,2	0,14	0,07
Summe Kombinationen	0,08	-0,1	0,1	-0,1	0,04	0,32	-0	-0,2	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1	-0,3	0,25	-0,1	-0	-0,1	-0,2	-0,3	0,79	0,48
Simulation Kombination29	0	-0	0,03	-0,1	0,03	0,21	0,07	-0,1	0,02	-0,1	-0	-0,1	-0	0,07	0,03	-0,1	-0	-0,2	-0,1	0,47	0,31
Differenz absolut	0,08	0,1	0,07	0,06	0,01	0,11	0,1	0,15	0,12	0,1	0,26	0,01	0,25	0,18	0,1	0,08	0,11	0,01	0,18	0,32	0,17

Tabelle 5-6: Vergleich aufsummierter Abweichungen in mm der Kombinationen 2, 3 und 5 im Vergleich zur simulierten Abweichung der Kombination 29 in den betrachteten Messpunkten.

Im arithmetischen Durchschnitt können die Abweichungen dennoch mit einer Genauigkeit von 0,11 mm ermittelt werden. Insgesamt liegt die durchschnittliche Genauigkeit der rechnerischen Abweichung über alle Kombinationen mit jeweils vier deformierten Verstärkungsteilen (Kombination 27 bis Kombination 31) bei 0,13 mm. Damit nimmt die rechnerische Ungenauigkeit mit steigender Anzahl an deformierten Verstärkungsteilen zu.

Auswertung Kombination 32 – Verwendung ausschließlich deformierter Verstärkungsteile

Der maximale Einfluss der prognostizierten Abweichungen auf die Maßhaltigkeit des ZSB ist erwartungsgemäß unter Verwendung aller deformierter Verstärkungsteile in der Kombination 32 sichtbar. Die Abweichungen liegen hierbei im Bereich von -0,9 mm und +0,5 mm und sind vergleichbar mit den Abweichungen der Kombinationen 18 und 29.

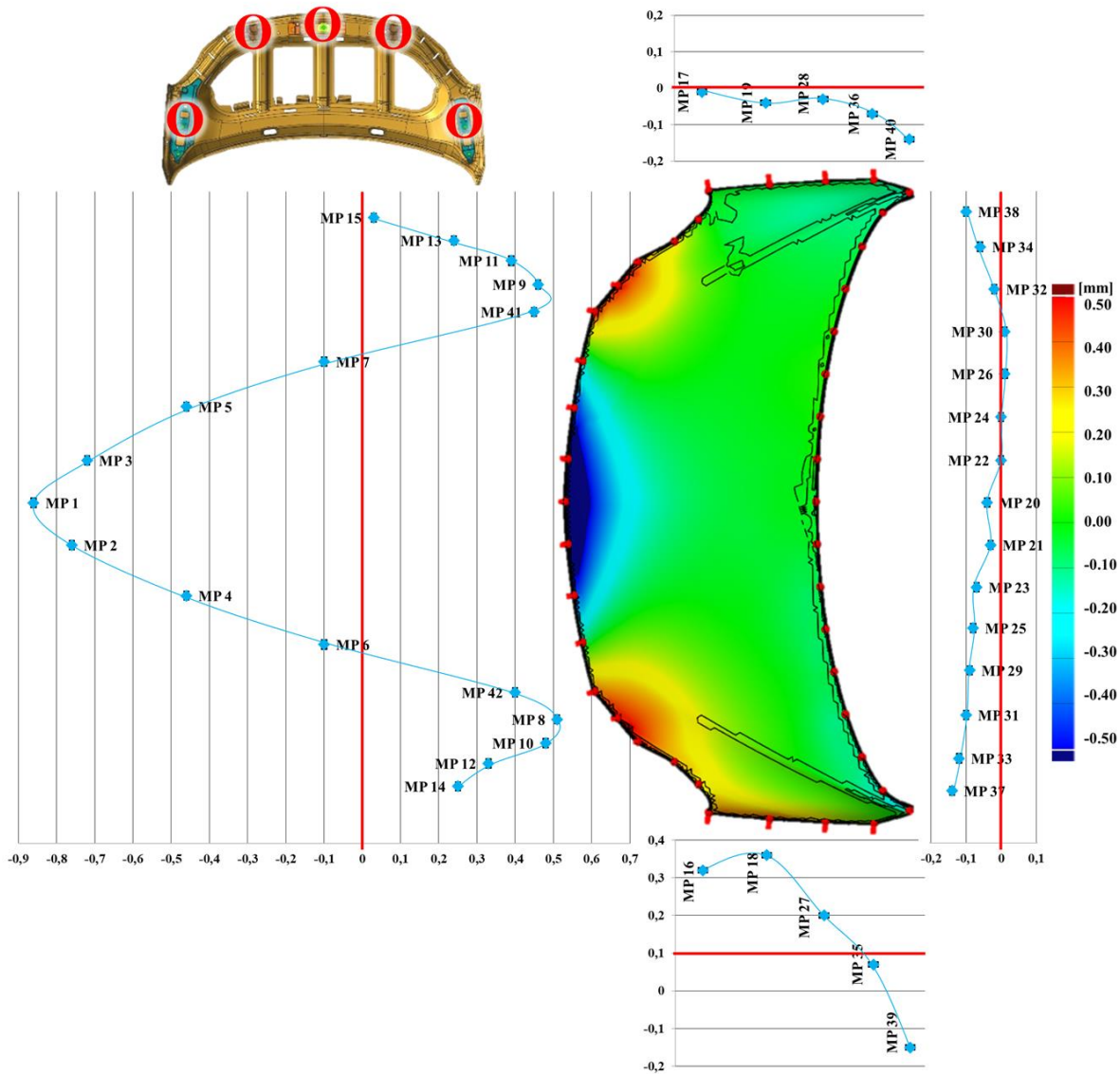


Abb. 5-17: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 32.

Wie bereits der Vergleich der aufsummierten Abweichungen der Einzeluntersuchungen und der Kombination 29 unter Verwendung von vier deformierten Verstärkungsteilen zeigt, ergibt sich auch hier eine zunehmend hohe Diskrepanz zwischen der Aufsummierung der Abweichungen der Einzeluntersuchungen zu den Abweichungen der Untersuchung in der Kombination 32 unter gleichzeitiger Verwendung aller deformierten Bauteile. Hier liegt die maximale Ungenauigkeit bei 0,47 mm in Messpunkt 34 im Frontscheibenbereich des ZSB (vgl. Tabelle 5-7). Insgesamt liegt die durchschnittliche Genauigkeit der rechnerischen Abweichung mit fünf deformierten Verstärkungsteilen bei 0,14 mm. Im Fall der untersuchten Motorhaube ist dieser Ansatz somit für maximal drei deformierte Verstärkungsteile mit ausreichender Genauigkeit gültig.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,36	0,07	0,39	0,04	0,18	0,09	0,11	0,14	-0	0,17	0,07	0,05	0,04	0,01
Simulation Kombination3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,12	0,42	0,1	0,31	0,08	0,13	0,06	-0,1	0,01	-0,1	0	0	-0	-0
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	-0	0,08	0,01	-0,1	-0,1	-0	0	-0,1	0,07	0,08	0,12	0,03	0,1	0,09	0,03	-0,1	-0,1
Simulation Kombination5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0	0,01	0,15	0,06	0,14	-0	0,14	-0	0,12	-0,2	0,29	-0,2	0,33	-0,1	0	0,01
Simulation Kombination6	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0,1	0	-0	0,12	0,08	0,07	0,04	0,05	0,07	-0	-0	0,01	0,04	0,06	0,02	0	0
Summe Kombinationen	-1,1	-0,9	-0,9	-0,5	-0,6	-0	-0,1	0,64	0,56	0,68	0,38	0,36	0,34	0,36	0,03	0,33	0,06	0,55	0,03	-0,1	-0,1
Simulation Kombination32	-0,9	-0,8	-0,7	-0,5	-0,5	-0,1	-0,1	0,51	0,46	0,48	0,39	0,33	0,24	0,25	0,03	0,32	-0	0,36	-0	-0	-0
Differenz absolut	0,21	0,17	0,22	0,02	0,12	0,07	0,02	0,13	0,1	0,2	0,01	0,03	0,1	0,11	0	0,01	0,07	0,19	0,07	0,04	0,09

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination2	0,07	-0	0,05	-0	-0	0,07	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0	-0,2	0,08	-0,1	0,01	-0,2	-0,1	-0,2	0,1	0,25
Simulation Kombination3	-0	-0,1	-0	-0,1	0,01	-0	0,05	-0,1	0,02	-0	0,03	-0	0,05	0,04	0,1	0,03	0,11	0,05	0,09	0,41	0,07
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,06	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0	-0,3	0,05	-0,1	-0	-0,3	-0	-0,3	0,05	-0
Simulation Kombination5	0,01	-0	0,02	-0	0,03	0,19	-0,1	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0	0,05	0,02	-0,1	0,04	-0,2	0,03	0,14	0,09
Simulation Kombination6	0,02	-0	0,04	0	0,03	0,07	0	-0	0	-0	-0,1	0,02	-0,1	0,08	-0,1	0,05	-0,1	0,02	-0,2	0,14	0,07
Summe Kombinationen	-0	-0,2	0,02	-0,2	-0,1	0,38	-0,1	-0,3	-0,3	-0,3	-0,5	-0,1	-0,5	0,3	-0,2	-0	-0,4	-0,2	-0,5	0,84	0,44
Simulation Kombination32	0	-0,1	0	-0,1	0,01	0,2	-0	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0,1	0,07	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	0,45	0,4
Differenz absolut	0,01	0,14	0,02	0,09	0,08	0,18	0,04	0,18	0,27	0,15	0,46	0,02	0,47	0,23	0,12	0,11	0,27	0,03	0,39	0,39	0,04

Tabelle 5-7: Vergleich summierter Abweichungen der Kombination 2, Kombination 3, Kombination 4, Kombination 5 und Kombination 6 zur Abweichung der Kombination 32 in den betrachteten Messpunkten.

Alle an dieser Stelle nicht gezeigten Auswertungen und summierten Abweichungen können Anhang 9.2 entnommen werden.

Auswertung Kombination 32* – Verwendung ausschließlich deformierter Verstärkungsteile unter Verwendung der Standardparameter in der Falzsimulation (Sliding in Hemzone nicht aktiv)

Wie bereits in Kapitel 4.4 erläutert, muss für eine korrekte und realitätsnahe Abbildung des Falzprozesses der sog. „Sliding in Hemzone“ Parameter in der Falzsimulation bzw. in der Entlastungsrechnung des gefalzten ZSB berücksichtigt werden. Unter Verwendung dieses Simulationsparameters wird der Einfluss auf die Maßhaltigkeit des ZSB unter Verwendung deformierter Verstärkungsteile deutlich sichtbar und durch die hier vorgestellten Ergebnisse nachgewiesen. Die Simulation der Kombination 32 unter Verwendung der Standardparameter (vgl. Kapitel 4.3) beim Falzen (hier als Kombination 32* bezeichnet), prognostiziert keinerlei Abweichungen zur Referenzsimulation obwohl alle Verstärkungsteile außerhalb der festgelegten Toleranz liegen (Abb. 5-21).

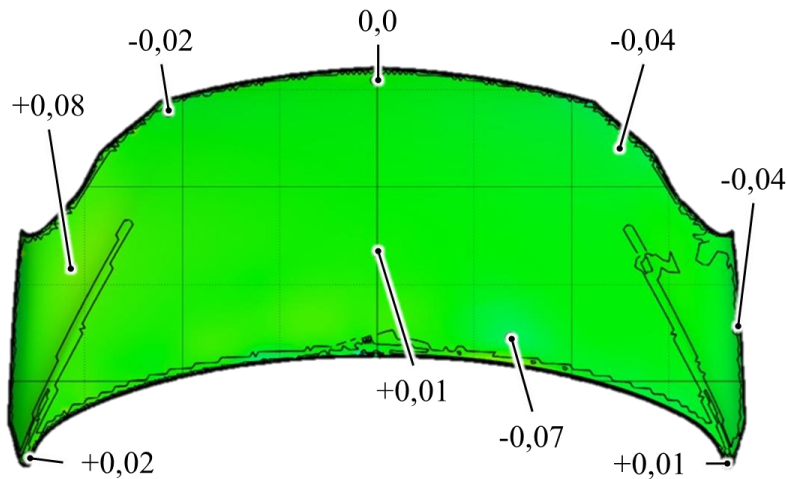


Abb. 5-18: Vergleich der Rückfederungsergebnisse der Referenzsimulation und der Kombination 32* unter Verwendung der Standardparameter in der AutoForm^{plus} Forming R7.1 Beta.

Die Auswertungen aller anderen Kombinationen unter Verwendung der Standardparameter in der Falzsimulation zeigen vergleichbare Ergebnisse. In den Simulationen mit Standardparametern bestimmt die Rückfederung der Außenhautbeplankung die Maßhaltigkeit des ZSB, was allerdings nicht plausibel mit den gezeigten Rückfederungsergebnissen der gescannten Bauteile (vgl. Abb. 5-42) übereinstimmt. Aus diesem Grund wird die Verwendung des neuen „Sliding in Hemzone“ Parameters für die untersuchte Baugruppe dringend empfohlen.

5.3 Zusammenfassung der Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile

Mit der Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile wurde in diesem Kapitel mithilfe der in Kapitel 4 vorgestellten PKS numerisch der singuläre und der kumulierte Einfluss von Formabweichungen der Verstärkungsteile auf die Maßhaltigkeit des ZSB untersucht. Diese dimensional Abweichungen wurden gezielt mithilfe einer Umformsimulation in Form von Bauteildurchbiegungen (vgl. Kapitel 5.1.1) und Bauteilverdrehungen (vgl. Kapitel 5.1.2) in die Verstärkungsteile eingebracht. Die auf diese Weise erzeugten Schlechteile wurden anschließend mit Gutteilen in insgesamt 32 Kombinationen auf Basis eines vollfaktoriellen Versuchsplans und unter Verwendung der vorgestellten PKS im Rahmen der Fertigung des ZSB simulativ untersucht. Die Simulationsparameter der PKS wurden hierbei nicht verändert. Die Rückfederungsergebnisse des ZSB der Kombinationen 2 bis 32 wurden dabei mit dem Rückfederungsergebnis des ZSB der Kombination 1, welches die Referenz des Prozesses darstellte, verglichen und ausgewertet. In den vorgestellten Auswertungen einzelner Kombinationen konnte der Einfluss gezeigt werden, inwieweit sich die erzeugten Formabweichungen der einzelnen Verstärkungsteile auf die Maßhaltigkeit des ZSB auswirken. Zur Verdeutlichung werden die simulierten Rückfederungsergebnisse des ZSB aller Kombinationen (vgl. Tabelle 5-1) in

den festgelegten Messpunkten (vgl. Abb. 5-2) in Abb. 5-19 zusammengefasst. Dabei werden die Mittelwerte der rückfederungsbedingten Abweichungen über alle Kombinationen im jeweiligen Messpunkt als blaue Raute dargestellt und die entsprechenden Minimal- bzw. Maximalwerte durch einen Balken abgebildet.

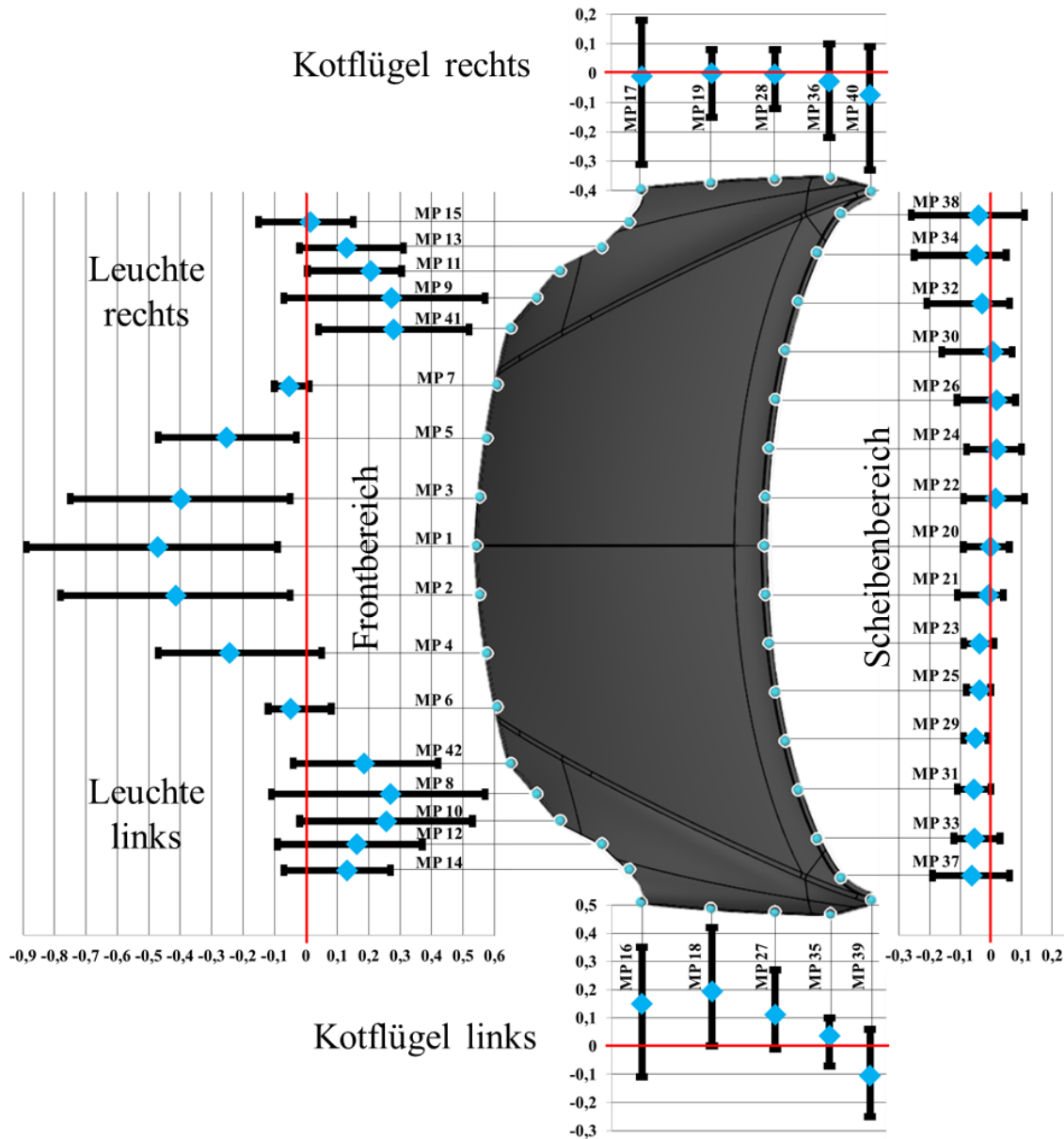


Abb. 5-19: Auswertung aller Rückfederungsergebnisse des ZSB der einzelnen Kombinationen in den einzelnen Messpunkten.

Wie die Auswertungen in Kapitel 5.2 gezeigt haben wird die Maßhaltigkeit des untersuchten ZSB hauptsächlich von den Abweichungen der beiden Pufferverstärkungen und der Scharnierverstärkung links beeinflusst. Die Hauptabweichungen liegen im Frontbereich zwischen + 0,1mm und - 0,9mm sowie in den beiden Leuchtenbereichen zwischen + 0,6mm und - 0,2mm (vgl. Abb. 5-19). Die Durchbiegungen der beiden Scharnierverstärkungen und der Schlossverstärkung verursachen zudem eine Verkipfung des ZSB in den Kotflügelbereichen mit einer

absoluten Maximalabweichung von insgesamt 0,7mm. In allen Kombinationen haben die Maßabweichungen der Verstärkungsteile einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Scheibenbereich und den gesamten Innenbereich der Motorhaube. Diese Bereiche können in Hinblick auf eine mögliche Kompensationsstrategie folglich nur durch das Gerippe oder die Außenhautbeplankung selbst beeinflusst werden. Wie die Ergebnisse der Falzsimulationen in Kapitel 4.4.3 bereits gezeigt haben, bestimmt die Maßhaltigkeit des UZSB im Fall der untersuchten Motorhaube die Maßhaltigkeit des gesamten ZSB recht wesentlich (vgl. Abb. 4-43 unten). Erfahrungsgemäß kann diese Pauschalisierung nicht für andere Baugruppen wie etwa Türen und Klappen getroffen werden. Bei formstabileren Außenhautteilen kann der Einfluss der Außenhaut auf den ZSB unterschätzt werden und die Baugruppe nach dem Falzen trotz maßhaltigem UZSB außerhalb der Toleranz liegen. Hinzu kommt der aufgezeigte Einfluss der Rückfederung im Überlappungsbereich des Falzflansches mit dem Innenblech (vgl. Kapitel 4.3). Kann sich der UZSB dabei nicht wie in der hier untersuchten Baugruppe im Beplankungsteil verschieben, so ist ein größerer Einfluss der Einzelteilabweichungen der Außenhautbeplankung auf den ZSB zu erwarten. Das zeigt auch der in diesem Kapitel durchgeführte Vergleich der Rückfederungsergebnisse der Referenzsimulation und der Kombination 32* unter Verwendung der Standardparameter in der AutoForm^{plus} Forming R7.1 Beta (vgl. Abb. 5-18). In diesem Fall wird von einem Kraftschluss zwischen der Außenhaut und dem Gerippe im Falzbereich ausgegangen. Zur Übertragbarkeit der hier erlangten Erkenntnisse auf andere gefaltete Baugruppen bedarf es folglich weiteren Untersuchungen bspw. an Türen und Klappen für eine exakte Modellierung dieses Rückfederungsverhaltens des Überlappungsbereichs des Falzflansches mit dem Innenblech.

Neben den Simulationsergebnissen der einzelnen Kombinationen wurde in Kapitel 5.2 weiterhin ein vereinfachter Ansatz zur Berechnung der Abweichungen des ZSB auf Basis der Ergebnisse der Einzelteilbetrachtungen gefunden und bewertet. Dabei wurde gezeigt, dass der Einfluss von Formabweichungen einzelner Verstärkungsteile auf die Maßhaltigkeit aller Kombinationen rechnerisch mit nahezu gleicher Prognosegenauigkeit berechnet werden kann ohne dafür alle Kombinationen in einer PKS berechnen zu müssen. Auf diese Weise könnte der Rechenaufwand einer Toleranzsimulation der Einzelteile (vgl. Kapitel 7.5) in einem ZSB deutlich reduziert werden. Dazu müsste jeweils nur der Einfluss einzelner Einzelteilabweichungen (Schwankungen der Bauteilgeometrie innerhalb der festgelegten Toleranzen) auf den ZSB simuliert werden und anschließend der kumulierte Einfluss aller Bauteilabweichungen auf den ZSB rechnerisch ermittelt werden. Auf diese Weise ließen sich festgelegte Toleranzen der Ein-

zelteil-Messpunkte überprüfen und ggf. anpassen. Da mit steigender Anzahl verwendeter, deformierter Verstärkungsteile die Ungenauigkeit dieses Ansatzes zunimmt, wird bei der untersuchten Motorhaube eine vereinfachte Aufsummierung der Abweichungen aus den einzelnen Kombinationen unter Verwendung von maximal drei deformierten Verstärkungsteilen empfohlen.

Zur Bewertung der Genauigkeit der in diesem Kapitel durchgeführten numerischen Untersuchungen werden nun aus dem Versuchsplan ausgewählte Kombinationen (rot umrandete Kombinationen Tabelle 5-1) mithilfe von realen Bauteilversuchen im nächsten Kapitel abgesichert.

6 Absicherung der Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile mittels realer Bauteilversuche

Das Ziel der in diesem Kapitel durchgeführten Versuche ist die Absicherung der vorgestellten Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile mit realen Bauteilversuchen zur Bewertung der Genauigkeit der in Kapitel 5 durchgeführten numerischen Untersuchungen. Bisher konnte mit dem Aufbau einer durchgängigen PKS der Herstellungsprozess der Einzelteillfertigung und des Fügens des UZSB unter Serienbedingungen sowie das Falzen des ZSB unter Laborbedingungen mit relativ guter Übereinstimmung der Rückfederung numerisch abgebildet werden (Kapitel 4). Dazu wurden die einzelnen Simulationsschritte der PKS (vgl. Abb. 4-1) unter Verwendung von ausschließlich Gutteilen der Verstärkungsteile bewertet und durch reale Bauteilscans validiert. Zur Bewertung der lokalen und globalen Struktursteifigkeit bzw. zur Identifizierung von Bauteilbereichen für die Kompensation von rückfederungsbedingten Maßabweichungen des ZSB (vgl. Abb. 6-11) wurde in Kapitel 5 eine Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile durchgeführt. Dazu wurden die Verstärkungsteile in einer Umformsimulation nachträglich so deformiert, dass die entstehenden Maßabweichungen außerhalb der erlaubten Toleranzen lagen (vgl. Kapitel 5.1.1 und 5.1.2) und der entsprechende Einfluss auf die Maßhaltigkeit des ZSB analysiert. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse (vgl. Kapitel 5.3) sollen nun mittels realer Bauteilversuche bestätigt werden. Dazu werden aus den 32 numerisch untersuchten Kombinationen aus Kapitel 5 insgesamt acht repräsentative Varianten ausgewählt (vgl. rot umrandete Kombinationen Tabelle 5-1), die durch reale Versuche nachgebildet und deren Messergebnisse verglichen werden (Tabelle 6-1).

Variante	Verstärkungsteil					zu vergleichen mit Kombination
	Puffer links	Puffer rechts	Schloss	Scharnier links	Scharnier rechts	
Referenz	O	O	O	O	O	1
1	O	O	O	X	O	5
2	X	O	O	X	O	9
3	O	X	O	O	X	13
4	O	X	O	O	X	13
5	X	O	X	O	X	21
6	O	X	X	O	X	24
7	O	O	X	X	X	25
8	X	X	X	X	X	32

Tabelle 6-1: Versuchsplanung der experimentellen Untersuchung zur Absicherung der Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile.

Zur Fertigung dieser Bauteilvarianten wird zunächst ein Versuchswerkzeug für alle Verstärkungsteile konzipiert, mit dem die Verstärkungsteile im experimentellen Umfeld definiert und wiederholgenau entsprechend Abb. 5-4 und Abb. 5-6 deformiert werden können (vgl. Kapitel

6.1). Anschließend werden aus diesen verformten Verstärkungsteilen (Schlechtteile) gemeinsam mit Gutteilen die verschiedenen UZSB-Varianten auf der Serienfügeanlage gefertigt. Daher ist es wichtig, dass die Bauteile trotz der eingebrachten Maßabweichungen in die Serienfügestation eingelegt werden können um den Fügeprozess unter gezielt veränderten Bedingungen realisieren zu können. Danach werden die gefügten UZSB-Varianten aus der Anlage vor dem Serienfalzprozess ausgeschleust und zusammen mit der Außenhaut auf der Versuchsfalzzelle unter Laborbedingungen gefügt. Analog zur Validierung der Falzsimulation (vgl. Kapitel 4.4.3) werden die ZSB-Varianten dann auf der Serienmessaufnahme gescannt und den simulierten Rückfederungsergebnissen der entsprechenden Kombination (vgl. Tabelle 6-1) gegenübergestellt (vgl. Kapitel 6.2). Für einen direkten Vergleich der Ergebnisse dieser Untersuchungen mit denen aus der numerischen Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile (vgl. Kapitel 5) werden die Messungen der gescannten Varianten stets mit der Referenz (vgl. Abb. 4-47) verglichen. Die Absicherung der Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile folgt dabei folgendem Prozessablauf:



Abb. 6-1: Herstellungsprozess der ZSB-Varianten für den Abgleich der Rückfederungsergebnisse mit der jeweiligen PKS.

Im Folgenden werden die einzelnen Bauteilvarianten vorgestellt, mit denen die Einzelteilvariationsanalyse abgesichert werden soll:

- Referenz: Bauteilsan des ZSB mit ausschließlich Gutteilen entsprechend Abb. 4-47 b.
- Variante 1: Einfluss der deformierten Scharnierverstärkung links. Vergleich zum virtuellen ZSB der Kombination 5
- Variante 2: Einfluss der beiden linken deformierten Pufferverstärkungen und der Scharnierverstärkung. Vergleich zum virtuellen ZSB der Kombination 9
- Variante 3: Einfluss der deformierten rechten Pufferverstärkung und der rechten Scharnierverstärkung. Vergleich zum virtuellen ZSB der Kombination 13
- Variante 4: Wiederholung der Variante 3 zur Bewertung möglicher Prozessschwankungen
- Variante 5: Einfluss der deformierten Pufferverstärkung links, der Schlossverstärkung und der Scharnierverstärkung rechts. Vergleich zum virtuellen ZSB der Kombination 21
- Variante 6: Einfluss der deformierten Schlossverstärkung, der beiden rechten Pufferverstärkung und der Scharnierverstärkung. Vergleich zum virtuellen ZSB der Kombination 24
- Variante 7: Einfluss der deformierten Schlossverstärkung und beider Scharnierverstärkungen. Vergleich zum virtuellen ZSB der Kombination 25
- Variante 8: Einfluss aller deformierter Verstärkungsteile. Vergleich zum virtuellen ZSB der Kombination 32

Zur statistischen Absicherung der Messergebnisse wird eine der Kombinationen zweifach gefertigt (vgl. Variante 3 und 4, Tabelle 6-1) und mögliche Ergebnisschwankungen bewertet.

6.1 Konzipierung eines Versuchswerkzeugs

Die in den Kapiteln 5.1.1 und 5.1.2 simulativ erzielten Maßabweichungen der Verstärkungsteile werden mittels eines Versuchsaufbaus im Laborbetrieb manuell in die Verstärkungsteile eingebracht. Für die Herstellung dieser reproduzierbar verformten Verstärkungsteile stand eine Werkstatttrichtpresse der Firma metallkraft® mit 60 t Nennkraft zur Verfügung. Die Kontaktflächen der Auflage-, Spann- und Biegesegmente wurden anhand der Nominalflächen der Bauteile abgeleitet. Die Eindringtiefe der Biegesemente wurde in der Simulation für alle Bauteile mit 4mm festgelegt (vgl. Kapitel 5.1) und im Werkzeug entsprechend umgesetzt. Die Bauteile wurden während der Versuchsdurchführung nach dem Einlegen mit einer Schraube und einer Spannscheibe auf den Auflagesegmenten verspannt und anschließend mit den Biegesegmenten

verformt. Eingebaute Distanzen sicherten dabei das wiederholgenaue Erreichen der festgelegten Eindringtiefe.

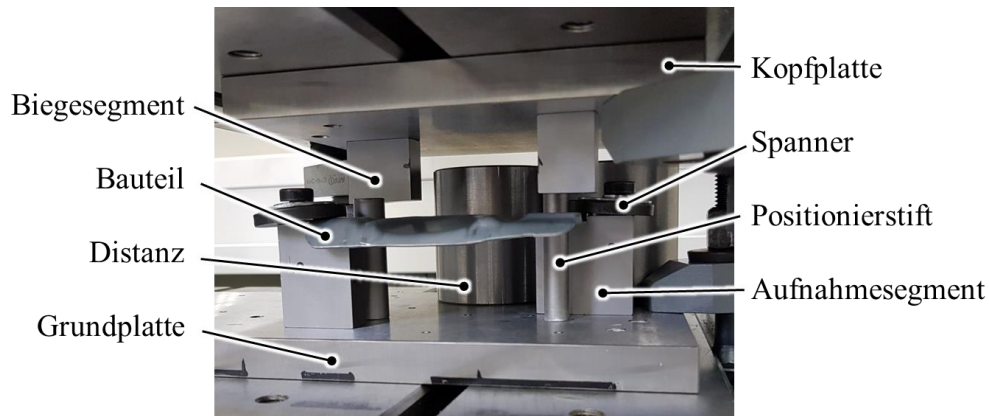


Abb. 6-2: Versuchsaufbau zur Erzeugung einer Bauteilverdrehung der Pufferverstärkung links.

Danach wurden die Spanner gelöst und die Bauteile im entlasteten Zustand optisch auf den Aufnahmesegmenten vermessen. Das Werkzeug diente somit gleichzeitig als Messaufnahme der deformierten Bauteile (vgl. Abb. 6-3). Für ein reproduzierbares Messergebnis, wurden Referenzpunkte auf das Bauteil und das Werkzeug geklebt, welche durch das optische Messsystem erfasst wurden.

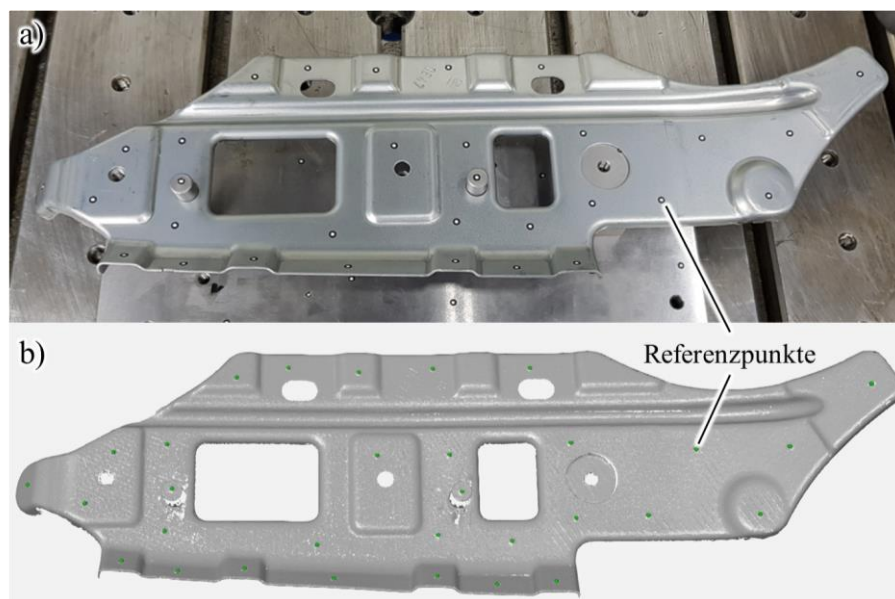


Abb. 6-3: a) Scharnierverstärkung links mit aufgeklebten Referenzpunkten auf der Aufnahme sowie b) digitalisiertes Bauteil.

Die Positionierung des gescannten Bauteilnetzes in Relation zu den Ergebnissen der Simulation erfolgte mithilfe der Positionen der Stifte und der Löcher, welche hierfür als Referenz dienten. Anschließend konnten die gescannten Teile mit den Simulationsergebnissen verglichen werden. Abb. 6-4 zeigt beispielhaft einen Vergleich der Messergebnisse der Pufferverstärkung links und der entsprechenden Ergebnisse aus der Umformsimulation. Lokale Abweichungen

(orangefarbene Pfeile Abb. 6-4) sind einzelne Lücken im Scan, die nicht richtig vom Streifenprojektionsscanner erfasst wurden. Die maximalen Abweichungen zwischen den realen Messergebnissen aller deformierter Verstärkungsteile und denen der Simulation liegen innerhalb der festgelegten Bauteiltoleranzen (vgl. Kapitel 4.1), sodass die virtuelle Abbildung des Deformationsprozesses der Verstärkungsteile realistisch erscheint.

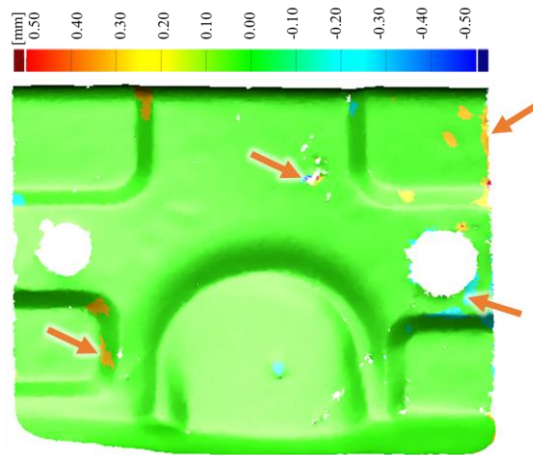


Abb. 6-4: Auswertung der deformierten Pufferverstärkung links mittels eines Vergleichs der gescannten und der entlasteten Bauteilgeometrie nach der Umformsimulation.

6.2 Auswertung der Bauteilversuche

Nach der Herstellung deformierter Verstärkungsteile im experimentellen Versuchsaufbau (vgl. Kapitel 6.1) werden diese gemeinsam mit Gutteilen entsprechend dem Versuchsplan (Tabelle 6-1) auf der Serienfügeanlage mit einem Gerippe aus der Serienfertigung gefügt. Die hergestellten UZSB-Varianten werden anschließend auf der Versuchsfalzzelle mit einer Außenhautbeplankung auf der Serienfertigung zur entsprechenden ZSB-Variante gefügt. Diese werden danach optisch mit einem Streifenprojektionsscanner analog zur Validierung der Falzsimulation (vgl. Kapitel 4.4.3) auf der Serienmessaufnahme gescannt und den simulierten Rückfederungsergebnissen der entsprechenden Kombination (vgl. Tabelle 6-1) gegenübergestellt. Auf Basis der Übereinstimmung der Bauteilversuche mit den simulierten Kombinationen kann eine Aussage über die Prognosegenauigkeit der Rückfederungsergebnisse der PKS für die untersuchte Motorhaube getroffen werden und die zuvor analysierte Struktursteifigkeit des ZSB (vgl. Kapitel 5.3) bei guter Übereinstimmung bestätigt werden. Nachfolgend werden die Auswertung und der Vergleich der realen und der virtuellen Messergebnisse vorgestellt.

Auswertung Variante 1 – Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse der Kombination 5

Bei der Auswertung von Variante 1 in Abb. 6-5 unter Verwendung des deformierten Verstärkungsteils der Scharnierverstärkung links zeigt die gemessene Rückfederung des gescannten

ZSB dieselbe Tendenz wie dies bereits durch die Simulation der Kombination 5 prognostiziert wurde (vgl. Abb. 5-10).

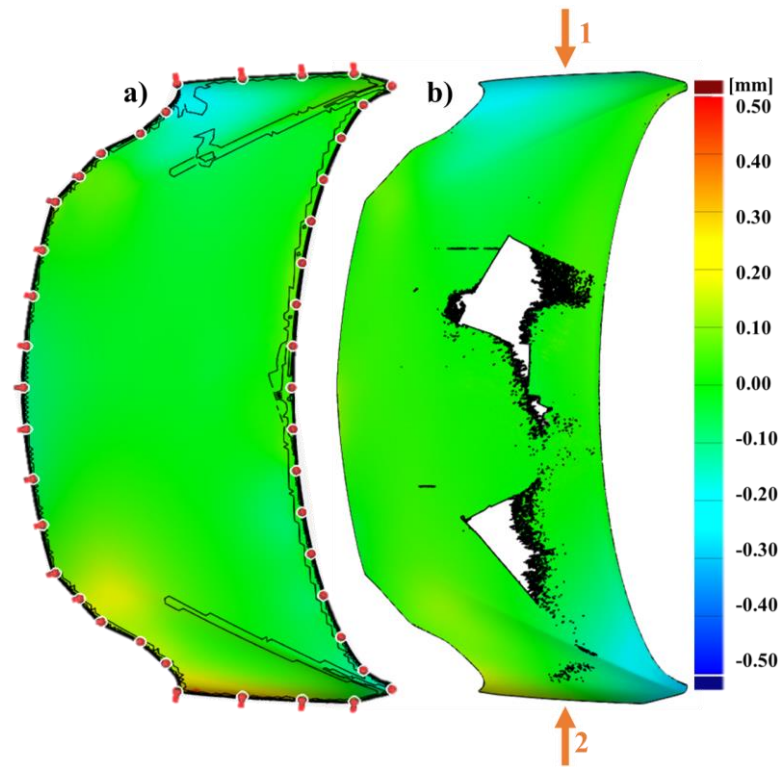


Abb. 6-5: Gegenüberstellung der rückfederungsbedingten Maßabweichungen von den a) Simulationsergebnissen der Kombination 5 und b) der gescannten Variante 1.

Dabei wird die Baugruppe über die beiden Kotflügelbereiche verdreht (vgl. orangefarbene Pfeile 1 und 2, Abb. 6-5), während die restlichen Bereiche kaum beeinflusst werden. Im Unterschied zur Simulation ist die Verkipfung im linken Kotflügelbereich (orangefarbener Pfeil 2) etwas stärker ausgeprägt. Insgesamt kann aber eine recht gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der PKS und der gescannten Baugruppe festgestellt werden.

Auswertung Variante 2 – Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse der Kombination 9

In der Gegenüberstellung der beiden Auswertungen der Variante 2 und der virtuellen Kombination 9, wird der Einfluss der deformierten linken Puffer- und Scharnierverstärkung untersucht (vgl. Abb. 6-6). Insgesamt wird die Rückfederung durch das Simulationsmodell qualitativ richtig prognostiziert. Dabei wird die Rückfederung jedoch quantitativ im Frontbereich leicht unterschätzt (orangefarbener Pfeil 1, Abb. 6-6) und im linken Leuchtenbereich überschätzt (orangefarbener Pfeil 2). Weiterhin zeigt die gescannte Baugruppe ein leichtes Auffedern im Übergang des rechten Kotflügelbereichs zum Frontscheibenbereich (orangefarbener Pfeil 3).

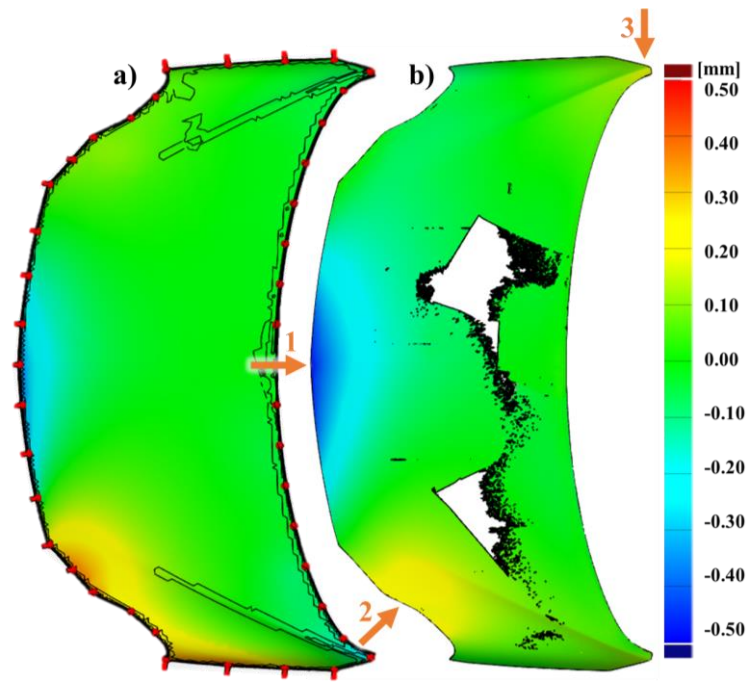


Abb. 6-6: Gegenüberstellung der rückfederungsbedingen Maßabweichungen von den a) Simulationsergebnissen der Kombination 9 und b) der gescannten Variante 2.

Auswertung Variante 3 – Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse der Kombination 13

In der Gegenüberstellung der beiden Auswertungen der Variante 3 und der virtuellen Kombination 13 wird der Einfluss der deformierten rechten Puffer- und der Scharnierverstärkung untersucht.

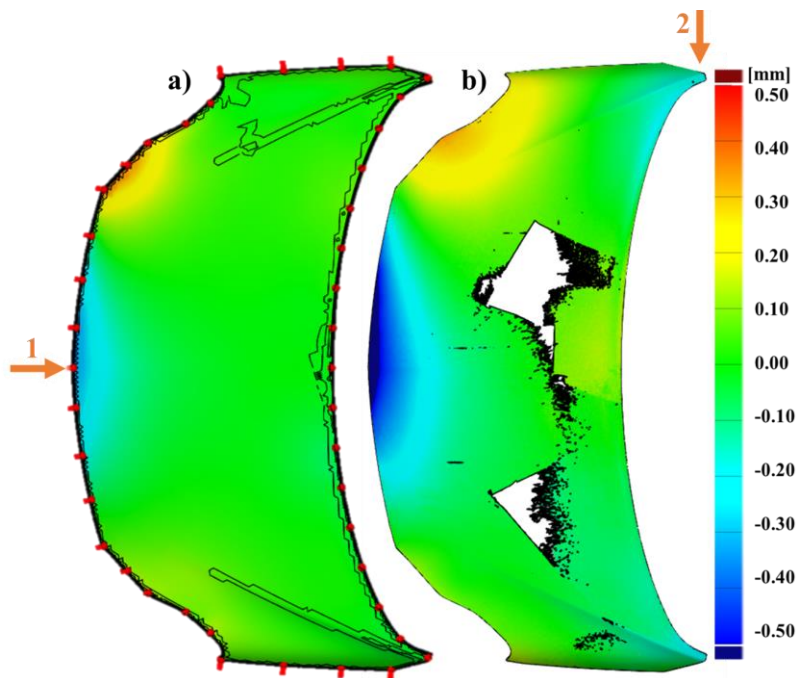


Abb. 6-7: Gegenüberstellung der rückfederungsbedingen Maßabweichungen von den a) Simulationsergebnissen der Kombination 13 und b) der gescannten Variante 3.

Wie auch in Variante 2 wird die Rückfederung im Frontbereich durch die verdrehte Pufferverstärkung in der Simulation unterschätzt (orangefarbener Pfeil 1, Abb. 6-7). Außerdem zeigt die gescannte Baugruppe einen größeren Einfluss der Scharnierverstärkung rechts. Die gesamte Baugruppe verkippt marginal nach hinten in Richtung Frontscheibe (orangefarbener Pfeil 2). Neben diesen leichten Abweichungen zeigt die PKS jedoch eine gute Übereinstimmung zu den Messergebnissen der gescannten ZSB-Variante 3.

Auswertung Variante 4 – Gegenüberstellung der Ergebnisse der Variante 3

In der Auswertung der Variante 4 werden mögliche Prozessschwankungen untersucht. Aus diesem Grund erfolgt die Gegenüberstellung der Auswertungen der beiden gescannten Varianten 3 mit Variante 4, welche baugleich sind. Der direkte Vergleich der beiden Varianten zeigt eine sowohl qualitativ als auch quantitativ gute Übereinstimmung der Rückfederungswerte in allen Bereichen. Lediglich im Übergang des linken Kotflügelbereichs zum Frontscheibenbereich sind geringe Unterschiede zu erkennen (orangefarbener Pfeil 1, Abb. 6-8). Dieser Bereich ist in Variante 4 vergleichbar mit dem Verhalten, welches durch die Simulation der Kombination 13 prognostiziert wurde (vgl. Abb. 6-7 a). Allerdings wird der Betrag der Rückfederung in der PKS im Frontbereich (orangefarbener Pfeil 2, Abb. 6-8) noch stärker überschätzt als dies in Variante 3 der Fall ist.

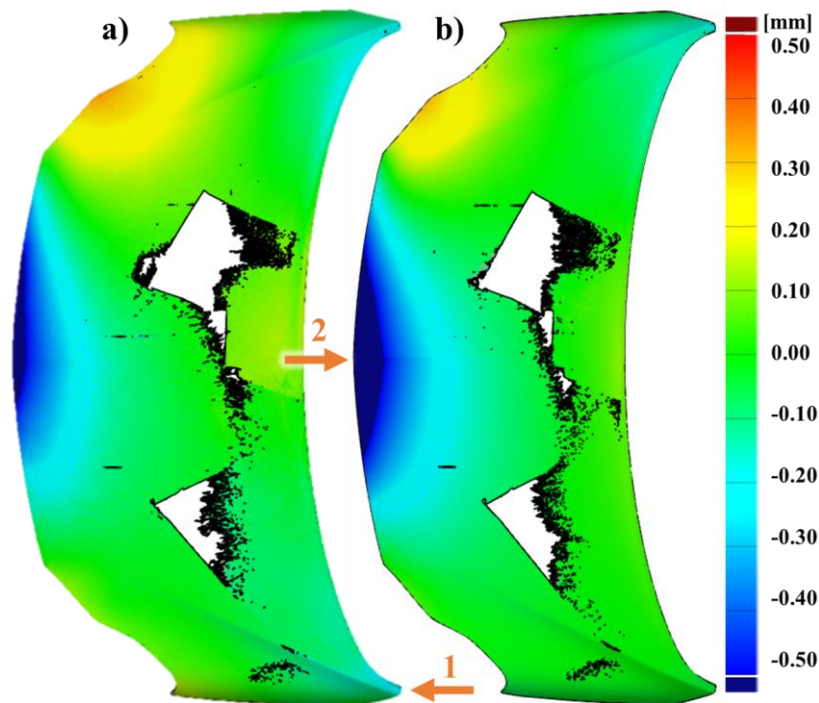


Abb. 6-8: Gegenüberstellung der rückfederungsbedingten Maßabweichungen von der a) gescannten Variante 3 und b) der gescannten Variante 4.

Auswertung Variante 5 – Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse der Kombination 21

In Variante 5 wird der Einfluss von insgesamt drei deformierten Verstärkungsteilen untersucht (Pufferverstärkung links, Schlossverstärkung und Scharnierverstärkung rechts). Die Gegenüberstellung der Auswertungen zeigt dabei eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse der PKS zur gescannten Baugruppe. Auch hier wird die Richtung der Rückfederung sehr gut abgebildet, während der Betrag der Rückfederung in der Simulation marginal unterschätzt wird (orangefarbene Pfeile 1, Abb. 6-9). Außerdem ist der Einfluss der deformierten Verstärkungsteile im linken Leuchtenbereich örtlich leicht verschoben (orangefarbener Pfeil 2).

In den Auswertungen der Varianten 6 und 7 werden ähnliche Ergebnisgenauigkeiten wie in der Variante 5 erzielt. Daher werden die Ergebnisse an dieser Stelle nicht näher erläutert, die Gegenüberstellungen dieser Varianten zu den jeweiligen PKS können Anhang 9.3 entnommen werden.

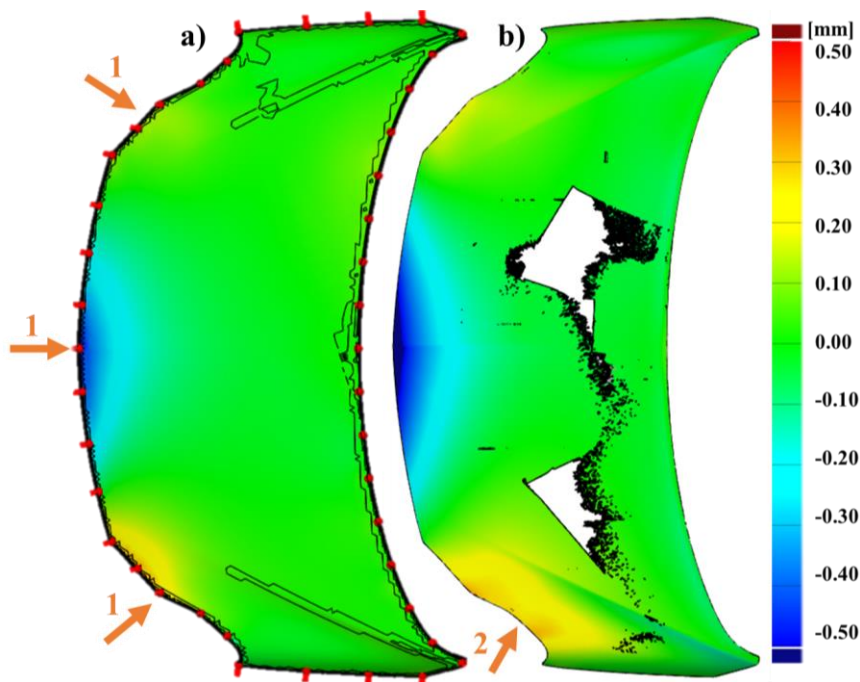


Abb. 6-9: Gegenüberstellung der rückfederungsbedingen Maßabweichungen von den a) Simulationsergebnissen der Kombination 21 und b) der gescannten Variante 5.

Auswertung Variante 8 – Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse der Kombination 32

In Variante 8 wird der Einfluss aller deformierten Verstärkungsteile auf die Maßhaltigkeit des ZSB und der Vergleich mit den Ergebnissen der PKS der Kombination 32 untersucht.

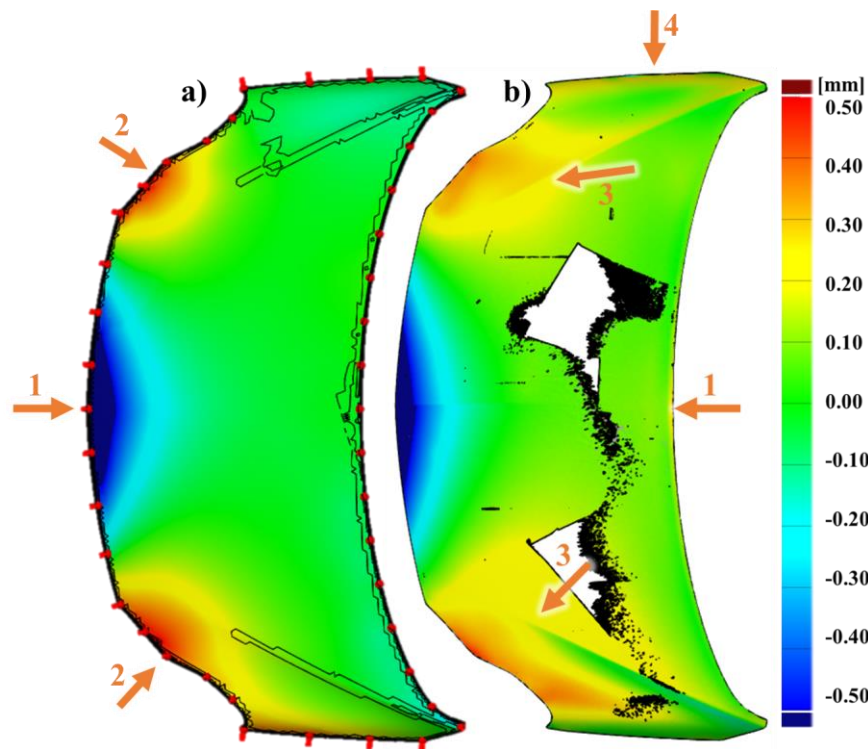


Abb. 6-10: Gegenüberstellung der rückfederungsbedingten Maßabweichungen von den a) Simulationsergebnissen der Kombination 32 und b) der gescannten Variante 8.

Dabei stimmen Betrag und Richtung der Rückfederung im Frontbereich und im Scheibenbereich sehr gut überein (orangefarbene Pfeile 1, Abb. 6-10). In den Leuchtenbereichen links und rechts wird der Betrag der Rückfederung in Umrissnähe des ZSB ebenfalls recht gut abgebildet (orangefarbene Pfeile 2), im Innenbereich des ZSB zeigt die gescannte Baugruppe einen größeren Einfluss der deformierten Verstärkungsteile als dies die Simulation prognostiziert wurde (orangefarbene Pfeile 3). Weiterhin federt der rechte Kotflügelbereich etwas auf (orangefarbener Pfeil 4). Die PKS der Kombination 32 zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung zur gescannten Variante 8.

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Bauteilversuche zur Absicherung der Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile zusammengefasst und diskutiert.

6.3 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Mithilfe der ausgeführten Gegenüberstellungen konnte neben marginalen Abweichungen zwischen den realen und den mittels Simulation berechneten Rückfederungsergebnissen insgesamt eine recht gute Prognosegenauigkeit der in Kapitel 5 durchgeführten Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile nachgewiesen werden. Dabei wurde gezeigt, dass die Richtung der Rückfederung in der Simulation qualitativ richtig berechnet wird. Quantitativ wird der Betrag der Rückfederung in der Simulation teilweise leicht unterschätzt. Das sollte später bspw. bei der Anpassung der Werkzeugwirkflächen zur Kompensation der Rückfederung

der Einzelteile durch einen größeren Kompensationsfaktor (Formel (1), Seite 28) berücksichtigt werden. Insgesamt wurde durch den Aufbau der PKS in Kapitel 4 und durch die numerische Analyse von Formabweichungen der Verstärkungsteile in Kapitel 5 ein besseres Verständnis der lokalen und globalen Struktursteifigkeit des untersuchten ZSB erlangt. Dabei wurde im Fall der untersuchten Motorhaube festgestellt, dass die dimensionale Bauteilqualität des ZSB hauptsächlich von der Maßhaltigkeit des formstabilen Innenteils abhängig ist. Außerdem konnte festgestellt werden inwiefern sich Maßabweichungen der Verstärkungsteile auf die Rückfederung des ZSB auswirken und welche Bauteilbereiche davon betroffen sind. Diese Ergebnisse aus Kapitel 5.3 konnten mit den durchgeführten Bauteilversuchen in diesem Kapitel bestätigt werden. Zur Verbesserung der Maßhaltigkeit des ZSB ist es daher sinnvoll mit diesen Erkenntnissen eine wirkflächenbasierte Kompensationsstrategie der Ziehanalge des Innenteils festzulegen. Dazu können bereits jetzt lokale Bauteilbereiche des Innenteils identifiziert werden, die mithilfe der neuen Kompensationsmethode im nächsten Kapitel (vgl. Kapitel 7) angepasst werden sollen (vgl. Abb. 5-19).

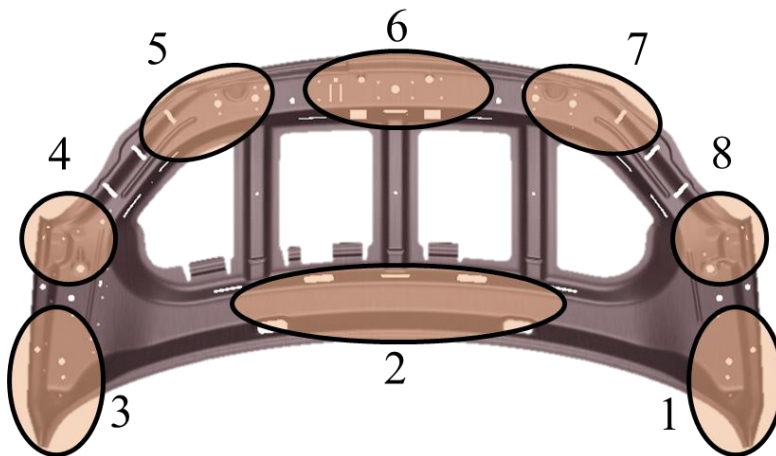


Abb. 6-11: Identifizierung von lokalen Bauteilbereichen des Innenteils, die zur Verbesserung der Maßhaltigkeit des ZSB mit der neuen Kompensationsmethode angepasst werden sollen.

Dabei werden die Bereiche wie folgt festgelegt:

- Bereich 1 und Bereich 8 im Kotflügelbereich rechts. Festlegung von zwei Einzelbereichen zur Kompensation der gezeigten Bauteilverdrehungen des ZSB in den Kombinationen 2,4 und 5 (vgl. Abb. 5-7, Abb. 5-9 und Abb. 5-10)
- Bereich 3 und 4 im Kotflügelbereich links. Festlegung analog zu Bereichen 1 und 8 zur Kompensation der gezeigten Bauteilverdrehung des ZSB in Kombination 5 (vgl. Abb. 5-10)
- Bereich 5 im Leuchtenbereich links zur Kompensation der Abweichungen verursacht durch die Pufferverstärkung links (Kombination 2, Abb. 5-7)

- Bereich 6 im Frontbereich zur Kompensation der durch die beiden Pufferverstärkungen verursachten Abweichungen (Kombination 2 und 3, Abb. 5-7 und Abb. 5-8)
- Bereich 7 im Leuchtenbereich rechts zur Kompensation der Abweichungen verursacht durch die Pufferverstärkung links (Kombination 2, Abb. 5-7)
- Bereich 2 im Scheibenbereich. Festlegung eines Bereiches, da dieser nicht durch die Verstärkungsteile beeinflusst werden kann

Auf Basis der bestätigten Prognosegenauigkeit der Rückfederung des ZSB der modellierten PKS wird nun im nächsten Kapitel eine neue Kompensationsmethode vorgestellt, mit deren Hilfe die Maßhaltigkeit des ZSB numerisch verbessert werden kann.

7 Entwicklung einer neuartigen Kompensationsmethode

Mithilfe der vorgestellten PKS wird nun eine neuartige, vorwärtsgerichtete Kompensationsmethode vorgestellt, mit der die dimensionale Bauteilqualität eines ZSB analysiert und verbessert werden kann. Der Grundgedanke dieser Kompensationsmethode ist die Verknüpfung der stochastischen Analyse (vgl. Kapitel 2.10.2) mit der in Kapitel 4 vorgestellten PKS und die Überführung der ermittelten Ergebnisse in ein Meta-Modell. Im Gegensatz zu konventionellen Methoden (vgl. Kapitel 2.8), die iterativ einzelne gemessene oder simulierte Abweichungen kompensieren (rückwärtsgerichtete Methoden), soll mit der neuen Methode die Analyse des Rückfederungsverhaltens eines ZSB in allen Prozessen und Bauteilen der Herstellung ermöglicht werden (vorwärtsgerichtete Methode). Im Gegensatz zu den bisherigen Erkenntnissen aus dem Stand der Technik soll diese Methode ohne Daten-Mapping oder Remeshing der Bauteilnetze zwischen den einzelnen Simulationsschritten der PKS auskommen (vgl. Kapitel 2.9.8). Im Folgenden wird die Entwicklung der Methode zunächst allgemein beschrieben und anschließend am Beispiel einer Wirkflächenkompensation der Ziehanalge des Innenteils zur Verbesserung der Maßhaltigkeit des untersuchten Motorhauben-ZSB angewendet.

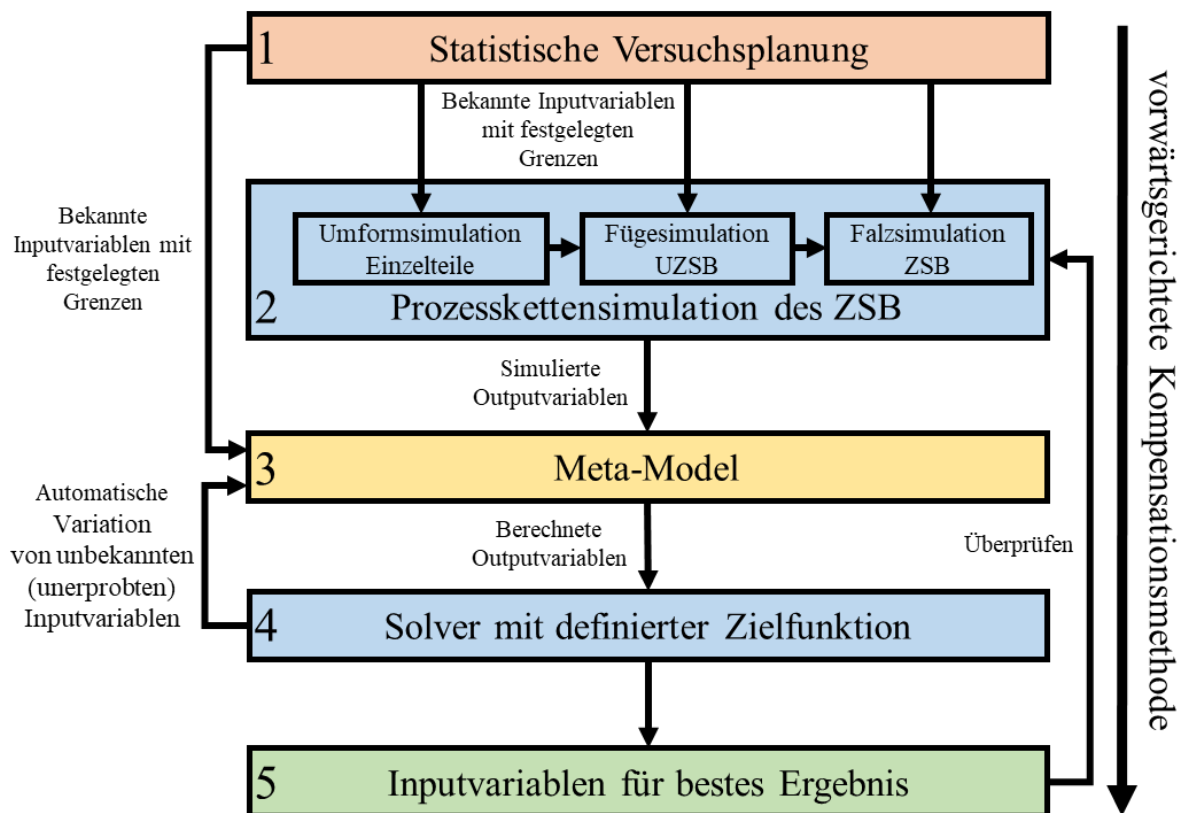


Abb. 7-1: Prinzipdarstellung der neuartigen, vorwärtsgerichteten Kompensationsmethode.

Als Basis der Methode muss immer eine möglichst durchgängige PKS des zu untersuchenden ZSB modelliert werden (vgl. Kapitel 4). Anschließend wird die Kompensationsmethode in fünf Schritten eingesetzt (vgl. Abb. 7-1):

1. Bei der statistischen Versuchsplanung wird der Umfang der durchzuführenden Versuche (Anzahl an zu berechnenden PKS) bestimmt. Dabei werden die zu untersuchenden Parameter und die entsprechenden Werte definiert. Diese Werte und Parameter können bspw. veränderte (modifizierte) Wirkflächen der Umformwerkzeuge der Einzelteile, veränderte Bauteilgeometrien der Einzelteile und schwankende Materialparameter der Blechwerkstoffe in der Umformsimulation sein; veränderte Spann- und Fügereihenfolgen und veränderte Endpositionen der Spann- und Fügepunkte in der Fügesimulation sowie veränderte Rollenanstellwinkel und Rollrichtungen in der Falzsimulation u.v.m. Zur Begrenzung des Versuchsumfangs wird das Samplingverfahren auf Basis der LHC-Methode (vgl. Kapitel 2.10.2) verwendet. Dadurch erfolgt eine systematische Auswahl der Inputvariablen wobei Toleranzbereiche und Grenzen der Parameter und der Werte (vgl. maximal zulässige Modifikationswerte, Abb. 7-2) berücksichtigt werden. Die statistische Versuchsplanung liefert die Inputvariablen mit festgelegten Grenzen für die anschließend durchzuführenden Prozesskettensimulationen des ZSB (Schritt 2) und zur Erstellung des Meta-Modells (Schritt 3). Mit diesen Inputvariablen kann das Rückfederungsverhalten des ZSB bei unterschiedlichen Parametern und Werten analysiert werden
2. Mithilfe der Inputvariablen der statistischen Versuchsplanung werden die verschiedenen Varianten der Prozesskettensimulation des ZSB modelliert, berechnet und anschließend ausgewertet. Zur Analyse der Maßhaltigkeit des ZSB werden bspw. die PKS-Rückfederungsergebnisse statistisch in einzelnen Messpunkten oder auch insgesamt in allen Knoten des Baugruppenetzes erfasst. Schritt 2 liefert somit die Outputvariablen in Form von Messdaten der rückfederungsbedingten Maßabweichungen der Baugruppe
3. Auf Basis der bekannten Inputvariablen der statistischen Versuchsplanung und der durch Simulation ermittelten Outputvariablen der Prozesskettensimulationen der Baugruppe wird anschließend mittels des räumlichen Kriging-Interpolationsverfahrens ein Meta-Modell erstellt (vgl. Kapitel 2.10.3). Mit diesem Meta-Modell kann dann das Rückfederungsverhalten der Baugruppe (Outputvariablen) für beliebige und bisher nicht erprobte Parameter und Werte (Inputvariablen innerhalb der festgelegten Grenzen) berechnet werden ohne dafür weitere PKS berechnen zu müssen
4. Mithilfe eines Solvers und dem Definieren einer Zielfunktion können dann durch automatische Variation von unerprobten Inputvariablen (vgl. Abb. 7-6) im erstellten Meta-

Modell diejenigen Inputvariablen gefunden werden, die zum bestmöglichen oder gewünschten Ergebnis (Minimierung der Rückfederung der Baugruppe) und damit zur Erreichung der Zielfunktion führen

5. Die Wirksamkeit der vorwärtsgerichteten Kompensationsmethode kann abschließend überprüft werden indem die mithilfe des Solvers ermittelten Inputvariablen in die PKS eingesetzt werden und das Rückfederungsergebnis des ZSB berechnet wird. Dadurch erfolgt erst die eigentliche Kompensation der Maßabweichungen des ZSB

Die Voruntersuchungen haben ergeben, dass die Maßhaltigkeit der untersuchten Baugruppe wesentlich von der Maßhaltigkeit des formstabilen Innenteils beeinflusst wird (vgl. Kapitel 6.3). Aus diesem Grund wird die neuartige Kompensationsstrategie in den folgenden Kapiteln prinzipiell anhand einer Wirkflächenkompensation der Ziehanlage des Innenteils erläutert. Als Basis dient das Rückfederungsergebnis des ZSB der simulierten Kombination 32 mit ausschließlich Schlechteilen der Verstärkungsteile (vgl. Abb. 6-10 a).

7.1 Statistische Versuchsplanung

Das Ziel der folgenden Anwendung der Methode ist die Verbesserung der rückfederungsbedingten Maßabweichungen des untersuchten Motorhauben-ZSB durch Kompensation der Wirkflächen der Ziehstufe des Innenteils. Dazu wurden bereits einzelne Bauteilbereiche des Innenteils festgelegt (vgl. Abb. 6-11), die nach einem festgelegten Versuchsplan geometrisch modifiziert werden sollen (vgl. Tabelle 7-1). Die Werkzeugwirkflächen aller anderen Bauteile werden dabei nicht verändert. Am untersuchten Beispiel der Motorhaube wurden insgesamt acht Bereiche festgelegt. Zur Reduzierung des Versuchsaufwands werden für diese Bereiche entsprechende Grenzen festgelegt (vgl. Abb. 7-2).

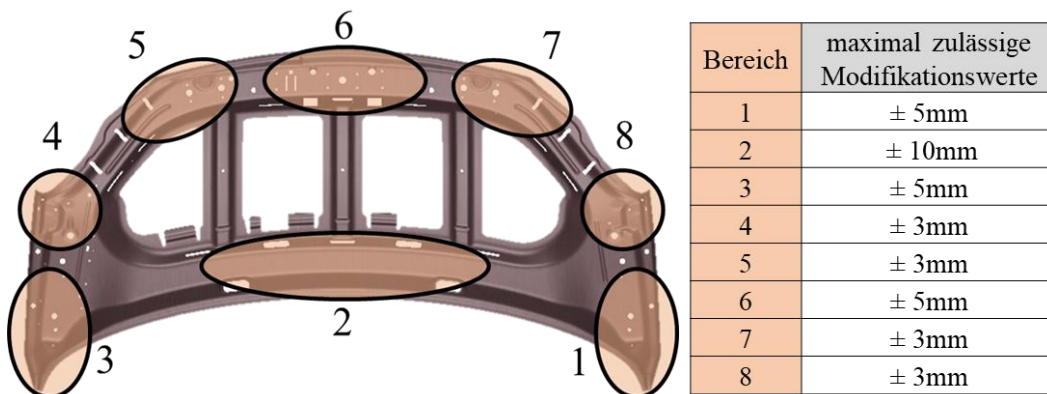


Abb. 7-2: Festgelegte Bereiche und maximal zulässige Werte für die geometrische Wirkflächenmodifikation der Ziehanlage des Innenteils.

Diese Grenzen beziehen sich auf die maximal zulässige geometrische Modifikation der Wirkflächen der Ziehstufe des Innenteils in z-Richtung. In der Regel wird hierbei auf Erfahrungswerte anderer Fahrzeugderivate oder Vorgängermodelle zur Festlegung adäquater Werte zurückgegriffen. Werden innerhalb dieser festgelegten Grenzen die Modifikationswerte in 1 mm-Schritten verändert, müssten bei einem vollfaktoriellen Versuchsplan (vgl. Kapitel 2.10.1) über 67 Millionen Kombinationen untersucht werden. Da dies unter Berücksichtigung der Rechenzeit und der Speicherkapazität der Rechner nicht möglich ist, muss die Anzahl an Varianten deutlich reduziert werden. Für die vergleichsweise langen Rechenzeiten der Simulationen ist daher ein Samplingverfahren erforderlich, bei dem möglichst wenige Berechnungen notwendig sind bei ähnlicher Ergebnisgenauigkeit [Emr13]. Für die Versuchsplanerstellung wird aus diesem Grund das LHS eingesetzt, welche eine reduzierte Variante der Monte-Carlo-Methode darstellt (vgl. Kapitel 2.10.2). Für das LHS wird eine Normalverteilung der möglichen Modifikationswerte vorausgesetzt. Weiterhin wird festgelegt, dass keine Korrelationen zwischen den Modifikationswerten der einzelnen Bereiche bestehen. Zur Prinzipdarstellung der Methode werden insgesamt zunächst 20 verschiedene Varianten (Runs) berechnet. Diese Anzahl an Runs wurde in Hinblick auf die langen Rechenzeiten und dem hohen Aufwand für die netzbasierte Modifikation der Wirkflächen (vgl. Kapitel 7.2) festgelegt. Für den hier gezeigten Anwendungsfall konnte mit dieser Variantenanzahl ein sehr gutes Ergebnis erzielt werden (vgl. Abb. 7-8). Dennoch führt in der Regel eine höhere Anzahl an Runs stets zu einer besseren Abbildung des Rückfederungsverhaltens des ZSB im Meta-Modell. Zusätzlich wird die Simulationsmethode des Innenteils derart angepasst, dass der gesamte Beschnitt in lediglich einer Operation durchgeführt und das Kalibrieren (vgl. OP50 Abb. 4-23) vernachlässigt wird. Dadurch wird zusätzlich Rechenzeit verringert und ein Einfluss der Folgeoperationen auf die Prognosegenauigkeit der entwickelten Methode ausgeschlossen.

Beim LHS werden nun unter Berücksichtigung einer Normalverteilung mit den maximal zulässigen Grenzen (Abb. 7-2) die zu betrachtenden Inputvariablen (Modifikationswerte der einzelnen Bereiche der Wirkflächen der Ziehstufe des Innenteils) in 20 Intervalle mit gleicher Wahrscheinlichkeit unterteilt. Dabei entspricht die Anzahl der Intervalle der insgesamt 20 durchzuführenden, vorher festgelegten Runs. Anschließend wird eine kumulative Wahrscheinlichkeit aus jedem Intervall als Stichprobe entnommen, wobei für jeden Bereich die gleiche Anzahl an Stichproben entnommen wird (analog zu Abb. 2-42). Danach werden die einzelnen Stichproben im LHS über eine Permutation zu einer LHC-Matrix kombiniert (vgl. Kapitel 2.10.2). Auf diese Weise entsteht der Versuchsplan (vgl. Tabelle 7-1), nach dem die einzelnen Bereiche geometrisch Modifiziert werden sollen. Demnach wird bspw. im „Run1“ der Bereich1 (vgl. Abb. 7-2)

in den Wirkflächen der Ziehstufe um +2,87mm in z-Richtung angehoben und Bereich8 um -0,74mm abgesenkt.

	Modifikationswerte in [mm]							
	Bereich1	Bereich2	Bereich3	Bereich4	Bereich5	Bereich6	Bereich7	Bereich8
Run1	2,87	4,47	1,31	0,45	0,22	-0,17	-0,49	-0,74
Run2	-1,34	-5,81	1,57	-2,85	-2,41	3,98	1,45	-1,51
Run3	-4,09	-7,89	-2,08	-0,08	0,83	3,18	0,49	1,44
Run4	-1,55	1,79	3,27	-1,71	-0,28	2,44	2,88	1,79
Run5	-0,40	-8,08	-3,19	-2,44	-0,97	4,30	1,04	-0,46
Run6	-3,61	-9,35	2,10	-1,21	-1,41	1,17	-2,28	2,41
Run7	-2,99	-2,66	4,57	2,20	1,58	1,62	2,50	1,95
Run8	-3,13	-3,32	0,47	-0,43	2,81	-4,95	-0,75	-1,40
Run9	0,78	-1,11	4,09	1,87	1,14	0,59	-0,30	-2,72
Run10	-4,64	5,80	-2,82	-1,13	2,33	-2,69	-2,00	-0,12
Run11	4,96	-4,51	-1,78	0,66	-1,96	-2,18	1,54	0,24
Run12	1,75	9,91	3,56	1,63	-2,24	4,80	2,15	-1,91
Run13	4,36	-0,45	-4,11	2,67	2,07	-3,11	-3,00	2,28
Run14	0,07	6,08	-4,72	-2,11	-0,40	-4,46	-2,65	-2,62
Run15	3,20	0,65	-0,88	-0,78	1,24	-0,99	-1,20	0,56
Run16	-2,43	3,94	2,81	2,81	-1,66	0,01	-1,11	2,95
Run17	1,24	7,92	-0,43	0,13	-2,95	-3,58	0,16	0,75
Run18	-0,61	2,06	-1,31	1,08	-0,77	-1,74	0,87	-2,18
Run19	2,25	8,45	0,63	-1,82	0,58	2,66	1,81	1,17
Run20	3,86	-6,70	-3,67	1,25	2,59	-1,27	-1,56	-1,18

Tabelle 7-1: Versuchsplan für die geometrische Modifikation der Werkzeugwirkflächen in den festgelegten Bereichen der Ziehanlage des Innenteils (in z-Richtung).

7.2 Prozesskettensimulationen mit festgelegten Inputvariablen

Nach dem erstellten Versuchsplan (vgl. Tabelle 7-1) müssen nun die Wirkflächen der Ziehstufe des Innenteils für die Umformsimulationen der 20 Runs angepasst werden. Diese Modifikationen werden netzbasiert mit dem Softwareprogramm HyperMesh™ der Firma Altair umgesetzt. Dafür wird die in AutoForm bereits vernetzte Ziehmatrize der nominalen Ziehform des Innenteils ohne Ziehsicken in das hierfür notwendige Nastran-Format umgewandelt, exportiert und in das Programm HyperMesh™ eingelesen. Die Problematik bei der Modifikation der Netzdaten besteht in der geometrischen Ausgestaltung aller Krümmungsübergänge zwischen den einzelnen Bereichen. Aus diesem Grund wird die Modifikation mithilfe des integrierten „Structural analysis solver OptiStruct™“ (linear static) in das Modell eingebracht. Dieses Vorgehen und die Funktionsweise der verwendeten Software wird im Folgenden beschrieben:

- Einlesen des Ziehmatrizenflächennetzes aus der Umformsimulation im Nastran-Format
- Zuordnung von Materialeigenschaften zu den Netzknoten des eingelesenen Ziehmatrizennetzes. Als Material wird ein allgemeiner isotroper Stahlguss festgelegt mit

$E=7,8 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^2$, $\rho = 7200 \text{ kg/m}^3$, $\nu=0,3$ und einer Gusswanddicke von $t=50 \text{ mm}$. Aufgrund der Zuordnung der Materialeigenschaften verhält sich das Werkzeugnetz während der Modifikation der Knoten ähnlich dem einer Platine in der Umformsimulation. Auf diese Weise können die resultierenden Knotenverschiebungen der freien Knoten (vgl. Abb. 7-3) durch den Solver stetig zwischen den Bereichen berechnet werden

- Manuelle Trennung des Ziehmatrizenetzes in Blechhalter- und den Stempelbereich durch Selektion der entsprechenden Netzknoten. Das Trennen des Ziehmatrizenetzes vereinfacht die spätere Zuordnung der Werkzeugdaten in der Umformsimulation.
- Unterteilung des Ziehmatrizenetzes in die nach Abb. 7-2 festgelegten Bereiche durch manuelle Selektion der entsprechenden Netzknoten
- Manuelle Selektion der zu modifizierenden Knoten in den festgelegten Bereichen (vgl. Modifizierte Knoten, Abb. 7-3)
- Manuelle Selektion der zu fixierenden Knoten (vgl. Fixierte Knoten, Abb. 7-3)
- Manuelle Eingabe der Knotenverschiebungen in z-Richtung der zu modifizierenden Knoten nach festgelegtem Versuchsplan (Modifikationswerte, Tabelle 7-1)
- Berechnung der Knotenverschiebungen der freien Knoten mit dem Solver OptiStruct™ (vgl. resultierende Knotenverschiebung, Abb. 7-3)
- Exportieren des modifizierten Netzes im Nastran-Format
- Austausch der Werkzeugwirkflächen in der Umformsimulation
- Neuberechnung der PKS
- Auswertung des ZSB-Rückfederungsergebnisses

Die Modifikation der Netzdaten erfolgt in der verwendeten Software nach folgendem Prinzip:

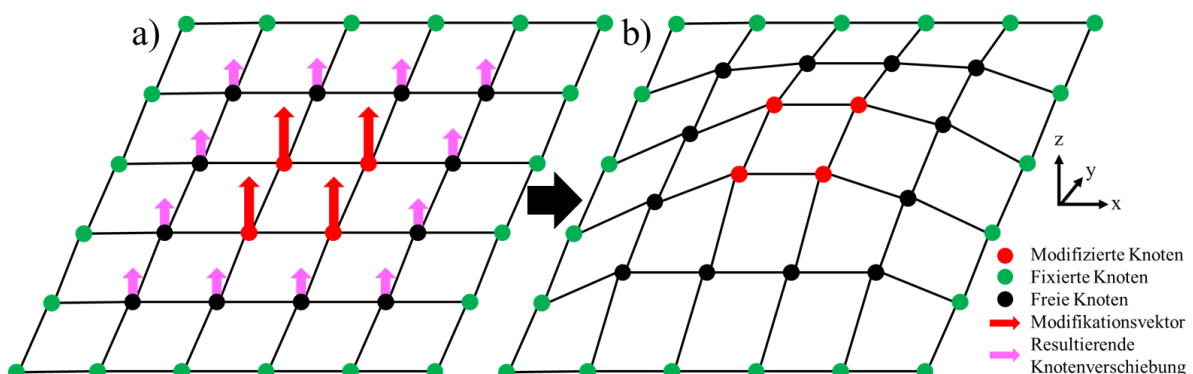


Abb. 7-3: Prinzip der Matrizenmodifikation a) Ausgangsnetz mit festgelegten Randbedingungen b) Werkzeugnetz nach der gezielten Modifikation nach [Sch19].

Im Fall der untersuchten Motorhaube werden die Knoten des Blechhalterbereichs fixiert (vgl. grün markierte Knotenpunkte in Abb. 7-2). Dadurch werden die Rückhaltekräfte und Positionen

der Ziehsicken in der Umformsimulation später nicht verändert. Die zu modifizierenden Netzknoten werden manuell innerhalb der festgelegten Bereiche selektiert (vgl. rot markierte Knotenpunkte in Abb. 7-2). In den Bereichen 1,3,4,5,6,7 und 8 werden alle diejenigen Netzknoten manuell ausgewählt, die auf den Kontaktflächen des entsprechenden Verstärkungsteils liegen. Auf diese Weise werden Unebenheiten vermieden, die sich negativ auf den späteren Fügeprozess des UZSB auswirken können. Außerdem wird jeweils der Flanschbereich des Innenteils, welcher später im Überlappungsbereich der Falzschlaufe liegt miteinbezogen, damit eine Verkipfung vermieden wird. Im Bereich2 erfolgt die Selektion der Netzknoten analog dazu in der Mitte des Scheibenbereichs mit einer vergleichbaren Knotenanzahl zu den anderen Bereichen. Anschließend werden die selektierten Netzknoten der einzelnen Bereiche mit dem Solver OptiStruct™ um den jeweiligen Modifikationswert (vgl. Tabelle 7-1) in z-Richtung verschoben und die dadurch resultierenden Knotenverschiebungen der freien Knoten für einen krümmungstetigen Übergang berechnet. Dieses Vorgehen wird für alle insgesamt 20 zu berechnenden Runs wiederholt. Dadurch entstehen auch 20 verschieden modifizierte Ziehmatrizennetze. Abb. 7-4 zeigt eine auf diese Weise entstandene Ziehmatrize am Beispiel von „Run18“ mit den entsprechenden Modifikationswerten aus Tabelle 7-1.

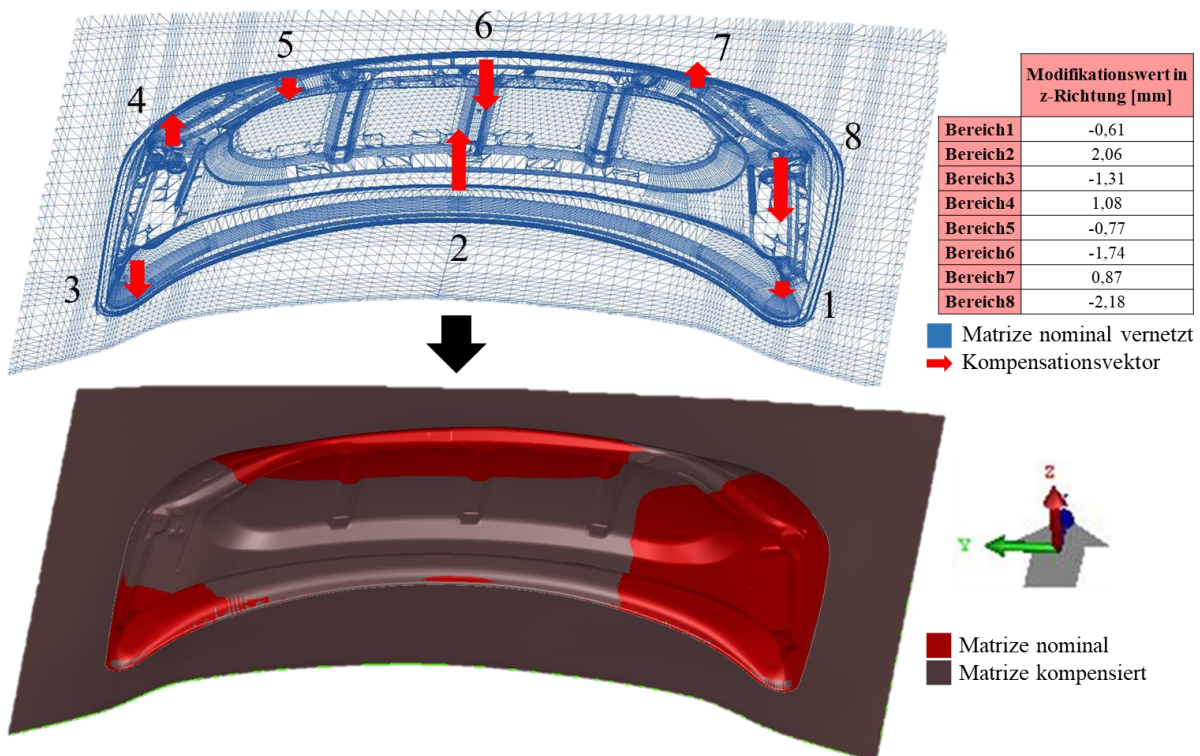


Abb. 7-4: Darstellung der geometrischen Modifikation des Ziehmatrizennetzes des Innenteils am Beispiel der Simulation „Run 18“.

Die erzeugten Ziehmatrizennetze für die insgesamt 20 Runs werden anschließend exportiert und in die Umformsimulation des Innenteils eingelesen. Für jeden Run wird dann eine neue

PKS durchgeführt und ausgewertet. Abb. 7-5 zeigt repräsentativ für alle 20 berechneten Runs die Rückfederungsergebnisse des ZSB für „Run1“ und „Run2“. Die Ergebnisse der PKS werden dem Rückfederungsergebnis der bereits berechneten Kombination 32 mit ausschließlich Schlechtteilen und ohne modifizierte Wirkflächen (vgl. Abb. 5-17) verglichen. Auf diese Weise kann der direkte Einfluss der kompensierten Wirkflächen auf die Rückfederung des ZSB dargestellt werden. Die Rückfederungsergebnisse des ZSB werden für eine bessere Darstellung ohne die Außenhautbeplankung und die Verstärkungsteile gezeigt. Die Rückfederungsergebnisse des ZSB der restlichen Runs können Anhang 9.4 entnommen werden.

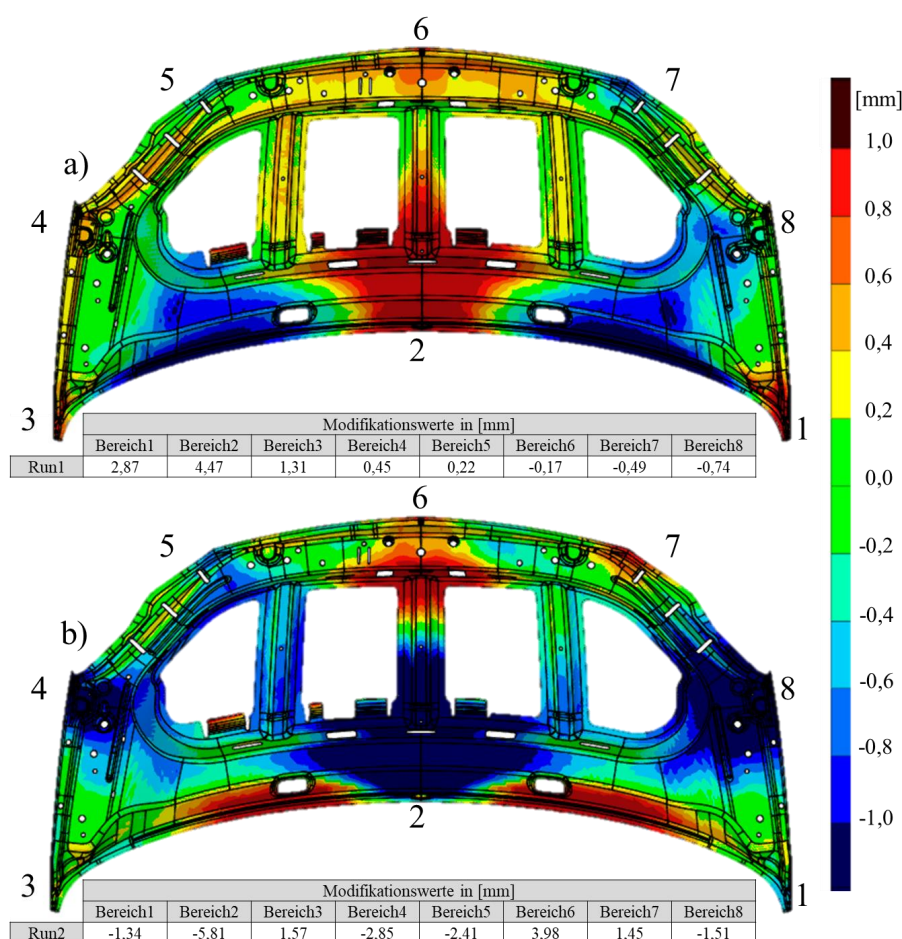


Abb. 7-5: Rückfederungsergebnisse des ZSB a) Run1 und b) Run2 nach Modifikation der Werkzeugwirkflächen der Ziehanlage des Innenteils ohne Darstellung der Verstärkungsteile und der Außenhautbeplankung.

Nachdem alle Ergebnisse der Rückfederungsberechnungen des ZSB aus den einzelnen Runs der PKS vorliegen, werden diese nach dem bereits festgelegten Messplan (vgl. Abb. 5-2) ausgewertet. Zur Beurteilung der Maßhaltigkeit der Baugruppe (Matching in der Karosserie) werden die Messpunkte entlang des Umrisses des Innenteils ausgewertet (vgl. MP1 – MP42 Abb. 5-2). Diese Auswertung der Rückfederungsergebnisse in den einzelnen Messpunkten aller 20 Runs mit modifizierten Matrizenwirkflächen kann in tabellarischer Form Anhang 9.5 entnom-

men werden. Die Werte entsprechen den Outputvariablen und werden zusammen mit den Inputvariablen (vgl. Tabelle 7-1) zur Erstellung des Meta-Modells zur Analyse des Rückfederungsverhaltens des ZSB benötigt, welches im Folgenden Kapitel beschrieben wird.

7.3 Meta-Modellerstellung zur Analyse der Rückfederung des ZSB

Auf Grundlage der berechneten Rückfederungsergebnisse der PKS wird nun ein Meta-Modell erstellt, mit dem das Rückfederungsergebnis des ZSB für jene Modifikationswerte, welche bisher nicht explizit untersucht wurden, ermittelt werden kann. Dadurch kann ohne erneutes Durchführen einer Wirkflächenmodifikation (vgl. Kapitel 7.2) und einer anschließenden Berechnung einer PKS eine Aussage über das zu erwartende Rückfederungsergebnis des ZSB in den festgelegten Messpunkten mit hinreichender Genauigkeit getroffen werden. Dieses Meta-Modell in Form einer Antwortfläche (Response Surface) wird mit dem räumlich linearen Interpolationsverfahren Kriging erstellt (vgl. Kapitel 2.10.3). Dabei dienen die Modifikationswerte der Werkzeugwirkflächen aus dem Versuchsplan (vgl. Tabelle 7-1) als Inputvariablen und die daraus resultierenden Rückfederungsergebnisse des ZSB in den festgelegten Messpunkten (vgl. Anhang 9.5) als Outputvariablen (vgl. Abb. 7-1).

Diese Input- und die davon abhängigen Outputvariablen bilden die erprobten Messdaten, mit denen zunächst ein experimentelles Semi-Variogramm erstellt wird. Die Erstellung des Semi-Variogramms erfolgt durch „Schätzen“ des räumlichen Zusammenhanges der vorliegenden Messdaten. Dafür werden aus allen erprobten Messdaten die jeweiligen Abstandsvektoren h bestimmt und anschließend in ein experimentelles Semi-Variogramm mittels eines Variogrammschätzers (nach Formel (37), S.60) erstellt. Anschließend wird aus den „geschätzten“ Semi-Variogrammwerten das theoretische Semi-Variogramm (kurz Variogramm) interpoliert (analog Abb. 2-43). Das interpolierte Variogramm ist ein Maß für die räumliche Abhängigkeit der Messdaten. Dabei wird angenommen, dass räumlich nahe beieinanderliegende Messpunkte sich gegenseitig stärker beeinflussen als weiter auseinanderliegende. In diesem Zusammenhang wird eine Stetigkeit zwischen den Messpunkten einbezogen, welche als Grundbedingungen im Kriging Verfahren hinterlegt ist. Die Abbildung des Rückfederungsverhaltens eines Bauteils oder einer Baugruppe kann dadurch deutlich verbessert werden. Im Kriging-Verfahren werden nun die Werte der Rückfederung in den einzelnen Messpunkten und die Varianz des Messfehlers σ^* für bisher unerprobte Inputvariablen (Modifikationswerte des Ziehmatrizennetzes) aus den bekannten Messwerten mithilfe einer gewichteten linearen Kombination dieser Werte abgeschätzt (vgl. Formel (38) und (39), S.61). Der grundlegende Gedanke des Krigings-Verfahrens beruht nun darauf, dass die Gewichtungsfaktoren λ_i und λ_j (vgl. Formel (38) und (39), S.61) so bestimmt werden, dass die Kriging-Varianz des Messfehlers minimiert wird. Dafür

rückfederungsbedingten Maßabweichungen des ZSB in den Messpunkten muss allerdings ein Solver verwendet werden, der diese Modifikationswerte automatisch variieren und nach einer festgelegten Zielfunktion optimieren kann. Dazu wird das entwickelte Meta-Modell im nächsten Kapitel mit einem in Excel als sog. Add-In-Programm verfügbaren Solver gekoppelt.

7.4 Solver mit definierter Zielfunktion

Zur Verbesserung der Maßhaltigkeit des untersuchten Motorhauben-ZSB wird nun auf Basis der neuen Kompensationsmethode (vgl. Abb. 7-1) das in Kapitel 7.3 entwickelte Meta-Modell mit einem Solver gekoppelt.

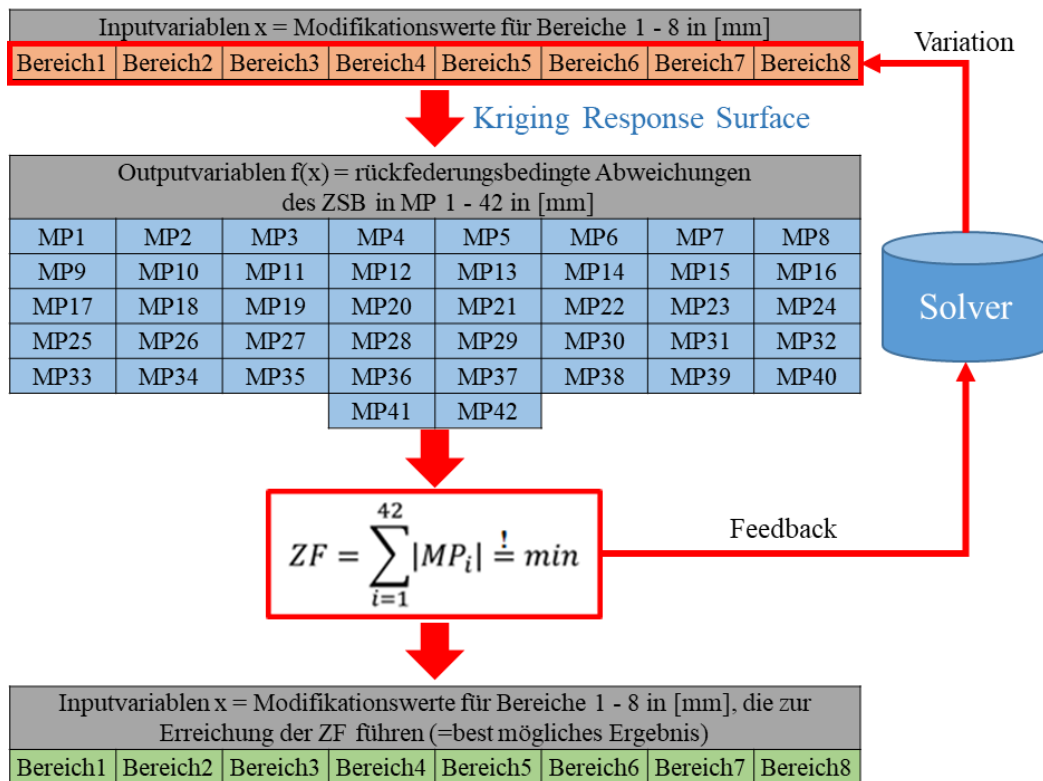


Abb. 7-6: Prinzip der Variation der Inputvariablen zur Erreichung der Zielfunktion.

Dieser Solver ermöglicht eine automatische Variation der Modifikationswerte des Ziehmatrizenetztes (vgl. Kapitel 7.2) in Tabelle 7-2 nach einer festgelegten Optimierungsstrategie. Dafür muss zunächst eine Zielfunktion (ZF) festgelegt werden. Im Fall der untersuchten Motorhaube soll die Maßhaltigkeit des ZSB verbessert werden. Aus diesem Grund soll die kumulierte Summe der Abweichungen in allen erfassten Messpunkten minimiert werden.

Die ZF ergibt sich somit zu:

$$ZF = \sum_{i=1}^{42} |MP_i| \stackrel{!}{=} \min \quad (42)$$

Über den in Excel integrierten Solver können anschließend die Kompensationswerte für die einzelnen Bereiche ermittelt werden, die zur minimalen Abweichung des ZSB führen. Dazu werden die Inputvariablen vom Solver automatisch variiert und die Zielfunktion mit einer nicht-linearen Lösung nach der Methode des generalisierten Gradienten (GRG-Methode) gelöst. Grundlagen der GRG-Methode können [Las76] entnommen werden. Dazu muss der Solver in Excel wie folgt eingerichtet werden:

The screenshot shows the 'Solver-Parameter' dialog box in Excel. Five red boxes with numbers 1 through 5 highlight specific settings:

- 1** Ziel festlegen: (with an upward arrow icon)
- 2** Bis: ☐ Max. ☒ Min. ☐ Wert:
- 3** Durch Ändern von Variablenzellen: (with an upward arrow icon)
- 4** Unterliegt den Nebenbedingungen: A list of constraints including SG\$5 <= 5, SG\$5 >= -5, SH\$5 <= -10, SH\$5 >= -10, SI\$5 <= 5, SI\$5 >= -5, SJ\$5 <= 3, SJ\$5 >= -3, SK\$5 <= 3, SK\$5 >= -3, SL\$5 <= 5, SL\$5 >= -5, and SM\$5 <= 3. To the right are buttons: Hinzufügen, Ändern, Löschen, Alles zurücksetzen, and Laden/Speichern.
- 5** Lösungsmethode auswählen: (with a dropdown arrow icon). Below this is an 'Optionen' button.

At the bottom, there is a checkbox 'Nicht eingeschränkte Variablen als nicht-negativ festlegen' which is checked. At the very bottom are buttons: Hilfe, Lösen, and Schließen.

Abb. 7-7: Eingabeparameter des Excel Solvers für das Lösen der Zielfunktion zur Ermittlung der besten Kompensationswerte.

Die Vorgehensweise für das Einrichten des Solvers gliedert sich wie folgt:

1. Zelle mit integrierter Zielfunktion auswählen. In dieser Zelle wird für die Eingetragenen Werte in Schritt 3 die kumulierte Summe der Abweichungen über alle Messpunkte berechnet
2. Zielfunktion soll minimiert werden
3. Festlegen der Zellen, die variiert werden dürfen (Modifikationswerte der Bereiche 1-8)
4. Festlegung der Nebenbedingungen für die Inputvariablen (maximal zulässige Grenzen der Modifikationswerte der einzelnen Bereiche)
5. Auswahl der Lösungsmethode und Start der Berechnung

Der Solver überträgt im Anschluss die Ergebnisse der ermittelten Modifikationswerte für die einzelnen Bereiche, die in den festgelegten Grenzen (vgl. Abb. 7-2) zur minimalen Abweichung des ZSB führen, in die Tabelle ein (vgl. Abb. 7-6 unten).

Inputvariablen x = Modifikationswerte für Bereiche 1 - 8 in [mm], die zur Erreichung der ZF führen (= best mögliches Ergebnis)							
Bereich1	Bereich2	Bereich3	Bereich4	Bereich5	Bereich6	Bereich7	Bereich8
0	-1,75	0	-0,2	-0,2	1,15	-0,2	0,4

Tabelle 7-3: Berechnete Modifikationswerte mittels Excel Solver und Kriging Response Surface für minimale Maßabweichungen des ZSB in den festgelegten Messpunkten.

Diese mithilfe des Solvers ermittelten Werte in Tabelle 7-3 führen auf Basis der geschätzten Rückfederungsergebnisse des Meta-Modells zur geringsten Maßabweichungen des ZSB in den Messpunkten. Mit den berechneten Modifikationswerten wird das Ziehmatrizennetz des Innenteils erneut mithilfe der in Kapitel 7.2 vorgestellten Methode angepasst. Zu diesem Zeitpunkt entspricht diese Modifikation nun erst der eigentlichen Kompensation der Werkzeugwirkflächen. Vorher wurden durch Modifikation der Bereiche lediglich unterschiedliche Rückfederungsergebnisse des ZSB erwirkt, die nicht einer Verbesserung der Maßhaltigkeit entsprechen. Zur Wirksamkeitsprüfung dieser Werte wird eine weitere PKS durchgeführt und die resultierende Rückfederung vor und nach der Kompensation in Abb. 7-8 gegenübergestellt.

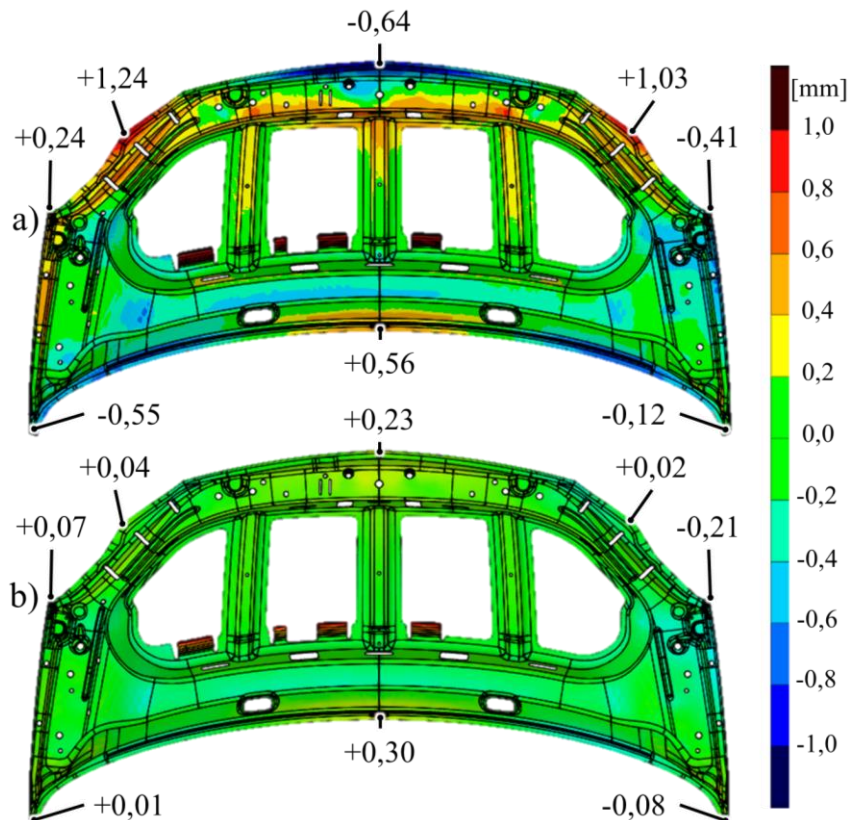


Abb. 7-8: Rückfederungsergebnis des ZSB a) vor und b) nach Optimierung der Werkzeugwirkflächen des Gerippes unter Anwendung der neuartigen Kompensationsmethode.

Wie deutlich erkennbar ist, kann mithilfe der Optimierung des ZSB durch Kompensation der Matrizendaten des Innenteils auf Basis der vorgestellten neuartigen Kompensationsmethode die Maßhaltigkeit signifikant verbessert werden. Die durchschnittliche kumulierte Summe der Abweichungen über die berechneten 20 Runs (vgl. Kapitel 7.2) nach Anhang 9.5 beträgt 32,3 mm. Dabei liegt die maximal kumulierte Summe bei 67,7 mm in Run 12 und die minimal kumulierte Summe bei 14,6 mm in Run 15. Nach der Kompensation konnte die kumulierte Summe der Abweichungen auf 11,0 mm reduziert werden. Im Gegensatz zum Rückfederungsergebnis des ZSB mit ausschließlich Schlechtteilen (vgl. Abb. 7-8 a) konnten die Abweichungen in den festgelegten Messpunkten um mehr als 60% verringert und die maximale Abweichung von 1,24 mm auf 0,30 mm reduziert werden. Dieses Ergebnis konnte bereits durch die Berechnung der festgelegten 20 PKS plus einer zusätzlichen PKS mit optimierten Modifikationswerten erreicht werden und bestätigt die Effizienz und die Umsetzbarkeit der hier entwickelten Methode.

7.5 Übertragbarkeit der Kompensationsmethode

Auf Basis der Erkenntnisse der in Kapitel 5 durchgeführten Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile wurde in diesem Kapitel eine neuartige Methodik zur Kompensation von Maßabweichungen an Einzelteilen aus Blech mit dem Ziel eines maßhaltigen Zusammenbaus entwickelt. Dazu wurde die in Kapitel 4 modellierte PKS mit den Methoden der stochastischen Analyse verknüpft, um aus den simulierten Rückfederungsergebnissen des ZSB ein Meta-Modell zu erstellen. Diese neue Methodik wurde anhand von einer netzbasierten Wirkflächenkompensation der Ziehanlage des Innenteils beschrieben. Dadurch konnte die Maßhaltigkeit des ZSB erheblich verbessert werden, wodurch die Effizienz und die Umsetzbarkeit der hier entwickelten Methode bestätigt werden konnte. Diese neue Kompensationsmethode ist aus diesem Grund auch für vergleichbare ZSB aus Einzelteilen aus Blech wie bspw. Türen, Klappen, Seitenwände etc. einsetzbar. Dabei ist die entwickelte Kompensationsstrategie mit dieser Methode maßgeblich abhängig von der Genauigkeit der prognostizierten Rückfederungsergebnisse der jeweiligen PKS und von der Anzahl der durchgeführten Berechnungen zur Erstellung eines Meta-Modells. Die Grenzen dieser Methode liegen somit in der zur Verfügung stehenden Rechen- und Speicherkapazität der verwendeten Hardware und in der aufwendigen manuellen Modellierung und Auswertung der durchgeführten Simulationsvarianten.

Für eine mögliche Erweiterung dieser Methode konnte in Kapitel 5.2 ein vereinfachter Ansatz zur Berechnung der Abweichungen des ZSB auf Basis der Ergebnisse der Einzelteilbetrachtungen gefunden und bewertet werden. Dabei wurde gezeigt, dass der Einfluss von Formabweichungen einzelner Verstärkungsteile auf die Maßhaltigkeit aller simulierter Kombinationen rechnerisch mit nahezu gleicher Prognosegenauigkeit berechnet werden kann ohne dafür alle

Kombinationen in einer PKS berechnen zu müssen. Dazu müsste jeweils nur der Einfluss einzelner Einzelteilabweichungen (Schwankungen der Bauteilgeometrie innerhalb der festgelegten Toleranzen) auf den ZSB simuliert werden und anschließend der kumulierte Einfluss aller Bauteilabweichungen auf den ZSB rechnerisch ermittelt werden. Mit diesem Ansatz könnte die netzbasierte Wirkflächenkompensation bereits heute in vereinfachter Form auf alle Einzelteile ausgeweitet werden.

Ohne Berücksichtigung der Rechen- und Speicherkapazität der verwendeten Hardware sind folgende weitere Anwendungsbeispiele der Methodik zur Analyse und Verbesserung der Maßhaltigkeit eines ZSB denkbar:

- Erweiterung der netzbasierten Werkzeugwirkflächenkompensation auf alle Bauteile und alle Knoten (nicht nur einzelne Bereiche)
- Toleranzsimulation der Einzelteile. Dabei können die im Messkonzept festgelegten Toleranzen der Einzelteilmesspunkte durch Modifikation der Einzelteilbauteilnetze (vgl. Kapitel 7.2) in den jeweiligen Bereichen überprüft und ggf. angepasst werden
- Analyse der möglichen Beeinflussung der Maßhaltigkeit des ZSB durch Veränderung der Spannmethode, wie z.B. durch Variation der Spanner-Endpositionen (vgl. ΔN , Kapitel 4.3), der Anzahl der Spannpunkte oder der Spannreihenfolge.
- Analyse der möglichen Beeinflussung der Maßhaltigkeit des ZSB durch Veränderung der Fügemethode. Analog zur Veränderung der Fügemethode
- Analyse der Prozessparameter beim Falzen, wie z.B. des Rollenanstellwinkels oder der Falzbahnrichtungen
- Quantifizierung der Auswirkungen von Streuungen der Materialkennwerte eines (oder mehrerer) Bauteile
- u.v.m.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Zielsetzung der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Entwicklung einer neuartigen, vorwärtsgerichteten Methodik zur virtuellen Kompensation von Maßabweichungen einer Karosseriezusammenbaugruppe aus Einzelteilen aus Blech. Dies beinhaltet die Modellierung einer durchgängigen PKS, mit der sich der Einfluss von Maßabweichungen einzelner Pressteile und die im Rohbau folgenden Fügeprozesse auf die Maßhaltigkeit eines ZSB untersuchen lassen. Diese Methodik hat den Anspruch, kein Remeshing der Bauteilnetze zwischen den einzelnen Simulationsschritten durchzuführen, um den dadurch verbundenen Informationsverlust aufgrund des Daten-Mappings zu vermeiden. Der vorgestellte Simulationsaufbau ist hierbei in allgemeiner Form für einen UZSB, welcher aus mehreren Pressteilen punktuell gefügt wird, sowie für gefaltete Baugruppen aus einem UZSB mit einem Beplankungsteil, dem finalen ZSB, gültig.

Der Stand der Technik (vgl. Kapitel 2) beschreibt zunächst den Herstellungsprozess einer konventionellen Karosserieanbaugruppe aus Einzelteilen beginnend mit der Umformung von der Platine im Presswerk bis hin zum Falzen des ZSB im Rohbau (vgl. Kapitel 2.1 bis 2.7). Dabei wird bereits auf verschiedene Kompensationsmaßnahmen zur Verbesserung der Maßhaltigkeit eines solchen ZSB hingewiesen (vgl. 2.8) und auf aktuelle Forschungsschwerpunkte zur digitalen Absicherung des Herstellungsprozesses eingegangen. Anschließend behandelt Kapitel 2.9 die FE-Simulation in der Karosserieentwicklung. Der Fokus liegt hierbei neben den Grundlagen der FEM und der zur numerischen Berechnung von Umformsimulationen wichtigen Zeitintegrationsverfahren auf aktuellen Einsatzgebieten sowie Forschungsarbeiten zur Kopplung verschiedener Simulationsmethoden. Abschließend werden zur Bearbeitung dieser Arbeit verwendete und relevante Methoden der statistischen Versuchsplanung und der stochastischen Analyse vorgestellt (vgl. Kapitel 2.10).

Nach der Ableitung der Motivation und Zielsetzung der Arbeit (vgl. Kapitel 3) aus dem Stand der Technik erläutert Kapitel 4 den Aufbau einer durchgängigen Prozesskettensimulation am Beispiel des Herstellungsprozesses eines Motorhauben-ZSB und stellt die gewählte Vorgehensweise und die Versuchsplanung vor. Ziel dieser Versuche ist eine realitätsnahe Abbildung der einzelnen Simulationsschritte mit den Herstellungsprozessen des untersuchten ZSB im Presswerk, dem Rohbau und im Labor. Die Umformsimulation aller Einzelteile, die Fügesimulation des UZSB durch Clinchen und die anschließende Simulation des Rollfalzens des UZSB mit der Außenhautbeplankung sind Bestandteil dieser virtuellen Prozessabbildung. Der Aufbau der PKS erfolgt mithilfe neuartiger Beta-Versionen der Firma AutoForm. Auf diese Weise sind alle

relevanten Herstellungsprozesse abgebildet, ohne zwischen FE-Codes verschiedener Anbieter zu wechseln. Dadurch entsteht eine durchgängige PKS ohne zusätzliches Daten-Mapping oder Remeshing, welche die Umformhistorie aller Einzelteile, inklusive tensorieller Größen wie beispielsweise die Eigenspannungen, berücksichtigt. Die simulierten Rückfederungsergebnisse der einzelnen Prozessschritte werden daraufhin jeweils mit Bauteilversuchen abgesichert. Die Ermittlung der Prognosegenauigkeit der modellierten PKS erfolgt durch die Nachbildung aller Prozessschritte in der PKS und dem Abgleich dieser mit optisch vermessenen Bauteilen. Dabei zeigen die Ergebnisse der realen Messungen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Umformsimulation der Einzelteile und der Fügesimulation des UZSB. Bei der Falzsimulation des ZSB war zunächst keine zufriedenstellende Übereinstimmung der simulierten Rückfederungsergebnisse mit der gescannten Baugruppe festzustellen. Beim Abgleich der Rückfederungsergebnisse aus der Simulation mit dem Baugruppenscan stellte sich heraus, dass sich der UZSB im realen Prozess nach Entlastung in der fertiggefalteten Falzschleife verschob, in der Simulation dieser jedoch aufgrund der vorherrschenden Randbedingungen keine Translation erfuhr. Mit der Einführung eines neuen Simulationsparameters, der diese Randbedingungen im Flanschbereich nach dem Fertigfalten unterdrückt, wird letztlich das reale Entlastungsverhalten des Innenteils im fertiggefalteten Zustand nachgebildet und eine sehr gute Prognosegenauigkeit der Falzsimulation erreicht. Im Fall der untersuchten Motorhaube ist die dimensionale Bauteilqualität des ZSB hauptsächlich von der Maßhaltigkeit des formstabilen Innenteils abhängig.

Zur Ermittlung des Einflusses von bauteiltypischen dimensional Abweichungen von Einzelteilen auf die Maßhaltigkeit des ZSB zeigt Kapitel 5 mithilfe der vorgestellten PKS eine numerische Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile. Hierzu werden die Verstärkungsteile zunächst virtuell gezielt deformiert, um deren Einfluss auf die Maßhaltigkeit des ZSB zu charakterisieren. Die vorgestellte Auswertung der einzelnen Kombinationen aus Gut- und Schlechteilen zeigt, inwieweit sich die erzeugten Formabweichungen der einzelnen Verstärkungsteile auf die Maßhaltigkeit des ZSB auswirken. Des Weiteren ist ein vereinfachter Ansatz zur Berechnung der Abweichungen des ZSB auf Basis der Ergebnisse der numerischen Einzelteilbetrachtungen beschrieben und bewertet. Dabei stellte sich heraus, dass der Einfluss von Formabweichungen einzelner Verstärkungsteile auf die Maßhaltigkeit aller Kombinationen rechnerisch mit nahezu gleicher Prognosegenauigkeit berechnet werden kann, ohne dafür alle Kombinationen in einer PKS zu berechnen.

Zur Absicherung der in Kapitel 5 durchgeführten numerischen Untersuchung wird in Kapitel 6 ein selektiver Versuchsplan für reale Bauteilversuche abgeleitet. Mit einem Versuchswerkzeug lassen sich definierte Maßabweichungen in die Verstärkungsteile einbringen. Die auf diese

Weise reproduzierbar deformierten Schlechteile der Verstärkungen werden anschließend nach festgelegten Kombinationen im Rahmen einer Versuchsreihe gemeinsam mit Gutteilen dem Serienfügeprozess des UZSB zugeführt. Anschließend werden die derart produzierten UZSB-Varianten in der Versuchsrollfalzanlage mit der Außenhautbeplankung zum fertigen ZSB gefügt und die Messergebnisse dieser Prozessschritte erneut mit den Simulationsergebnissen der jeweiligen PKS-Variante abgeglichen (vgl. Kapitel 6.2). Der Abgleich zwischen den Simulationsergebnissen und denen der gescannten Einzelteil-, UZSB- und ZSB-Messungen stimmt dabei sehr gut in Betrag und Richtung der auftretenden Rückfederung in allen Prozessschritten überein. Der modellierten PKS kann somit eine relativ hohe Prognosegenauigkeit zur Bewertung der Maßhaltigkeit der untersuchten Motorhaube nachgewiesen werden und bestätigen die Ergebnisse aus Kapitel 5. Anschließend erfolgt auf Basis der bisherigen Erkenntnisse die Identifizierung von einzelnen Bauteilbereichen des formgebenden Innenteils, um diese mithilfe der neuen Methode zur Verbesserung der Maßhaltigkeit des ZSB zu kompensieren.

Diese neue Kompensationsmethode wird in Kapitel 7 in allgemeiner Form vorgestellt und anschließend am Beispiel einer wirkflächenbasierten Modifikation der Ziehanlage des Innenteils zur Verbesserung der Maßhaltigkeit des untersuchten Motorhauben-ZSB angewendet. Dazu wird das Ziehmatrizenetz des Innenteils in den zuvor identifizierten Bereichen gezielt nach einem auf Basis der Latin-Hypercube-Methode festgelegten statistischen Versuchsplan (vgl. Kapitel 7.1) in Kapitel 7.2 modifiziert. Die im Versuchsplan festgelegten Werte werden anschließend durch Modifikation des Ziehmatrizenetz im Softwareprogramm HyperMesh™ eingebracht. Die entstehenden Wirkflächenvarianten der Ziehform ermöglichen es im Anschluss mithilfe der PKS die sich ergebende Rückfederung des ZSB zu analysieren. Berechnet werden dafür insgesamt 20 Simulationen und die jeweiligen Beträge der Rückfederung in insgesamt 42 festgelegten Messpunkten des ZSB statistisch erfasst. Die Rückfederungsergebnisse der verschiedenen Varianten werden anschließend mittels des Kriging Verfahrens in ein Excel-basiertes Meta-Modell überführt (vgl. Kapitel 7.3). Die Kombination dieses Meta-Modells mit einem Solver erlaubt die Ableitung derjenigen Modifikationswerte, die zur minimalen Maßabweichung des ZSB führen (vgl. Kapitel 7.4). Mit den auf diese Weise ermittelten Kompensationswerten für die lokalen Wirkflächenbereiche der Ziehanlage des Innenteils wird dann in einer weiteren PKS die Fähigkeit der vorgestellten Methode nachgewiesen. In den festgelegten Messpunkten konnte somit durch insgesamt 21 durchgeführte PKS der Gesamtwert der Rückfederung des ZSB um insgesamt 60% und der Maximalwert der Rückfederung von 1,24 mm auf

0,30 mm reduziert werden. Abschließend beschreibt Kapitel 7.5 die Übertragbarkeit der vorgestellten Methode auf andere Baugruppen und stellt weitere Anwendungsfälle zur Analyse der rückfederungsbedingen Maßabweichungen eines ZSB vor.

8.2 Ausblick

Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik kann die Maßhaltigkeit eines Karosserie-ZSB virtuell analysiert und verbessert werden. Dafür müssen alle Fertigungsschritte des Herstellungsprozesses in einer numerischen FE-Simulation modelliert und miteinander verkettet werden. Die Ergebnisse der aufgebauten PKS sind hierbei signifikant von der Qualität der verwendeten Eingangsparameter abhängig. Abweichungen der prognostizierten Rückfederungen, die bspw. durch den Einsatz verschiedener Ersatzmodelle zur Abbildung der realen Prozesse entstehen können, werden durch die gesamte Simulationskette getragen. Aus diesem Grund muss die Prognosegenauigkeit der angewendeten Simulationsmethoden weiterhin kontinuierlich verbessert werden.

Bei der Fügesimulation muss der Fokus hauptsächlich in der Validierung der verwendeten AutoForm^{plus} Assembly R7.1 Beta liegen. Bisher erfolgte der Abgleich der aufgebauten PKS ausschließlich für das Fügeverfahren Clinchen, also einem mechanischen punktuellen Fügeverfahren. Das integrierte Ersatzmodell zur Berücksichtigung von thermischem Verzug (bspw. beim Punktschweißen) wurde in Bezug auf dessen Prognosegenauigkeit der Rückfederung des UZSB noch nicht mit realen Bauteilversuchen abgesichert.

Die Prognosegenauigkeit der Falzsimulation konnte bereits für den hier betrachteten Anwendungsfall durch die Einführung eines neuen Simulationsparameters verbessert werden. Dabei werden die Randbedingungen, die den UZSB nach Entlastung im Fertigfalz fixieren, vollständig unterdrückt, sodass nunmehr das reale Werkstoffverhalten abgebildet werden kann. Dieser Ansatz muss allerdings noch für andere Baugruppen, bei denen die Maßhaltigkeit nicht ausschließlich vom rückfederungsverhalten des Innenteils beeinflusst wird, untersucht werden.

Auf Basis der gezeigten PKS wurde in dieser Arbeit eine vorwärtsgerichtete Kompensationsmethode erarbeitet. Dazu müssen zur Erstellung ausreichend vieler Varianten entweder verschiedene Parameter in den Einzelsimulationsschritten manuell angepasst oder die Werkzeugnetze nach vorgestellter Methode (vgl. Kapitel 7.2) modifiziert werden. Die Hauptproblematik hierbei liegt im hohen Modellierungsaufwand. Derzeit erfolgt die Erstellung der Varianten noch manuell, da die verwendeten Softwarecodes mit eigenständigen GUI arbeiten. Für einen wirtschaftlichen Einsatz im industriellen Umfeld muss die PKS in einer einzigen GUI aufgebaut werden können. Außerdem müssen die Methoden der statistischen Versuchsplanung, die Modifikation von Bauteil- und Werkzeugnetzen sowie die Erstellung und die Analyse eines Meta-

Modells integriert werden. Zur Umsetzung in der Software sind bereits fast alle dafür notwendigen Module, wie z.B. AutoForm-Sigma[®] vorhanden. Damit können in der Umformsimulation bereits verschiedene Varianten erzeugt und untersucht werden. Dazu zählen bspw. die automatische Optimierung von Beschnittkurven, von Ziehsickengeometrien oder die Robustheitsuntersuchung des Umformprozesses. Die Grenzen der entwickelten Methode liegen somit aktuell in der zur Verfügung stehenden Rechen- und Speicherkapazität der verwendeten Hardware und in der aufwendigen Modellierung und Auswertung der durchgeführten Simulationsläufe.

Mit der Umsetzung der vorgestellten Methode in einer einzigen GUI und mit der Verfügbarkeit ausreichend hoher Rechenkapazitäten könnte künftig eine vollautomatisierte Anpassung aller Werkzeugwirkflächen mit dem Ziel eines Maßhaltigen ZSB ermöglicht werden. In diesem Fall würde die PKS die kompensierten Fräsdaten für abgesicherte Ziehanlagen sowie alle einzustellenden Prozessparameter in den Fügestationen liefern, die zu einem maßhaltigen ZSB führen.

9 Anhang

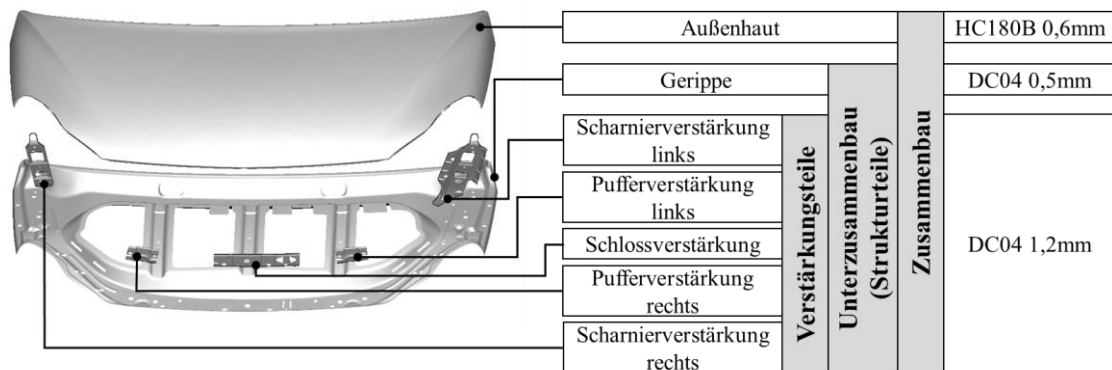


Abb. 9-1: Bauteile und verwendete Blechwerkstoffe des ZSB Motorhaube des Opel Adam (Modelljahr 2013-2019).

9.1 Messergebnisse der Verstärkungsteile

In den folgenden Abbildungen sind die Messergebnisse zur Ermittlung der rückfederungsbedingten Bauteilabweichungen der Serienteile (vgl. Kapitel 4.2) dargestellt. Die gemessenen Werte der Abweichungen zur Nominalgeometrie in den Messpunkten sind jeweils durch grüne Kreuze markiert. Ein außerhalb der Toleranzgrenzen liegender Messpunkt wird rot angezeigt. Außerdem sind die Toleranzbänder des jeweiligen Messpunktes dargestellt.

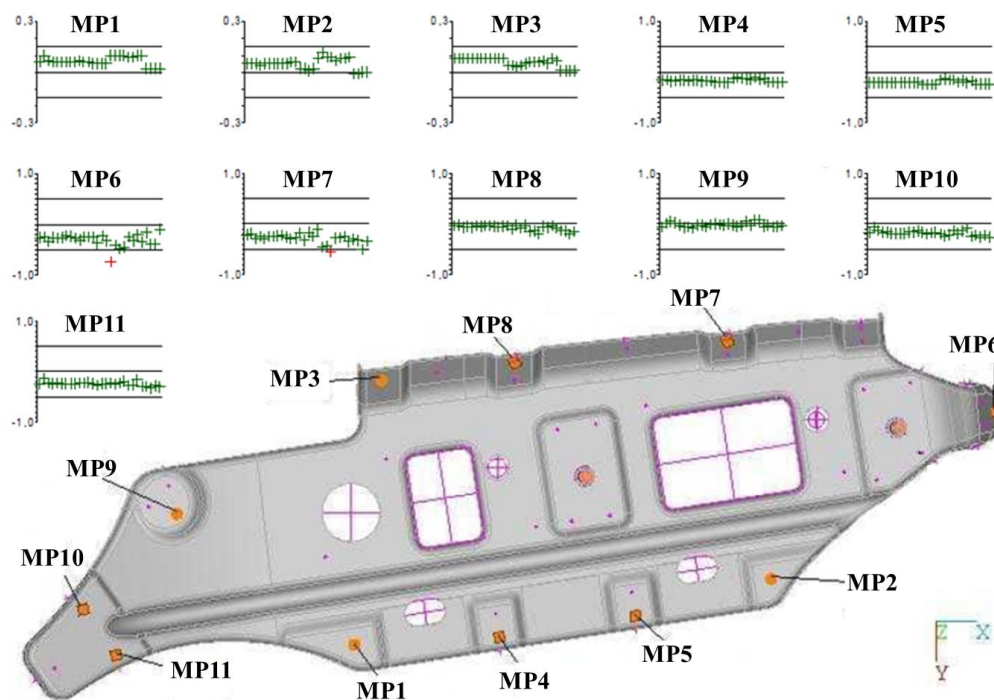


Abb. 9-2: Messbericht zur statistischen Absicherung der Scharnierverstärkung links mithilfe taktiler Messung.

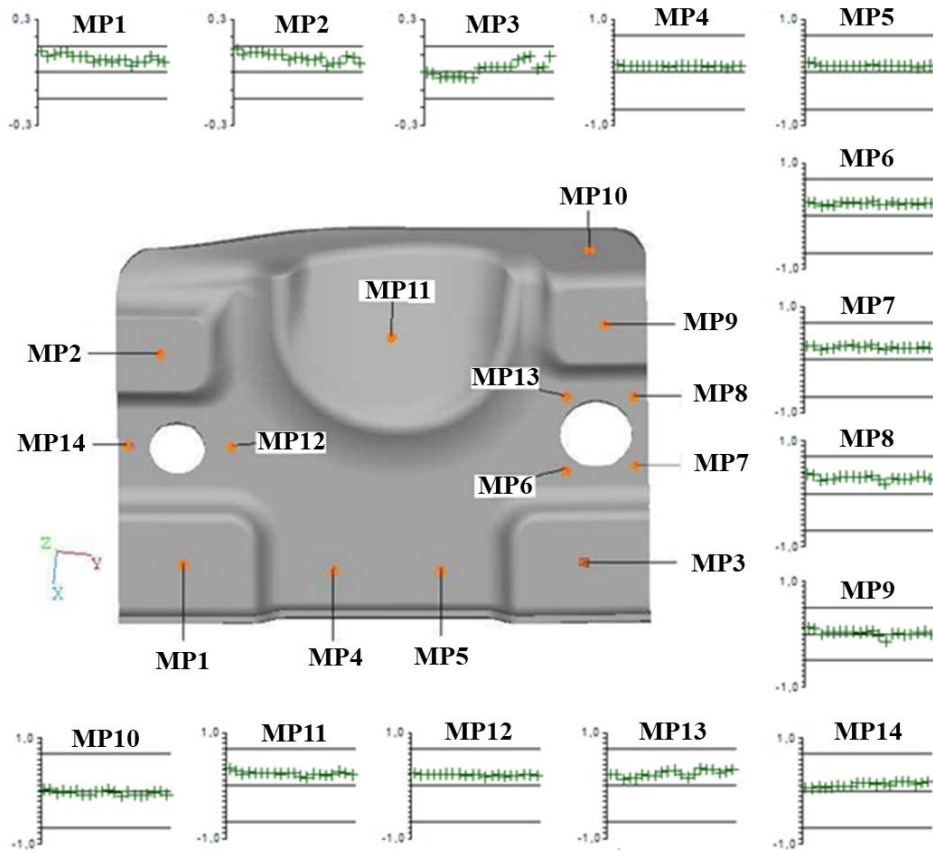


Abb. 9-3: Messbericht zur statistischen Absicherung der Pufferverstärkung links mit taktiler Messung.

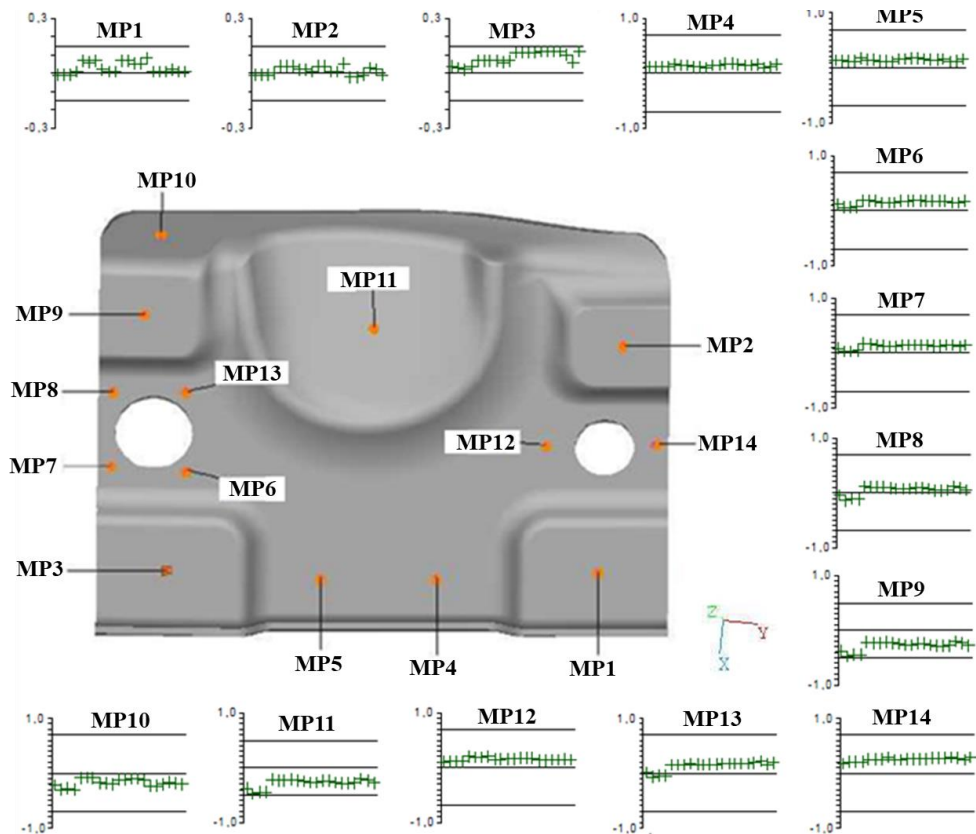


Abb. 9-4: Messbericht zur statistischen Absicherung der Pufferverstärkung rechts mit taktiler Messung.

9.2 Auswertungen der Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile

Für die Auswertung der Simulationen wurden alle berechneten Rückfederungsergebnisse der Kombinationen 2 – 32 analysiert und die Rückfederung in den zuvor festgelegten Messpunkten (vgl. Abb. 5-2) ausgewertet. Die Ergebnisse wurden jeweils der Kombination 1 gegenübergestellt und mit dieser verglichen, da diese Variante die Soll-Geometrien aller Einzelbauteile aufweist und somit die Referenz darstellt. Auf diese Weise kann in den Auswertungen der direkte Einfluss der Formabweichungen der deformierten Verstärkungsteile auf die Maßhaltigkeit des ZSB untersucht werden. Positive Maßabweichungen stellen bei der gewählten Darstellung eine Rückfederung aus der Zeichenebene heraus dar, negative ein Einfallen in die Zeichenebene. In allen folgenden Abbildungen sind die verwendeten Schlechteile in der jeweiligen Kombination mit einem roten „O“ gekennzeichnet, nicht gekennzeichnete Verstärkungsteile bedeuten hingegen Gutteile. Die dargestellten Maßabweichungen in mm beschreiben stets die lokale Abweichung gegenüber den Messwerten der Kombination 1, welche die Referenz dieser Untersuchung bildet. Auf den folgenden Anhang wird in Kapitel 5.2 verwiesen. Hier fehlende Kombinationen wurden in Kapitel 5.2 besprochen.

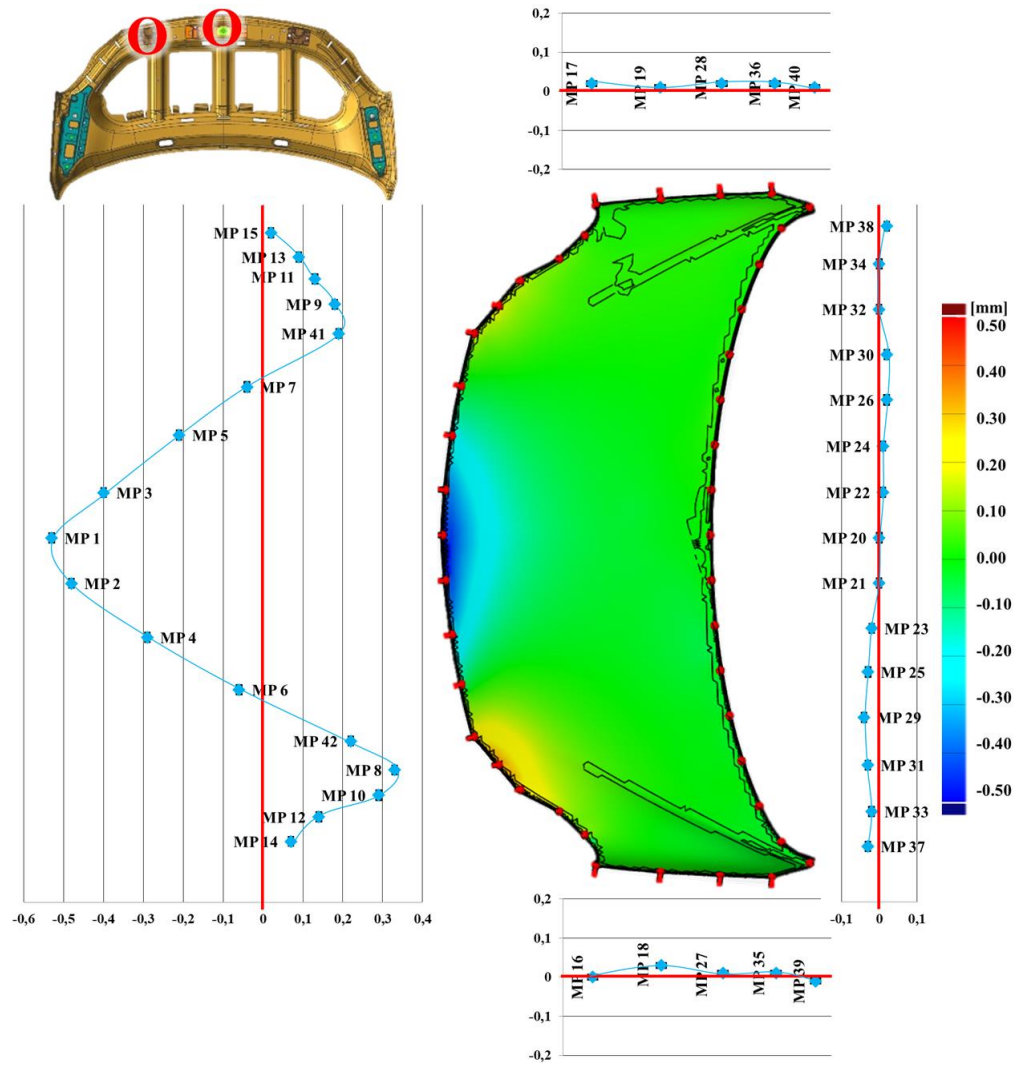


Abb. 9-5: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 8.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,36	0,07	0,39	0,04	0,18	0,09	0,11	0,14	-0	0,17	0,07	0,05	0,04	0,01
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	-0	0,08	0,01	-0,1	-0,1	-0	0	-0,1	0,07	0,08	0,12	0,03	0,1	0,09	0,03	-0,1	-0,1
Summe Kombinationen	-0,5	-0,4	-0,4	-0,2	-0,2	0,01	-0,1	0,25	0	0,37	0,04	0,09	0,16	0,19	0,26	0,02	0,27	0,16	0,08	-0,1	-0,1
Simulation Kombination8	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0	0,33	0,18	0,29	0,13	0,14	0,09	0,07	0,02	0	0,02	0,03	0,01	0	0
Differenz absolut	0,02	0,04	0,02	0,06	0,01	0,07	0,01	0,08	0,18	0,08	0,09	0,05	0,07	0,12	0,24	0,02	0,25	0,13	0,07	0,05	0,1

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination2	0,07	-0	0,05	-0	-0	0,07	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0	-0,2	0,08	-0,1	0,01	-0,2	-0,1	-0,2	0,1	0,25
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,06	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0	-0,3	0,05	-0,1	-0	-0,3	-0	-0,3	0,05	-0
Summe Kombinationen	-0	-0,1	-0	-0,1	-0,1	0,13	-0,1	-0,1	-0,3	-0,1	-0,4	-0,1	-0,5	0,13	-0,2	0	-0,4	-0,1	-0,5	0,15	0,21
Simulation Kombination8	0,01	-0	0,01	-0	0,02	0,01	0,02	-0	0,02	-0	0	-0	0	0,01	0,02	-0	0,02	-0	0,01	0,19	0,22
Differenz absolut	0,03	0,09	0,04	0,05	0,16	0,12	0,08	0,08	0,31	0,1	0,42	0,06	0,46	0,12	0,24	0,03	0,44	0,06	0,49	0,04	0,01

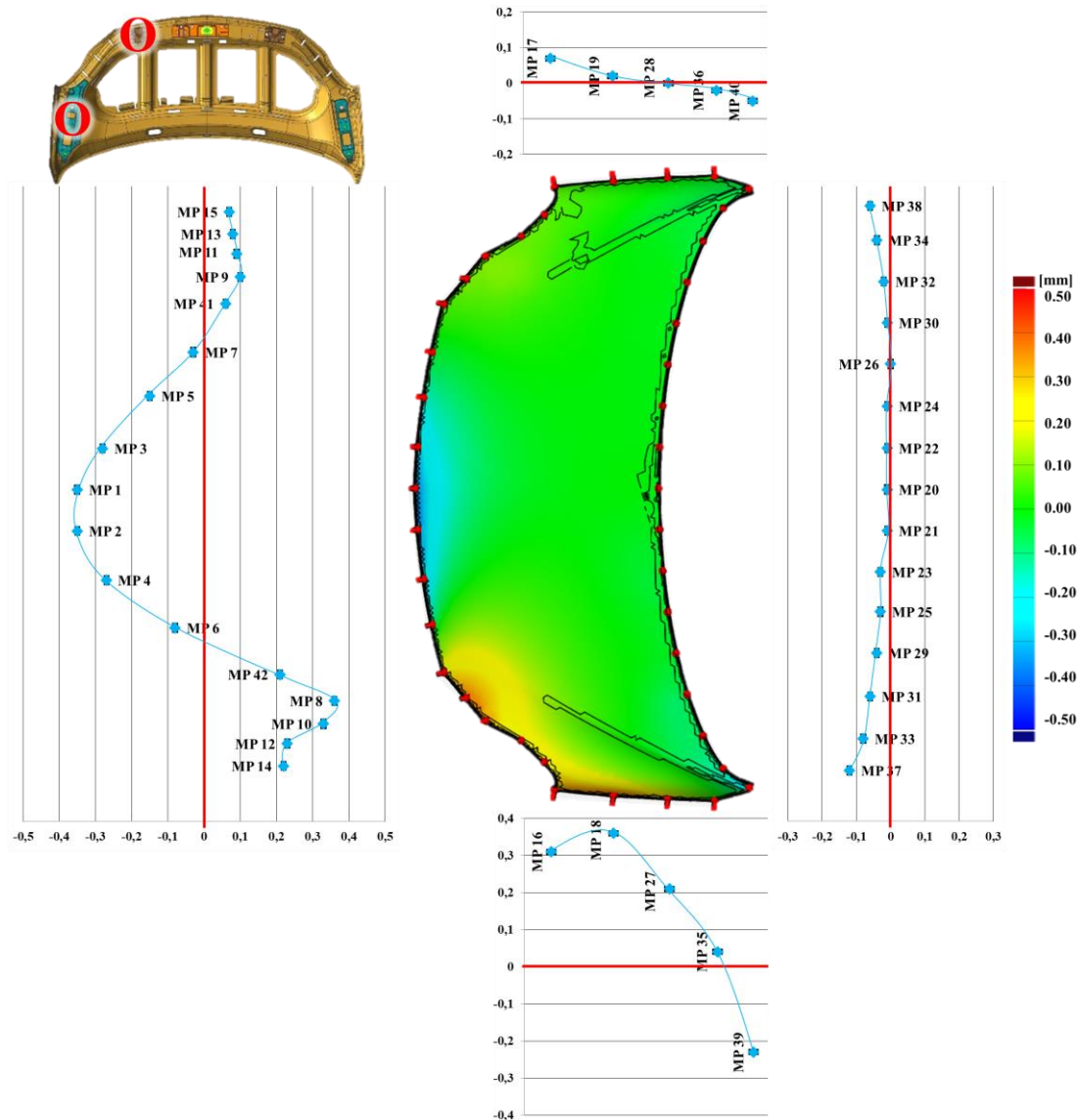


Abb. 9-6: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 9.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,36	0,07	0,39	0,04	0,18	0,09	0,11	0,14	-0	0,17	0,07	0,05	0,04	0,01
Simulation Kombination5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0	0,01	0,15	0,06	0,14	-0	0,14	-0	0,12	-0,2	0,29	-0,2	0,33	-0,1	0	0,01
Summe Kombinationen	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,51	0,13	0,53	0,03	0,32	0,07	0,23	-0	0,28	-0	0,4	-0	0,04	0,02
Simulation Kombination9	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0	0,36	0,1	0,33	0,09	0,23	0,08	0,22	0,07	0,31	0,07	0,36	0,02	-0	-0
Differenz absolut	0,14	0,14	0,15	0,07	0,08	0	0,02	0,15	0,03	0,2	0,06	0,09	0,01	0,01	0,08	0,03	0,1	0,04	0,04	0,05	0,03

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination2	0,07	-0	0,05	-0	-0	0,07	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0	-0,2	0,08	-0,1	0,01	-0,2	-0,1	-0,2	0,1	0,25
Simulation Kombination5	0,01	-0	0,02	-0	0,03	0,19	-0,1	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0	0,05	0,02	-0,1	0,04	-0,2	0,03	0,14	0,09
Summe Kombinationen	0,08	-0,1	0,07	-0,1	0	0,26	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	0,13	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	0,24	0,34
Simulation Kombination9	-0	-0	-0	-0	0	0,21	0	-0	-0	-0,1	-0	-0,1	-0	0,04	-0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	0,06	0,21
Differenz absolut	0,09	0,03	0,08	0,04	0	0,05	0,08	0,09	0,11	0,08	0,21	0,03	0,18	0,09	0,06	0,02	0,07	0,01	0,12	0,18	0,13

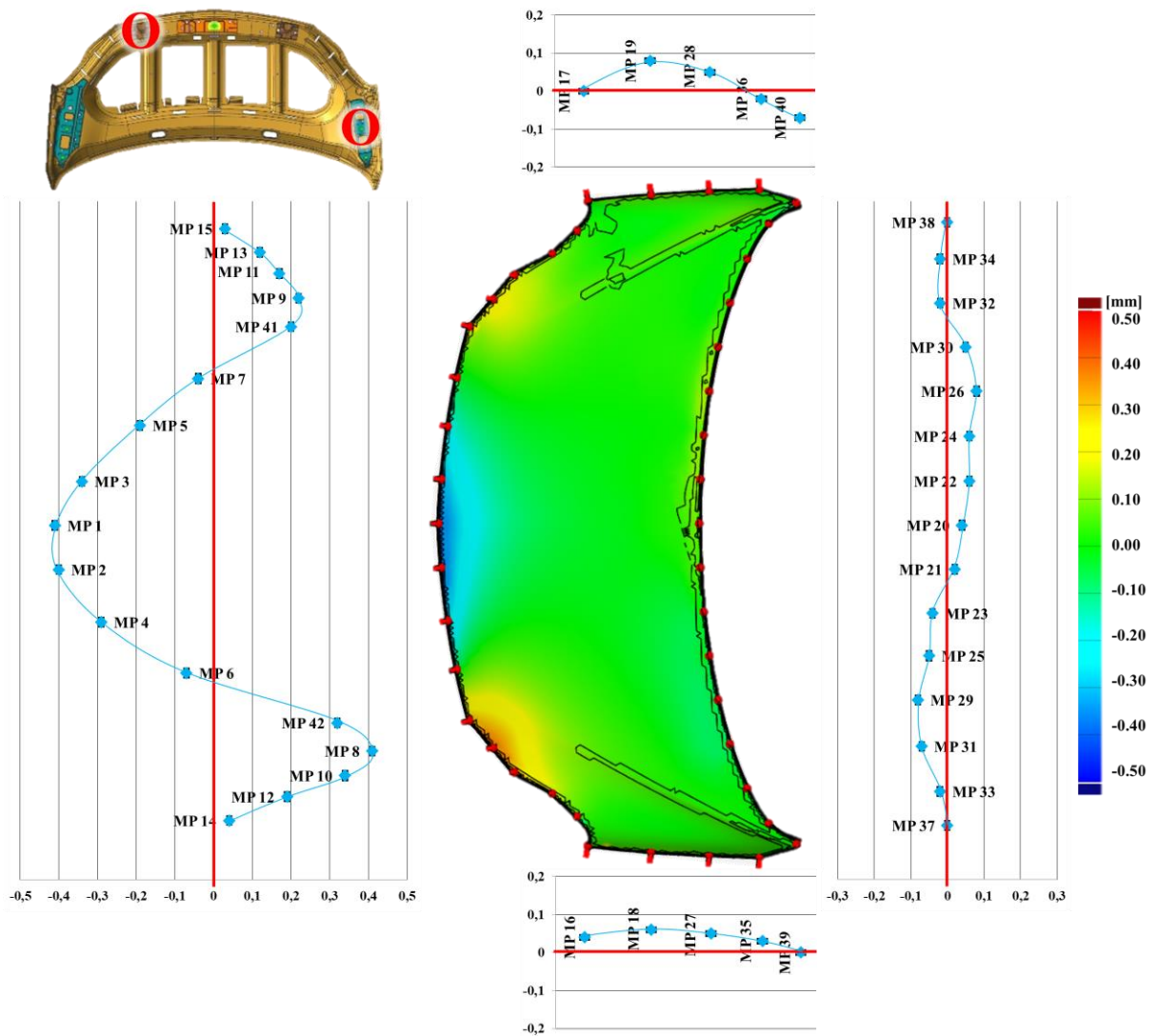


Abb. 9-7: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 10.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,36	0,07	0,39	0,04	0,18	0,09	0,11	0,14	-0	0,17	0,07	0,05	0,04	0,01
Simulation Kombination6	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0,1	0	-0	0,12	0,08	0,07	0,04	0,05	0,07	-0	-0	0,01	0,04	0,06	0,02	0	0
Summe Kombinationen	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,1	-0,1	0,48	0,15	0,46	0,08	0,23	0,16	0,1	0,12	0	0,21	0,13	0,07	0,04	0,01
Simulation Kombination10	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0	0,41	0,22	0,34	0,17	0,19	0,12	0,04	0,03	0,04	0	0,06	0,08	0,04	0,02
Differenz absolut	0,08	0,08	0,09	0,03	0,07	0	0,05	0,07	0,07	0,12	0,09	0,04	0,04	0,06	0,09	0,04	0,21	0,07	0,01	0	0,01

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination2	0,07	-0	0,05	-0	-0	0,07	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0	-0,2	0,08	-0,1	0,01	-0,2	-0,1	-0,2	0,1	0,25
Simulation Kombination6	0,02	-0	0,04	0	0,03	0,07	0	-0	0	-0	-0,1	0,02	-0,1	0,08	-0,1	0,05	-0,1	0,02	-0,2	0,14	0,07
Summe Kombinationen	0,09	-0,1	0,09	-0	0	0,14	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0	-0,3	0,16	-0,2	0,06	-0,3	-0	-0,4	0,24	0,32
Simulation Kombination10	0,06	-0	0,06	-0,1	0,08	0,05	0,05	-0,1	0,05	-0,1	-0	-0	-0	0,03	-0	0	0	0	-0,1	0,2	0,32
Differenz absolut	0,03	0,03	0,03	0,02	0,08	0,09	0,07	0,03	0,18	0,03	0,26	0	0,3	0,13	0,17	0,06	0,27	0,04	0,3	0,04	0

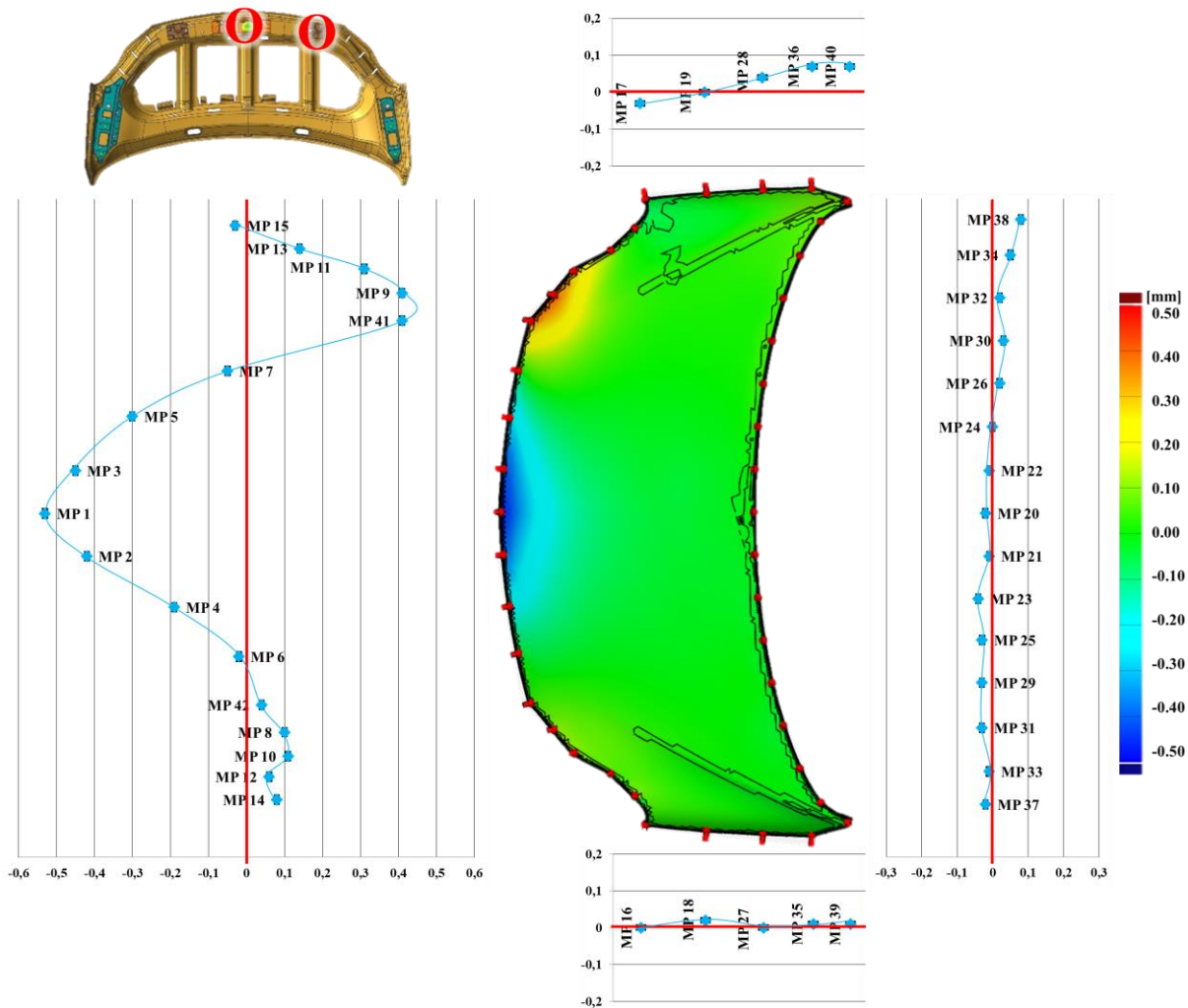


Abb. 9-8: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 11.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,12	0,42	0,1	0,31	0,08	0,13	0,06	-0,1	0,01	-0,1	0	0	-0	-0
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	-0	0,08	0,01	-0,1	-0,1	-0	0	-0,1	0,07	0,08	0,12	0,03	0,1	0,09	0,03	-0,1	-0,1
Summe Kombinationen	-0,5	-0,4	-0,4	-0,1	-0,3	0,05	-0	0,01	0,35	0,08	0,31	-0	0,2	0,14	0,06	0,04	0,05	0,09	0,03	-0,1	-0,1
Simulation Kombination11	-0,5	-0,4	-0,5	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,11	0,41	0,11	0,31	0,06	0,14	0,09	-0	0	-0	0,02	-0	-0	-0
Differenz absolut	0,06	0,07	0,04	0,09	0,02	0,08	0,01	0,1	0,06	0,03	0	0,07	0,06	0,05	0,1	0,04	0,08	0,07	0,04	0,1	0,12

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination3	-0	-0,1	-0	-0,1	0,01	-0	0,05	-0,1	0,02	-0	0,03	-0	0,05	0,04	0,1	0,03	0,11	0,05	0,09	0,41	0,07
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,06	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0	-0,3	0,05	-0,1	-0	-0,3	-0	-0,3	0,05	-0
Summe Kombinationen	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	0,01	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	0,09	-0	0,02	-0,1	0,04	-0,2	0,46	0,03
Simulation Kombination11	-0	-0	0	-0	0,01	0	0,05	-0	0,03	-0	0,02	-0	0,05	0,02	0,07	-0	0,08	0,01	0,08	0,42	0,04
Differenz absolut	0,1	0,08	0,09	0,08	0,11	0,05	0,04	0,07	0,17	0,06	0,2	0,04	0,25	0,07	0,09	0,04	0,22	0,03	0,27	0,04	0,01

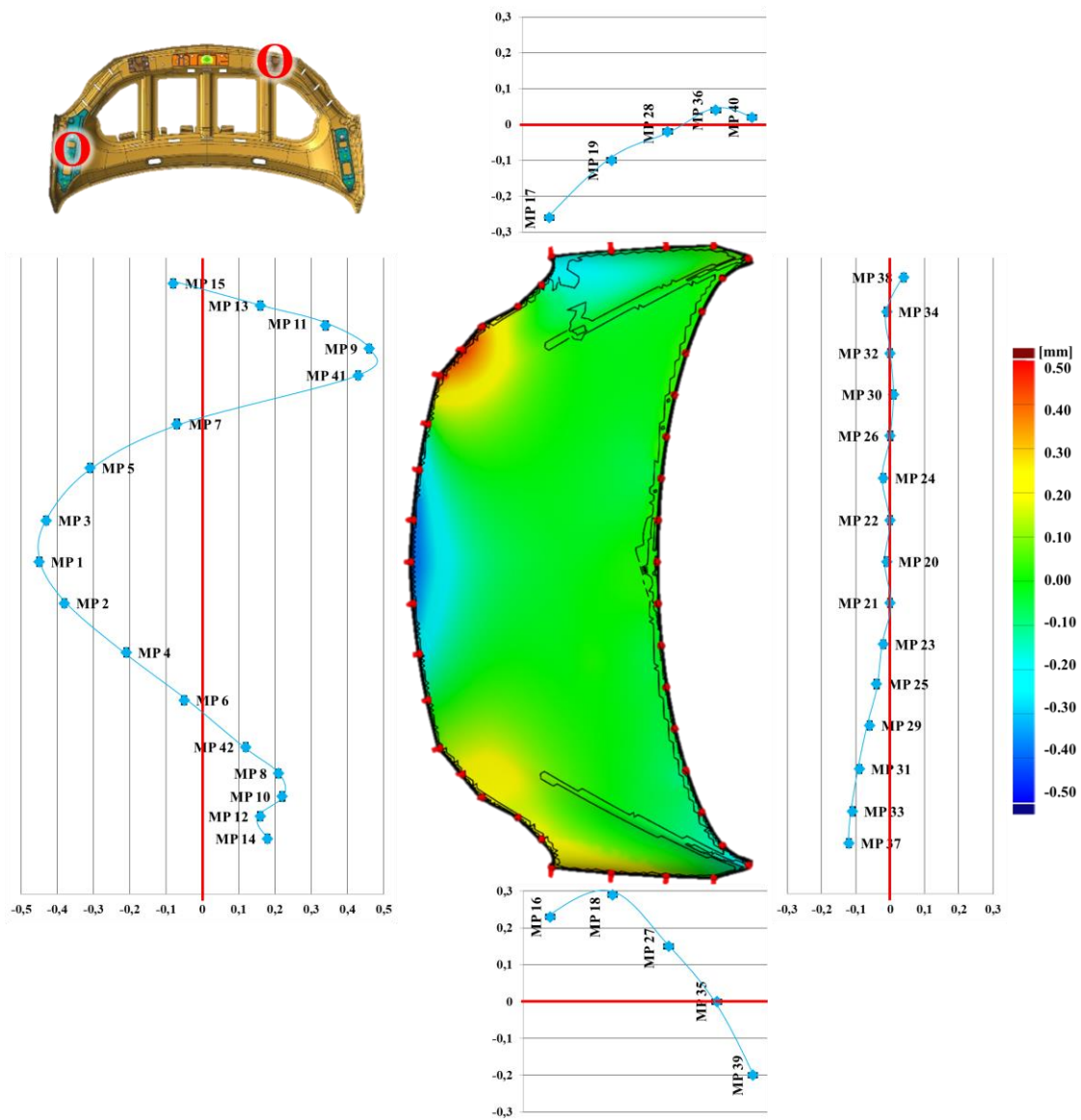


Abb. 9-9: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 12.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,12	0,42	0,1	0,31	0,08	0,13	0,06	-0,1	0,01	-0,1	0	0	-0	-0
Simulation Kombination5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0	0,01	0,15	0,06	0,14	-0	0,14	-0	0,12	-0,2	0,29	-0,2	0,33	-0,1	0	0,01
Summe Kombinationen	-0,5	-0,4	-0,5	-0,2	-0,3	-0	-0	0,27	0,48	0,24	0,3	0,22	0,11	0,18	-0,2	0,3	-0,3	0,33	-0,1	-0	-0
Simulation Kombination12	-0,5	-0,4	-0,4	-0,2	-0,3	-0,1	-0,1	0,21	0,46	0,22	0,35	0,17	0,16	0,19	-0,1	0,23	-0,3	0,3	-0,1	-0	0
Differenz absolut	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,03	0,06	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05	0,01	0,12	0,07	0,01	0,03	0,03	0,02	0,02

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination3	-0	-0,1	-0	-0,1	0,01	-0	0,05	-0,1	0,02	-0	0,03	-0	0,05	0,04	0,1	0,03	0,11	0,05	0,09	0,41	0,07
Simulation Kombination5	0,01	-0	0,02	-0	0,03	0,19	-0,1	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0	0,05	0,02	-0,1	0,04	-0,2	0,03	0,14	0,09
Summe Kombinationen	-0	-0,1	0,01	-0,1	0,04	0,18	-0	-0,1	0,03	-0,1	0,01	-0,1	0,04	0,09	0,12	-0,1	0,15	-0,1	0,12	0,55	0,16
Simulation Kombination12	0	-0	-0	-0	0	0,15	-0	-0,1	0,01	-0,1	0	-0,1	-0	0,01	0,05	-0,1	0,04	-0,2	0,04	0,43	0,11
Differenz absolut	0,01	0,05	0,02	0,05	0,04	0,03	0,01	0,05	0,02	0,01	0,01	0,02	0,05	0,08	0,07	0,04	0,11	0,07	0,08	0,12	0,05

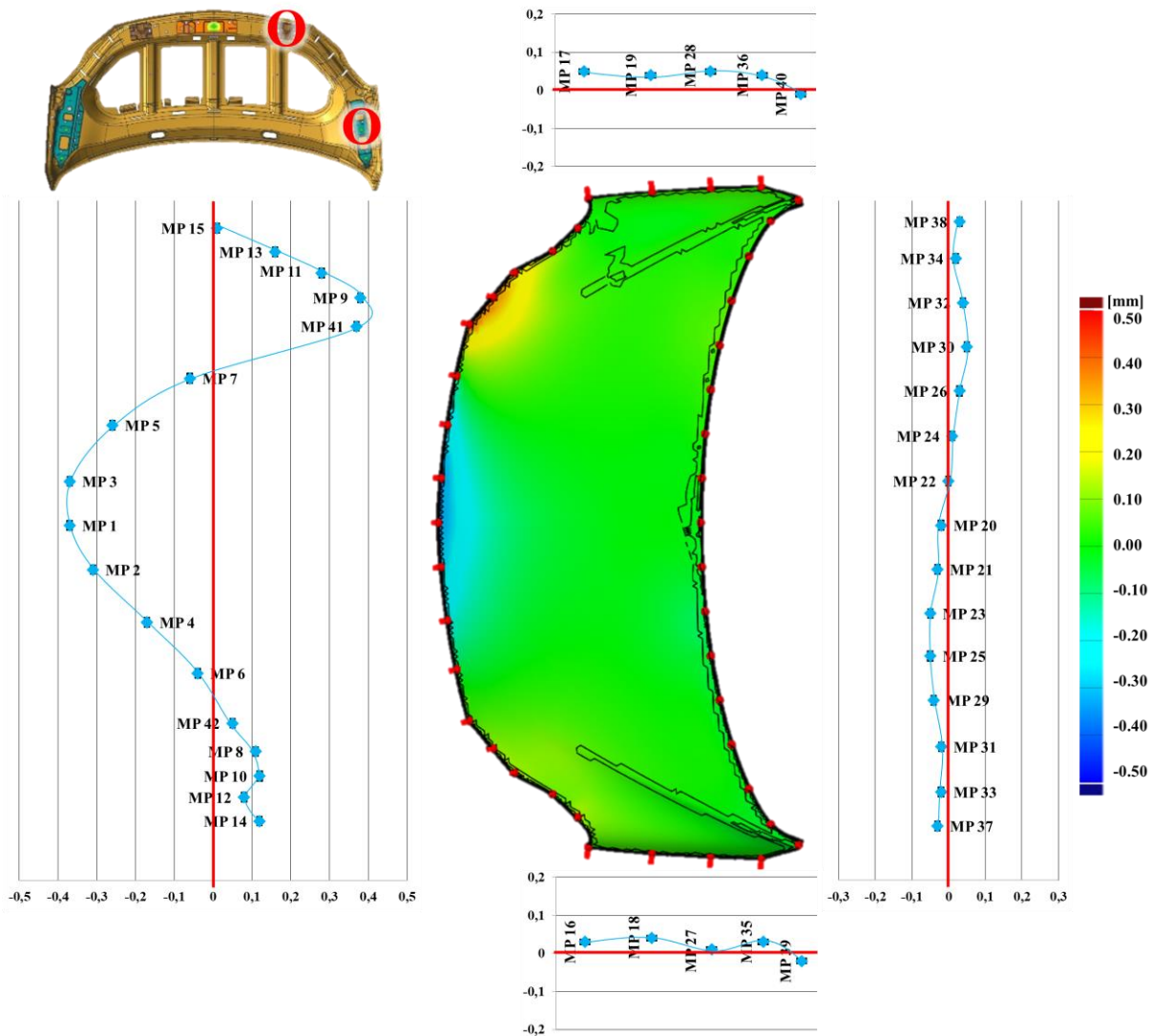


Abb. 9-10: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 13.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,12	0,42	0,1	0,31	0,08	0,13	0,06	-0,1	0,01	-0,1	0	0	-0	-0
Simulation Kombination6	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0,1	0	-0	0,12	0,08	0,07	0,04	0,05	0,07	-0	-0	0,01	0,04	0,06	0,02	0	0
Summe Kombinationen	-0,5	-0,4	-0,5	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,24	0,5	0,17	0,35	0,13	0,2	0,05	-0,1	0,02	-0	0,06	0,02	-0	-0
Simulation Kombination13	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0,1	-0,1	0,11	0,38	0,12	0,29	0,09	0,16	0,12	0	0,02	0,05	0,04	0,03	-0	-0
Differenz absolut	0,08	0,08	0,09	0,02	0,05	0,02	0,02	0,13	0,12	0,05	0,06	0,04	0,04	0,07	0,08	0	0,06	0,02	0,01	0,01	0

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination3	-0	-0,1	-0	-0,1	0,01	-0	0,05	-0,1	0,02	-0	0,03	-0	0,05	0,04	0,1	0,03	0,11	0,05	0,09	0,41	0,07
Simulation Kombination6	0,02	-0	0,04	0	0,03	0,07	0	-0	0	-0	-0,1	0,02	-0,1	0,08	-0,1	0,05	-0,1	0,02	-0,2	0,14	0,07
Summe Kombinationen	0	-0,1	0,03	-0,1	0,04	0,06	0,05	-0,1	0,02	-0,1	-0	0,01	-0,1	0,12	0,01	0,08	0,01	0,07	-0,1	0,55	0,14
Simulation Kombination13	0	-0,1	0,02	-0	0,02	0,01	0,06	-0	0,05	-0	0,04	-0	0,02	0,04	0,04	-0	0,02	-0	0	0,37	0,05
Differenz absolut	0	0,03	0,01	0,01	0,02	0,05	0,01	0,04	0,03	0,03	0,08	0,03	0,08	0,08	0,03	0,11	0,01	0,09	0,08	0,18	0,09

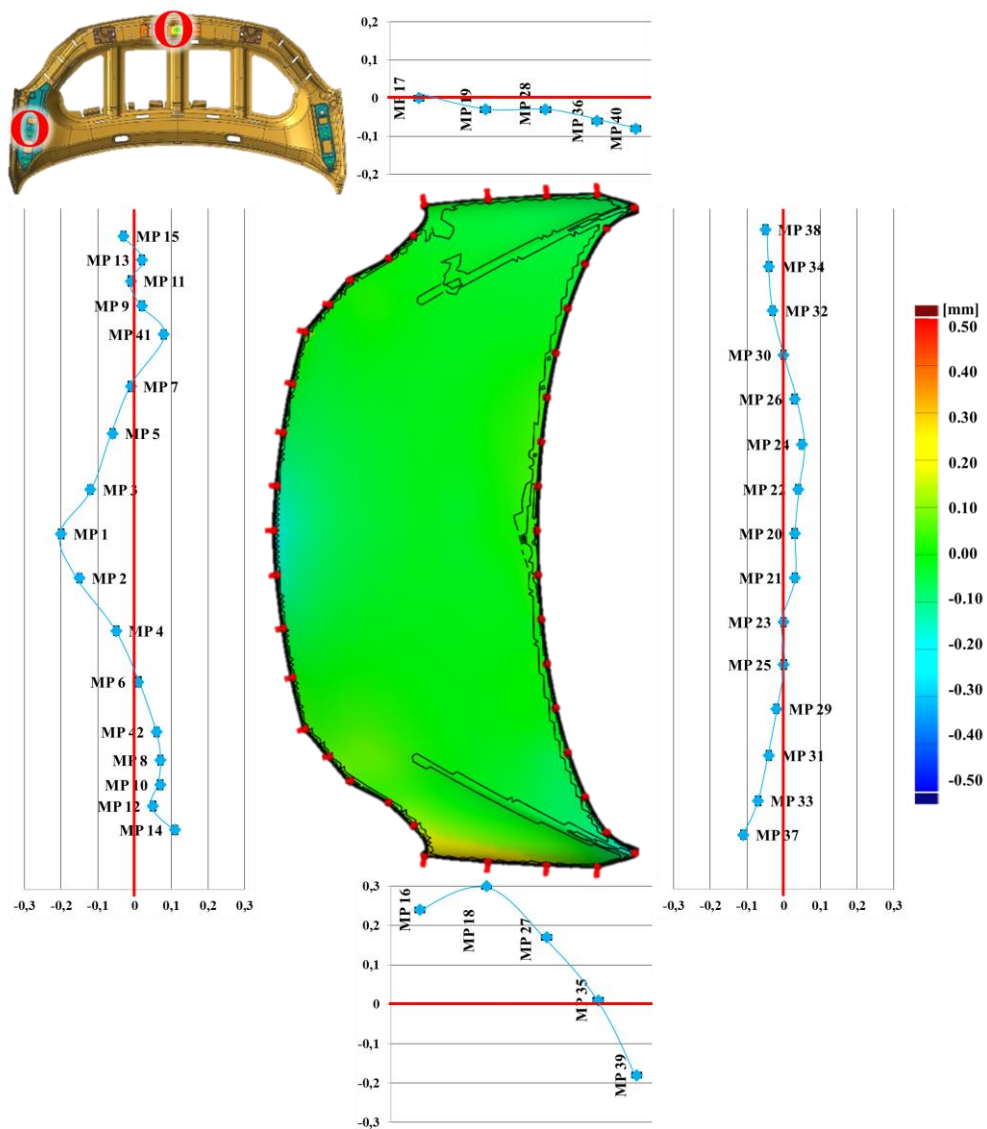


Abb. 9-11: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 14.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	-0	0,08	0,01	-0,1	-0,1	-0	0	-0,1	0,07	0,08	0,12	0,03	0,1	0,09	0,03	-0,1	-0,1
Simulation Kombination5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0	0,01	0,15	0,06	0,14	-0	0,14	-0	0,12	-0,2	0,29	-0,2	0,33	-0,1	0	0,01
Summe Kombinationen	-0,2	-0,2	-0,2	-0	-0,1	0,07	0,02	0,04	-0	0,12	-0	0,05	0,05	0,2	-0	0,32	-0,1	0,42	-0	-0,1	-0,1
Simulation Kombination14	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0	-0	0,07	0,02	0,07	0	0,05	0,02	0,11	-0	0,24	0	0,31	-0	0,03	0,03
Differenz absolut	0,02	0,01	0,03	0,04	0,01	0,07	0,03	0,03	0,03	0,05	0,01	0	0,03	0,09	0,01	0,08	0,1	0,11	0,01	0,12	0,13

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,06	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0	-0,3	0,05	-0,1	-0	-0,3	-0	-0,3	0,05	-0
Simulation Kombination5	0,01	-0	0,02	-0	0,03	0,19	-0,1	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0	0,05	0,02	-0,1	0,04	-0,2	0,03	0,14	0,09
Summe Kombinationen	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,25	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1	-0,3	0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	0,19	0,05
Simulation Kombination14	0,05	0	0,05	0	0,03	0,17	-0	-0	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0	0,02	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	0,09	0,06
Differenz absolut	0,13	0,09	0,11	0,09	0,11	0,08	0,07	0,09	0,16	0,06	0,2	0,04	0,22	0,08	0,04	0,02	0,16	0,01	0,17	0,1	0,01

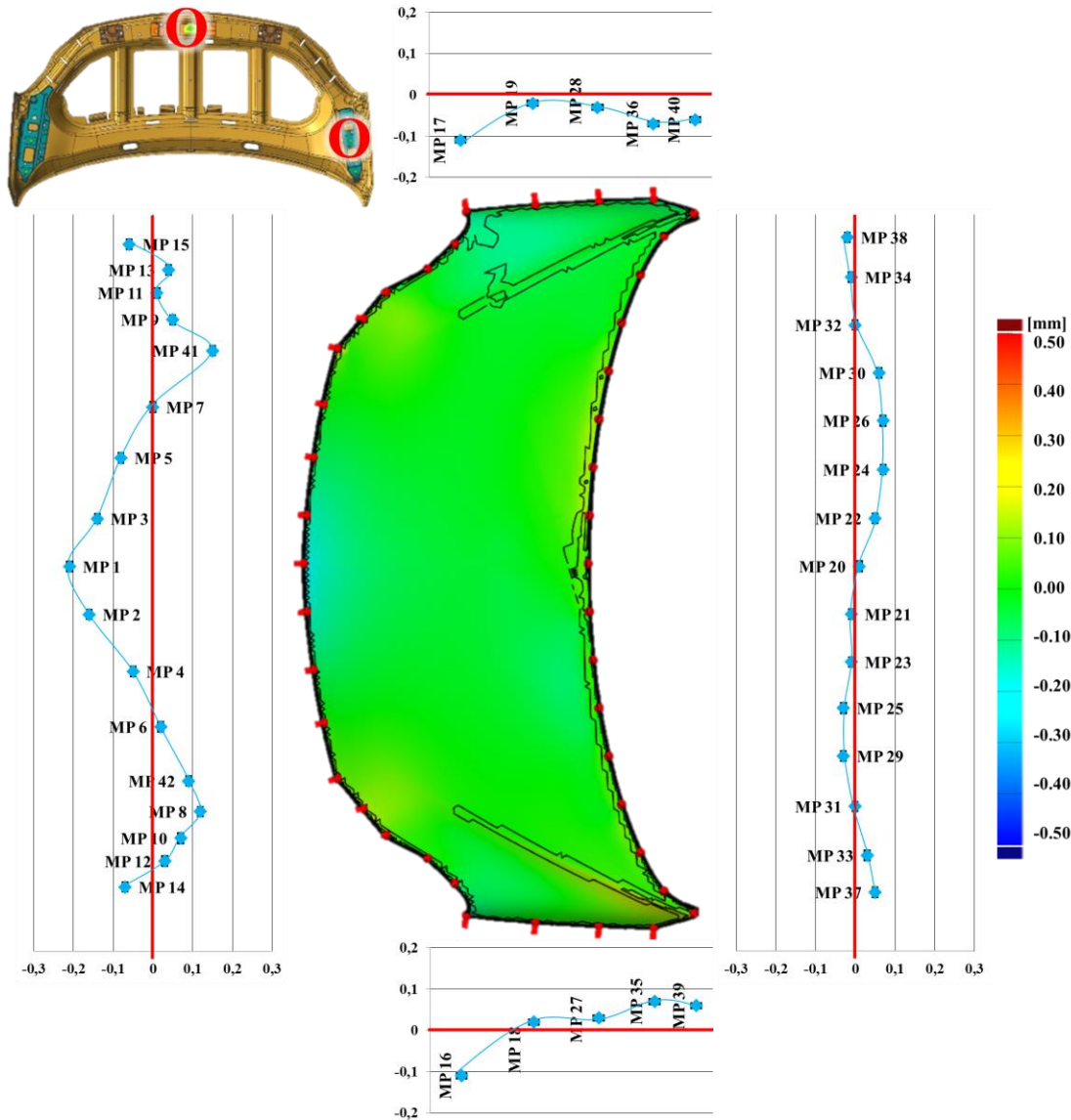


Abb. 9-12: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 15.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	-0	0,08	0,01	-0,1	-0,1	-0	0	-0,1	0,07	0,08	0,12	0,03	0,1	0,09	0,03	-0,1	-0,1
Simulation Kombination6	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0,1	0	-0	0,12	0,08	0,07	0,04	0,05	0,07	-0	-0	0,01	0,04	0,06	0,02	0	0
Summe Kombinationen	-0,2	-0,1	-0,2	0,01	-0,1	0,08	-0	0,01	0,01	0,05	0,04	-0	0,14	0,07	0,1	0,04	0,14	0,15	0,05	-0,1	-0,1
Simulation Kombination15	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,02	0	0,12	0,05	0,07	0,01	0,03	0,04	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,01	-0	0,01	-0
Differenz absolut	0,01	0,02	0,01	0,06	0,02	0,06	0,02	0,11	0,04	0,02	0,03	0,07	0,1	0,13	0,16	0,16	0,25	0,14	0,08	0,1	0,1

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,06	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0	-0,3	0,05	-0,1	-0	-0,3	-0	-0,3	0,05	-0
Simulation Kombination6	0,02	-0	0,04	0	0,03	0,07	0	-0	0	-0	-0,1	0,02	-0,1	0,08	-0,1	0,05	-0,1	0,02	-0,2	0,14	0,07
Summe Kombinationen	-0,1	-0,1	-0	-0,1	-0,1	0,13	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,3	-0	-0,4	0,13	-0,2	0,04	-0,4	0,01	-0,5	0,19	0,03
Simulation Kombination15	0,05	-0	0,08	-0	0,07	0,02	-0	-0	0,06	-0	0	0,03	-0	0,08	-0,1	0,06	-0	0,1	-0,1	0,15	0,09
Differenz absolut	0,12	0,09	0,12	0,03	0,15	0,11	0,01	0,05	0,22	0,06	0,28	0,05	0,35	0,05	0,14	0,02	0,32	0,09	0,39	0,04	0,06

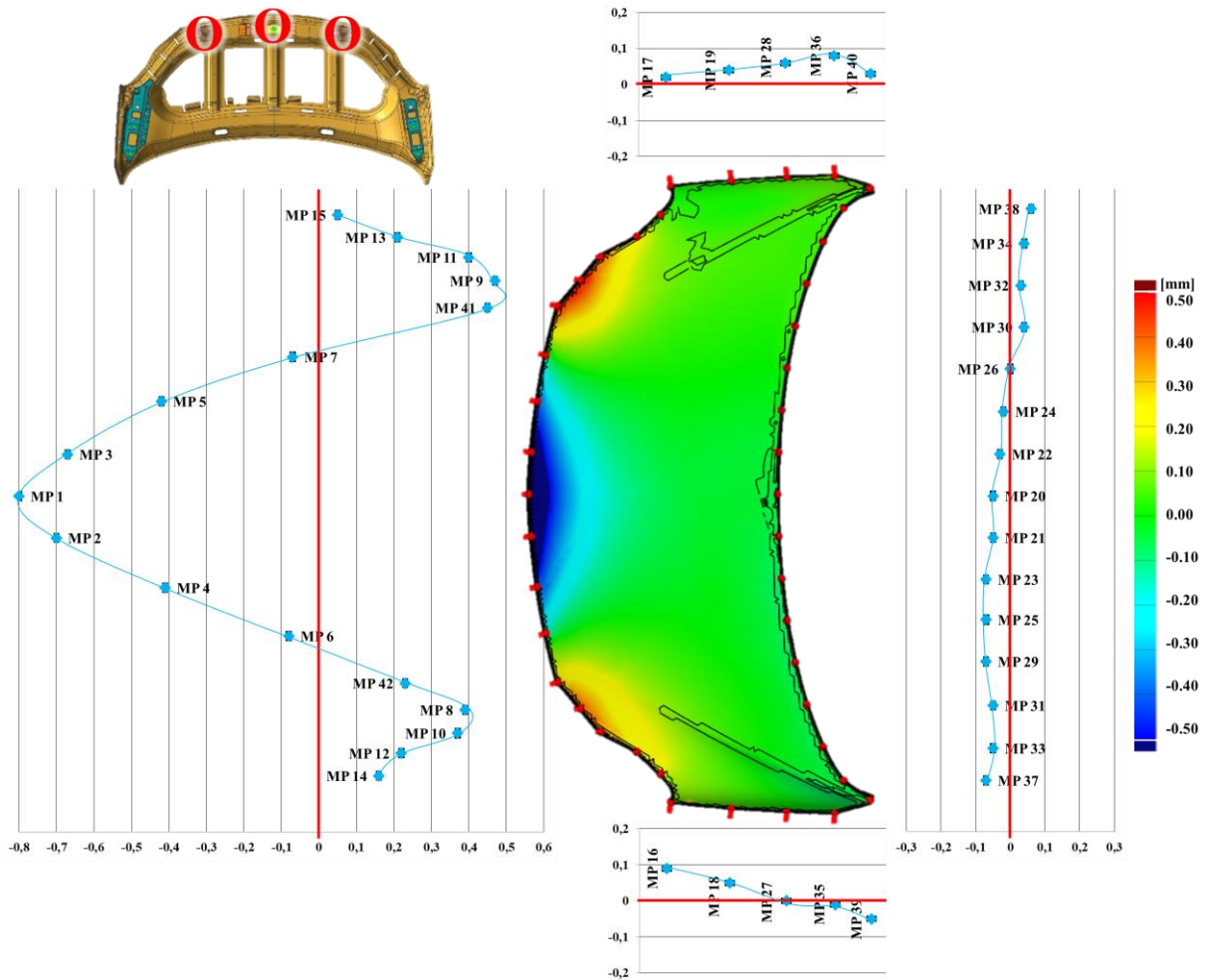


Abb. 9-13: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 17.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,36	0,07	0,39	0,04	0,18	0,09	0,11	0,14	-0	0,17	0,07	0,05	0,04	0,01
Simulation Kombination3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,12	0,42	0,1	0,31	0,08	0,13	0,06	-0,1	0,01	-0,1	0	0	-0	-0
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	-0	0,08	0,01	-0,1	-0,1	-0	0	-0,1	0,07	0,08	0,12	0,03	0,1	0,09	0,03	-0,1	-0,1
Summe Kombinationen	-0,9	-0,7	-0,7	-0,4	-0,5	-0	-0,1	0,37	0,42	0,47	0,35	0,17	0,29	0,25	0,2	0,03	0,22	0,16	0,08	-0,1	-0,1
Simulation Kombination17	-0,8	-0,7	-0,7	-0,4	-0,4	-0,1	-0,1	0,4	0,47	0,37	0,4	0,22	0,21	0,16	0,05	0,08	0,02	0,05	0,04	-0,1	-0,1
Differenz absolut	0,06	0,04	0,07	0,04	0,05	0,07	0,03	0,03	0,05	0,1	0,05	0,05	0,08	0,09	0,15	0,05	0,2	0,11	0,04	0,03	0,08

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination2	0,07	-0	0,05	-0	-0	0,07	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0	-0,2	0,08	-0,1	0,01	-0,2	-0,1	-0,2	0,1	0,25
Simulation Kombination3	-0	-0,1	-0	-0,1	0,01	-0	0,05	-0,1	0,02	-0	0,03	-0	0,05	0,04	0,1	0,03	0,11	0,05	0,09	0,41	0,07
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,06	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0	-0,3	0,05	-0,1	-0	-0,3	-0	-0,3	0,05	-0
Summe Kombinationen	-0	-0,2	-0	-0,1	-0,1	0,12	-0	-0,2	-0,3	-0,2	-0,4	-0,1	-0,4	0,17	-0,1	0,03	-0,3	-0	-0,4	0,56	0,28
Simulation Kombination17	-0	-0,1	-0	-0,1	0	-0	0,06	-0,1	0,04	-0,1	0,03	-0,1	0,04	0	0,08	-0,1	0,05	-0,1	0,04	0,46	0,24
Differenz absolut	0,01	0,09	0,02	0,06	0,13	0,13	0,07	0,09	0,31	0,11	0,42	0,04	0,45	0,17	0,2	0,09	0,36	0,03	0,43	0,1	0,04

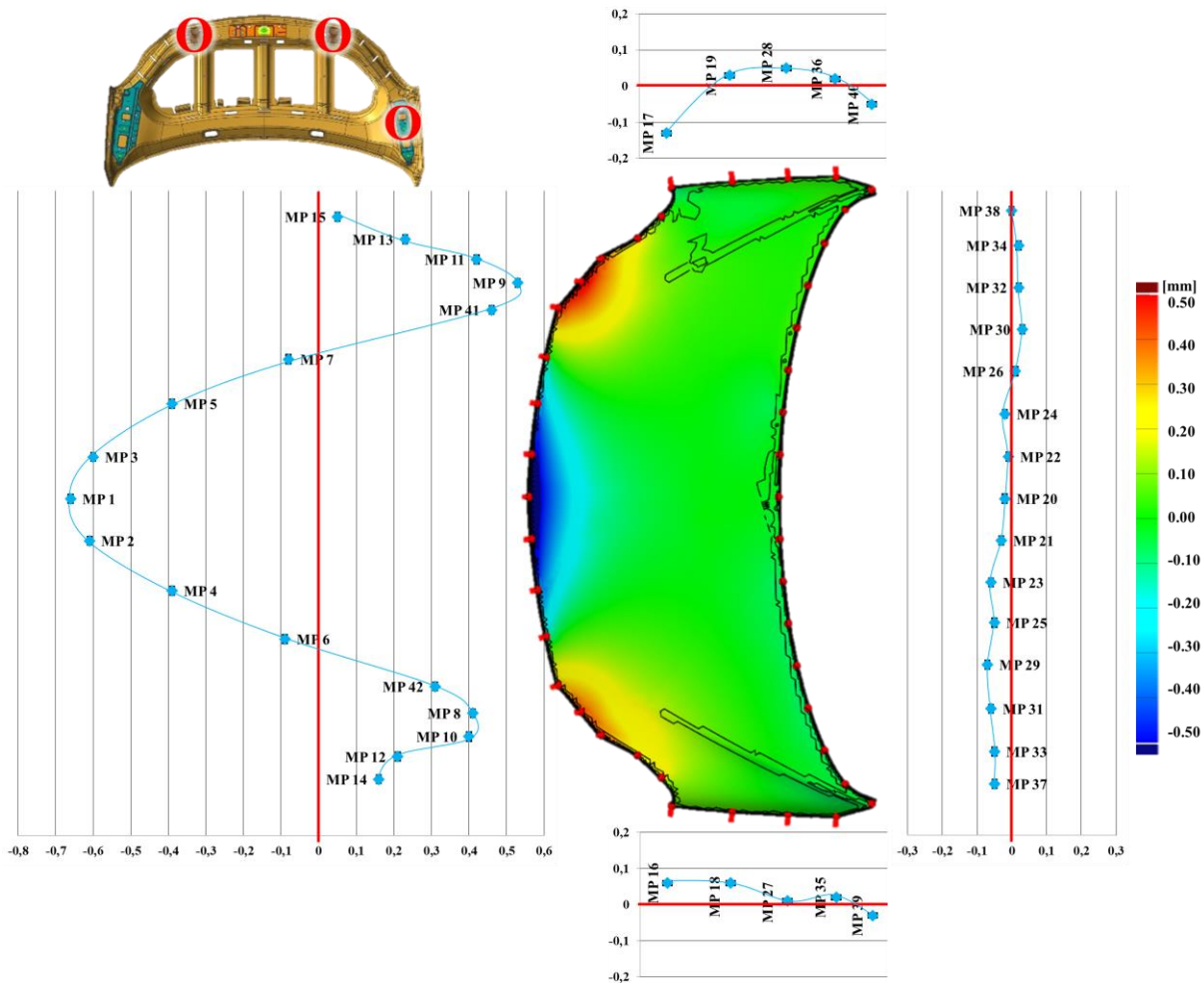


Abb. 9-14: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 19.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,36	0,07	0,39	0,04	0,18	0,09	0,11	0,14	-0	0,17	0,07	0,05	0,04	0,01
Simulation Kombination3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,12	0,42	0,1	0,31	0,08	0,13	0,06	-0,1	0,01	-0,1	0	0	-0	-0
Simulation Kombination6	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0,1	0	-0	0,12	0,08	0,07	0,04	0,05	0,07	-0	-0	0,01	0,04	0,06	0,02	0	0
Summe Kombinationen	-0,9	-0,8	-0,8	-0,5	-0,5	-0,1	-0,1	0,6	0,57	0,56	0,39	0,31	0,29	0,16	0,06	0,01	0,16	0,13	0,07	0,01	-0
Simulation Kombination19	-0,7	-0,6	-0,6	-0,4	-0,4	-0,1	-0,1	0,41	0,53	0,41	0,42	0,22	0,24	0,16	0,05	0,06	-0,1	0,06	0,03	-0	-0
Differenz absolut	0,18	0,17	0,19	0,07	0,12	0	0,06	0,19	0,04	0,15	0,03	0,09	0,05	0	0,01	0,05	0,28	0,07	0,04	0,03	0,01

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination2	0,07	-0	0,05	-0	-0	0,07	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0	-0,2	0,08	-0,1	0,01	-0,2	-0,1	-0,2	0,1	0,25
Simulation Kombination3	-0	-0,1	-0	-0,1	0,01	-0	0,05	-0,1	0,02	-0	0,03	-0	0,05	0,04	0,1	0,03	0,11	0,05	0,09	0,41	0,07
Simulation Kombination6	0,02	-0	0,04	0	0,03	0,07	0	-0	0	-0	-0,1	0,02	-0,1	0,08	-0,1	0,05	-0,1	0,02	-0,2	0,14	0,07
Summe Kombinationen	0,07	-0,1	0,08	-0,1	0,01	0,13	0,03	-0,2	-0,1	-0,1	-0,3	-0	-0,3	0,2	-0,1	0,09	-0,2	0,01	-0,3	0,65	0,39
Simulation Kombination19	-0	-0,1	-0	-0,1	0,01	0,01	0,05	-0,1	0,03	-0,1	0,02	-0,1	0,02	0,03	0,03	-0	0	-0	-0,1	0,46	0,31
Differenz absolut	0,08	0,06	0,09	0,03	0	0,12	0,02	0,08	0,14	0,07	0,27	0,02	0,29	0,17	0,12	0,13	0,16	0,05	0,23	0,19	0,08

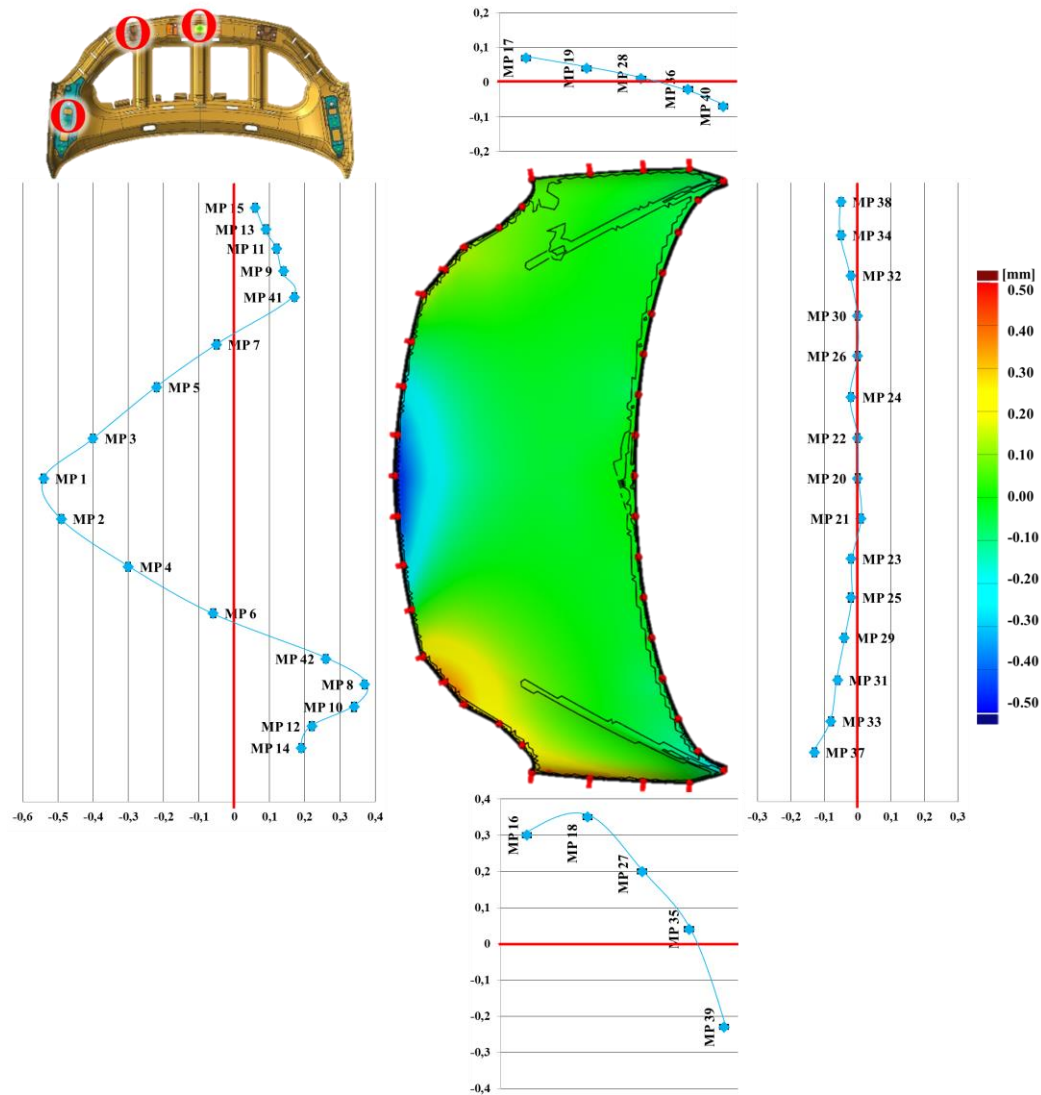


Abb. 9-15: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 20.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,36	0,07	0,39	0,04	0,18	0,09	0,11	0,14	-0	0,17	0,07	0,05	0,04	0,01
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	-0	0,08	0,01	-0,1	-0,1	-0	0	-0,1	0,07	0,08	0,12	0,03	0,1	0,09	0,03	-0,1	-0,1
Simulation Kombination5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0	0,01	0,15	0,06	0,14	-0	0,14	-0	0,12	-0,2	0,29	-0,2	0,33	-0,1	0	0,01
Summe Kombinationen	-0,6	-0,5	-0,5	-0,3	-0,3	0	-0	0,4	0,06	0,51	0,03	0,23	0,14	0,31	0,11	0,31	0,07	0,49	0,01	-0,1	-0,1
Simulation Kombination20	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0	0,38	0,14	0,34	0,12	0,23	0,09	0,2	0,06	0,3	0,06	0,36	0,03	0	0
Differenz absolut	0,06	0,05	0,08	0,01	0,04	0,06	0	0,02	0,08	0,17	0,09	0	0,05	0,11	0,05	0,01	0,01	0,13	0,02	0,05	0,09

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination2	0,07	-0	0,05	-0	-0	0,07	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0	-0,2	0,08	-0,1	0,01	-0,2	-0,1	-0,2	0,1	0,25
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,06	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0	-0,3	0,05	-0,1	-0	-0,3	-0	-0,3	0,05	-0
Simulation Kombination5	0,01	-0	0,02	-0	0,03	0,19	-0,1	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0	0,05	0,02	-0,1	0,04	-0,2	0,03	0,14	0,09
Summe Kombinationen	-0	-0,1	-0	-0,1	-0,1	0,32	-0,1	-0,2	-0,3	-0,2	-0,4	-0,2	-0,5	0,18	-0,2	-0,1	-0,4	-0,3	-0,5	0,29	0,3
Simulation Kombination20	0,01	-0	-0	-0	-0	0,2	0,01	-0	0	-0,1	-0	-0,1	-0	0,05	-0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	0,17	0,26
Differenz absolut	0,02	0,11	0,01	0,1	0,1	0,12	0,13	0,14	0,28	0,13	0,42	0,07	0,42	0,13	0,18	0,01	0,33	0,02	0,37	0,12	0,04

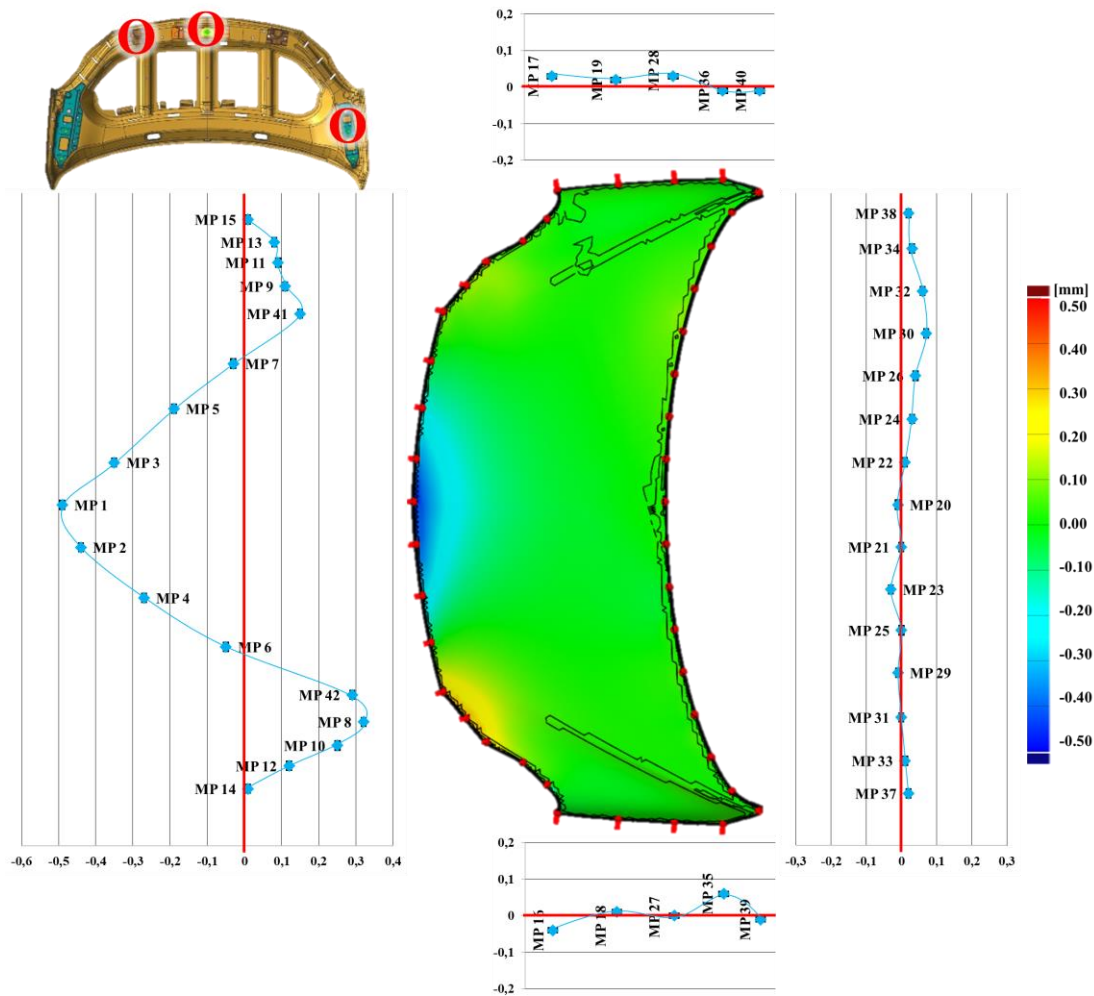


Abb. 9-16: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 21.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,36	0,07	0,39	0,04	0,18	0,09	0,11	0,14	-0	0,17	0,07	0,05	0,04	0,01
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	-0	0,08	0,01	-0,1	-0,1	-0	0	-0,1	0,07	0,08	0,12	0,03	0,1	0,09	0,03	-0,1	-0,1
Simulation Kombination6	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0,1	0	-0	0,12	0,08	0,07	0,04	0,05	0,07	-0	-0	0,01	0,04	0,06	0,02	0	0
Summe Kombinationen	-0,6	-0,5	-0,5	-0,3	-0,3	0,01	-0,1	0,37	0,08	0,44	0,08	0,14	0,23	0,18	0,24	0,03	0,31	0,22	0,1	-0,1	-0,1
Simulation Kombination21	-0,5	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0	0,33	0,11	0,25	0,09	0,12	0,08	0,01	0,01	-0	0,03	0	0,01	-0	0
Differenz absolut	0,12	0,09	0,13	0	0,1	0,07	0,05	0,04	0,03	0,19	0,01	0,02	0,15	0,17	0,23	0,07	0,28	0,22	0,09	0,04	0,1

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination2	0,07	-0	0,05	-0	-0	0,07	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0	-0,2	0,08	-0,1	0,01	-0,2	-0,1	-0,2	0,1	0,25
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,06	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0	-0,3	0,05	-0,1	-0	-0,3	-0	-0,3	0,05	-0
Simulation Kombination6	0,02	-0	0,04	0	0,03	0,07	0	-0	0	-0	-0,1	0,02	-0,1	0,08	-0,1	0,05	-0,1	0,02	-0,2	0,14	0,07
Summe Kombinationen	0	-0,1	0,01	-0,1	-0,1	0,2	-0,1	-0,2	-0,3	-0,2	-0,5	-0,1	-0,6	0,21	-0,3	0,05	-0,5	-0,1	-0,7	0,29	0,28
Simulation Kombination21	0,01	-0	0,03	0	0,03	-0	0,03	-0	0,07	-0	0,06	0,01	0,03	0,07	-0	0,02	0,02	0	-0	0,15	0,29
Differenz absolut	0,01	0,11	0,02	0,08	0,14	0,21	0,09	0,15	0,36	0,14	0,55	0,07	0,6	0,14	0,3	0,03	0,54	0,05	0,63	0,14	0,01

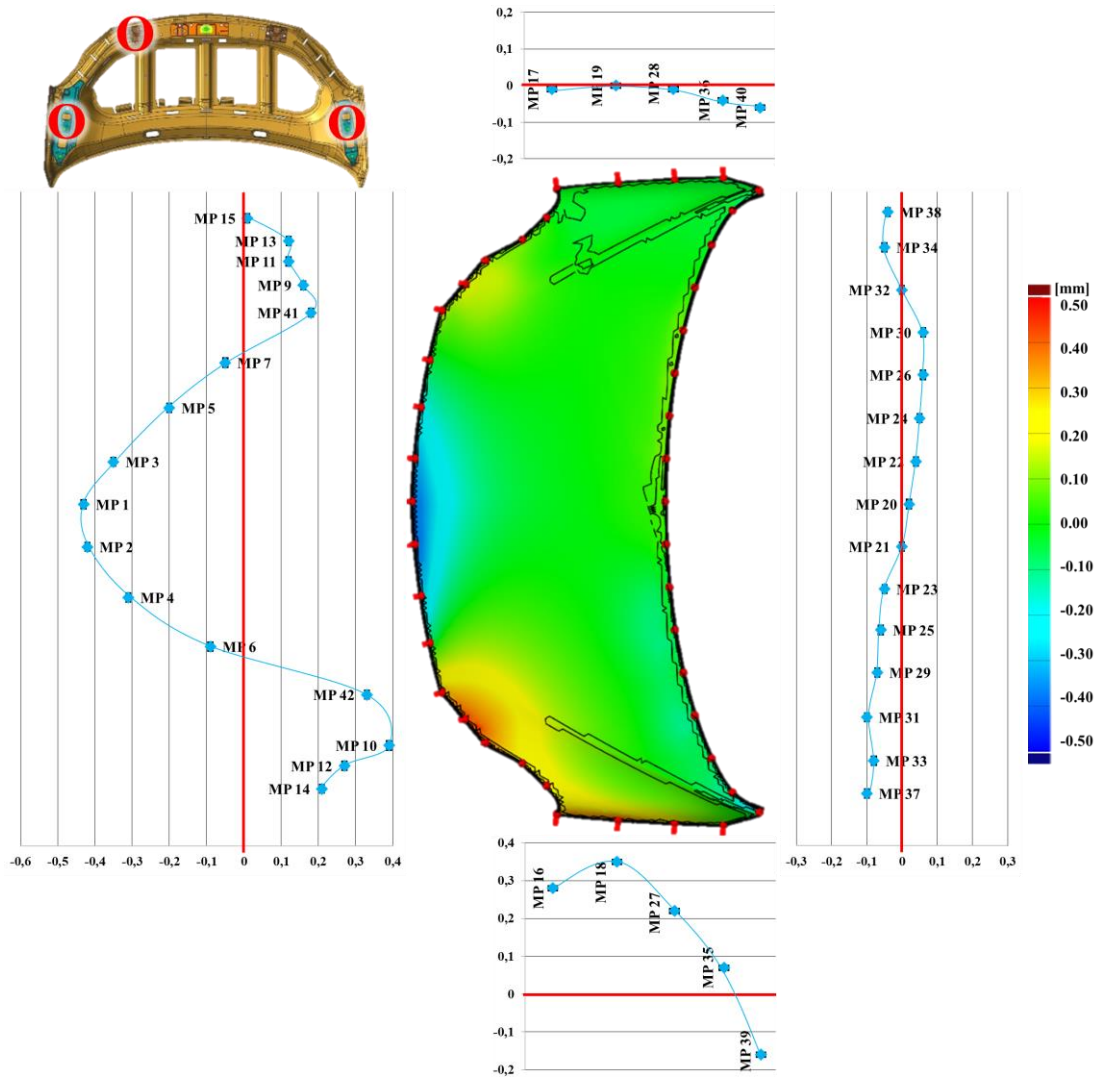


Abb. 9-17: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 22.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,36	0,07	0,39	0,04	0,18	0,09	0,11	0,14	-0	0,17	0,07	0,05	0,04	0,01
Simulation Kombination5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0	0,01	0,15	0,06	0,14	-0	0,14	-0	0,12	-0,2	0,29	-0,2	0,33	-0,1	0	0,01
Simulation Kombination6	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0,1	0	-0	0,12	0,08	0,07	0,04	0,05	0,07	-0	-0	0,01	0,04	0,06	0,02	0	0
Summe Kombinationen	-0,6	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,1	-0,1	0,63	0,21	0,6	0,07	0,37	0,14	0,22	-0	0,29	0,01	0,46	0	0,04	0,02
Simulation Kombination22	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,43	0,16	0,39	0,12	0,28	0,12	0,21	0,01	0,28	-0	0,35	0	0,02	0
Differenz absolut	0,16	0,16	0,18	0,07	0,1	0,01	0,03	0,2	0,05	0,21	0,05	0,09	0,02	0,01	0,04	0,01	0,02	0,11	0	0,02	0,02

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination2	0,07	-0	0,05	-0	-0	0,07	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0	-0,2	0,08	-0,1	0,01	-0,2	-0,1	-0,2	0,1	0,25
Simulation Kombination5	0,01	-0	0,02	-0	0,03	0,19	-0,1	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0	0,05	0,02	-0,1	0,04	-0,2	0,03	0,14	0,09
Simulation Kombination6	0,02	-0	0,04	0	0,03	0,07	0	-0	0	-0	-0,1	0,02	-0,1	0,08	-0,1	0,05	-0,1	0,02	-0,2	0,14	0,07
Summe Kombinationen	0,1	-0,1	0,11	-0,1	0,03	0,33	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1	-0,3	0,21	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	0,38	0,41
Simulation Kombination22	0,05	-0,1	0,05	-0,1	0,06	0,22	-0	-0,1	0,06	-0,1	0	-0,1	-0	0,07	-0	-0,1	-0	-0,1	-0	0,18	0,33
Differenz absolut	0,05	0,04	0,06	0,01	0,03	0,11	0,07	0,09	0,18	0,05	0,3	0,01	0,28	0,14	0,13	0,04	0,19	0,09	0,3	0,2	0,08

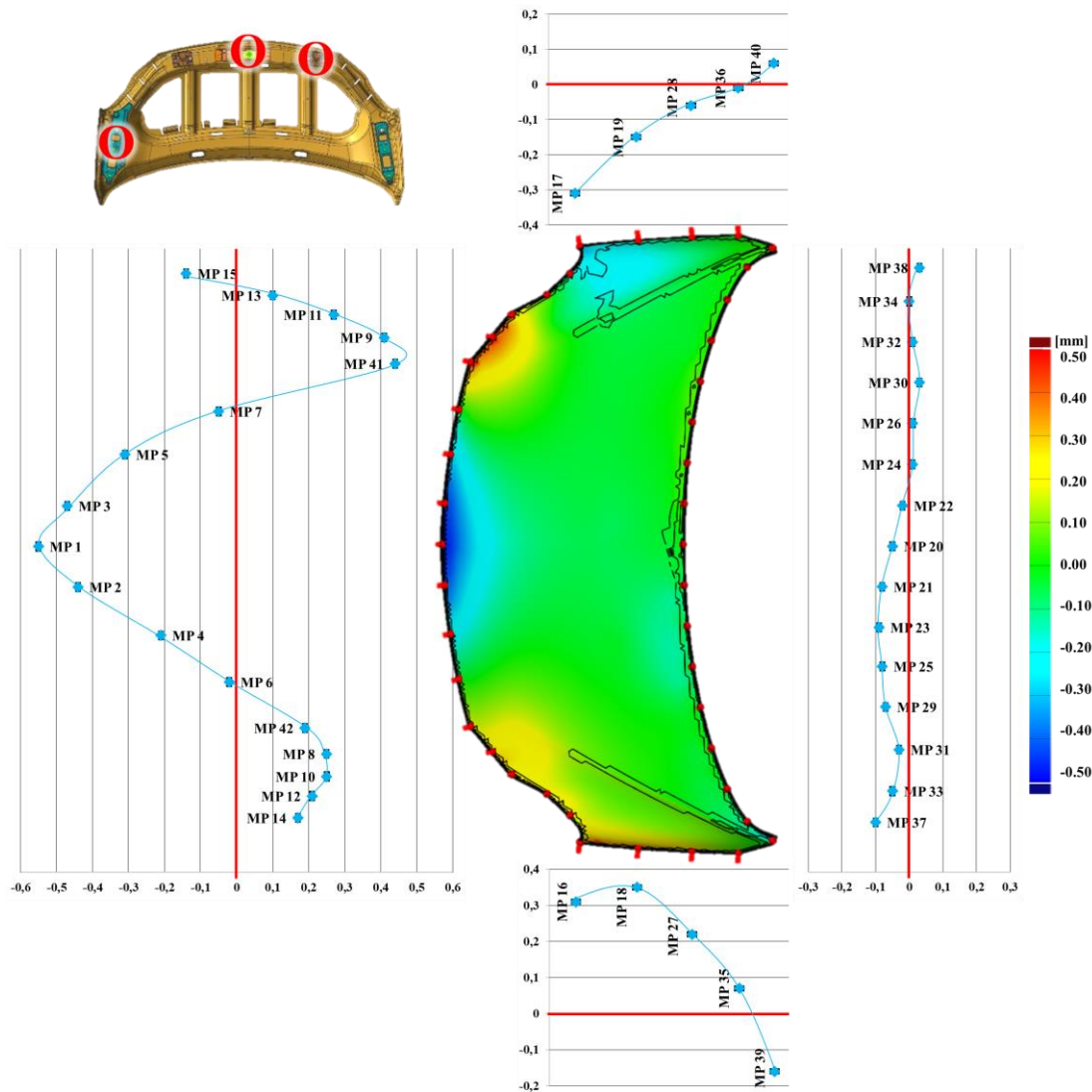


Abb. 9-18: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 23.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,12	0,42	0,1	0,31	0,08	0,13	0,06	-0,1	0,01	-0,1	0	0	-0	-0
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	-0	0,08	0,01	-0,1	-0,1	-0	0	-0,1	0,07	0,08	0,12	0,03	0,1	0,09	0,03	-0,1	-0,1
Simulation Kombination5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0	0,01	0,15	0,06	0,14	-0	0,14	-0	0,12	-0,2	0,29	-0,2	0,33	-0,1	0	0,01
Summe Kombinationen	-0,6	-0,5	-0,5	-0,2	-0,3	0,04	-0	0,16	0,41	0,22	0,3	0,13	0,18	0,26	-0,1	0,33	-0,2	0,42	-0	-0,1	-0,1
Simulation Kombination23	-0,6	-0,4	-0,5	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,25	0,4	0,25	0,27	0,22	0,1	0,18	-0,1	0,32	-0,3	0,35	-0,2	-0,1	-0,1
Differenz absolut	0,03	0,01	0,04	0,06	0,01	0,06	0,02	0,09	0,01	0,03	0,03	0,09	0,08	0,08	0,05	0,01	0,15	0,07	0,11	0,07	0,05

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination3	-0	-0,1	-0	-0,1	0,01	-0	0,05	-0,1	0,02	-0	0,03	-0	0,05	0,04	0,1	0,03	0,11	0,05	0,09	0,41	0,07
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,06	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0	-0,3	0,05	-0,1	-0	-0,3	-0	-0,3	0,05	-0
Simulation Kombination5	0,01	-0	0,02	-0	0,03	0,19	-0,1	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0	0,05	0,02	-0,1	0,04	-0,2	0,03	0,14	0,09
Summe Kombinationen	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,24	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2	0,14	0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	0,6	0,12
Simulation Kombination23	-0	-0,1	0,01	-0,1	0	0,22	-0,2	-0,1	0,03	-0	0,01	-0,1	0	0,08	-0	-0,1	0,03	-0,1	0,07	0,45	0,19
Differenz absolut	0,08	0,05	0,08	0,06	0,07	0,02	0,11	0,09	0,16	0,12	0,21	0,07	0,21	0,06	0,01	0,01	0,13	0	0,23	0,15	0,07

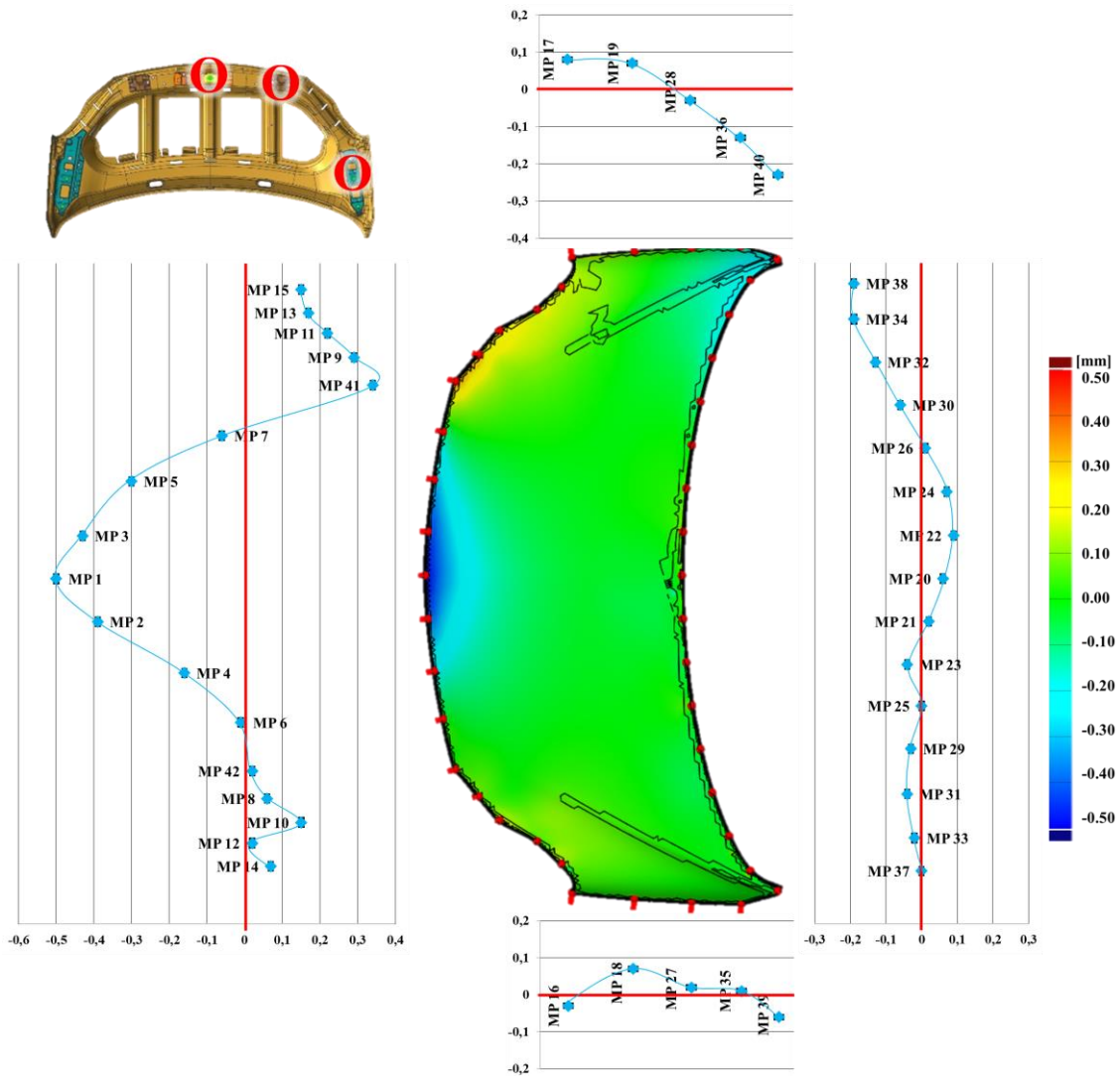


Abb. 9-19: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 24.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,12	0,42	0,1	0,31	0,08	0,13	0,06	-0,1	0,01	-0,1	0	0	-0	-0
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	-0	0,08	0,01	-0,1	-0,1	-0	0	-0,1	0,07	0,08	0,12	0,03	0,1	0,09	0,03	-0,1	-0,1
Simulation Kombination6	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0,1	0	-0	0,12	0,08	0,07	0,04	0,05	0,07	-0	-0	0,01	0,04	0,06	0,02	0	0
Summe Kombinationen	-0,6	-0,4	-0,5	-0,1	-0,4	0,05	-0,1	0,13	0,43	0,15	0,35	0,04	0,27	0,13	0,04	0,05	0,09	0,15	0,05	-0,1	-0,1
Simulation Kombination24	-0,5	-0,4	-0,4	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,06	0,3	0,15	0,22	0,03	0,17	0,07	0,15	-0	0,08	0,05	0,07	0,06	0,02
Differenz absolut	0,08	0,05	0,08	0,03	0,05	0,06	0,01	0,07	0,13	0	0,13	0,01	0,1	0,06	0,11	0,09	0,01	0,1	0,02	0,18	0,16

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination3	-0	-0,1	-0	-0,1	0,01	-0	0,05	-0,1	0,02	-0	0,03	-0	0,05	0,04	0,1	0,03	0,11	0,05	0,09	0,41	0,07
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,06	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0	-0,3	0,05	-0,1	-0	-0,3	-0	-0,3	0,05	-0
Simulation Kombination6	0,02	-0	0,04	0	0,03	0,07	0	-0	0	-0	-0,1	0,02	-0,1	0,08	-0,1	0,05	-0,1	0,02	-0,2	0,14	0,07
Summe Kombinationen	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,12	0,01	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0	-0,3	0,17	-0,1	0,07	-0,2	0,06	-0,4	0,6	0,1
Simulation Kombination24	0,09	-0	0,08	0,01	0,01	0,02	-0	-0	-0,1	-0	-0,1	-0	-0,2	0,01	-0,1	0	-0,2	-0,1	-0,3	0,35	0,02
Differenz absolut	0,18	0,11	0,13	0,11	0,08	0,1	0,03	0,11	0,08	0,07	0,12	0,01	0,12	0,16	0,02	0,07	0,04	0,13	0,11	0,25	0,08

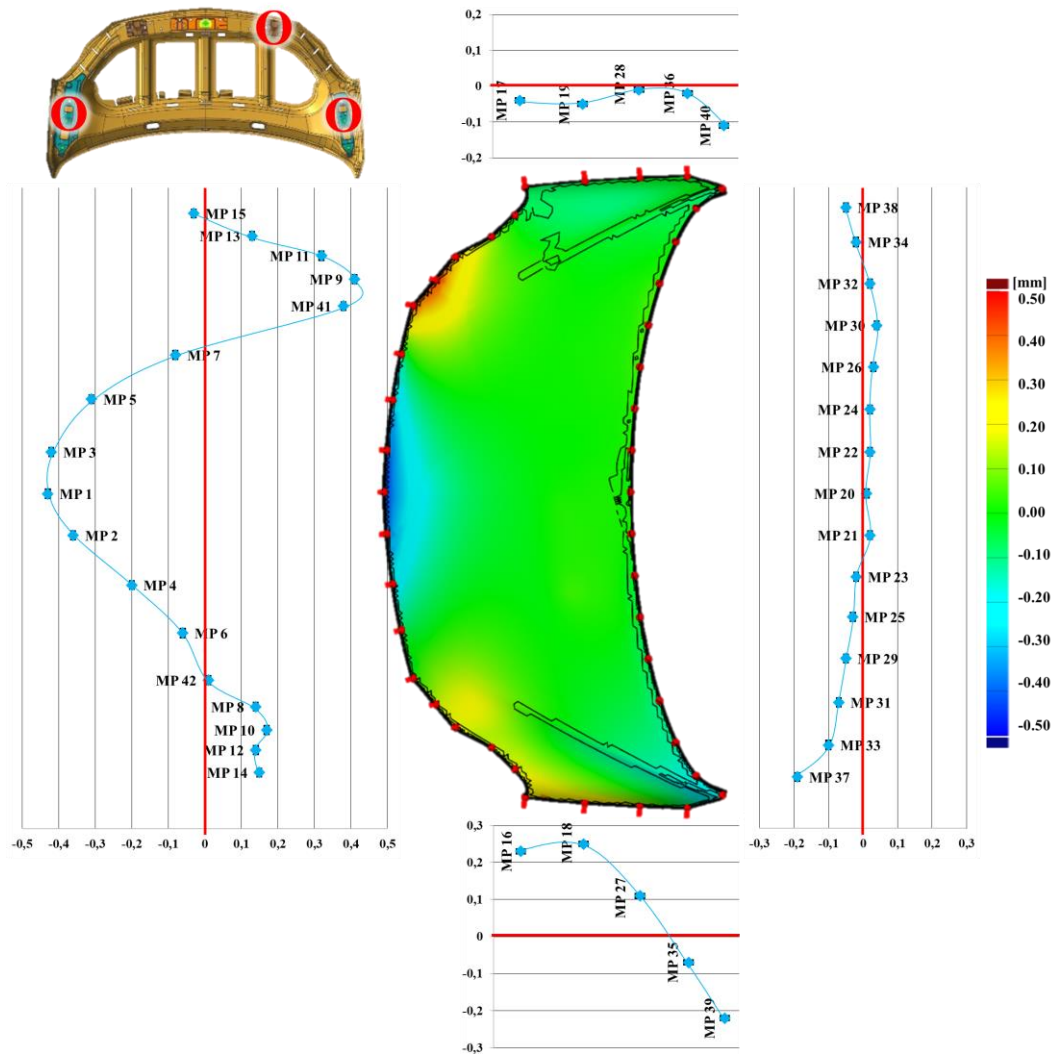


Abb. 9-20: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 26.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,12	0,42	0,1	0,31	0,08	0,13	0,06	-0,1	0,01	-0,1	0	0	-0	-0
Simulation Kombination5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0	0,01	0,15	0,06	0,14	-0	0,14	-0	0,12	-0,2	0,29	-0,2	0,33	-0,1	0	0,01
Simulation Kombination6	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0,1	0	-0	0,12	0,08	0,07	0,04	0,05	0,07	-0	-0	0,01	0,04	0,06	0,02	0	0
Summe Kombinationen	-0,6	-0,5	-0,6	-0,3	-0,4	-0	-0,1	0,39	0,56	0,31	0,34	0,27	0,18	0,17	-0,2	0,31	-0,2	0,39	-0,1	-0	-0
Simulation Kombination26	-0,4	-0,4	-0,4	-0,2	-0,3	-0,1	-0,1	0,14	0,41	0,17	0,32	0,15	0,14	0,15	-0	0,23	-0	0,25	-0,1	0,01	0,02
Differenz absolut	0,12	0,13	0,14	0,04	0,05	0,02	0,01	0,25	0,15	0,14	0,02	0,12	0,04	0,02	0,19	0,08	0,17	0,14	0,01	0,04	0,04

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination3	-0	-0,1	-0	-0,1	0,01	-0	0,05	-0,1	0,02	-0	0,03	-0	0,05	0,04	0,1	0,03	0,11	0,05	0,09	0,41	0,07
Simulation Kombination5	0,01	-0	0,02	-0	0,03	0,19	-0,1	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0	0,05	0,02	-0,1	0,04	-0,2	0,03	0,14	0,09
Simulation Kombination6	0,02	-0	0,04	0	0,03	0,07	0	-0	0	-0	-0,1	0,02	-0,1	0,08	-0,1	0,05	-0,1	0,02	-0,2	0,14	0,07
Summe Kombinationen	0,01	-0,1	0,05	-0,1	0,07	0,25	-0	-0,2	0,03	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,17	0,03	-0	0,05	-0,1	-0,1	0,69	0,23
Simulation Kombination26	0,02	-0	0,03	-0	0,03	0,1	-0	-0,1	0,05	-0,1	0,02	-0,1	-0	-0,1	-0	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1	0,39	0,01
Differenz absolut	0,01	0,08	0,02	0,07	0,04	0,15	0	0,09	0,02	0,04	0,08	0,04	0,05	0,24	0,04	0,16	0,1	0,12	0,05	0,3	0,22

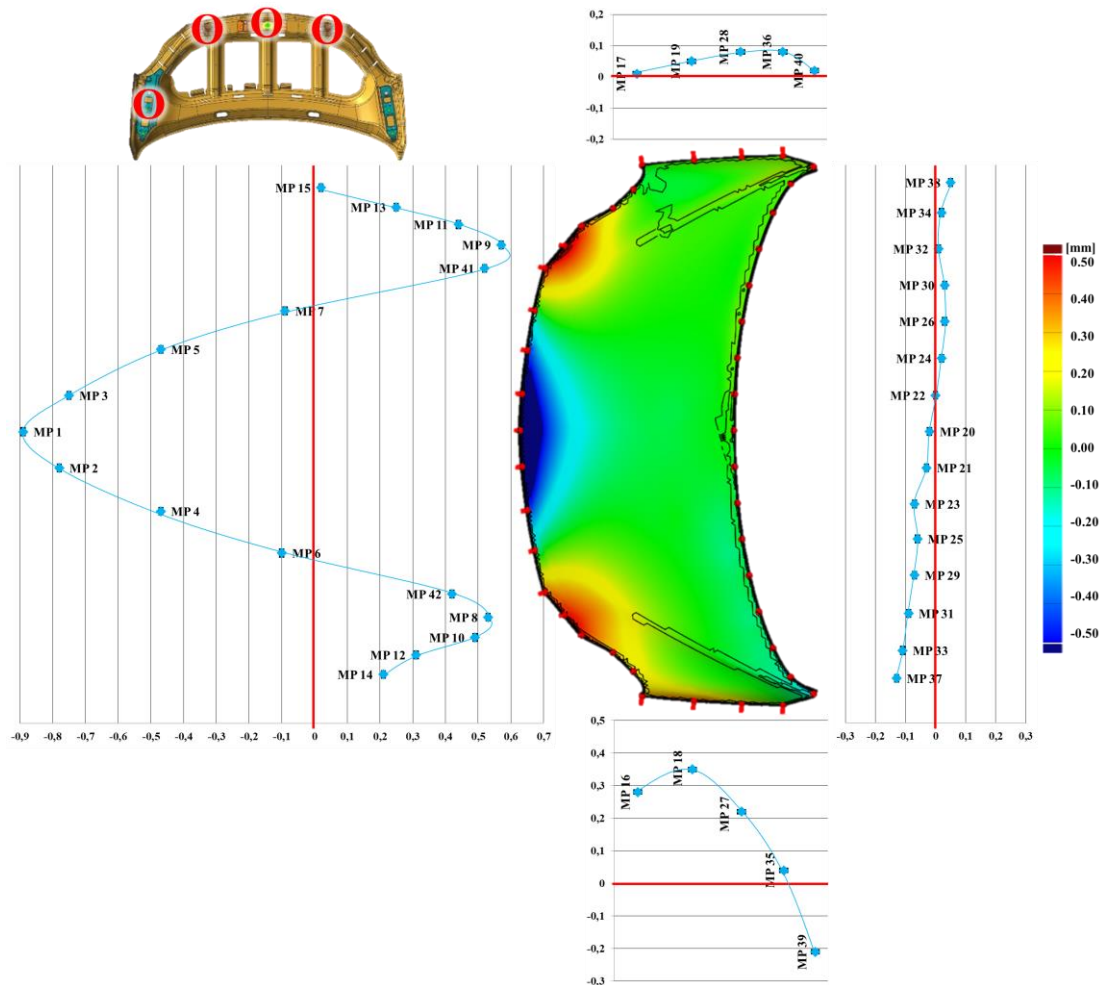


Abb. 9-21: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 27.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,36	0,07	0,39	0,04	0,18	0,09	0,11	0,14	-0	0,17	0,07	0,05	0,04	0,01
Simulation Kombination3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,12	0,42	0,1	0,31	0,08	0,13	0,06	-0,1	0,01	-0,1	0	0	-0	-0
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	-0	0,08	0,01	-0,1	-0,1	-0	0	-0,1	0,07	0,08	0,12	0,03	0,1	0,09	0,03	-0,1	-0,1
Simulation Kombination5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0	0,01	0,15	0,06	0,14	-0	0,14	-0	0,12	-0,2	0,29	-0,2	0,33	-0,1	0	0,01
Summe Kombinationen	-1	-0,8	-0,8	-0,4	-0,5	-0	-0,1	0,52	0,48	0,61	0,34	0,31	0,27	0,37	0,05	0,32	0,02	0,49	0,01	-0,1	-0,1
Simulation Kombination27	-0,9	-0,8	-0,8	-0,5	-0,5	-0,1	-0,1	0,54	0,57	0,49	0,45	0,32	0,26	0,21	0,01	0,28	0,01	0,35	0,05	-0	-0
Differenz absolut	0,07	0,06	0,09	0,03	0,03	0,08	0	0,02	0,09	0,12	0,11	0,01	0,01	0,16	0,04	0,04	0,01	0,14	0,04	0,06	0,09

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination2	0,07	-0	0,05	-0	-0	0,07	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0	-0,2	0,08	-0,1	0,01	-0,2	-0,1	-0,2	0,1	0,25
Simulation Kombination3	-0	-0,1	-0	-0,1	0,01	-0	0,05	-0,1	0,02	-0	0,03	-0	0,05	0,04	0,1	0,03	0,11	0,05	0,09	0,41	0,07
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,06	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0	-0,3	0,05	-0,1	-0	-0,3	-0	-0,3	0,05	-0
Simulation Kombination5	0,01	-0	0,02	-0	0,03	0,19	-0,1	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0	0,05	0,02	-0,1	0,04	-0,2	0,03	0,14	0,09
Summe Kombinationen	-0	-0,2	-0	-0,2	-0,1	0,31	-0,1	-0,2	-0,3	-0,2	-0,4	-0,2	-0,4	0,22	-0,1	-0,1	-0,3	-0,2	-0,4	0,7	0,37
Simulation Kombination27	0	-0,1	0,02	-0,1	0,02	0,22	0,08	-0,1	0,03	-0,1	0,01	-0,1	0,02	0,06	0,08	-0,1	0,05	-0,2	0,04	0,53	0,42
Differenz absolut	0,03	0,12	0,04	0,11	0,12	0,09	0,15	0,16	0,29	0,13	0,42	0,06	0,44	0,16	0,18	0,05	0,32	0	0,4	0,17	0,05

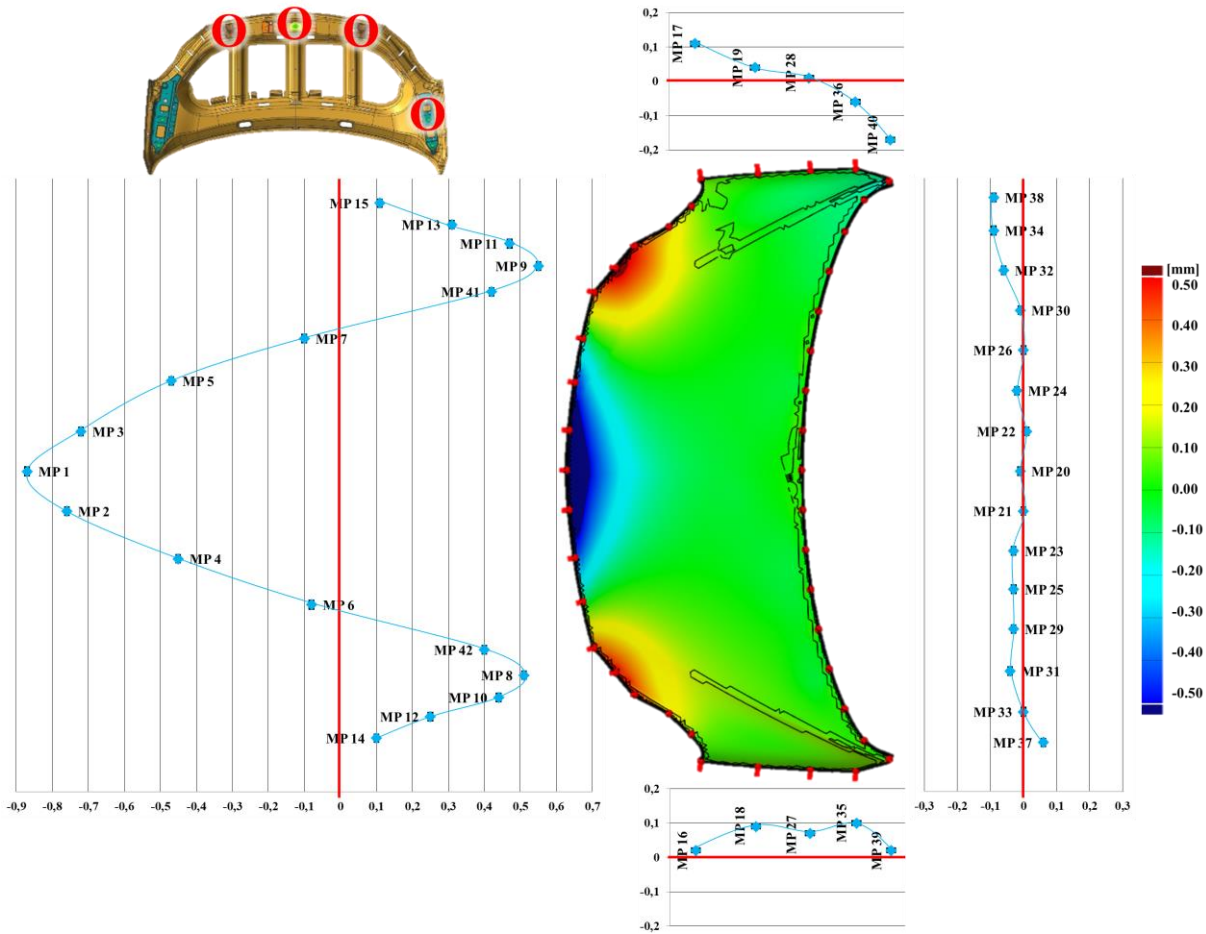


Abb. 9-22: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 28.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,36	0,07	0,39	0,04	0,18	0,09	0,11	0,14	-0	0,17	0,07	0,05	0,04	0,01
Simulation Kombination3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,12	0,42	0,1	0,31	0,08	0,13	0,06	-0,1	0,01	-0,1	0	0	-0	-0
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	-0	0,08	0,01	-0,1	-0,1	-0	0	-0,1	0,07	0,08	0,12	0,03	0,1	0,09	0,03	-0,1	-0,1
Simulation Kombination6	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0,1	0	-0	0,12	0,08	0,07	0,04	0,05	0,07	-0	-0	0,01	0,04	0,06	0,02	0	0
Summe Kombinationen	-1	-0,8	-0,8	-0,4	-0,5	-0	-0,1	0,49	0,5	0,54	0,39	0,22	0,36	0,24	0,18	0,04	0,26	0,22	0,1	-0,1	-0,1
Simulation Kombination28	-0,9	-0,8	-0,7	-0,5	-0,5	-0,1	-0,1	0,51	0,55	0,45	0,48	0,26	0,32	0,1	0,1	0,02	0,11	0,08	0,04	-0	0
Differenz absolut	0,1	0,07	0,12	0,03	0,07	0,07	0,03	0,02	0,05	0,09	0,09	0,04	0,04	0,14	0,08	0,02	0,15	0,14	0,06	0,07	0,13

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination2	0,07	-0	0,05	-0	-0	0,07	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0	-0,2	0,08	-0,1	0,01	-0,2	-0,1	-0,2	0,1	0,25
Simulation Kombination3	-0	-0,1	-0	-0,1	0,01	-0	0,05	-0,1	0,02	-0	0,03	-0	0,05	0,04	0,1	0,03	0,11	0,05	0,09	0,41	0,07
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,06	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0	-0,3	0,05	-0,1	-0	-0,3	-0	-0,3	0,05	-0
Simulation Kombination6	0,02	-0	0,04	0	0,03	0,07	0	-0	0	-0	-0,1	0,02	-0,1	0,08	-0,1	0,05	-0,1	0,02	-0,2	0,14	0,07
Summe Kombinationen	-0	-0,2	0	-0,1	-0,1	0,19	-0	-0,2	-0,3	-0,2	-0,5	-0,1	-0,5	0,25	-0,2	0,08	-0,4	0	-0,6	0,7	0,35
Simulation Kombination28	0,01	-0	-0	-0	0	0,07	0,02	-0	-0	-0,1	-0,1	0	-0,1	0,1	-0,1	0,07	-0,1	0,04	-0,2	0,43	0,4
Differenz absolut	0,03	0,16	0,01	0,1	0,1	0,12	0,03	0,18	0,26	0,14	0,4	0,07	0,43	0,15	0,15	0,01	0,31	0,04	0,4	0,27	0,05

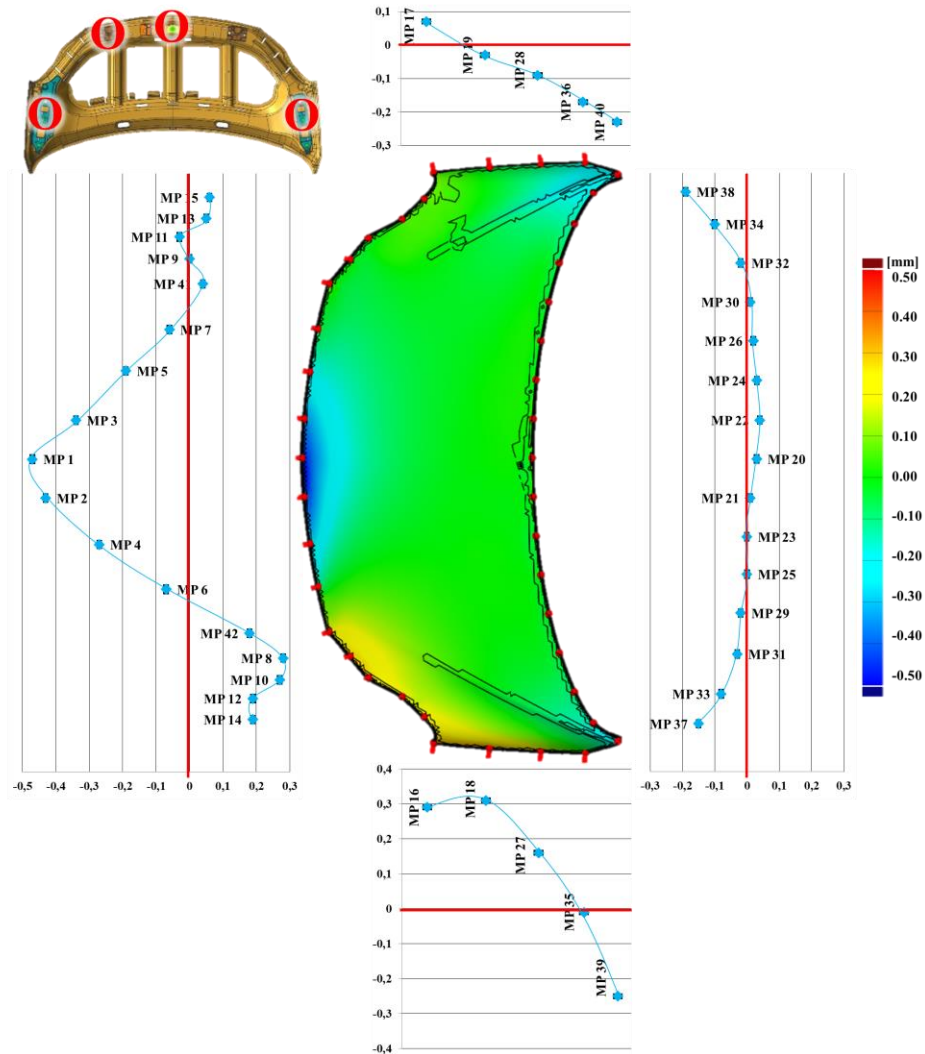


Abb. 9-23: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 30.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,36	0,07	0,39	0,04	0,18	0,09	0,11	0,14	-0	0,17	0,07	0,05	0,04	0,01
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	-0	0,08	0,01	-0,1	-0,1	-0	0	-0,1	0,07	0,08	0,12	0,03	0,1	0,09	0,03	-0,1	-0,1
Simulation Kombination5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0	0,01	0,15	0,06	0,14	-0	0,14	-0	0,12	-0,2	0,29	-0,2	0,33	-0,1	0	0,01
Simulation Kombination6	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0,1	0	-0	0,12	0,08	0,07	0,04	0,05	0,07	-0	-0	0,01	0,04	0,06	0,02	0	0
Summe Kombinationen	-0,7	-0,6	-0,6	-0,3	-0,3	-0	-0,1	0,52	0,14	0,58	0,07	0,28	0,21	0,3	0,09	0,32	0,11	0,55	0,03	-0,1	-0,1
Simulation Kombination30	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,28	-0	0,27	-0	0,19	0,05	0,19	0,06	0,29	0,06	0,31	-0	0,03	0,01
Differenz absolut	0,24	0,2	0,24	0,06	0,14	0,07	0,02	0,24	0,15	0,31	0,1	0,09	0,16	0,11	0,03	0,03	0,05	0,24	0,07	0,08	0,1

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination2	0,07	-0	0,05	-0	-0	0,07	-0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0	-0,2	0,08	-0,1	0,01	-0,2	-0,1	-0,2	0,1	0,25
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,06	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0	-0,3	0,05	-0,1	-0	-0,3	-0	-0,3	0,05	-0
Simulation Kombination5	0,01	-0	0,02	-0	0,03	0,19	-0,1	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0	0,05	0,02	-0,1	0,04	-0,2	0,03	0,14	0,09
Simulation Kombination6	0,02	-0	0,04	0	0,03	0,07	0	-0	0	-0	-0,1	0,02	-0,1	0,08	-0,1	0,05	-0,1	0,02	-0,2	0,14	0,07
Summe Kombinationen	0,01	-0,2	0,03	-0,1	-0,1	0,39	-0,1	-0,2	-0,3	-0,2	-0,5	-0,1	-0,6	0,26	-0,3	-0,1	-0,5	-0,2	-0,6	0,43	0,37
Simulation Kombination30	0,04	0	0,03	0,01	0,02	0,16	-0,1	-0	0,01	-0	-0	-0,1	-0,1	0	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	0,05	0,17
Differenz absolut	0,03	0,16	0	0,13	0,1	0,23	0,03	0,2	0,29	0,18	0,49	0,05	0,48	0,26	0,12	0,09	0,28	0,03	0,37	0,38	0,2

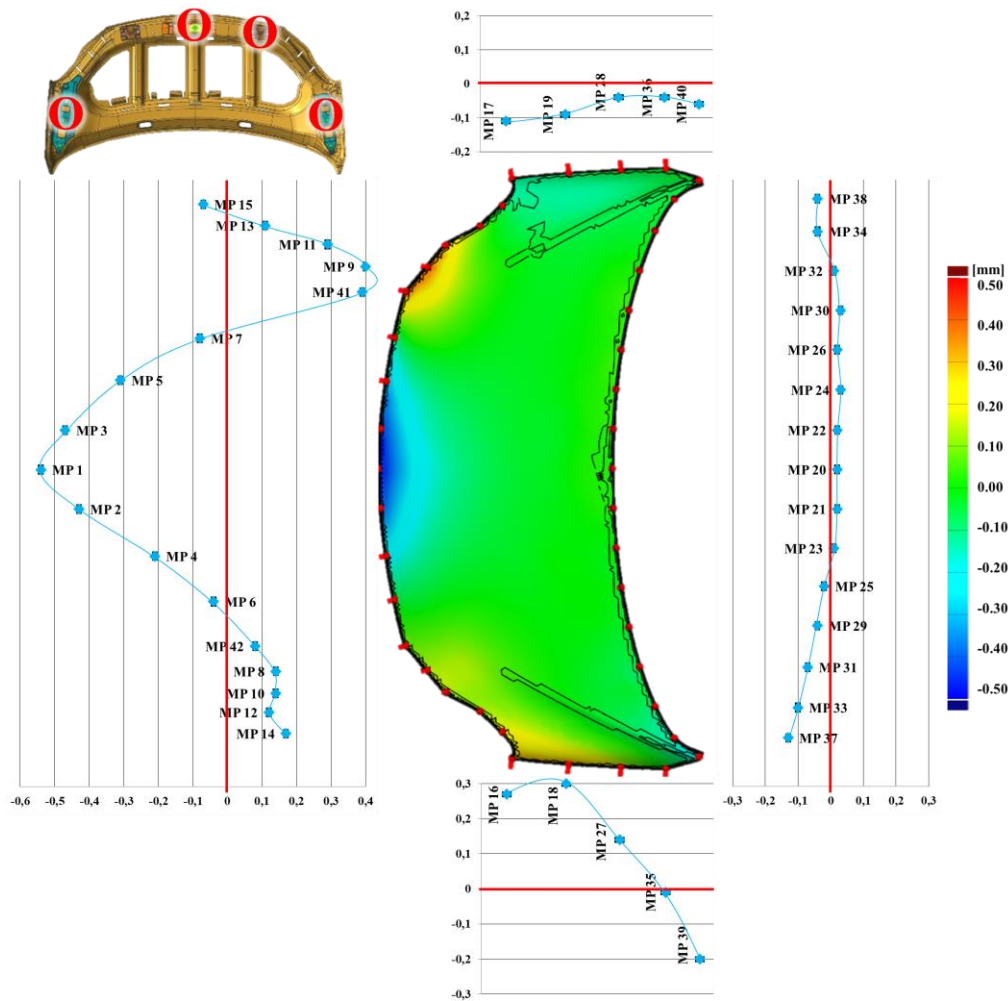


Abb. 9-24: Auswertung der ZSB-Rückfederungsergebnisse der PKS der untersuchten Kombination 31.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7	MP 8	MP 9	MP 10	MP 11	MP 12	MP 13	MP 14	MP 15	MP 16	MP 17	MP 18	MP 19	MP 20	MP 21
Simulation Kombination3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,2	-0,3	-0	-0,1	0,12	0,42	0,1	0,31	0,08	0,13	0,06	-0,1	0,01	-0,1	0	0	-0	-0
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	-0	0,08	0,01	-0,1	-0,1	-0	0	-0,1	0,07	0,08	0,12	0,03	0,1	0,09	0,03	-0,1	-0,1
Simulation Kombination5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0	0,01	0,15	0,06	0,14	-0	0,14	-0	0,12	-0,2	0,29	-0,2	0,33	-0,1	0	0,01
Simulation Kombination6	-0,1	-0,1	-0,1	-0	-0,1	0	-0	0,12	0,08	0,07	0,04	0,05	0,07	-0	-0	0,01	0,04	0,06	0,02	0	0
Summe Kombinationen	-0,7	-0,5	-0,6	-0,2	-0,4	0,04	-0,1	0,28	0,49	0,29	0,34	0,18	0,25	0,25	-0,1	0,34	-0,1	0,48	-0	-0,1	-0,1
Simulation Kombination31	-0,6	-0,4	-0,5	-0,2	-0,3	-0,1	-0,1	0,14	0,4	0,14	0,3	0,13	0,11	0,18	-0,1	0,27	-0,1	0,3	-0,1	0,02	0,02
Differenz absolut	0,13	0,11	0,14	0,01	0,07	0,09	0,02	0,14	0,09	0,15	0,04	0,05	0,14	0,07	0,03	0,07	0	0,18	0,08	0,14	0,15

	MP 22	MP 23	MP 24	MP 25	MP 26	MP 27	MP 28	MP 29	MP 30	MP 31	MP 32	MP 33	MP 34	MP 35	MP 36	MP 37	MP 38	MP 39	MP 40	MP 41	MP 42
Simulation Kombination3	-0	-0,1	-0	-0,1	0,01	-0	0,05	-0,1	0,02	-0	0,03	-0	0,05	0,04	0,1	0,03	0,11	0,05	0,09	0,41	0,07
Simulation Kombination4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,06	-0	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0	-0,3	0,05	-0,1	-0	-0,3	-0	-0,3	0,05	-0
Simulation Kombination5	0,01	-0	0,02	-0	0,03	0,19	-0,1	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0,1	-0	0,05	0,02	-0,1	0,04	-0,2	0,03	0,14	0,09
Simulation Kombination6	0,02	-0	0,04	0	0,03	0,07	0	-0	0	-0	-0,1	0,02	-0,1	0,08	-0,1	0,05	-0,1	0,02	-0,2	0,14	0,07
Summe Kombinationen	-0,1	-0,2	-0	-0,1	-0	0,31	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1	-0,3	0,22	-0,1	-0	-0,2	-0,1	-0,3	0,74	0,19
Simulation Kombination31	0,02	0,01	0,03	-0	0,02	0,14	-0	-0	0,04	-0,1	0,01	-0,1	-0	-0	-0	-0,1	-0	-0,2	-0,1	0,39	0,08
Differenz absolut	0,1	0,18	0,06	0,12	0,06	0,17	0,01	0,15	0,17	0,1	0,28	0,01	0,29	0,23	0,06	0,09	0,16	0,08	0,28	0,35	0,11

9.3 Varianten zur Absicherung der Analyse definierter Bauteilabweichungen der Verstärkungsteile mittels realer Bauteilversuche

Die folgenden Auswertungen ergänzen die Ausführungen von Kapitel 6.2.

Variante 6: Einfluss der deformierten Schlossverstärkung, der beiden rechten Pufferverstärkung und Scharnierverstärkung. Vergleich zur simulierten Kombination 24.

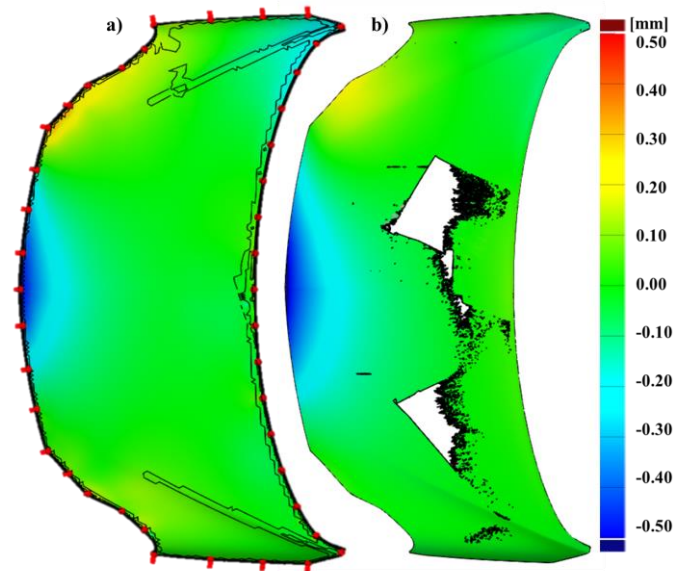


Abb. 9-25: Gegenüberstellung der rückfederungsbedingten Maßabweichungen von den a) Simulationsergebnissen der Kombination 24 und b) der gescannten Variante 6.

Variante 7: Einfluss der deformierten Schlossverstärkung und beider Scharnierverstärkungen. Vergleich zur simulierten Kombination 25.

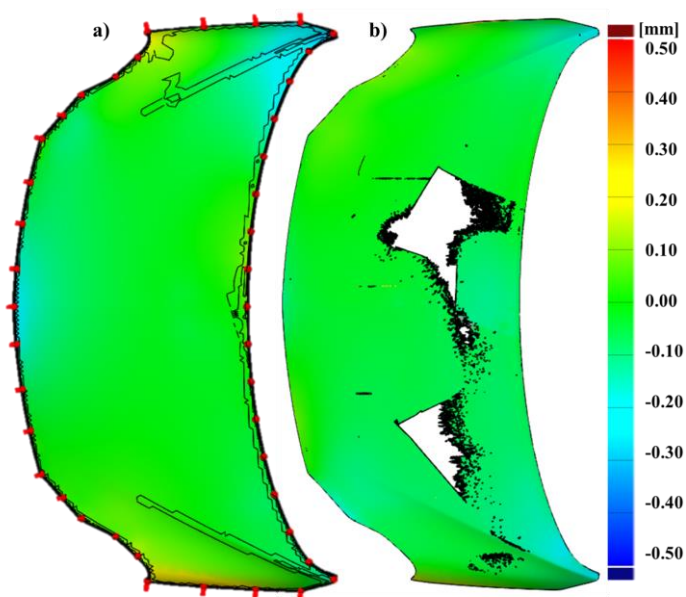


Abb. 9-26: Gegenüberstellung der rückfederungsbedingten Maßabweichungen von den a) Simulationsergebnissen der Kombination 25 und b) der gescannten Variante 7.

9.4 Rückfederungsergebnisse des Zusammenbaus nach Modifikation der Werkzeugwirkflächen

Die hier gezeigten Gegenüberstellungen wurden durch die Modifikation der Werkzeugwirkflächen der Ziehanlage des Innenteils nach Tabelle 7-1 erzeugt. Dabei wird die jeweilige PKS mit ausschließlich Schlechtteilen der Verstärkungsteile modelliert und die Rückfederung des ZSB berechnet. Die Ergebnisse der PKS werden anschließend dem Rückfederungsergebnis der bereits berechneten Kombination 32 mit ausschließlich Schlechtteilen und ohne modifizierte Wirkflächen (vgl. Abb. 5-17) verglichen. Auf diese Weise kann der direkte Einfluss der kompensierten Wirkflächen auf die Rückfederung des ZSB dargestellt werden. Die Rückfederungsergebnisse des ZSB werden für eine bessere Darstellung ohne die Außenhaut und die Verstärkungsteile gezeigt.

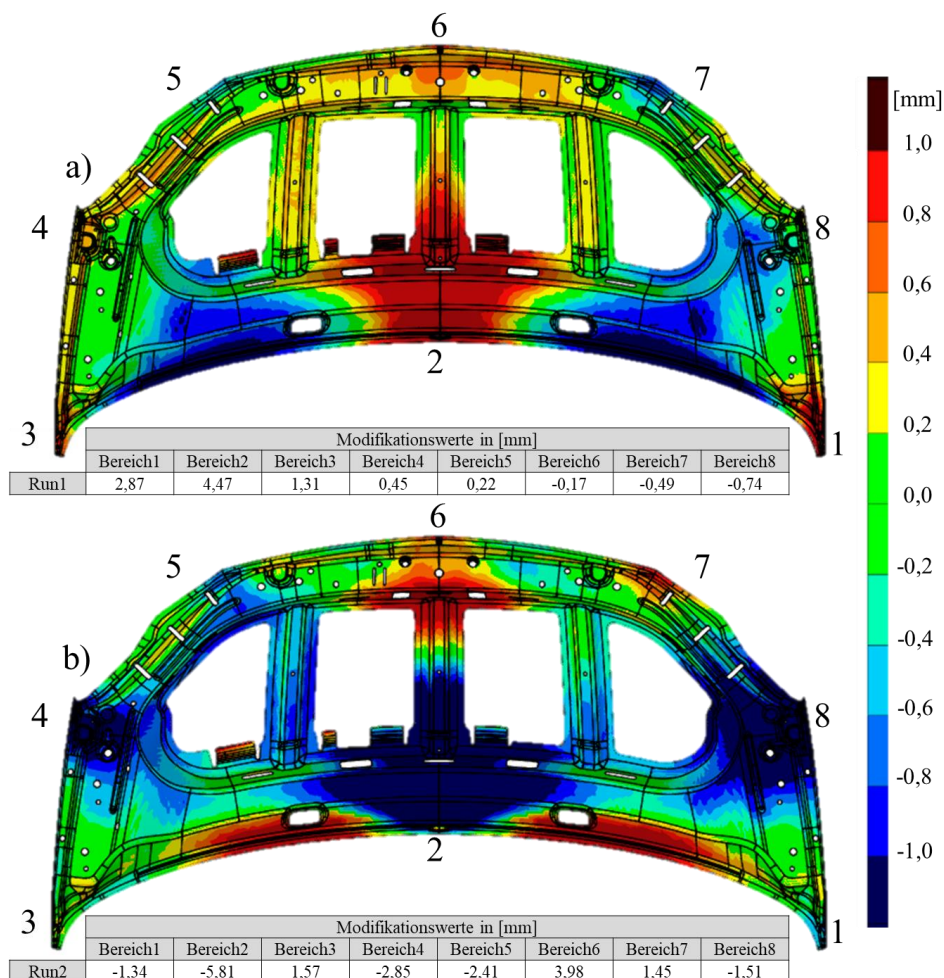


Abb. 9-27: Rückfederungsergebnisse a) Run1 und b) Run2 nach Modifikation der Werkzeugwirkflächen der Zieh-anlage des Innenteils.

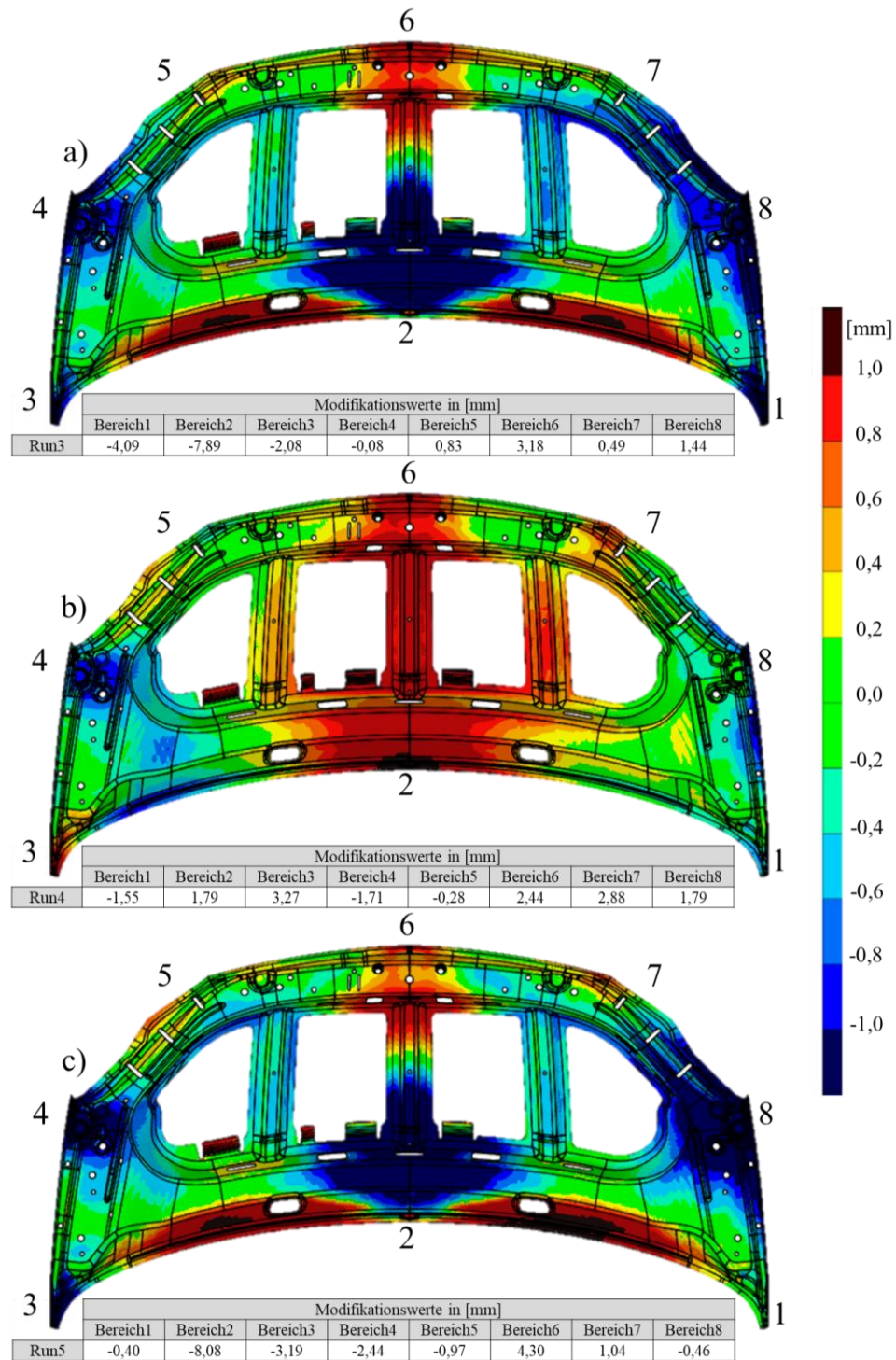


Abb. 9-28: Rückfederungsergebnisse a) Run3, b) Run4 und c) Run5 nach Modifikation der Werkzeugwirkflächen der Ziehanlage des Innenteils.

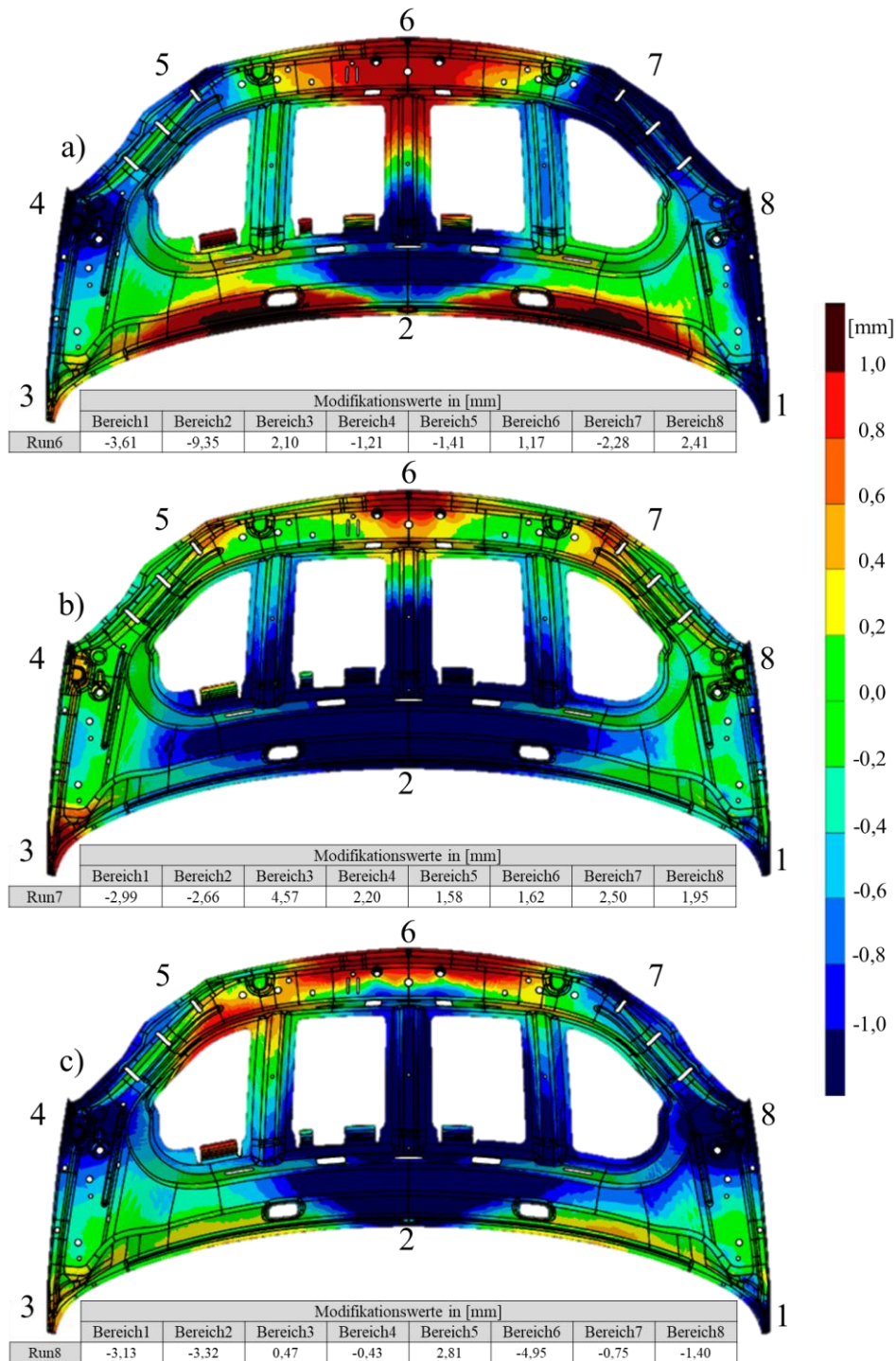


Abb. 9-29: Rückfederungsergebnisse a) Run6, b) Run7 und c) Run8 nach Modifikation der Werkzeugwirkflächen der Ziehanlage des Innenteils.

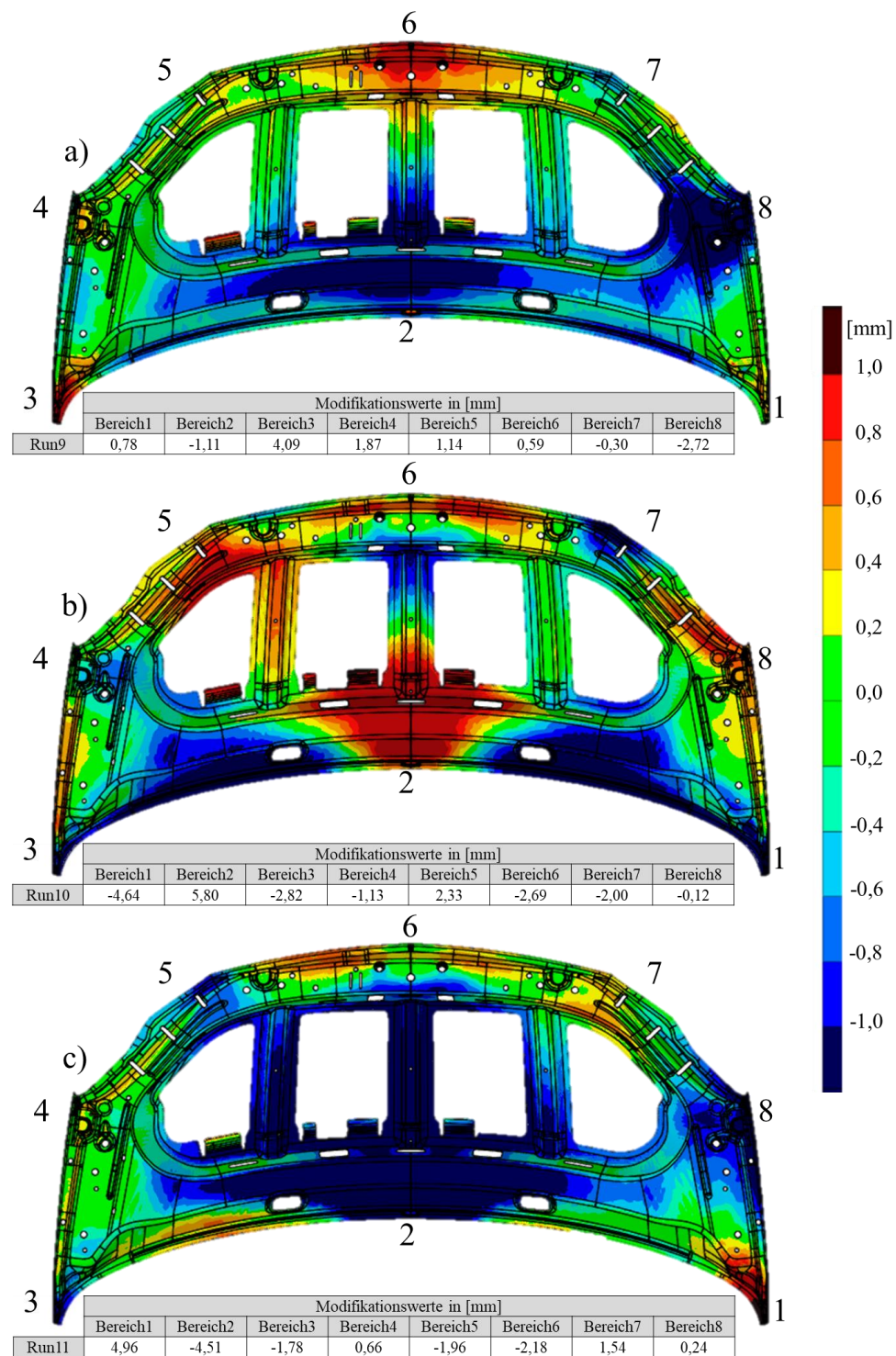


Abb. 9-30: Rückfederungsergebnisse a) Run9, b) Run10 und c) Run11 nach Modifikation der Werkzeugwirkflächen der Ziehanlage des Innenteils.

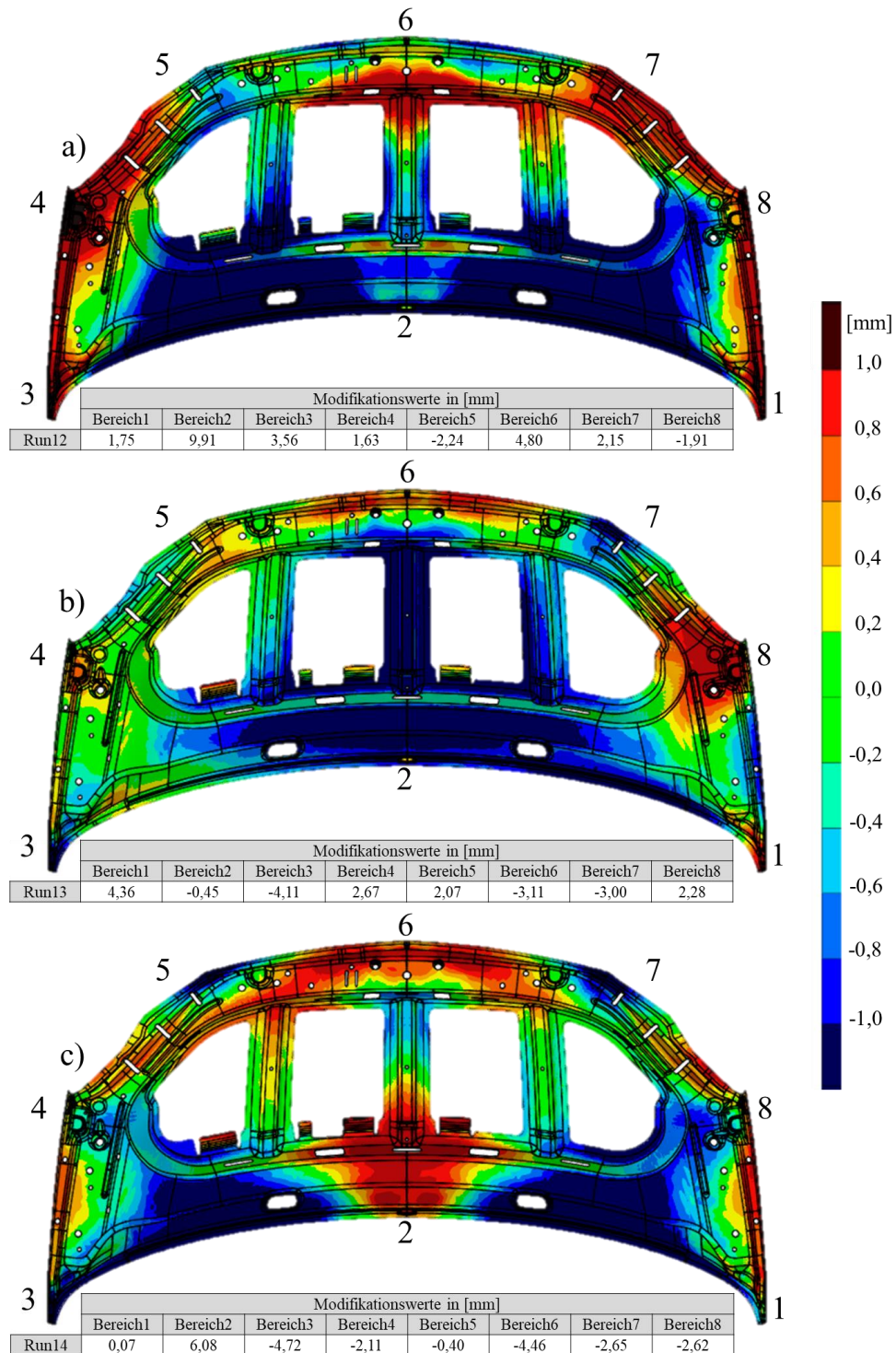


Abb. 9-31: Rückfederungsergebnisse a) Run12, b) Run13 und c) Run14 nach Modifikation der Werkzeugwirkflächen der Ziehanlage des Innenteils.

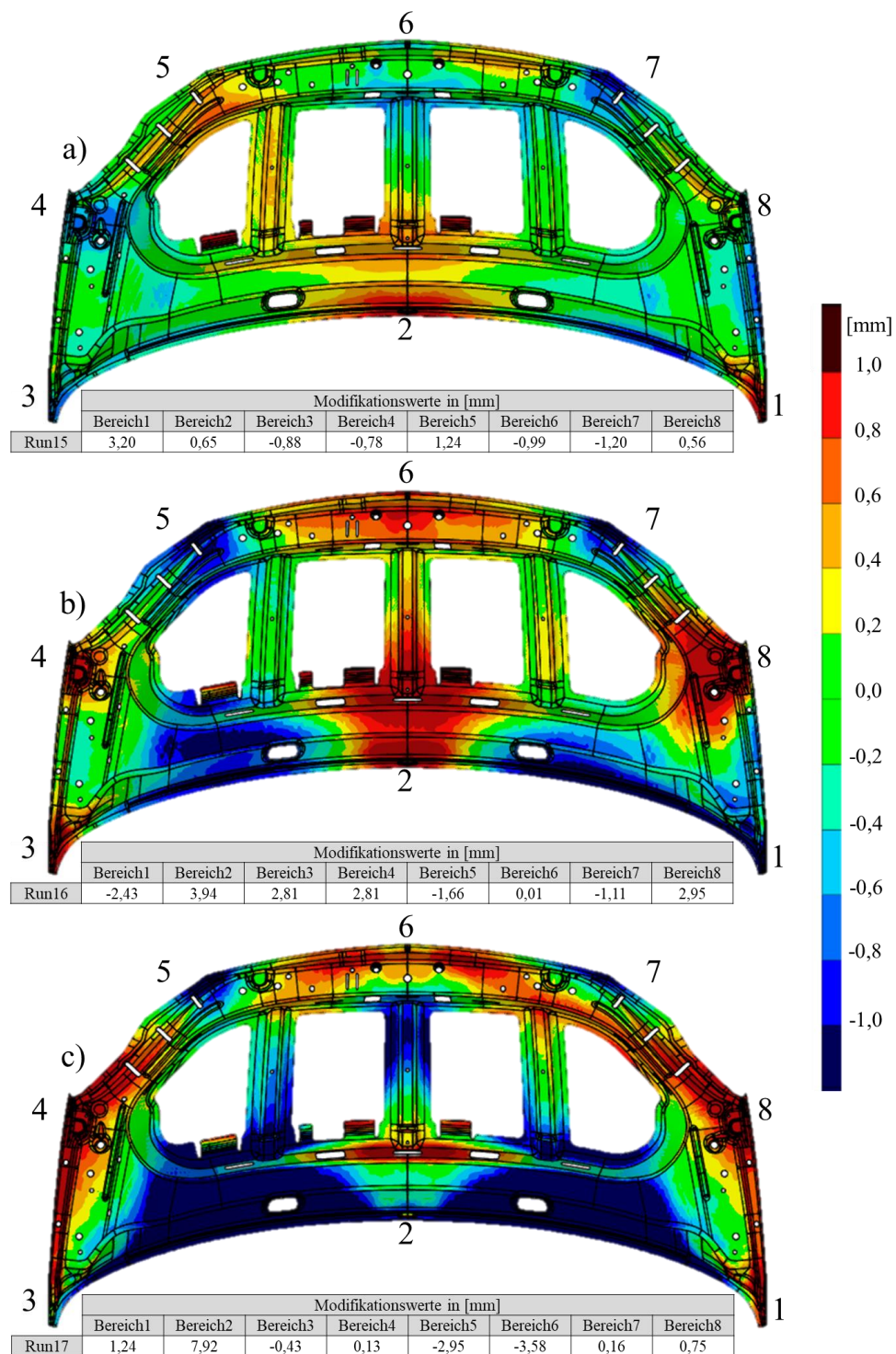


Abb. 9-32: Rückfederungsergebnisse a) Run15, b) Run16 und c) Run17 nach Modifikation der Werkzeugwirkflächen der Ziehanlage des Innenteils.

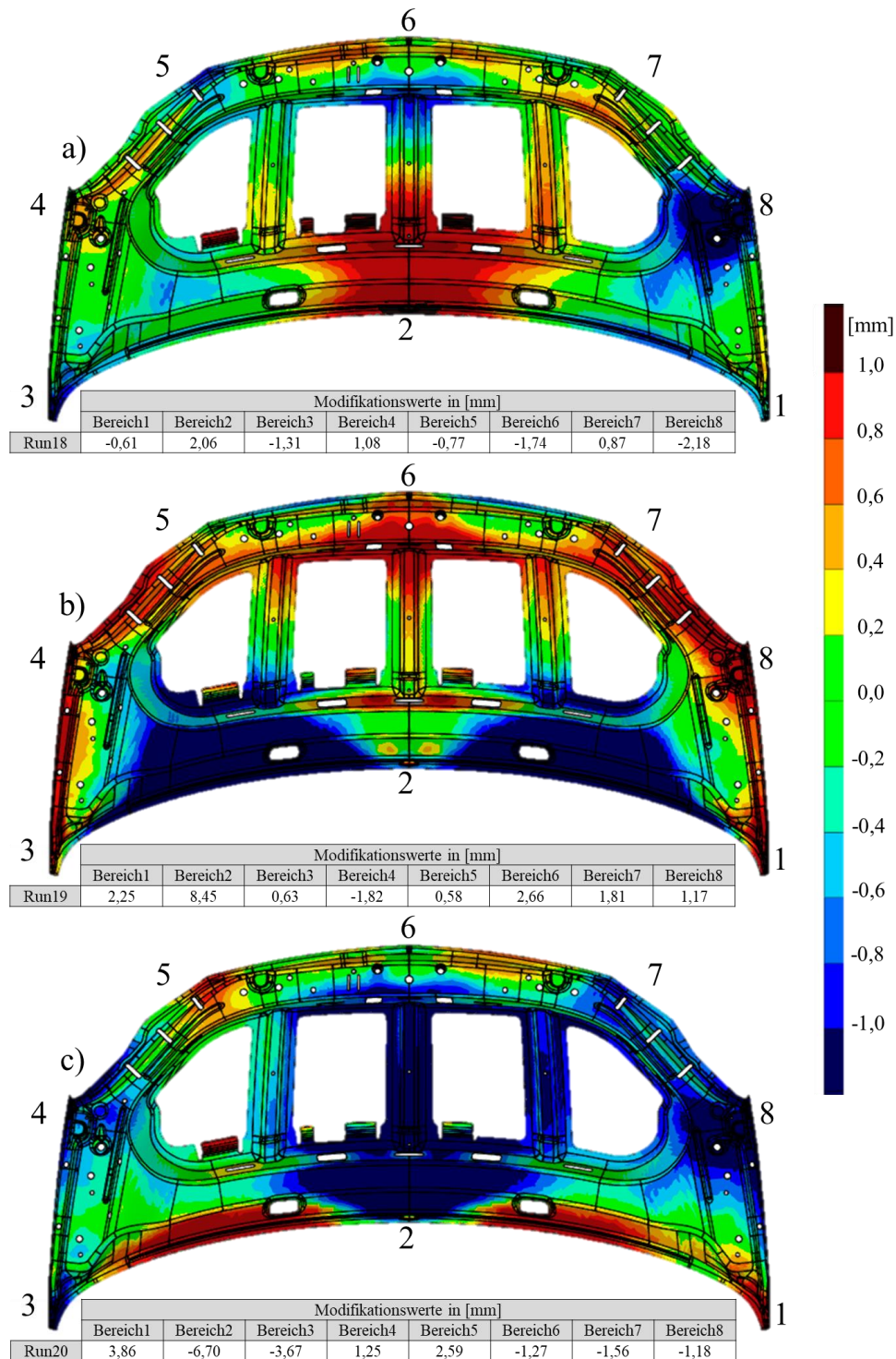


Abb. 9-33: Rückfederungsergebnisse a) Run18, b) Run19 und c) Run20 nach Modifikation der Werkzeugwirkflächen der Ziehanlage des Innenteils.

9.5 Tabelle zur Auswertung der Prozesskettensimulationen mit modifizierten Werkzeugwirkflächen

Dargestellt sind alle gemessenen Werte der Rückfederung in den festgelegten Messpunkten 1-42 (vgl. Abb. 5-2) in mm über die insgesamt 20 durchgeführten PKS (Verweis in Kapitel 7.2).

MP	Run1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6	Run7	Run8	Run9	Run10	Run11	Run12	Run13	Run14	Run15	Run16	Run17	Run18	Run19	Run20	Run21
1	0,78	0,79	1,53	1,54	1,05	2,05	1,63	1,27	1,5	0,12	0	0,15	0,33	0,41	-0,2	1,14	0,25	0,05	0,63	-0,03	0,66
2	0,22	0,19	0,67	0,65	0,39	1,29	0,68	1,49	0,65	0,32	0,5	-0,42	0,69	0,83	-0,12	0,68	0,63	0,45	-0,21	0,15	0,21
3	0,41	0,01	0,68	0,44	0,27	1,35	0,62	1,72	0,76	0,63	0,43	-0,72	0,89	0,91	0,21	0,69	0,72	0,35	-0,36	0,48	0,29
4	0,15	-0,22	0,08	0,18	-0,1	0,52	0,27	0,95	0,29	-0,08	0,14	-0,64	0,38	0,47	-0,08	0,64	0,38	0,54	-0,61	0,15	0,21
5	0,33	-0,22	0,27	0,03	-0,02	0,8	0,16	1,31	0,33	0,57	0,29	-0,86	0,83	0,61	0,46	0,5	0,37	0,14	-0,63	0,74	0,26
6	-0,11	0,23	0,18	0,1	0,38	0,17	0,24	-0,09	0,06	-0,51	0,41	-0,01	-0,12	-0,54	-0,15	0,29	-0,11	0,14	-0,49	0,13	-0,02
7	-0,06	0,17	0,32	0,05	0,38	0,36	0,06	0,22	-0,08	-0,11	-0,01	-0,38	0,31	-0,3	0,2	0,02	-0,56	-0,22	-0,52	0,47	-0,08
8	-0,2	-0,11	-0,02	0,2	0,47	-0,7	0,09	-0,48	-0,19	0,28	-0,48	0,3	-0,04	-0,54	0,04	-0,84	-0,62	-0,37	0,54	0,29	-0,03
9	-0,11	0,47	-0,35	0,22	0,11	-1,46	0,26	-0,9	0,05	-0,77	0,01	1,26	-0,65	-0,71	-0,47	-0,7	-0,5	0,13	0,53	-0,55	-0,26
10	0,04	0,06	-0,25	0,49	0,68	-0,6	-0,13	-0,79	-0,34	0,36	-0,42	0,87	-0,18	0,07	0,02	-0,64	-0,01	-0,19	1,12	-0,1	0,31
11	0,26	0,1	-0,73	0,12	-0,34	-1,64	0,11	-0,79	0,44	-0,31	-0,17	1,62	-0,3	-0,18	-0,27	-0,37	0,09	0,25	0,93	-0,6	0
12	0,2	0,09	-0,66	0,3	0,13	-0,65	-0,33	-0,99	-0,4	0,21	-0,26	1,38	-0,55	0,5	-0,13	-0,32	0,96	-0,12	1,25	-0,95	0,01
13	0,28	-0,8	-1,35	-0,53	-1,18	-1,85	-0,49	-0,82	0,08	0,38	-0,64	1,52	0,33	0,79	-0,15	0,02	0,79	-0,05	1,02	-0,74	-0,26
14	0,32	-0,28	-1,07	-0,02	-0,52	-0,85	-0,27	-1,27	-0,25	0,11	-0,01	1,83	-0,27	0,7	-0,25	0,22	1,64	0,11	1,2	-1,23	0
15	0,33	-1,51	-1,65	-0,76	-1,86	-1,83	-0,63	-0,92	-0,32	0,92	-1,04	1,29	0,91	1,2	0,05	0,65	1,33	-0,34	1,18	-0,9	-0,35
16	0,27	-0,69	-0,95	-0,24	-0,94	-0,87	-0,07	-0,89	-0,25	0,25	-0,1	1,7	0,2	0,38	-0,2	0,52	1,54	-0,11	1,19	-1,01	-0,1
17	0,53	-0,99	-1,56	-0,65	-1,38	-1,81	-0,65	-0,95	-0,25	0,71	-0,89	1,62	0,01	0,87	-0,2	0,32	1,21	-0,19	1,11	-0,81	-0,52
18	0,59	-0,25	-0,53	-0,02	-0,37	-0,59	0,3	-0,41	-0,01	0,62	0,14	1,83	0,43	0,76	0,02	0,82	1,52	0,1	1,52	-0,56	0,11
19	0,53	-0,37	-1,12	-0,46	-0,88	-1,49	-0,48	-0,38	0,23	0,65	-0,66	1,84	-0,21	1,19	-0,25	0,01	1,2	0,26	1,12	-0,63	-0,29
20	1,77	-0,67	-0,33	2,34	0,23	0,21	-2,61	-1,57	-0,68	0,65	-2,08	-1,11	-0,99	0,63	1,12	1,27	-0,96	2,19	-0,59	-0,73	0,57
21	0,94	0,17	0,51	1,5	0,79	1,14	-1,74	-0,77	-0,25	0,12	-1,19	-1,6	-0,71	-0,03	0,79	0,48	-1,51	1,33	-1,19	-0,13	0,46
22	0,89	0,09	0,35	1,45	0,96	0,8	-1,81	-0,71	-0,15	0,05	-1,24	-1,74	-0,78	-0,1	0,77	0,37	-1,55	1,35	-1,03	0,09	0,42
23	-0,32	1,32	1,7	0,7	1,76	2,45	-0,88	0,21	-0,22	-1,16	0,03	-2,87	-0,67	-1,37	0,36	-0,61	-2,79	0,52	-2,64	1,11	0,23
24	-0,47	1,35	1,46	0,76	2,19	1,91	-0,96	0,18	-0,14	-1,18	0,11	-3,24	-0,93	-1,46	0,28	-0,83	-2,89	0,49	-2,41	1,47	0,11
25	-0,97	1,26	1,89	0,1	1,73	2,45	-0,55	0,33	-0,31	-1,67	0,4	3,49	-0,47	-1,9	0,01	-0,96	-3,26	0,11	-3,33	1,39	-0,08
26	-1,24	1,51	1,73	0,29	2,32	2,02	-0,62	0,3	-0,41	-1,73	0,29	4,03	-1,11	-2,2	-0,23	-1,27	-3,45	-0,1	-3,12	1,51	-0,24
27	0,57	-0,29	-0,27	-0,05	-0,26	-0,61	0,55	-0,09	0,08	0,89	0,21	1,71	0,56	0,76	0,18	0,84	1,56	0,15	1,7	-0,26	0,2
28	0,59	-0,05	-0,83	-0,19	-0,6	-1,31	-0,19	0,01	0,26	0,62	-0,21	1,99	-0,28	1,23	-0,23	-0,06	1,4	0,43	1,31	-0,52	-0,06
29	-1,26	0,78	1,63	-0,44	1,25	1,98	-0,45	0,32	-0,48	-1,77	0,5	-3,51	-0,18	-1,98	-0,23	-1,01	-3,19	-0,13	-3,43	1,4	-0,31
30	-1,63	1,21	1,38	-0,05	1,89	1,59	-0,32	0,32	-0,74	-1,84	0,07	4,13	-1,27	-2,48	-0,59	-1,36	-3,42	-0,52	-3,17	1,18	-0,55
31	-1,17	0,07	1,08	-0,72	0,79	1,02	-0,4	0,15	-0,59	-1,48	0,28	-2,75	0,14	-1,58	-0,25	-0,81	-2,41	-0,24	-2,81	1,09	-0,36
32	-1,53	0,61	0,99	-0,17	1,06	1,11	-0,26	0,11	-0,79	-1,59	-0,19	-3,25	-1,33	-2,31	-0,81	-1,24	-2,65	-0,66	-2,48	0,42	-0,6
33	-0,84	-0,37	0,26	-0,7	0,02	0,18	-0,29	-0,01	-0,47	-1,01	-0,11	-1,52	0,2	-1,13	-0,4	-0,48	-1,56	-0,46	-1,63	0,48	-0,24
34	-0,89	0,11	0,3	-0,26	0,32	0,33	-0,27	-0,13	-0,66	-1,28	0,02	-1,75	-1,07	-1,63	-0,59	-1,11	-1,55	-0,62	-1,4	0,08	-0,36
35	0,63	-0,42	-0,13	0	-0,14	-0,73	0,49	0,15	0,01	1,43	0,32	1,83	1	1,18	0,36	0,83	1,81	0,27	2,02	0,08	0,43
36	0,91	0,2	-0,47	0,37	-0,43	-0,94	0,44	0,45	0,33	0,9	0,32	2,3	-0,17	1,42	0,06	0,42	1,87	0,69	1,77	-0,27	0,35
37	-0,03	-0,13	-0,64	0,35	-1,07	0,33	1,13	0,24	0,81	-1,05	-0,65	0,49	-0,65	-1,43	-0,56	0,72	-0,78	-0,83	-0,32	-0,65	-0,08
38	0,57	-0,29	-0,97	-0,5	-0,05	-1,01	-0,89	-0,89	-0,21	-1,85	1,51	0,09	0,19	-0,87	0,53	-1,53	-0,1	-0,55	0,36	1	-0,14
39	0,71	0,15	-1,01	1,19	-1,86	0,73	2	0,68	1,6	-1,06	-0,89	1,65	-1,19	-1,95	-0,54	1,53	-0,41	-0,97	0,43	-1,31	0,09
40	1,65	-0,37	-1,76	-0,38	0,1	-1,67	-1,13	-1,42	0,14	-2,52	2,76	1,11	1,03	-0,49	1,36	-1,79	0,79	-0,46	1,51	1,82	0,26
41	-0,7	0,87	0,17	0,64	0,67	-1,33	0,63	-1,07	-0,51	-1,41	0,32	0,97	-0,82	-1,41	-0,82	-1,22	-1,23	-0,02	0,23	-0,52	-0,53
42	-0,47	-0,39	0,27	-0,27	0,12	-0,95	0,5	-0,04	0,07	0,11	-0,67	-0,29	0,19	-1,55	0,07	-0,97	-1,23	-0,83	-0,13	0,8	-0,34

Literaturverzeichnis

- [Aba04] ABAQUS: Analysis user's manual, Version 6.4, Hibbit - Karlsson & Sorensen Inc., 2004.
- [Ada95] Adam, H.: Leichtbau im Karosseriebau – Werkstoffe und Bauweisen, 5. Aachener Kolloquium Fahrzeug- u. Motorentech, Aachen, 1995.
- [Alb10] Albiez, C.; Liewald, M.: Bewertung der Oberflächenqualität von Blechbauteilen nach thermischen Prozessen. WT Werkstattstechnik online Ausgabe 10-2010, VDI Springer Verlag, 2010.
- [Alb11] Albiez, C.; Liewald, M.: Enhanced requirements for surface quality for outer car body shells according to thermal manufacturing processes. Key Engineering Materials Vol. 473, pp. 857-964, 2011.
- [Alb16] Albiez, C.: Simulationsgestützte Analysemethodik zur Untersuchung von thermomechanischen Bauteildeformationen von Fahrzeugkarosserien im Lacktrocknungsprozess, Dissertation, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, 2016.
- [Arm98] Armstrong, M.: Basic Linear Geostatistics, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1998.
- [Awi10] Awiszus, B.; Bolick, S.; Leck, L.; Pinner, S.: Durchgängige Simulationsprozesskette in der Fahrzeugentwicklung. In: Mathias Liewald (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Blechumformung 2010, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, Fellbach, S. 294-309, 2010.
- [Ban05] Banabic, D.; Kuwabara, T.; Comsa, D.S.: An anisotropic yield criterion for sheet metals. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 157-158, pp. 462-465, 2004.
- [Ban10] Banabic, D.: Constitutive modelling and numerical simulation, 1. Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Ban12] Banabic, D.; Carleer, B.; Comsa, D.-S.; Kam, E.; Krasovskyy, A.; Mattiasson K.; Sester, M.; Sigvant, M.; Zhang, X.: Sheet Metal Forming Process, Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2012.
- [Bar89] Barlat, F.; Lian, J.: Plastic behaviour and stretchability of sheet metals: a yield function for orthotropic sheet under plane stress conditions, Int J Plast 5, pp.51–56, 1989.
- [Bat02] Bathe, K.J.; Zimmermann, P.: Finite-Elemente-Methoden. Springer Verlag, 2. Auflage, Berlin Heidelberg und New York, 2002.
- [Bay02] Bayer, J.; Collisi, T.; Wenzel, S.: Simulation in der Automobilproduktion, Springer VDI-Verlag Berlin Heidelberg, 2002.
- [Bec04] Beck, S.: Optimierung der Zargenspannung beim Ziehen unregelmäßiger Blechformteile, Dissertation, Universität Stuttgart, MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt, 2004.
- [Bel08] Belytschko, T.; Liu, W.K.; Moran, B.: Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures, Wiley Verlag, 2008.
- [Bel14] Belytschko, T.; Liu, W.; Moran, B.; Elkhodary, K. I.: Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2014.

- [Bey08] Beyer, R.; Becker, F.; Schuler, B.; Mikeska, H.; Lehmann, K.: Spalt ist nicht gleich Spalt. *Inspect Fachmagazin*, Ausgabe 2, 2008, GIT Verlag GmbH & Co.KG, Darmstadt, 2008.
- [Bir13] Birkert, A.; Haage, S.; Straub, M.: *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile – Auslegung von Ziehanlagen*, Springer Vieweg Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [Bon09] Bonitz, P.: *Freiformflächen in der rechnerunterstützten Karosseriekonstruktion und im Industriedesign*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009.
- [Bra07] Braess, D.: *Finite Elemente – Theorie, schnelle Löser und Anwendungen in der Elastizitätstheorie*. 4. Überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Bra13] Braess, H.-H.; Seiffert, U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [Buc11] Buchitz, I.; Fritsche, D.; Hillmann, M.; Burchitz, I.A.; 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, South Korea, 2011.
- [Bur08] Burchitz, I.A.: *Improvement of Springback Prediction in Sheet Metal Forming*, PHD Thesis, Universität Twente, 2008.
- [Cai96] Cai, W.; Hu, S. J.; Yuan, J. X.: Deformable Sheet Metal Fixturing: Principles, Algorithms and Simulations. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Volume 118, Issue 3, S. 318-324, 1996.
- [Cai05] Cai, W.; Wang, P.C.; Yang, W.: Assembly dimensional prediction for selfpiercing riveted aluminum panels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 45, Issue 6, pp. 695–704, 2005.
- [Cai06] Cai, W.: Fixture optimization for sheet panel assembly considering welding gun variations, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 222, pp.235-245, 2006.
- [Cam03] Camelio, J.; Hu, S.J.; Ceglarek, D.: Modelling Variation Propagation in Multi-Station Assembly Systems with Compliant Parts, *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol 125(4), pp. 673-681, 2003.
- [Cam04] Camelio, J.A.; Hu, S.J.; Ceglarek, D.: Impact of fixture design on sheet metal assembly variation, In: *Journal of Manufacturing Systems*, 23, pp.182-193, 2004.
- [Car05] Carsley, J.; Tuomala, D.; Tyckoski, P.; Lanker, T.: *Roller Hemming of the Aluminum Hood of the Cadillac CTS*, Research Report, GM Research and Development Center, 2005.
- [Cas08] Casalino, G.; Rotondo, A.; Ludovico, A.: On the numerical modelling of the multiphysics self-piercing riveting process based on the finite element technique, *Advances in Engineering Software* 39, Elsevier, 2008.
- [Ceg97] Ceglarek, D.J.; Shi, J.: Tolerance analysis for sheet metal assembly using a beam-based model, *Concurrent Product Design Environmentally Conscious Manufacturing*, DE-94 MED-5, 1997.
- [Cha97] Chang, M.; Gossard, D.C.: Modeling the assembly of compliant, non-ideal parts, *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No.10, pp. 701-708, 1997.
- [Cre90] Cressie, N.: *The Origins of Kriging*, *Mathematical Geology* 22, 1990.

- [Cwi11] Cwiekala, T.: Entwicklung einer Simulationsmethode zur zeiteffizienten Berechnung von Tiefziehprozessen, Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Technische Universität Dortmund, 2011.
- [Del13] de Lange, N.: Geoinformatik in Theorie und Praxis, Springer Spektrum Berlin/ Heidelberg, 2013.
- [Den04] Deng, X.; Xu, S.: An evaluation of simplified finite element models for spotwelded joints, *Finite Element Analysis and Design*, Vol. 40, pp. 1175-1194, 2004.
- [DeP07] De Paula, A.A.; Aguilar, M.T.P.; Pertence, A.E.M.; Cetlin, P.R.: Finite element simulations of the clinch joining of metallic sheets, *Journal of Materials Processing Technology* 182, pp.352- 357, 2007.
- [Doe01] Dölle, N.: Numerische Simulation des Fügeprozesses beim Stanznieten mit Halbhohlmetall von duktilen Blechwerkstoffen, Dissertation, Universität Paderborn, 2001.
- [Doe07] Doege, E.; Behrens, B.-A.: *Handbuch Umformtechnik*, 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2007.
- [Eck11] Eckert, A.; Altermann, T.; Roessinger, M.; Wahl, M.; Schulz, F.: Beitrag zur Prozesskettensimulation im Karosseriebau, Veröffentlichung, Pam-Stamp Forum, Landshut, 2011.
- [Eck12] Eckert, A.: Prognose der Maßhaltigkeit punktförmig mechanisch gefügter Karosseriebauteile; Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2012.
- [Eis09] Eisele, U.; Roll, K.: Simulation des Rollfalzens mit LS-Dyna, Veröffentlichung, LS-Dyna Updateforum 2009, Filderstadt, 2009.
- [Eis12] Eisele, U.: Ein Beitrag zur verbesserten Auslegung von Rollfalzprozessen, Dissertation, Universität Stuttgart, DGM Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt, 2012.
- [Emr13] Emrich, A.: Systematik zur Robustheitsanalyse von Umformprozessen für Karosseriekomponenten aus Blech, Dissertation, Fakultät Konstruktions- Produktions- und Fahrzeugtechnik, Universität Stuttgart, 2013.
- [Fle09] Fleischer, M.: Absicherung der virtuellen Prozesskette für Folgeoperationen in der Umformtechnik, Dissertation, Technische Universität München, 2009.
- [Gal03] Galbraith, C.; Thomas, D.; Finn, M.J.: Manufacturing simulation of an automotive hood assembly, 4th European LS-Dyna Conference, Ulm 2003.
- [Ges02] Gese, H.; Dell, H.; Keller, S.; Yeliseyev, V.: Ermittlung von Fließwiderstandskurven bei großen Formänderungen für die Blechumformsimulation, DVM-Tagung Werkstoffprüfung 2002 -Kennwertermittlung für die Praxis, Bad Nauheim, 2002.
- [Ges10] Gese, H.; Dell, H.; Metzenbacher, G.: Beschreibung der isotropen, isotrop-kinematischen und anisotropen Verfestigung von Blechwerkstoffen - Experimentelle Aufnahme und numerische Modellierung, Tagungsband 13. Workshop Simulation in der Umformtechnik, Stuttgart, 2010.
- [Goc06] Gockel, T.: Interaktive 3D-Modellerfassung mittels One-Shot-Musterprojektion und schneller Registrierung, Dissertation, Fakultät für Information, Universität Karlsruhe (TH), 2006.
- [Goe10] Goesling, M.: Metamodell unterstützte Simulation und Kompensation von Rückfederungen in der Blechumformung, Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Technische Universität Dortmund, 2010.

- [Gol75] Gologranc, F.: Beitrag zur Ermittlung von Fließkurven im kontinuierlichen hydraulischen Tiefungsversuch, Universität Stuttgart, 1975.
- [Goo68] Goodwin, G.M.: Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop, Society of Automotive Engineers, Bd. 680093, pp. 371–379, 1968.
- [Got01] Gottstein, G.: Physikalische Grundlagen der Materialkunde, Springer Verlag, Berlin, 2001.
- [Gov12] Govik, A.; Nilsson, L.; Moshfegh, R.: Finite element simulation of the manufacturing process chain of a sheet metal assembly, Journal of Materials Processing Technology, Band 212, pp. 1453-1462, 2012.
- [Gra02] Grasse, J.: Beitrag zur Gestaltung eines Qualitätsmethodenverbundes in der Karosserieentwicklung und -planung, Dissertation, Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme, Technische Universität Berlin, 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, 2011.
- [Hah02] Hahn, O.: Verfahrenssimulation des Durchsetzfügens kaltverfestigter Aluminiumwerkstoffe zur rechnergestützten Werkzeugentwicklung, EFB-Forschungsbericht Nr. 183, Hannover, 2002.
- [Hah08] Hahn, O.; Heger, M.: Auswahl und Optimierung von Werkzeug sowie Hilfsfügeteilen für den Setzprozess beim Stanznieten mit Halbhohlstanzniet auf PC-Basis, EFB-Forschungsbericht Nr. 279, Hannover, 2008.
- [Hal09] Hallfeldt, T.; Keller, S.; Staud, D.; Merklein, M.; Guener, A.; Brosius, A.; Geisler, S.: Vereinheitlichung der Versuchsbedingungen für die Fließkurvenermittlung in der hydraulischen Tiefung, Tagungsband Werkstoffprüfung, 2009.
- [Han14] Han, F.; Liewald, M.: A new method to enhance the accuracy of the buckling test using modified Yoshida sample, Trans Tech Publications, Switzerland, Advanced Materials Research Vol. 1018, 2014.
- [Han15] Han, F.; Radonjic, R.: New Approach for Wrinkle Prediction in Deep Drawing Process, Key Engineering Materials Vol. 639, 2015.
- [Has77] Hasek, V.: Anwendung von Grenzformänderungsschaubildern, Industrie Anzeiger 99, Nr. 20, S. 343-347, 1977.
- [Hei14] Heizmann, J.; Walzl, H.; Rothenspieler, H.-J.: Optimierung von Produktionsprozessen, Vom Design zum Produkt – Produkt- und Betriebsmittelentwicklung, Produktionsstrategien und Innovationen, Technische Universität Chemnitz, Vorlesungsunterlagen Fertigungsstrategie im Automobilbau, https://www.tu-chemnitz.de/mb/WerkzMasch/studium/lehrvst/fertstrat_automobil/vorlesung/Pruefungsskript_Schwerpunkte_SS2014.pdf.
- [Hil48] Hill, R.: A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, Proc. Roy. Soc. A193, pp. 281-297, 1948.
- [Hil90] Hill, R.: Constitutive modelling of orthotropic plasticity in sheet metal, J. Mech Phys. Solids. 38, pp. 405-417, 1990.
- [Hin03] Hinterding, A.; Müller, A.; Gerlach, N.; Gabel, F.: Geostatistische und statistische Methoden und Auswerteverfahren für Geodaten mit Punkt- bzw. Flächenbezug, Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), Münster, 2003.

- [Hoe16] Hönle, S.: Methode zur Bewertung und Prognose der Anmutungsqualität und der Herstellbarkeit von Falzschlaufen an Karosserieanbauteilen aus Aluminium, Dissertation, Universität Stuttgart, 2016.
- [Hof12] Hoffmann, H.; Neugebauer, R.; Spur, G.: Handbuch Umformen, Carl Hanser Verlag, München, 2012.
- [Hu03] Hu, S.J.; Webbink, R.; Lee, J.; Long, Y.: Robustness Evaluation for Compliant Assembly Systems, ASME Journal for Mechanical Design, Vol. 125(2), pp.262 – 267, 2003.
- [Hue01] Hütte, H.: Untersuchungen zum Rückfederungsverhalten hochfester Stahlwerkstoffe beim Tiefziehen, Dissertation, Universität Hannover, 2001.
- [Ima81a] Iman, R.L.; Helton, J.C.; Campbell, J.E.: An Approach to Sensitivity Analysis of Computer Models, Part 1. Introduction, Input Variable Selection and Preliminary Variable Assessment, Journal of Quality Technology, 13(3), pp. 174-183, 1981.
- [Ima81b] Iman, R.L.; Helton, J.C.; Campbell, J.E.: An Approach to Sensitivity Analysis of Computer Models, Part 2. Ranking of Input Variables, Response Surface Validation, Distribution Effect and Technique Synopsis, Journal of Quality Technology, 13(4), pp. 232-240, 1981.
- [Ima82] Iman, R.L.; Conover W. J.: A Distribution-Free Approach to Inducing Rank Correlation Among Input Variables, Commun. Stat., B11(3): pp. 311-334, 1982.
- [Iss97] Issler, L.; Ruoff, H.; Häfele, P.: Festigkeitslehre – Grundlagen, Springer Verlag, Heidelberg, 1997.
- [Jen07] Jensen, M.R.: Introduction to LS-DYNA Implicit – Version 1.0. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California, 2007.
- [Jon06] Jonkers, B.: Simulation of the Roboter roller Hemming process. Dissertation, Department of Mechanical Engineering - Applied mechanics, Universität Twente, 2006.
- [Kae16] Kästle, C.: Simulationsmethode zur Beurteilung der Maßhaltigkeit von rollgefalzten Karosseriebaugruppen im Zusammenbau, Dissertation, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, 2016.
- [Kas92] Kassem, K.R.; Fuchs, F.; Hillmann, M.; Kabisch, A.; Mathiak, F.U.; Sünkel, R.: Mathematical modeling of the sheet metal forming process with INDEED, Numerical Methods in Industrial Forming Processes, Chenot, Wood&Zienkiewicz, Balkema, Rotterdam, 1992.
- [Kee65] Keeler, S.P.: Determination of forming limits in automotive stampings, Society of Automotive Engineers, Bd. 650535, pp. 1–9, 1965.
- [Kee77] Keeler, S. P.; Brazier, W. G.: Relationship between Laboratory Material Characterization and Press-Shop Formability, Microalloying 75, pp. 517-530, 1977.
- [Kle12] Klein, B.: FEM-Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, 9. verbesserte und erweiterte Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [Kle15] Klein, B.: FEM - Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, 10. verbesserte und erweiterte Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2015.
- [Kle16] Kleppmann, W.: Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren, 9. überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2016.

- [Klo06] Klocke F.; König, W.: Fertigungsverfahren Umformen, 5. neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2006.
- [Koc14] Koch, N.: Neue Ansätze und Methoden zum kombinierten Streck- und Tiefziehen von flachen Außenhautteilen moderner Fahrzeugkarosserien, Dissertation, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, 2014.
- [Kop16] Kopfer, P.: Methode zur adaptiven Rückfederungskompensation und -korrektur von Blechbiegebauteilen in mehrstufigen Biegeprozessen, Dissertation, Universität Siegen, Shaker Verlag Aachen, 2016.
- [Kra01] Krasowsky, A.; Sester M.: Simulation des elastischen Rückfederns beim Streifenziehbiegeversuch mit sehr kleinen Ziehradien, Diplomarbeit, IWM Bericht V 57/01, 2001
- [Kra05] Krasowsky, A.: Verbesserte Vorhersage der Rückfederung bei der Blechumformung durch weiterentwickelte Werkstoffmodelle, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2005.
- [Kre06] Kreimeyer, M.; Herfeld, U.; Deubzer, F.; Lindemann, U.: Effiziente Zusammenarbeit von Konstruktions- und Simulationsabteilungen in der Automobilindustrie, Competence in Design and Development, ISSN 1861-079X, Jahrgang 02, Nr. 01, 2006.
- [Kri51] Krige, D.: A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand, Journal of the Chemical Metallurgical & Mining Society of South Africa, Vol.52 Nr.6, 1951.
- [Lan75] Lange, K.: Umformtechnik Band 3: Blechbearbeitung, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1975.
- [Lan90] Lange, K.: Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 3: Blechbearbeitung, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1990.
- [Las76] Lasdon, L.S.; Waren, A.D.; Jain, A.; Ratner, M.: Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programming, Technical Report SOL 76-3, Department of Operations Research, Stanford University, 1976.
- [Lec09] Lechner, A.; Cramer, H.: Simulation der Prozesskette Tiefziehen – Schweißen zur Ermittlung von Verzug und Eigenspannungen, Tagungsband Sysweld Forum 2009, S. 106-114, Weimar, 2009.
- [Lee10] Lee, C.-J.: Design of mechanical clinching tools for joining of aluminium alloy sheets, Materials & Design, Vol. 31, Issue 4, Design of Nanomaterials and Nanostructures, pp. 1854-1861, 2010.
- [Len01] Lenz, B.: Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung, München: Herbert Utz, 2001.
- [Lia07] Liao, X.; Wang, G. G.: Non-linear dimensional variation analysis for sheet metal assemblies by contact modeling, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 44, Issue 1-2, 2007.
- [Lie11] Liewald, M.; Wurster K.; Blaich, C.: New Approaches on Automated Wrinkle Detection in Sheet Metal Components by Forming Simulation, Veröffentlichung, The 14th International ESAFORM Conference on Material Forming, 2011.
- [Lie12] Liewald, M.; Wagner, S.; Bolay, C.: Tiefziehen. in: Hoffmann, H.: Handbuch Umformen; ISBN: 978-3446427785; München; Hanser; 2012.

- [Lie14] Liewald, M.: Deep Drawing. in: Laperrière, L.; Reinhart, G.: CIRP Encyclopedia of Production Engineering, Berlin, Heidelberg; Springer Berlin Heidelberg; 2014.
- [Lie15a] Liewald, M.; Han, F.; Radonjic, R.: New criterion for prediction of the wrinkle formation in deep drawing process, Key Engineering Materials Vol. 651-653, 2015.
- [Lie15b] Liewald, M.; Han, F.: A New Approach for Determination of the Wrinkling Limit Curve (WLC) in Deep Drawing, 8th Forming Technology Forum, Zürich, 2015.
- [Lie19] Liewald M.: Einteilung der Umformverfahren, Vorlesungsmanuskript, Universität Stuttgart, 2019.
- [Liu95] Liu, S.: Variation Simulation for Deformable Sheet Metal Assembly, PhD Thesis, University of Michigan, 1995.
- [Mar67] Marciniak, Z.; Kuczynski, K.: Limit Strains in the Process of Stretchforming Sheet Metal, Int. J. Mech. Sci, Vol9, 1967.
- [Mar02] Marciniak, Z.; Duncan, J.L.; Hu, S.J.: Mechanics of Sheet Metal Forming, 2nd. Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, Woburn, 2002.
- [Mat63] Matheron, G.: Principles of Geostatistics, Economic Geology 58, pp. 1246–1266, 1963.
- [Mck79] McKay, M.D.; Conover, W.J.; Beckman, R.J.: A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code, Technometrics, 221, pp.239-245.
- [Mem05] Memhard, D. et al.: Entwicklung und Anwendung von Ersatzmodellen für die Modellierung von Klebverbindungen unter Crashbelastung, 4. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, 2005.
- [Mer98] Merkley, K.: Tolerance Analysis of Compliant Assemblies, PhD Thesis, Brigham Young University, 1998.
- [Mis28] Mises, R. v.: Mechanik der plastischen Formänderung von Kristallen, Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik 8, S. 161–185, 1928.
- [Mue96] Müller, W.: Beitrag zur Charakterisierung von Blechwerkstoffen unter mehrachsiger Beanspruchung, Dissertation, Universität Stuttgart, 1996.
- [Mut05] Muthler, A.: Berechnung der elastischen Rückfederung von Tiefziehbauteilen mit der p-Version der Finite-Elemente-Methode, Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, 2005.
- [Neu09] Neugebauer, R.; Israel, M.: Erweiterungen der Anwendungsgrenzen des Vollstanznietens mit zweiteiligen Matrizen. EFB-Forschungsbericht Nr. 294, Hannover, 2009.
- [Neu14] Neugebauer, R.; Drossel, W.-G.; Rössinger, M.; Eckert, A.; Hecht, B.: Roller Hemming Simulation: State of the art and application limits. Trans Tech Publications, Key Engineering Materials, Vol. 611-612, pp. 1062-1070, 2014.
- [NN04] N.N.: Werkstoffverhalten in der Blechumformung, AutoForm 4.1 Fundamental Training, AutoForm Engineering GmbH, 2004.
- [Owe80] Owen, D. R.; Hinton, E.: Finite Elements in Plasticity - Theory and Practice, Pineridge Press Ltd., Swansea, 1980.
- [Pap08] Papadakis, L.: Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains, Herbert Utz Verlag, München, 2008

- [Pap11] Papaioanu, A.; Liewald, M.: Study on SCS Process by Variation of Geometrical and Tribological Parameters of Forming Die. in: International Deep Drawing Research Group: Proceedings of the IDDRG Conference 2011 - Towards sustainable sheet forming processes, Bilbao, 2011.
- [Per11] Perret, W.; Thater, R.; Alber, U.; Schwenk, C.; Rethmeier, M.: Approach to assess a fast welding simulation in an industrial environment – Application for an automotive welded part, International Journal of Automotive Technology, 12 (6), pp.895-901, 2011.
- [Pet11a] Peters, P.; Leppin, C.; Hora, P.: Method for evaluation of the hydraulic bulge test, Proceedings of the IDDRG Conference 2011, Bilbao, Spain, 2011.
- [Pet11b] Petropoulos, A.; Lechner, A.; Cramer, H.: Virtuelle Bauteilentwicklung durch Simulation der Prozesskette Umformen-Schweißen, SYSWELD-Forum 2011, Weimar, 2011.
- [Pin14] Pinner, S.: Untersuchung von Methoden zur durchgängigen Prozesskettensimulation im Karosseriebau, Dissertation, Berichte aus der virtuellen Fertigungstechnik, Technische Universität Chemnitz, Band 10, 2014.
- [Por06] Porcaro, R.; Hanssen, A.G.; Langseth, M.; Aalberg, A.: Self-piercing riveting process: An experimental and numerical investigation, Journal of Material Processing Technology 171, pp. 10-20, 2006.
- [Rad19] Radonjic, R.; Liewald, M.: New process design for reduction of springback by forming with alternating blank draw-in, Procedia Manufacturing Vol. 29, pp. 217-224, 2019.
- [Rie04] Rietman, B.; Kose, K.; Tikhomirov, D.: Mechanische Schweißersatzmodelle für gekoppelte Simulationen, Veröffentlichung, INPRO Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH, Berlin, 2004.
- [Roh01] Rohleder, M. W.: Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen im Produktentstehungsprozess von Blechformteilen, Fakultät Maschinenbau, Universität Dortmund, Dissertation, Shaker Verlag Aachen, 2001.
- [Rol04] Roll, K.; Lemke, T.; Wiegand, K.: Simulationsgestützte Kompensation der Rückfederung, 3. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, 2004.
- [Rus11] Rust, W.: Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen – Kontakt, Geometrie, Material, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg und Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [Sch98] N. N.: Schuler Handbuch der Umformtechnik, Schuler GmbH, Springer-Verlag Berlin, London, New York, 1998.
- [Sch99] Schulte, S.: Umformsimulation als fester Bestandteil des Produktentstehungsprozesses bei Audi, 16. Umformtechnisches Kolloquium, Hannover, 1999.
- [Sch03] Schmidt- Jürgensen, R.: Untersuchungen zur Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen beim Tiefziehen, Dissertation, Universität Hannover, 2003.
- [Sch04] Schmid, E.: Numerische Analyse des Clinchprozesses mit dreiteiliger Matrize, Dissertation, Universität Paderborn, Shaker-Verlag, Aachen, 2004.
- [Sch07] 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, 2007.
- [Sch15a] Schützle W.: Beitrag zur Prozesskettensimulation geschweißter Aluminium- Karosseriebauteile, Dissertation, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Verlag Wissenschaftlicher Scripten, Chemnitz, 2015.
- [Sch15b] Schuler, F.; Koch, N.: Effective Springback Compensation of Advanced High Strength Steels, Fachkonferenz „Global Automotive Lightweight Vehicle Manufacturing“, Birmingham, 2015.
- [Sch15c] Schuler, F.; Rösen, H.; Biasutti, M.: Part Study on Material Modelling for Prediction Accuracy in a Combined Forming and Springback Simulation, Fachkonferenz „automotive CAE Grand Challenge 2015“, Hanau, 2015.
- [Sch17] Schuler, F.; Rupp, M.; Liewald, M.: A contribution to an improved joining simulation of car hood components, In: 17. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil- und Motorentechnik, pp. 1053-1069, Springer Vieweg Wiesbaden, 2017.
- [Sch19] Schuler, F.; Liewald, M.; Bezerra, D.M.: New compensation strategy for car bonnet assemblies, “18th International Conference on Sheet Metal, SHEMET 2019”, Procedia Manufacturing, Volume 29, pp. 552-559, Leuven, 2019.
- [Sel99] Sellem, E.; Rivière, A.; Hillerin, C.A.D.; Clement, A.: Validation of the Tolerance Analysis of Compliant Assemblies, 1999 ASME Design Engineering Technical Conference, Las Vegas, Nevada, Sept. 12-15, 1999.
- [Sie93] Siegert, K.; Mnif, J.: Untersuchungen über das Falzen (180°-Biegen) von Aluminiumblechen, EFB-Forschungsbericht Nr. 47, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover, 1993.
- [Sie15] Siegert, K.: Blechumformung, Springer Vieweg Verlag, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [Sie17] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE), 2. Auflage, Springer View Verlag, Berlin, 2017.
- [Sin19] Singer, R.: Neuartige Versuchsmethodik zur verbesserten Modellierung der Reibung in der Blechumformung, Dissertation, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, 2019.
- [Sta09] Stapelfeld, C.; Doynov, N.; Michailov, V.: Hybride Berechnungsansätze zur Prognostizierung und Minimierung des Verzugs komplexer Schweißkonstruktionen, Tagungsband Sysweld Forum, 2009.
- [Ste12] Steinbeck-Behrens, C.; Menke, T.; Steinbeck, J.; Schroeder, M.; Duan, H.; Hoffmann, A.; Brylla, U.; Kulp, S.; Pinner, S.; Rambke, M.; Leck, L.; Awiszus, B.; Bolland, S.; Katzenberger, J.; Schulz, M.; Runde, C.; Czaykowska, A.; Mager, K.: Durchgängige Virtualisierung der Entwicklung und Produktion von Fahrzeugen (VIPROF), Gemeinsamer FuE-Abschlussbericht des Verbundprojektes, Förderkennzeichen: 02PC1090 bis 1097, 2012.
- [Ste15] Steinle, P.: Toleranzmanagement für Bauteile aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät Maschinenbau, 2015.
- [Sve02] Svensson, M.; Mattiasson, K.: Three-dimensional simulation of hemming with the explicit FE-method. Journal of Materials Processing Technology 128, 2002.

- [Tha11] Thater, R.; Alber, U.: Anwendung der Schweißsimulation an einem Beispiel aus der Automobilindustrie, BAM-Workshop, Anwendungsnahe Schweißsimulation 2011, Berlin, 2011.
- [Thu08] Thuillier, S.; Lemaout, N.; Manach, P.; Debois, D.: Numerical simulation of the roll hemming process. Journal of Materials Processing Technology 198, 2008.
- [Tik05] Tikhomirov, D.; Rietmann, B.; Kose, K.; Makkink, M.: Computing Welding Distortion: Comparison of Different Industrially Applicable Methods, Advanced Materials Research, Vol. 6-8, pp. 195-202, 2005.
- [Veg99] Vegter, H.; An, H.; Pijlman, H.; Huetink, J.: Advanced mechanical testing on aluminum alloys and low carbon steels for sheet forming, Proceedings of NUMISH-EET Conference, Besancon, France, 1999.
- [Ven06] Venazio, C.; Brand, M.; Burdack, M.; Sguaizer, Y.; Pfeiffer, W.; Urich, B.; Siegele, D.: Numerische Simulation von Verzug und Eigenspannungen geschweißter Komponenten aus Al-Guss und Strangpressprofilen. Forschungsbericht, AiF 13.716 N. DVS-Bericht, Nr. 9.032, Düsseldorf, 2006.
- [Vol09] Volk, W.: Virtual engineering and planning process in sheet metal forming, 7th European LS-DYNA Users Conference, Salzburg, 2009.
- [Wac98] Wackernagel, H.: Multivariate Geostatistics - An Introduction with Applications, Springer Verlag, Berlin/ Heidelberg, 1998.
- [Wec06] Weckerman, A.; Gabbia, A.; Weickmann, J.: Optische Prüfung umgeformter Blechbauteile unter Anwendung virtueller Verzugskompensation, SFB 396, Tagungsband zum Industriekolloquium, Bamberg, 2006.
- [Wag17] Wagner, M.: Lineare und nichtlineare FEM: Eine Einführung mit Anwendungen in der Umformsimulation mit LS-DYNA®, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2017.
- [Wei09] Weigert, P.: Berücksichtigung formänderungsbedingter Effekte (Rückfederung) im Entwicklungsprozess der Methodenplanung von tiefgezogenen Karosseriebauteilen, Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2009.
- [Wie10a] Wiegand, K.; Zubeil, M.; Roll, K.: Use of simulation in the process chain of car body manufacturing, 9. LS-Dyna Forum, Bamberg, 2010.
- [Wie10b] Wieczorek, D.: Statistische Versuchsplanung, In: Bandow G.; Holzmüller, H. (eds) „Das ist gar kein Modell!“ Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften, Gabler, Wiesbaden, 2010.
- [Wil06] Will, J.; Bucher, C.: Statistischer Maße für rechnerische Robustheitsbewertungen CAE gestützter Berechnungsmodelle, Proceedings Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 3.0, Weimar, 2006.
- [Wio01] Wiora, G.: Optische 3D-Messtechnik - Präzise Gestaltvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren, Dissertation, Universität Heidelberg, 2001.
- [Wri08] Wriggers, P.: Nonlinear Finite Element Methods, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [Wys98] Wyss, G.D.; Jorgensen, K.H.: A User's Guide to LHS: Sandia's Latin Hyper-cube Sampling Software, SAND98-0210 Unlimited Release Printed February 1998.
- [Zha09] Zhang, L.: LS-PrePost: Metal Forming Simulation – Tutorial Manual – Forming, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California, 2009.

- [Zub14] Zubeil, M.: Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren, Dissertation, Technische Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2014.

Normen

- [DIN10360] DIN EN ISO 10360-1:2003-07: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 1: Begriffe (ISO 10360-1:2000 + Corr 1:2002) (enthält Berichtigung AC:2002); Deutsche Fassung EN ISO 10360-1:2000 + AC:2002, Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN12004] DIN EN ISO 12004-2:2009-02: Metallische Werkstoffe - Bleche und Bänder - Bestimmung der Grenzformänderungskurve - Teil 2: Bestimmung von Grenzformänderungskurven im Labor (ISO 12004-2:2008); Deutsche Fassung EN ISO 12004-2:2008, Beuth Verlag, Berlin, 2009.
- [DIN14610] DIN EN 14610: Schweißen und verwandte Prozesse – Begriffe für Metallschweißprozesse; Dreisprachige Fassung EN 14610:2004, Beuth Verlag, Berlin, 2004.
- [DIN8580] DIN 8050: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung, Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN 8582] DIN 8582: Fertigungsverfahren Umformen: Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht. Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN85841] DIN 8584-1: Fertigungsverfahren Zugdruckumformen, Teil 1: Allgemeines. Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN85843] DIN 8584-3: Fertigungsverfahren Zugdruckumformen, Teil 3: Tiefziehen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN85851] DIN 8585-1: Fertigungsverfahren Zugumformen, Teil 1: Allgemeines. Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN85854] DIN 8585-4: Fertigungsverfahren Zugumformen, Teil 4: Tiefen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN8586] DIN 8586: Fertigungsverfahren Biegeumformen: Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN8588] DIN 8588: Fertigungsverfahren Zerteilen: Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag, Berlin, 2013.
- [DIN8593] DIN 8593-0: Fertigungsverfahren Fügen, Teil 0: Allgemeines. Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN85935] DIN 8593-5: Fertigungsverfahren Fügen, Teil 5: Fügen durch Umformen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN85936] DIN 8593-6: Fertigungsverfahren Fügen, Teil 6: Fügen durch Schweißen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag, Berlin, 2016.
- [DVS3420] Merkblatt DVS-EFB 3420: Clinchen – Überblick, DVS Media GmbH, Düsseldorf, 2012.

- [VDI3001] VDI-Richtlinie 3001: Bördelverbindungen im Karosseriebau, Beuth Verlag, Berlin 1998.

Curriculum Vitae

Persönliche Daten	Geburtsdatum:	08.09.1988
	Geburtsort:	Frankfurt a.M.
	Staatsangehörigkeit:	deutsch
Berufserfahrung	September 2020 – heute	Leiter Produktions- und Werkzeugtechnologie, Roto Frank Fenster- und Türtechnologie GmbH, Leinfelden-Echterdingen
	Mai 2019 – August 2020	Abteilungsleiter Prototypen/Vorserie, voestalpine Automotive Components Dettingen GmbH & Co. KG
	Juli 2018 – April 2019	Werkzeugprojektleiter, voestalpine Automotive Components Dettingen GmbH & Co. KG
	April 2014 – Juni 2018	Projektingenieur Falzsimulation, Adam Opel GmbH, Rüsselsheim
	März 2013 – März 2014	Projektingenieur Digital Engineering, Star Cooperation GmbH, Böblingen Arbeitnehmerüberlassung Daimler AG, Sindelfingen
	August 2012 – Februar 2013	Masterand, Procter & Gamble Manufacturing GmbH, Hünfeld Thema: Capacity of Utility Systems and their Limitations
	Oktober 2011 – August 2012	Werkstudent, Bertrandt GmbH, Ehningen Versuch und Erprobung Exterieur/Karosserie/Safety
	Oktober 2008 – September 2011	Duales Studium, Homag AG, Schopfloch Konstruktion und Entwicklung
	April 2014 – Februar 2021	Doktorand, Institut für Umformtechnik Stuttgart Abschluss: Doktor-Ingenieur
	Oktober 2011 – Februar 2013	Masterand, Hochschule Esslingen Schwerpunkt: Design and Development in Automotive and Mechanical Engineering Abschluss: Master of Engineering
	Oktober 2008 – September 2011	Bachelorand, Duale Hochschule Stuttgart – Horb Schwerpunkt: Konstruktion und Entwicklung Abschluss: Bachelor of Engineering
	September 1998 – Juni 2007	Allgemeine Hochschulreife, Keplergymnasium Freudenstadt
Bildung	Dezember 2010 – Februar 2011	Auslandssemester VR China, Homag Machinery Shanghai Co., Ltd. Begleitung Prototypeneinführung
	August 2004 – Juni 2005	Schüleraustausch in Wisconsin USA, Youth for Understanding Komitee e.V.
	Juli 2007 – März 2008	Wehrdienst
Sonstiges		