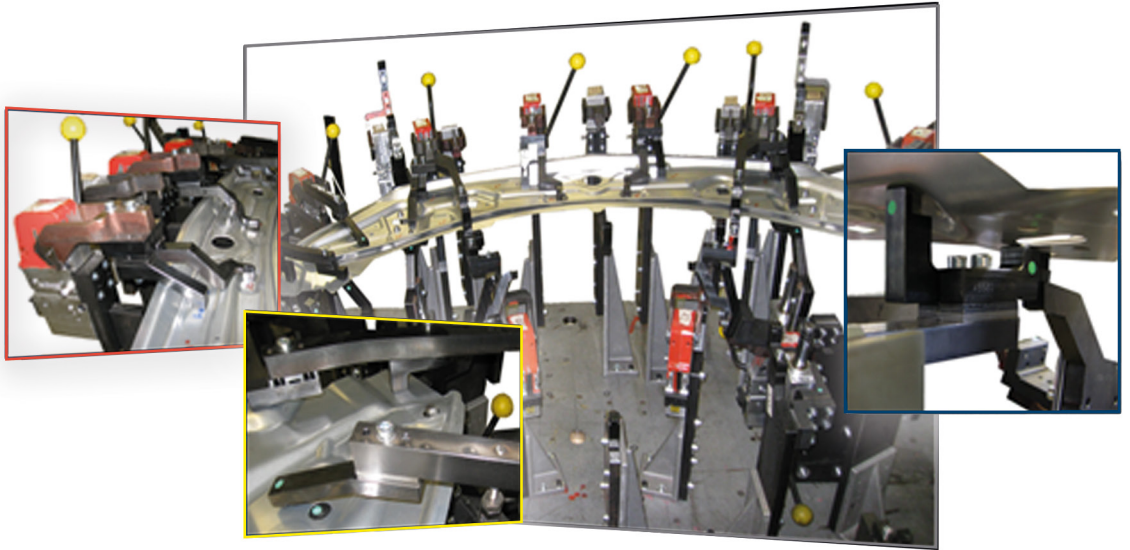




FAU Studien aus dem Maschinenbau 319

Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und
Fixierkonzepte im Karosserierohrbau:
Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit
unter Berücksichtigung schwankender
Einflussgrößen

Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte
im Karosserierohbau

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 319

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau

Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter
Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT)
Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Erlangen
FAU University Press
2019

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

Bitte zitieren als

Konrad, Tobias. 2018. *Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohrbau. Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 319.
Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-177-5.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative Commons Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-176-8 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-177-5 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-177-5

**Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte
im Karosserierohbau:
Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter
Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Tobias Konrad

aus Tirschenreuth

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen

Prüfung: 30.05.2018

Vorsitzender des

Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. M. Merklein
Prof. Dr.-Ing. Karl Roll

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner dreijährigen Doktorandentätigkeit in der Abteilung für Digitale Produktionsplanung der Daimler AG in Sindelfingen. Betreut wurde die Arbeit während dieser sehr interessanten Zeit seitens der Daimler AG von Herrn Klaus Wiegand. Die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit übernahm dankenswerterweise die Ordnaia des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie (LFT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein. Im Folgenden möchte ich nun denjenigen Personen, welche mich entlang der verschiedenen Phasen der Industriepromotion begleitet, gefördert und unterstützt haben meinen Dank aussprechen.

Mein erster und ganz besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. Ing. habil. Marion Merklein für die gesamtheitliche Unterstützung an durchgeführten Industriearbeiten, beginnend mit der Bachelorarbeit bis hin zum Abschluss dieser Dissertation. Neben der durchgängigen Kontaktmöglichkeit profierte die Arbeit durch ihre aufgebrauchte Zeit und den entstandenen konstruktiven Anmerkungen im Rahmen der überaus engagierten Betreuung. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Roll sehr für die Übernahme des Koreferats, insbesondere seinen persönlichen und wissenschaftlichen Ratschlägen im Bereich der Simulationsmethoden.

Genauso möchte ich Herrn Klaus Wiegand für das Einbringen seines langjährigen Fachwissens im Bereich der Entwicklung der Umformsimulation sowie meinem Vorgesetzten Herrn Dr. Günter Wöhlke für die Möglichkeit sehr herzlich Danke sagen. Den gegebenen Raum zur Bearbeitung der wissenschaftlichen Fragestellungen, den Einbezug in produktionsnahe Arbeitsinhalten sowie den inspirierenden, regelmäßigen Austausch wusste ich zu schätzen.

Mein Dank gilt aber genauso denjenigen Kollegen und Mitarbeiter des Lehrstuhls, mit welchen ich in den letzten Jahren so gut zusammenarbeiten durfte. Zu nennen sind an dieser Stelle die Kollegen aus der eigenen Abteilung bei der Daimler AG, mit welchen ich zu den Produktionsthemen jederzeit fachlich und fundiert diskutieren konnte. Stellvertretend gilt hier der Dank den Kollegen aus den Simulationsteams verschiedener Fachbereiche, genauso wie den Kollegen aus den Werkstattbereichen

in den prototypischen Fertigungsumfeldern. Sehr geschätzt habe ich zudem den fachlichen und freundschaftlichen Austausch mit den wissenschaftlichen Mitarbeitern und Technikern des Lehrstuhls. Neben Korrekturanmerkungen erhielt ich durch freundliche Einweisungen an den Versuchsanlagen und Prüfvorrichtungen hilfreiche Hinweise für die Bearbeitung der Fragenstellungen meiner Arbeit. Zu danken gilt es auch den industriellen Partnern im Bereich der Simulations-, Optimierungs- und Statistiktools. Meinen studentischen Mitarbeitern Alexander Piatke, Bastian Fiegl, Caroline Forster, Felix Schaub, Martin Brezina, Philipp Mittmann, Steffen Schöllhammer, Thomas Schneider und Vicent Gascó gilt ein sehr großer Dank für ihre Beiträge zur entstandenen Dissertation.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern für ihre Förderung und Unterstützung während meines bisherigen Lebensweges. Danke!

Tirschenreuth, im Oktober 2018

Tobias Konrad

Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und Forschung	5
2.1	Fertigung von Karosseriebaugruppen	5
2.1.1	Werkstofflicher Mischbau für den Karosserieleichtbau	6
2.1.2	Herstellungsprozess und Kategorisierung von Anbauteilen	8
2.1.3	Eingesetzte Fügeverfahren zur Herstellung von Karosseriebaugruppen	12
2.2	Maßhaltigkeit des Einzelbauteils und der Baugruppe	14
2.2.1	Ursachen für Maßhaltigkeitsabweichungen	15
2.2.2	Stellgrößen zur Verbesserung der Formhaltigkeit	22
2.3	Toleranzanalyse bei der Herstellung von Karosseriebaugruppen	22
2.4	Digitale Prozesskette im Karosserierohbau	24
2.5	Stochastische Analyse von Prozesssimulationen	27
2.5.1	Grenzen zur statistischen Analyse von Eingangsgrößen mittels Simulationen	27
2.5.2	Stochastische Parameteroptimierung einer digitalen Prozesskette	29
2.6	Zusammenfassende Bewertung des Standes der Technik	30
3	Zielsetzung der Arbeit und Vorgehensweise	33
4	Versuchswerkstoffe, Versuchsanlagen, Methoden und Simulationsumfeld	37
4.1	Charakterisierung der eingesetzten Versuchswerkstoffe	37
4.2	Versuchsanlagen zur Herstellung von Einzelteilen und Baugruppen	39
4.2.1	Versuchspressen zur Herstellung der Einzelbauteile	39
4.2.2	Versuchspressen zur Herstellung der Einzelbauteile	40
4.2.3	Vorrichtungen zum Beschnitt der Prinzipbauteile und -proben	42
4.2.4	Flexible Fügestation ZB S-Rail und ZB H-Probe	43
4.2.5	Fügestation der (Unter-)Baugruppe einer Motorhaube	45
4.2.6	Fügevorschriften und eingesetzte Fügeanlagen	45
4.3	Taktile und optische Messmethoden zur Bauteilcharakterisierung ..	46

4.4	Methoden zur Verknüpfung von Einzelprozessen zu einer durchgängigen Prozesskette	50
4.4.1	Geometrisches Mapping	50
4.4.2	Übertragung von Dehnungen und ausiterierten Spannungen .	51
4.5	Simulationsumfeld und Modellbildung Zusammenbausimulation....	52
5	Einflussgrößen des Umformprozesses auf die Maßhaltigkeit von Einzelteilen	59
5.1	Methodische Vorgehensweise zur Ermittlung relevanter Einflussgrößen des Umformprozesses.....	59
5.2	Werkstoffcharakterisierungen als Eingangsgrößen für die Umformsimulationen und zur Beurteilung der Experimente.....	60
5.3	Einfluss ausgewählter Eingangsgrößen auf die Rückfederung von Einzelteilen	63
5.3.1	Variation des Werkstoffs/Elastizitätsmoduls	66
5.3.2	Variation der Blechdicke.....	70
5.3.3	Einlegeposition und Blechhalterkraft.....	72
5.3.4	Platinenform und Struktursteifigkeit von Prinzipgeometrien und -segmenten	76
5.3.5	Einfluss des Beschnittprozesses tiefgezogener Bauteile.....	81
5.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse aus der Untersuchung singulärer Werkstoff-, Prozess- und Geometrieparameter	85
5.5	Stochastische Analysen mit ausgewählten Eingangsgrößen der Tiefziehprozesse eines Prinzip- und eines Realbauteils	87
5.5.1	Bestimmung von Parameterschwankungen des Umformprozesses	87
5.5.2	Sensitivitätsanalysen zu Eingangsgrößen von Tiefziehsimulationen.....	90
5.5.3	Robustheitsanalyse und Optimierung des Umformprozesses eines Prinzipbauteils	94
5.6	Erkenntnisse bei der Umformung realer Karosseriekomponenten und Analyse der Struktursteifigkeit.....	96
6	Einflussgrößen des Fügeprozesses auf die Maßhaltigkeit von Baugruppen.....	103
6.1	Methodische Vorgehensweise zur Ermittlung der Stellhebel einzelner Fügestationsparameter	103

6.2	Einfluss ausgewählter Eingangsgrößen des Fügeprozesses auf die Maßhaltigkeit von Baugruppen	106
6.2.1	Validierung der Fügeprozesse von Prinzip- und Realbaugruppen	109
6.2.2	Spannprozess und deren Reihenfolge.....	109
6.2.3	Anzahl, Position und Geometrie von Kniehebelspannern	113
6.2.4	Programmierung der Fügepunkte, Fügereihenfolge und Fügezeitpunkt	117
6.2.5	Anzahl an Geofügepunkten, Fügeposition und Fügepunktabstand	121
6.2.6	Elastizitätsmodule der Fügepartner	124
6.2.7	Blechdicke der Fügepartner	126
6.2.8	Struktursteifigkeit der Fügepartner	127
6.2.9	Zusammenfassende Erkenntnisse aus Werkstoff-, Prozess- und Geometriestudien	130
6.3	Einfluss verschiedener Füge Techniken auf die ZB-Maßhaltigkeit.....	132
6.4	Geometrische Wechselwirkung der Nicht-Maßhaltigkeit von Einzelteilen	139
6.4.1	Zusammenfassende Erkenntnisse aus Werkstoff-, Prozess- und Geometriestudien	140
6.4.2	Gegenseitige geometrische Beeinflussung zweier umgeformter Einzelbauteile	143
6.4.3	Formhaltigkeit beim Fügen mehrerer Karosseriekomponenten	146
6.5	Stochastische Analysen von ausgewählten Fügepositionsparametern mit anschließender Optimierung	148
6.5.1	Bestimmung von Parameterschwankungen beim Fügeprozess.....	149
6.5.2	Sensitivitätsanalysen und Optimierungsstudien	150
7	Untersuchung der Prozessfenster von verketteten Umform- und Fügeprozessen	157
7.1	Methodik zur Bestimmung einer Grenzblechdicke und Ableitungen für die einzelnen Prozesse.....	158
7.2	Methodik zur Bestimmung einer Grenzblechdicke und Ableitungen für die einzelnen Prozesse.....	160
7.3	Toleranzanalyse zur Analyse der Wechselwirkung mehrerer nichtmaßhaltiger Einzelteile.....	174
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	181
9	Summary and outlook.....	185
	Literaturverzeichnis.....	189

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
α	°	Biegewinkel
α_m	°	Gemessener Biegewinkel
ε	-	Dehnung
ε_{el}	-	Elastische Dehnung
ε_{pl}	-	Plastische Dehnung
σ_n	MPa	Normalspannung
σ_r	MPa	Radialspannung
σ_t	MPa	Tangentialspannung
φ	-	Umformgrad
ψ	°	Zargenwinkel
b	mm	Breite
c_t	Nm/°	Statische Torsionsfestigkeit
d	mm	Durchmesser
d_i	mm	Innendurchmesser
d_o	mm	Außendurchmesser
k_f	MPa	Fließspannung
m	kg	Masse
l	mm	Länge
s	mm	Blechdicke
s_0	mm	Ausgangsblechdicke
t	mm	Blechdicke
t_i	mm	Einzelblechdicken
A	-	Bruchdehnung
A_0	mm ²	Ausgangsquerschnittsfläche
A_{80}	%	Bruchdehnung
A_g	%	Gleichmaßdehnung
A_L	-	Lüdersdehnung
A_{proj}	mm ²	Projizierte Fläche
E	MPa	Elastizitätsmodul
F	N	Prüfkraft
K	-	Korrekturwert
R_{el}	MPa	Elastische (untere) Streckgrenze
R_m	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	Ersatzstreckgrenze, 0,2 %-Dehngrenze, Proportionalitätsgrenze

T	°C	Temperatur
ZT	mm	Ziehtiefe

Abkürzung

Beschreibung

AA	Aluminium Association
AT	Außenteil
BE	Balkenelement
CAD	Computer Aided Design
CADO	Ursprünglicher Konstruktionsdatenstand
DIN	Einzel(bau)teil
ET	Finite Elemente
FEM	Finite Element Methode
GOM	Gesellschaft für optische Messtechnik
IT	Innenteil
K	Korrekturwert
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LHS	Latin Hypercube Sampling
MBN	Mercedes-Benz-Norm
NMF	Neue Materialien Fürth GmbH
RDO	Robust-Design Optimization
RT	Raumtemperatur
SG	Spanngruppe
SRF	Spannerreihenfolge
STL	Stereolithographie
WPS	Widerstandspunktschweißen
WR	Walzrichtung
ZB	Zusammenbau

1 Einleitung

Eine steigende Anzahl an Fahrzeugvarianten fordert kürzere Produktentwicklungszyklen. Die Hardwarephasen der Produktvarianten werden daher verringert oder entfallen komplett [1]. Der steigende Wunsch nach Individualisierung bedingt eine höhere Flexibilität der Produktionsprozesse bei gleichbleibenden Qualitätsstandards der Produkte. Im Fahrzeugbau der Automobilindustrie gilt es, sich gegenüber den Wettbewerbern mit an den Kunden angepassten Produktdesigns zu behaupten. Einzigartige Produkte lösen Kaufanreize aus und erweitern das Marktvolumen.

Bei den Produkten ist der schöpferische Gestaltungsfreiraum durch staatliche Reglementierungen begrenzt. So einigten sich 196 Staaten im Jahr 2015 im Rahmen der UN-Klimakonferenz in Paris auf eine maximal zulässige Erwärmung der Erdtemperatur um zusätzliche 2 °C [2]. Ebenso beinhaltet der derzeit gültige Koalitionsvertrag der Regierungsparteien der Bundesrepublik Deutschland eine Klausel zur CO₂-Reduktion zwischen 80 und 95 % bis zum Jahr 2050 [3]. Aufgrund der EU-Verordnung von 2009 ist der CO₂-Ausstoß der Fahrzeugflotte bis 2020 auf durchschnittlich 95 g/km zu verringern. Des Weiteren wurde gemäß dem Kyoto-Protokoll von 2015 vereinbart, eine globale Klimaerwärmung unter 2 °C anzustreben. Ziel ist die Reduktion der CO₂-Emissionen [4]. Damit sind im modernen Fahrzeugbau nach [5] und [6] Karosserievarianten nach den Prinzipien des Leichtbaus anzufertigen.

Bei den eingesetzten Technologien in der Integral-, Verbund- oder Differenzialbauweise nach [7] werden unterschiedliche Werkstoffe zum Verbinden von Einzelbauteilen eingesetzt. Entlang der Produktionskette entstehen durch die Leichtbauweise in der Umform- und Fügetechnik neue Herausforderungen. Etablierte Fügekonzepte mit konventionellen Fügeverfahren werden wegen der Mischbauweise partiell durch mechanische Fügeverfahren ersetzt [8]. Hierzu gilt es zu erörtern, welche Auswirkung dieser Wechsel auf Kriterien der Formhaltigkeit gefügter Karosseriebauteile und die Gestaltung ihres Herstellungsprozesses hat. Auf das Ergebnis des Zusammenbauprozesses wirken eine hohe Anzahl streuender Werkstoff- und Prozessparameter ein.

Durch den Einsatz von Finite Elemente Methoden (FEM) und den heutigen rechnergestützten Möglichkeiten können stochastische Analysen relevanter Einflussgrößen auf die Maßhaltigkeit von Baugruppen durch-

geführt werden. Die Kombination aus einer steigenden Anzahl an Produktvarianten sowie neuen Werkstoffkombinationen bedingt prognosebasierte Verfahren, um ausreichend zuverlässig und schnell die Auswirkungen von Parameteränderungen in einer frühen Produktphase vorherzusagen. Numerische Berechnungsmodelle, wie die FE-Simulation, haben das Potential, die Sensitivitäten und Wechselwirkungen schwankender Eingangsgrößen von Karosserieprozessen aufzuzeigen.

Jeder Prozessschritt der Fertigung von gefügten Baugruppen unterliegt zufälligen, fertigungsbedingten Abweichungen. Eine systematische Analyse der Eingangsgrößen eines verketteten Umform- und Fügeprozesses stellt daher die Möglichkeit dar, Sensitivitäten relevanter Faktoren auf charakteristische Qualitätskriterien zu bestimmen.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, anhand von Geometrie-, Prozess- und Werkstoffstudien zu den einzelnen Prozessschritten die Relevanz von Faktoren auf die Formhaltigkeit der jeweiligen Ergebnisse systematisch zu quantifizieren. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse stellt der Ansatz zudem ein geeignetes Mittel zur Verfügung, um Produktionsprozesse von Zusammenbauten zu optimieren und hinsichtlich ihrer Robustheit zu bewerten. In einer frühen Phase des Produktentwicklungszyklus von Karosseriebaugruppen lassen sich mögliche Fehlerquellen identifizieren und nach [9] in einer späteren Produktphase kostenintensive Korrektur- und Abstellmaßnahmen verhindern. Die Arbeit leistet mit Grundlagenuntersuchungen einen Beitrag für die Auslegung von Spann- und Fixierkonzepte von Karosseriebaugruppen. Allgemeingültige Zusammenhänge zwischen Werkstoff und Spannkonzentration können unabhängig von der Bauteilgeometrie angewendet werden.

Mit der zu entwickelnden durchgängigen FE-Methode auf Basis statistischer Versuchspläne wird in der Forschungsarbeit anhand von Prinzip- und Realbaugruppen ein Konzept erarbeitet, mit welchem sich grundlegende Zusammenhänge von Zusammenbau- oder Einzelteiltoleranzen bewerten lassen. Anhand der Analyse mit schwankenden Eingangsgrößen lassen sich für jeden Schritt einer durchgängigen digitalen Rohbauprozesskette Prozessfenster für relevante Einflussgrößen hinsichtlich eines Toleranzmerkmals ableiten. Die Vorgehensweise beinhaltet die Bildung einer durchgängigen Systemarchitektur zur Analyse der Wechselwirkungen zwischen Einzelteil- und Zusammenbauqualität. Des Weiteren eröffnet es den Entwicklern von Karosserieprozessen Optionen, Fertigungsprozesse systematisch anhand der Sensitivitäten ihrer Prozess- und Werkstoffparameter zu verbessern. Die Ergebnisse zeigen dem industriellen

Anwender Möglichkeiten auf, Kosten bei den Anforderungen an die einzelnen Prozessrahmenbedingungen zu sparen. Durch ein verbessertes Prozessverständnis werden größere Optimierungsmöglichkeiten für die Maßhaltigkeit von Einzelbauteilen und Baugruppen deutlich.

2 Stand der Technik und Forschung

Eine Karosseriebaugruppe wird in verschiedenen Fertigungsstufen mit den dazu notwendigen Fertigungsverfahren hergestellt. Der Werkstoffmix der Einzelbauteile induziert Vorgaben und Herausforderungen für den Herstellungsprozess der Rohkarosserie eines Fahrzeugs [10]. Zur Anfertigung der Karosseriebaugruppe ist eine geeignete Füge-technik für einen form- oder kraftschlüssigen Verbund auszuwählen. Die produzierten Einzelteile und Baugruppen unterscheiden sich hinsichtlich relevanter Qualitätsfaktoren nicht nur aufgrund des gewählten Werkstoffs und des Fügeverfahrens. Es gilt daher, die Ursachen für die Formabweichungen der Bauteile/-gruppen nach dem jeweiligen Schritt der Prozesskette zu analysieren und geeignete Kompensationsmaßnahmen zur Reduzierung abzuleiten [11]. Die Formabweichungen der Einzelteile und Baugruppen werden mittels definierter Toleranzvorgaben bewertet.

Den Schwerpunkt dieses Kapitels bilden daher die eingesetzten Fertigungsprozesse und Werkstoffe vom Einzelbauteil bis zum Zusammenbau sowie Beurteilungsmethoden ihrer Qualitätskriterien. Das bisherige Wissen zur simulativen Abbildbarkeit der Prozesse und ihrer schwankenden Einflussgrößen schließt das Kapitel ab.

2.1 Fertigung von Karosseriebaugruppen

Bei der Fertigung von Karosseriebaugruppen gilt es, die Erwartungen der Interessensgruppen zu berücksichtigen [12]. Aus den Kundenanforderungen resultieren Vorgaben für die Prozesse und Produkte zur Herstellung kostengünstiger und robuster Karosseriebaugruppen [12]. Es konkurrieren funktionale und designbezogene Aspekte [13]. Nach Birkert [14] können folgende vier Kategorien zugeordnet werden:

- **Funktionalität** (Maßhaltigkeit, Steifigkeit und Festigkeit, Gewicht, Aerodynamik, Korrosionsbeständigkeit und Temperaturverhalten)
- **Technische Herstellbarkeit** (Aufbaureihenfolge, Messbarkeit, Maßhaltigkeit und Lackierbarkeit)
- **Wirtschaftliche Herstellbarkeit** (Material- und Energieeinsatz, Ausbringung/Nacharbeit)
- **Optik** (Oberflächengeometrie/Design)

Aus den aufgelisteten Kategorien können die Merkmalsausprägungen der gesamten Rohbaukarosserie, den Baugruppen und letztendlich den Einzelteilen zugeordnet werden. 200-500 Einzelteile (Blech-, Gussteile) werden zu (Unter-)Baugruppen verbunden, bis weitere Rohbau-, Oberflächen- und Montageschritte zur Herstellung der kompletten Karosserie erfolgen.

2.1.1 Werkstofflicher Mischbau für den Karosserieleichtbau

Neben dem funktionalen Aspekt des Gewichts sind Karosseriebaugruppen hinsichtlich der Steifigkeit und Festigkeit von Einzelbauteilen (ET) auszuwerten. Reduzierungen des Bauteilgewichts bei einem gleichzeitigen Erhalt der Bauteilfunktionen können durch die partielle Verringerung der Blechdicke erreicht werden. In Anlehnung an Braess/Seiffert [15] wird die Leichtbaugüte (1) als Beurteilungskriterium einer Karosseriebaugruppe wie folgt definiert:

$$\text{Leichtbaugüte } L = \frac{m_{\text{Baugruppe}}}{c_t * A_{\text{proj}}} \left[\frac{\text{kg} * 10^3}{\text{Nm}^{\circ} * \text{m}^2} \right] \quad (1)$$

Die Leichtbaugüte stellt eine Maßzahl dar, um den Zusammenhang zwischen dem Baugruppengewicht $m_{\text{Baugruppe}}$, der statischen Torsionssteifigkeit c_t und der projizierten Fläche der Baugruppe A_{proj} darzustellen. Das Gewicht der Baugruppe berechnet sich aus dem Quotienten der spezifischen Dichte ρ des Werkstoffes und dem Volumen der Baugruppe.

Die Kennwerte für Festigkeit und Bauteilsteifigkeit sind werkstoff- und geometrieabhängig. Im Spannungs-Dehnungsschaubild von Bild 1 sind in Anlehnung an DIN 50145 ausgewählte Werkstoffkennwerte dargestellt. Hinsichtlich des Verformungsgrades werden elastische und plastische Bereiche getrennt. Im Gegensatz zum reversiblen Materialverhalten im elastischen Bereich bis zur Streckgrenze R_{el} ist der plastische Bereich durch eine irreversible Verformung des Werkstücks gekennzeichnet. Die Dehnung ε wird über der Spannung σ aufgetragen.

Die Zugfestigkeit R_m bezeichnet die Nennspannung, bei der die Gleichmaßdehnung A_g vorherrscht. Bis zur Gleichmaßdehnung A_g verformen sich die Volumina innerhalb des Messbereichs gleichermaßen. Bei Erreichen der Zugfestigkeit schreiten die plastischen Verformungen lokal im Bereich des geringsten Probenquerschnittes bis zur Einschnürung und Bruchdehnung A fort. Nach der Entlastung einer eintretenden plastischen Verformung besitzt das Bauteil eine ungleichmäßige Verteilung der

Werkstoffverformungen. Eine erneute Belastung in umkehrender Belastungsrichtung führt zu einem niedrigeren Elastizitätsmodul und somit zu einem früheren Beginn der plastischen Verformung [17]. Dieses Verhalten ist in der Literatur unter dem Begriff Bauschinger-Effekt bekannt. Für eine gute Vorhersage des Materialverhaltens ist daher die Formänderungsgeschichte des jeweiligen Bauteils einzubeziehen [18].

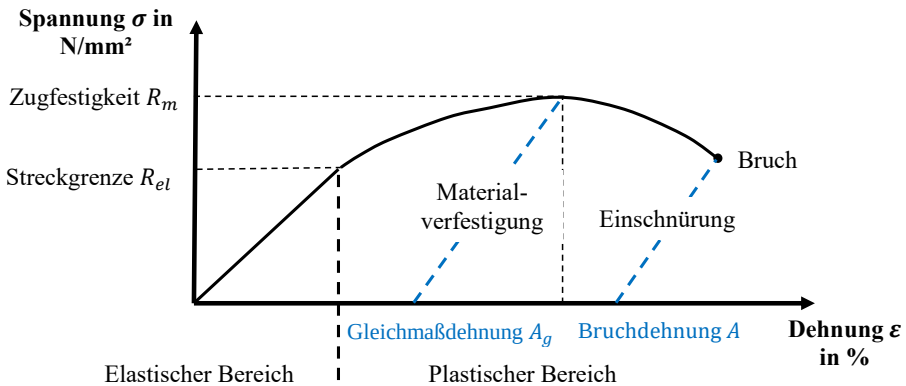


Bild 1: Elastoplastisches Werkstoffverhalten im Spannungs-Dehnungsdiagramm [16]

Für die Herstellung von Karosseriebaugruppen kommen in Anlehnung an [19] unterschiedliche Stahl- und Aluminiumwerkstoffe mit differierenden strukturelevanten mechanischen Werkstoffkenngrößen (E-Modul, Zugfestigkeit) zum Einsatz. Von einem werkstofflichen Mischbau wird in der Literatur dann gesprochen, wenn der prozentuale Anteil des zweiten oder dritten Werkstoffes 5 % überschreitet. 5000er-Aluminiumlegierungen werden vorwiegend für Strukturbauteile im nicht-sichtbaren Bereich aufgrund der induzierten Fließfiguren eingesetzt [20]. Gegenüber der Verwendung eines Reinaluminiums führt die Mischkristallhärtung des Legierungszusatzes Magnesium zu einer Festigkeitssteigerung. Weiterhin nehmen das Verfestigungsverhalten sowie die Bruchdehnung durch einen erhöhten Magnesiumgehalt zu [21]. Bei den 5000er-Aluminiumlegierungen führt die Zugabe von Mangan zu einer Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit, Schweißseignung und Festigkeitssteigerung gegenüber den 6000er- und 7000er-Aluminiumlegierungen [21]. Zudem werden zur Anfertigung von Karosseriebaugruppen die aushärtbaren 6000er-Aluminiumlegierungen genutzt und im Außenhautbereich eingesetzt. Neben Magnesium enthalten die 6000er-Aluminiumlegierungen das Legierungselement Silizium. Durch die Mischkristallhärtung mit (teil-)kohärenten und inkohärente Ausscheidungen wird die Ausgangsstreckgrenze deutlich erhöht [22].

Ergänzende Erläuterungen auf atomarer Strukturebene und zu den Werkstoffeigenschaften verschiedener Aluminiumlegierungen sind der Literatur von Altenpohl [23] zu entnehmen.

2.1.2 Herstellungsprozess und Kategorisierung von Anbauteilen

Neben dem werkstofflichen Mischbau gibt es bei der Herstellung von Karosseriebaugruppen eine Kombination von Schalen- und Rahmenstrukturbauweise: den strukturellen Mischbau. Eine Rahmenstrukturbauweise stellt eine tragende Fahrzeugstruktur dar, welche aus profilförmigen Komponenten besteht [24]. Die Profile werden an den Ecken und Knoten mit Druckussteilen zu einem „Rahmen“ verbunden, welcher durch die Blechteile – Funktions- und Beplankungsteile – zur Karosserie vervollständigt wird. Die Blechteile tragen nicht zur Erhöhung des Steifigkeits- und Festigkeitsverhaltens bei. Die Schalenbauweise ist als Erweiterung der Rahmenstrukturbauweise zu sehen. Durch die schalenförmige Zusammenbaustruktur wird neben der funktionalen Aufnahme der Karosserieanbauteile in seiner Gesamtheit den Funktionalitäten wie Biege-, Torsionssteifigkeit und Crashverhalten Rechnung getragen.

Ziel einer Kombination des strukturellen und werkstofflichen Mischbaus ist, die Anzahl der Einzelteile und Baugruppen zu reduzieren. Die Kosten der Karosserie werden reduziert und die für das Crashverhalten erforderlichen Festigkeits- und Steifigkeitswerte der Gesamtstruktur verbessert. Durch die Verwendung einer Aluminium-Rahmenbauweise können die Kosten gegenüber den in Stahl-Schalenbauweise gefertigten Karosserien ansteigen [14].

Anbauteile sind von den fest mit der Karosserie verbundenen Baugruppen der Karosserie abzugrenzen [25]. Unterteilt werden diese in die Unterkategorien Türen, Klappen, Stoßfänger und Kotflügel [26]. Weiterhin werden bei den Karosseriebaugruppen Außenhautbauteile, Struktur- und Verstärkungsbauteile gegeneinander abgegrenzt. Unterschiede in den Konstruktionsprinzipien und den gewählten Werkstoffen sind aufgrund ihrer Ansprüche an die Optik und die geforderten Funktionsweisen vorhanden. Eine beispielhafte Zuordnung von Außenhautbauteilen, Verstärkungs- und Strukturbauteilen ist anhand der Explosionsansicht der Motorhaube einer E-Klasse in Bild 2 dargestellt.

Als Außenhautbauteile werden Karosseriebaugruppen bezeichnet, welche sich im Sichtbereich des Kunden befinden und höchste Anforderungen hinsichtlich der optischen Wahrnehmung erfüllen müssen. Die Vorgabe für Oberflächenqualität entspricht sogenannter Class-A-Oberflächen. Diese sind bei der Methodenplanung, Auslegung von Umformprozessen und Werkzeugen sowie bei der Konstruktion von Fügevorrichtungen zu berücksichtigen.

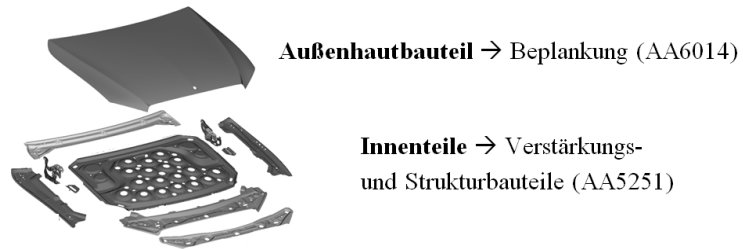


Bild 2: Zuordnung von Außenhaut-, Verstärkungs- und Strukturbauteilen anhand einer beispielhaften Motorhaubenbaugruppe

Strukturbauteile befinden sich im Gegensatz dazu im nicht sichtbaren Fahrzeugbereich und dienen der Schaffung der strukturellen Werkstoffeigenschaften. An den Strukturbauteilen können weitere Anbauteile befestigt werden [14]. Strukturbauteile werden teilweise aus Aluminium gefertigt und haben gegenüber Stahl verminderte Festigkeitswerte. Durch den Einsatz von Verstärkungsteilen ist eine lokale Erhöhung der Strukturfestigkeit des Bauteils möglich.

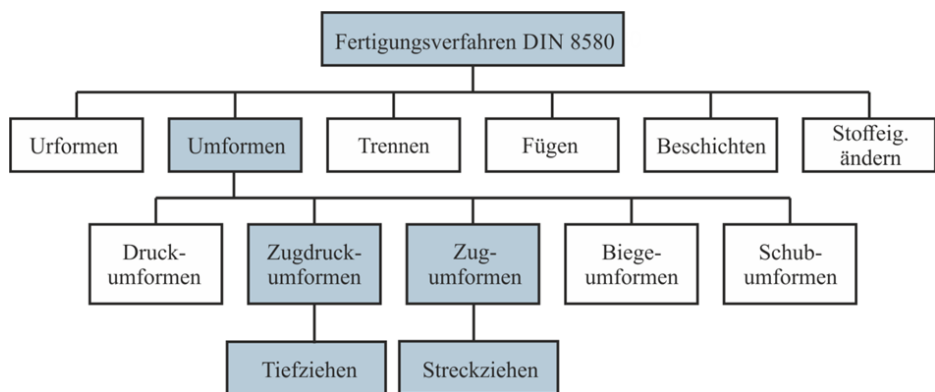


Bild 3: Einordnung der Fertigungsverfahren Tiefziehen und Streckziehen nach DIN 8582

Bei der Einzelteilherstellung sind verschiedene Fertigungsschritte und Verfahren zu durchlaufen. Neben Tiefziehvorgängen, in der Literatur oftmals idealisiert durch einen zylindrischen Napf dargestellt, findet bei der Herstellung von Blechbauteilen Streckziehvorgänge nach [27] oder eine Kombination aus Tief- und Streckziehen statt. Die Umformverfahren lassen sich den sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 in Bild 3 zuordnen.

Das Fertigungsverfahren Umformen wird nach DIN 8582 gemäß folgender Kriterien klassifiziert: Art, Richtung der Umformkräfte und verwendete Werkzeuge. Beim Zugdruckumformverfahren Tiefziehen wird nach DIN 8582 beim Umformen ein Werkstück durch plastische Deformation hergestellt. Die Masse bleibt gemäß dem Gesetz der Volumenkonstanz unverändert und der Zusammenhalt des Stoffes wird beibehalten. Das Fertigungsverfahren Streckziehen ist nach DIN 8584 ein Zugumformverfahren, bei welchem ein eingespanntes Werkstück mit Zugbeanspruchung getieft wird.

Zur Herstellung von Karosseriebauteile folgen den Tiefzieh- oder Streckziehoperationen die Verfahrensschritte Beschneiden, Ausschneiden, Lochen, Biegen und Kalibrieren. Informationen zu diesen Verfahren können der Fachliteratur nach Lange [28] entnommen werden.

Der Prozessablauf beim Tiefziehen setzt sich aus mehreren Vorgängen zusammen [28]. Nach dem Einlegeschnitt des zugeschnittenen Bleches (Platine) wird der Abstand zwischen Blechhalter und Matrize geschlossen. Anschließend wird weg- oder kraftgesteuert eine definierte Flächenpressung oder Kraft auf den Blechhalter aufgebracht. Das Ziel ist die Vermeidung der folgenden Ziehfehler: Faltenbildung 1-ter, Faltenbildung 2-ter Ordnung oder Bauteilreißer.

Der beim Tiefziehen entstehende Hohlkörper verursacht in den Bereichen Ziehteilboden, Zarge und Flansch unterschiedliche Spannungszustände (siehe Bild 4). Um die Ursachen und Auswirkungen des Spannungs- und Formänderungszustands auf die Blechdicke zu beschreiben, werden Bereiche nach Ort und Art auftretender Umformkräfte gegliedert [29]:

- (Ziehteil-)Boden (Krafteinleitungszone)
- Stempel(kanten-)radius (Bereich zwischen Boden und Zarge)
- (Ziehteil-)Zarge (Kraftübertragungszone)
- (Zieh-)Radius (Bereich zwischen Zarge und Flansch)
- (Ziehteil-)Flansch (Umformzone)

Mit der Annahme einer rotationssymmetrischen Napfgeometrie entstehen Radialspannungen σ_r (Flansch, Zarge und Boden), Tangentialspannungen σ_t (Flansch, Zarge und Boden) und Normalspannungen σ_n im Flanschbereich. Gegenüber dem zweiachsigen Spannungszustand (Tangential- und Radialspannung) im Boden dominieren Radialspannungen im Zargenbereich. Zugspannungen herrschen aufgrund der indirekten Krafteinleitung im Boden, der Zarge und im Flansch. Dort findet der Großteil der Umformung statt.

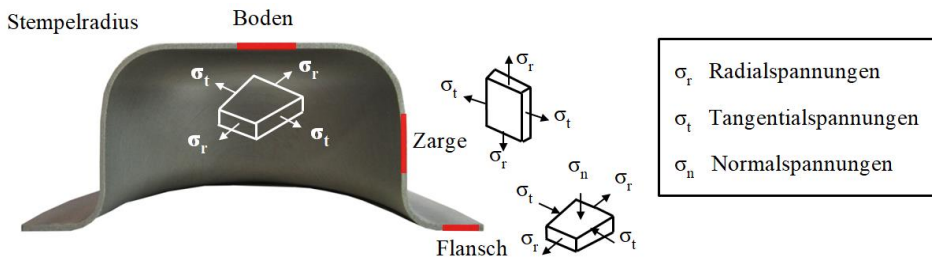


Bild 4: Spannungszustände eines rotationssymmetrischen Napfes nach dem Tiefziehen [30]

Im Bereich des Flansches überlagern sich Zug- und Druckspannungen. Während des Tiefziehvorgangs wirkt an dem in Bild 4 oben rechts dargestellten, infinitesimalen Volumenelement eine Zugbeanspruchung durch die Flanschverkürzung. Die resultierende Materialanhäufung führt zur indirekten Ausbildung von tangentialen Druckspannungen. Weitere Kenngrößen und Begriffe des Tiefziehens [31] sowie Beschreibungen zur Formänderungsfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur T und der Dehnrates sind in [32] beschrieben.

Beim Streckziehen mit starren oder beweglichen Spannelementen fließt kein Werkstoff nach. Der seitliche Flansch dient als Spannelement, um die Zugbeanspruchung in die Umformzone einzuleiten. Zudem wird in allen Bereichen, mit Ausnahme der äußeren beiden Flanschzonen, Umformarbeit geleistet. Genauso wie beim Tiefziehverfahren können vereinfacht die Spannungen in Blechdickenrichtung hinsichtlich ihrer Plastizität außer Acht gelassen werden [27]. Für weiterführende Erklärungen wird aufgrund der bisherigen Beschränkung des Streckziehverfahrens auf sehr flache Teile (Tür- und Dachbeplankungen) auf die Fachliteratur [27] verwiesen.

Je nach Beanspruchungsart (Zug-Druck oder Zug-Zug) und Bauteilgeometrieform überwiegt der Streck- oder Tiefziehanteil bei der Herstellung von Karosseriebauteilen. Es treten andere Spannungs- und Formände-

rungszustände in Abhängigkeit der Bauteilwölbungen auf. Exemplarisch ist dies in Bild 5 anhand des Prinzipbauteils S-Rail aufgezeigt.

Bei dem Prinzipbauteil kommt es aufgrund der geometrischen Formen zu verschiedenen Spannungszuständen und Flanscheinzügen. In den konvexen (konkaven) Bereichen entsteht wegen der Abnahme (Zunahme) der Flanschfläche ein Zug-Druck(-Zug)-Spannungszustand. In Anlehnung an Reissner [33] führen die durch äußere Kräfte verursachten Spannungen zu einem Fließen in der Umformzone. Das Material fließt aus dem Flanschbereich über die Bauteilzarge in den Ziehteilboden. In Abhängigkeit von der jeweiligen Bauteilkrümmung entstehen in der Umformzone folgende Formänderungszustände:

- Blechaufdickung des Flansches in konvexen Flanschbereichen
- Blechausdünnung des Flansches in konkaven Flanschbereichen

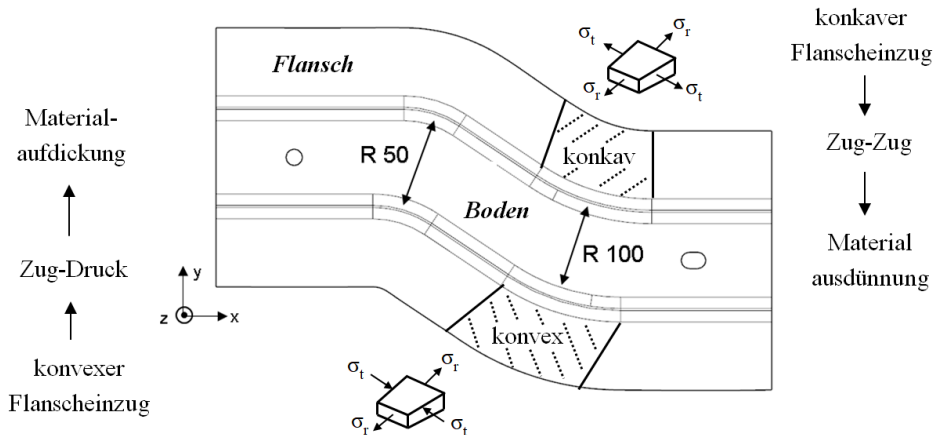


Bild 5: Entstehende Spannungszustände und Werkstoffveränderungen in Abhängigkeit von der Bauteilwölbung (konvex/konkav) eines tiefgezogenen Prinzipbauteils

2.1.3 Eingesetzte Fügetechniken zur Herstellung von Karosseriebaugruppen

Die Einzelteile einer Karosseriebaugruppe werden in einem weiteren Schritt zu funktionsfähigen Unterbaugruppen und Baugruppen zu verbunden. Für jede Werkstoffkombination ist das passende Fügeverfahren auszuwählen [34]. Des Weiteren sind den serienfertigungsbezogenen Aspekten beim Fügen von Karosserieeinzelbauteilen zu genügen [25].

Eine Zusammenstellung der genormten Fügefertigungsverfahren ist den sechs Gruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8593-0 (2003) zu

entnehmen. Durch das Fügen wird eine örtliche Verbindung von zwei oder mehreren Werkstoffen für einen längeren Zeitraum geschaffen. Die Gruppe Fügen durch Umformen umfasst das punktförmige Durchsetzfügeverfahren, in der Literatur zudem als Clinchen bezeichnet, sowie die inkrementelle Umformverfahren Falzen bzw. Bördeln. Für eine detaillierte Beschreibung der nicht in der Arbeit untersuchten Fügeverfahren wird auf die dazugehörigen DIN-Normen verwiesen.

In Abhängigkeit von den Anforderungen an die Fügeverbindungen und den Werkstoffkennwerten der Fügepartner werden mechanische oder thermische Fügeverfahren genutzt. Mechanische Verbindungstechniken weisen eine höhere Prozesssicherheit und Robustheit sowie eine größere Flexibilität gegenüber thermischen Fügeverfahren auf [8]. Die Fügeverfahren Clinchen (punktförmiges Wirkprinzip) und Widerstandspunktschweißen (linienförmiges Wirkprinzip) werden im Automobilbau häufig eingesetzt [35].

Beim Clinchen sind keine zusätzlichen Fügeelemente oder Hilfsstoffe für den Fügeprozess notwendig. Weiterhin ist das Verfahren sehr gut automatisierbar und Fügeverbindungen sind einfach und kostengünstig ohne Nachbehandlung herstellbar. Nachteilig ist die Musterbildung auf der Oberfläche, wodurch der Einsatz für das Fügen von Außenhaut- und Strukturbauteilen von Karosserien entfällt. Der Prozess des Durchsetzfügens setzt sich gemäß Bild 6 aus den Schritten Positionieren, Durchsetzen und Einsenken/Stauchen/Fließpressen zusammen.

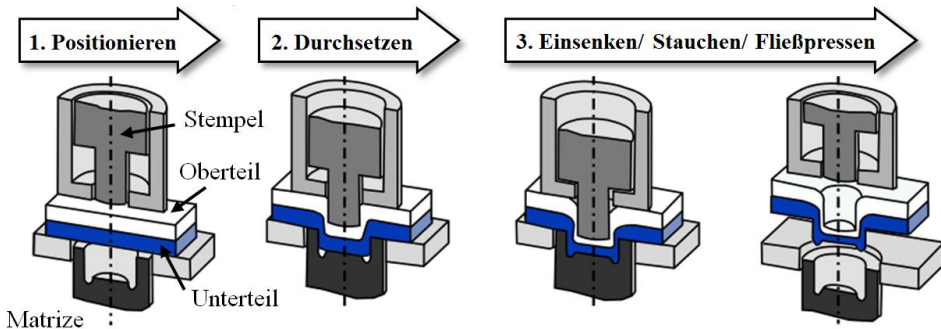


Bild 6: Schematischer Ablauf des einstufigen Durchsetzfügens ohne Schneidanteil [36]

Weiterführende Erklärungen zum Prozessablauf des Durchsetzfügens sind der Literatur nach [36] zu entnehmen. Für die Anfertigung einer Karosseriebaugruppe wird eine Vielzahl solcher in Bild 6 rechts dargestellten Durchsetzfügepunkte benötigt. Bei den punktförmigen, thermischen Fügeverfahren nimmt das Verfahren Widerstandspunktschweißen stetig an Bedeutung zu [37]. Nach dem Verpressen der Werkstücke durch

zwei Elektroden, wird durch das Hinzuführen eines Schweißstroms und ein örtliches Erwärmen ein Schweißvorgang ermöglicht. Für weiterführende Informationen zum Widerstandspunktschweißen wird auf die Fachliteratur von [38] und die entsprechenden Normen DIN 1910-100, DIN 8593-6 und DIN EN 14610 verwiesen. Ansätze für die simulative Umsetzung sind [39] und [40] zu entnehmen.

Des Weiteren finden im Karosseriebau linien- und bahnförmigen Fügeverfahren Remotelaserbahnschweißen (Robscan) und Rollfalzvorgänge Anwendung. Remotelaserschweißverbindungen ermöglichen kürzere Prozesszeiten. Für Erklärungen des Verfahrensprinzips wird auf [41] zurückgegriffen. Ein vereinfachtes Simulationsmodell ist in [42] zu finden. Das Rollfalzen ist ein Fertigungsverfahren, bei dem die Flansche abgekanteter Außenhautbauteile schrittweise umgebogen und mit Innenteilen gefügt werden [43].

2.2 Maßhaltigkeit des Einzelbauteils und der Baugruppe

Durch die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Umformprozesse entstehen Einzelteile, welche sich hinsichtlich ihrer Geometrie zur definierten Soll-Geometrie unterscheiden. In DIN EN ISO 286-1 (2010) wird die Soll-Geometrie – der CADo-Datensatz – durch das Nennmaß, als Maß eines Geometrieelements mit einer perfekten Form definiert. Den primären Datensatz der Baugruppe (CADo) legt der Bauteilkonstrukteur als Nenngröße fest. Dazu passend ist das jeweilige Istmaß ein Maßelement (DIN EN ISO 14660 1, 1999), welches durch die Größe des Geometrieelements gemessen wird. Eine Maßabweichung ist als Differenz zwischen Ist- und Nennmaß zu verstehen, welche durch die Größe der Maßhaltigkeit genauer quantifiziert wird.

Zur Bestimmung der Maßhaltigkeit von Karosserieeinzelteilen und -anbauteilen werden die Ergebnisse hinsichtlich vorgegebener Toleranzen bewertet (siehe Abschnitt 2.3). Erst das Ergebnis des letzten Schrittes einer aufeinander aufbauenden Prozesskette liefert das zu analysierende Kriterium für die Form- und Maßhaltigkeit [44].

Zur korrekten Bestimmung der Maßhaltigkeit von Einzelteilen und Baugruppen ist nach DIN EN ISO 5459 (2011) eine exakte Bauteilaufnahme und Bauteilausrichtung erforderlich. Konventionell wird bei eigensteifen Bauteilen ein Aufnahmeprinzip verwendet, bei welchem drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade in ihrer Bewegungsrichtung

eingeschränkt werden. Forschungsergebnisse [45] zeigen Lösungsansätze für nicht eigensteife Baugruppen, wie beispielsweise großflächige Karosseriebaugruppen. Die Primärebene wird demnach um weitere Aufnahmepunkte erweitert. Diese wirken einer starken Baugruppenverformung entgegen, welche sonst durch ihr Bauteilgewicht induziert werden würde. Ein statisch überbestimmtes System bzw. Aufnahmekonzept nach DIN EN ISO 10579 (2013) ist die Folge.

2.2.1 Ursachen für Maßhaltigkeitsabweichungen

Um geeignete Stellgrößen zur Veränderung der Maßhaltigkeit von Einzelteilen zu finden, ist es wichtig, die Ursachen für Abweichungen der Istmaße zu analysieren. Abhängig von der Art des Prozesses gibt es nach Hein [46] verschiedene Faktoren mit unterschiedlich hohem Einfluss auf die Maßhaltigkeit des entstehenden Produktes. Bild 7 zeigt am Beispiel des Tiefziehprozesses die Hauptkategorien, welche Einfluss auf die Rückfederung des gefertigten Bauteils haben: Werkstückgeometrie und Spannungsverteilung. Spannungsverteilungen über den Bauteilquerschnitt werden durch eine plastische Formänderungsverteilung unter Berücksichtigung des elastischen Werkstoffverhaltens induziert. Die beschriebenen Kategorien beziehen sich auf die Einflussfaktoren für die rückgefederten Einzelteile aus dem Presswerk. Neben den Prozessparametern haben die elastoplastischen Werkstoffkenngrößen einen erheblichen Einfluss auf die Maßhaltigkeit. Prozessparameter und die Ziehanlage komplettieren die Einflussfaktoren auf die Maßhaltigkeit des Einzelteils aus dem Presswerk [47].

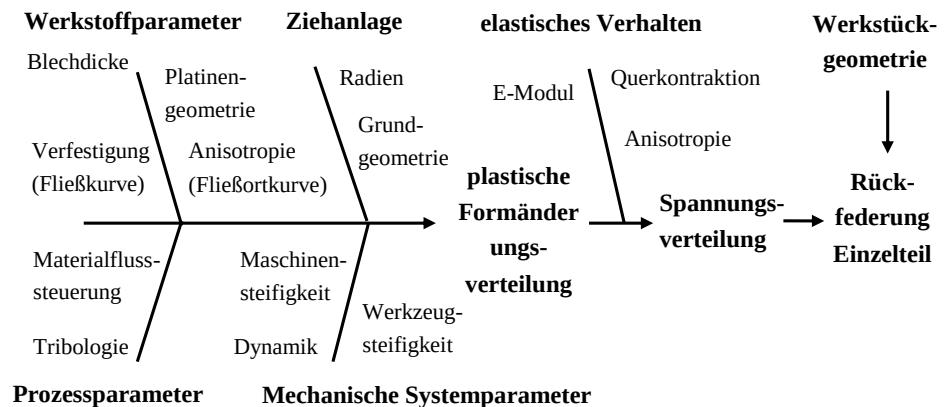


Bild 7: Kategorisierung der Einflussfaktoren auf die Maßhaltigkeit eines gefertigten Ziehteils [48]

Der Herstellungsprozess von Karosseriebaugruppen besteht aus einer Vielzahl an Karosserieziehschritten mit nachgelagerten Fügeschritten. Daher werden chronologisch die verfahrenstypischen Prozessfehler des Karosserieziehens und der Fügeverfahren aufgezeigt. Das Phänomen der Rückfederung tritt nach jedem Einzelprozess auf und wird daher fokussiert.

1) Maßhaltigkeitsabweichungen nach Tief- und Streckziehprozessen

Einstellungen der Einflussgrößen des Tiefziehprozesses können gemäß Bild 7 zu Versagensfällen sowie Abweichungen zum Nennmaß führen. Versagensfälle werden in der Literatur [49] exemplarisch an Rundnäpfen erläutert.

Bei einem Rundnapf können Bereich des Flansches Faltenbildungen 1. Ordnung auftreten. Dies ist auf tangential Druckspannungen im Bereich des Flansches zurückzuführen [50]. Die Höhe des Blechhalterdrucks ist in diesem Fall als zu gering anzusehen.

Faltenbildungen 2. Ordnung im konischen Zargenbereich des Rundnapfes können die Folge zu niedriger Blechhalterkräften und zu hoher Druckspannungen sein. Entscheidend ist das Verhältnis der radialen Zugspannungen zu den tangentialen Druckspannungen im Bereich der Bauteilzarge [51]. Weiterhin sind geometrische Verhältnisse, wie der Zargenwinkel Ψ oder das Verhältnis Stempel- zu Matrizenradius, ein Indiz für die Ausprägung der Falten 2. Ordnung. Werkstückwerkstoff und Blechdicke beeinflussen die Auftrittswahrscheinlichkeit von Falten 2. Ordnung. Bei der Herstellung von Außenhautbauteilen ist die Faltenbildung zu vermeiden, wenngleich schräge Bauteilzargen die Faltenbildung begünstigen.

Neben der Faltenbildung sind Bodenreißer ein weiteres Versagenskriterium beim Tiefziehen von Karosseriebauteilen. Reißer treten im Bauteilboden auf, falls durch zu hohe Blechhalterkräfte die Zugfestigkeit des Werkstücks überschritten wird. Durch die Zugspannungen dünnt das Bauteil in der Zarge aus, was ein Versagen in Form eines Reißers zur Folge hat [52].

2) Maßhaltigkeitsabweichungen nach mechanischen/thermischen Fügevorgängen

Prozessfehler in Form von Maßabweichungen treten auch nach den anschließenden Fügeprozessen auf. Induziert werden die Maßhaltigkeitsabweichungen durch das Fertigungsverfahren selbst und durch die Abweichungen vorgelagerter Prozessschritte. Die geometrischen Abweichungen der Einzelbauteile bedingen bei vielen Fügeprozessen eine Füge-

station, um die Bauteile in eine definierte, gespannte Bauteilelage für den Fügeprozess zu einer Baugruppe zu bringen. Nach dem Entspannen tritt wieder eine Bauteilrückfederung auf.

Einflüsse des Zusammenbauprozesses auf die Maßhaltigkeit sind insbesondere in den Arbeiten nach Hu [53], Voß [54] und Leuschel [55] aufgeführt und werden wie folgt gegliedert:

- Durchgängigkeit der Prozesskette
(Messlagerung der Bauteile und Baugruppen)
- Ausrichtung
(Bezugsstellen Einzelteile und Baugruppe Messung - Simulation)
- Einstellungen Fügezeuge
(Abweichungen bei der Position und Stellung)
- Zusammenbaufolge von Einzelteilen zur Baugruppe
- Einfluss des Fügeverfahrens
(mechanisch - thermisch, punktförmig - linienförmig)

Für die Fügeverfahren Durchsetzfügen und Stanznieten hat Eckert [8] verschiedene Einflussfaktoren anhand von Einfach- und Mehrpunktproben aus dem Werkstoff AA6181 untersucht. Zur Beurteilung der Maßhaltigkeit werden zwei lokale Verzugsarten erörtert: „in-plane“ und „out-of-plane“ Verzug. Gemäß Bild 8 zeigt der „in-plane“ Verzug nach Eckert [8] und Fan [37] die Änderung der Formhaltigkeit in der Blechebene an. Die Begriffe „out-of-plane“ und „normal distortion“ werden für den Verzug außerhalb und senkrecht zur Blechebene genutzt. Falls nicht explizit erwähnt, wird in der Arbeit der „out-of-plane“ Verzug ausgewertet.

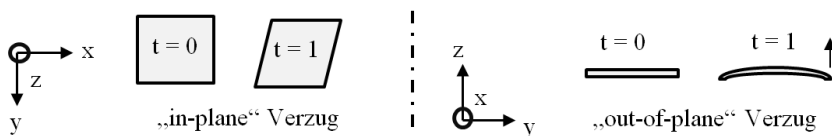


Bild 8: Unterscheidung der lokalen Verzugsarten „in-plane-“ und „out-of-plane“ [37]

Gemäß der Studie zu mechanischen Fügeprozessen korreliert die Vorverformung des Einzelteils mit dem Maß des Baugruppenverzugs [8]. Durch die Einzelsteifigkeit und Vorhaltemaße kann gezielt die Baugruppenmaßhaltigkeit beeinflusst werden. Untersuchungsergebnisse zum Widerstandspunktschweißen nach [56] und [57] zeigen einen höheren Verzug am Flansch als beim Halbhohlstanznietverfahren. Generell hängen Aussagen über die Verzugsanfälligkeit der Fügeverfahren von der Werkstoffpaarung und dem Verfahren selbst ab.

3) Maßhaltigkeitsabweichung: Elastische Rückfederung

Bauteile weichen nach den Umform- und Fügeprozessen von ihrer Wunschform ab. Die entstehende Maßhaltigkeitsabweichung Rückfederung wird nach ihrem Auftreten klassifiziert und ihre Ursachen dargestellt. Einflussgrößen auf das Rückfederungsmaß werden aufgeführt.

Roll [58] unterscheidet in seinen Ausführungen zwischen zwei Arten der Rückfederung: der Biege- und der Membranrückfederung. An die Biegekanten/-radien der Bauteilgeometrie tritt die Biegerückfederung gemäß Bild 9 in Radien auf.

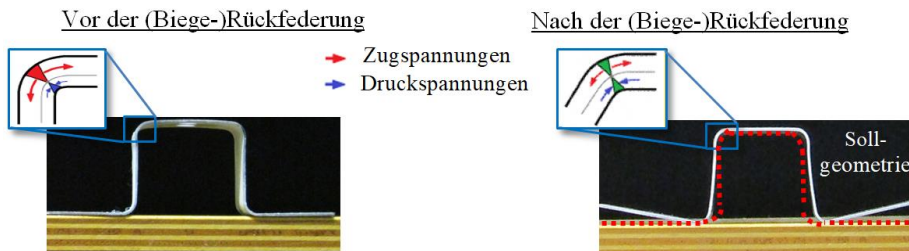


Bild 9: Vorherrschende Spannungszustände vor und nach der Biegerückfederung

Im linken Teil von Bild 9 herrscht bei geschlossenem Umformwerkzeug im Bereich des Stempelradius ein Ungleichgewicht der Zugspannungen am äußeren Radius und Druckspannungen im Inneren des Radius. Beim Ziehradius verhält sich der Spannungszustand umgekehrt. Die neutrale Faser in der Blechmitte trennt die beiden Spannungszustände. Durch das Öffnen des Werkzeuges oder der Spanner bedingen die Biegespannungen einen Abbau der elastischen Spannungen mit einer einhergehenden Plastifizierung des Werkstoffes. Das Bauteil bzw. die Baugruppe besitzt gemäß Bild 9 weiterhin reduzierte Zug- und Druckspannungen, ohne dass eine äußere Kraft aufrechterhalten wird. Es entstehen Eigenspannungen. Bei großflächigen Baugruppen, wie der Beplankung einer Motorhaube, kann diese Biegerückfederung mit Größenordnung bis ± 20 mm ausfallen.

Eine weitere Art der Rückfederung ist die Membranrückfederung. Membranspannungen wirken in der Bauteilfläche, insbesondere in schalenförmigen Werkstückbereichen sowie über der gesamten Blechdicke. Durch die Membranspannungen kommt es im Gegensatz zur Biegerückfederung zu einer dreidimensionalen Aufbiegung des Werkstücks. Je nach Spannungszustand (Zug, Druck, Zug-Druck) ist eine Werkstückdehnung/-stauchung die Folge.

Die dritte Art der Rückfederung ist die Rückbiegerückfederung. Eine ungleichmäßige Spannungsverteilung über die Blechdicke am Biegeradius induziert eine Rückbiegerückfederung (siehe Bild 9). Diese kann nach dem vereinfachten Modell nach Milch [59] analytisch abgeschätzt werden. Für ein vertieftes Studium zu den Zusammenhängen zwischen zugüberlagerten Biegespannungen und der Rückfederung, insbesondere bei höherfesten Stählen, wird auf die Arbeit von Hütte [60] verwiesen. Bei der Herstellung von Karosseriebaugruppen tritt demnach vermehrt eine Überlagerung aus Biege-, Membran- und Rückbiegerückfederung auf.

Einflussgrößen auf das Rückfederungsmaß werden in folgende Hauptgruppen untergliedert:

- Werkstoffeigenschaften
(E-Modul, Vordehnung, Streckgrenze, Verfestigung)
- Bauteilgeometrie (Wölbung, Krümmung, Biegeradius/Blechdicke)
- Prozessführung bei der Bauteilherstellung

Werkstoffeigenschaften (E-Modul, Streckgrenze, Verfestigungsverhalten)

Aus den Experimenten von Bur [61] zu den Einflussgrößen der Rückfederung geht hervor, dass das Rückfederungsmaß von den Werkstoffeigenschaften abhängig ist. Im Bild 10 wird anhand von H-Proben bei einem Stempelradius von 5 mm die Formhaltigkeit verschiedener Werkstoffe verglichen. Der Aluminiumwerkstoff AA5182 zeigt gegenüber CR3 bei einer Ausgangsblechdicke von 1 mm eine größere Abweichung der Ist- zur Soll-Geometrie auf.

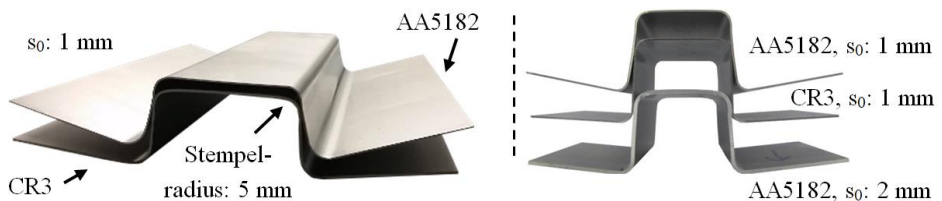


Bild 10: Umgeformte Hutprofile zum Vergleich des Einflusses verschiedener Werkstoffe und Blechdicken auf die Rückfederung

Bei gleichen Prozessparametern ist die Rückfederung abhängig von den Werkstoffeigenschaften. Der einachsige Zugversuch verdeutlicht die Abhängigkeit der Rückfederung von den mechanischen Kenngrößen E-Modul, Festigkeit und Formänderung. So führt ein höherer E-Modul E_{Stahl} gegenüber Aluminium $E_{\text{Aluminium}}$ im Faktor 3 zu einer höheren elastischen Dehnung ε_{el} von Aluminium gegenüber Stahl. Dies bewirkt bei

gleich hoher Belastung eine frühere Plastifizierung des Stahlwerkstoffes. Relativ gesehen ist dann der Anteil der elastischen zur gesamten Dehnung (elastische und plastische Dehnung) beim Stahlwerkstoff geringer, was folglich zu einer geringeren Rückfederung führt. Neben dem E Modul ist die Rückfederung von der Festigkeit des Werkstoffs und der dazugehörigen Streckgrenze sowie der Formänderung abhängig. Je höher die Streckgrenze und Formänderungen sind, desto höher ist der elastische Anteil an der gesamten Dehnung. Die Rückfederung steigt. Eine Abschätzung der Rückfederung kann mit folgender Näherungsformel (1) in Abhängigkeit des E-Moduls und der Proportionalitätsgrenze vorgenommen werden [62]:

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i Y}{Et} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i (R_{p0,2})}{Et} \right) + 1 \quad (2)$$

Veröffentlichungen demonstrieren anhand des Werkstoffes HCT780X, dass eine E-Modul-Reduzierung zu einer erkennbaren Veränderung des Rückfederungsmaßes führen kann [63].

Bauteilgeometrie

Des Weiteren wirkt sich die konstruktive Gestaltung der Bauteilgeometrie auf die Rückfederung aus. Einhergehend mit der Geometrie ist die Analyse des Zusammenhanges lokaler Steifigkeiten mit der Maßhaltigkeit tiefgezogener Aluminiumbauteile [64]. Zudem ändert sich der Spannungs- und Formänderungswiderstand bei geraden, konvexen oder konkaven Biegekanten. In Bild 11 sind drei Krümmungen dargestellt. Je nach geometrischer Gestaltung der Biegekanten resultieren unterschiedliche Spannungszustände und Rückfederungen [14].

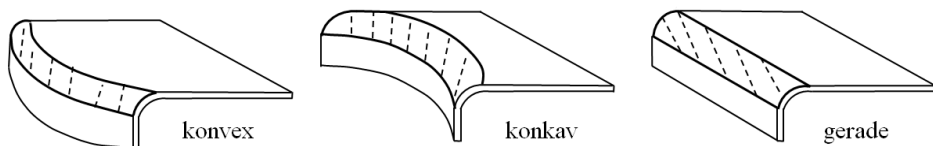


Bild 11: Krümmungszustände beim Biegen in Abhängigkeit von der Geometrie

Zusätzlich zur Biegerückfederung bei geraden Biegekanten treten bei konvexen und konkaven Krümmungszuständen Membranrückfederungen auf. Im Gegensatz zum Spannungszustand beim Biegen um gerade Biegekanten, sind die Formabweichungen bei konvexen und konkaven Biegekanten ungleichmäßiger. Je nach Ausprägung der konkaven und konvexen Radiuskrümmungen stellen sich unterschiedliche Bauteilsteifigkeiten

ein [65]. Eine Erhöhung der geometriebasierten Steifigkeit führt zu einer Verminderung der entstehenden Eigenspannungen, was wiederum zu einer Reduzierung des Rückfederungsverhaltens führt.

Bei der Analyse verschiedener Krümmungszustände ist in der Bauteilcharakteristik zwischen einfach- und mehrfach konvexen und konkaven Bauteilkrümmungen zu unterscheiden [66]. Um singuläre Effekte der verschiedenen Krümmungszustände im Kontext eines komplexeren Bauteils zu analysieren, wurden verschiedenste Demonstratorgeometrien entwickelt. Unterschiedlichste Maßhaltigkeitsfehler können anhand dieser Geometrien dargestellt werden [67].

Rückfederungsuntersuchungen an dem aus konkaven und konvexen Geometrieformen bestehenden Benchmarkbauteil S-Rail zeigen eine sehr gute Vorhersagegüte verschiedenster Simulationsprogramme [68]. Eine weitere Parameterstudie an zwei z-förmigen Blechen ergründet, welchen Einfluss Geometrie-, Werkstoff- und Diskretisierungsparameter haben [54].

Prozessführung:

Neben der Werkstoff- und Geometriewahl ist die Werkstückrückfederung von der gewählten Umform- oder Fügeprozessführung abhängig. Die Arbeit von Emrich zeigt dazu eine Analyse der Prozessrobustheit von Umformprozessen [69]. In simulativen und experimentellen Studien wurden durch die Analysen exemplarisch die Sensitivitäten der Prozessgrößen Platinengröße, Blechhalterkraft, Ziehsickengeometrie und der Schmierstoffmenge ermittelt.

Speziell der Einfluss der Blechhalterkraft auf die Rückfederung wurde in diversen Arbeiten, unter anderem für die Werkstoffe AA5754-o und DP-Stahl, anhand einer U-förmigen Testgeometrie ergründet [70]. Durch eine Modifikation der Blechhalterkraft variiert der Biegeanteil im Verhältnis zum Streckziehanteil. Der Anteil der elastischen Dehnung ändert sich, was nach den Ergebnissen von [71] zu einer anderen Rückfederung führt. Für die Blechhaltervariation wurde der Werkstoff AA5754-o verwendet. Eine weitere Möglichkeit ist die Adaption der konstanten Blechhalterkraft, indem diese während des Umformprozesses erhöht oder gesenkt wird. Durch die Prozessregelung entstehen im Blech niedrigere Zug- und Druckspannungen [61], was zu kleineren Rückfederungen führt. Für weitere Untersuchungen zur Schmierstoffmenge und Ziehsickengeometrie wird auf die Veröffentlichung von [72] verwiesen.

2.2.2 Stellgrößen zur Verbesserung der Formhaltigkeit

Um entstandene Verfahrensfehler in Folge der Rückfederung zu kompensieren, werden verschiedenste Strategien verfolgt. Eine Auswahl an möglichen Kompensationsmaßnahmen zur Verbesserung der Formhaltigkeit nach den Prozessen wird im Folgenden aufgeführt [14]:

- **Kontrolle der Blechhalterkraft:** Lokale und globale Korrekturmaßnahmen (abhängig von Bauteilsteifigkeit) durch Blechhalterkraftvariation [73] während der Umformung
- **Partielle Verformung der Bauteile:** Bei den Bereichen mit hohen Biegemomenten wird lokal die Blechdicke reduziert
- **Umformung** eines Bauteils in **mehreren Prozessschritten** und Zwischentemperierung zur signifikanten Verbesserung der Umformbarkeit von Werkstoffen [74]
- **Werkzeugkorrektur:** Möglichkeiten der Anpassung der Werkzeuggeometrien durch spring back und spring forward Methoden [75]
- **Weitere Ansätze:** Überbiegen des Biegeradius, Prägen des Biegebereiches, Reckbiegen oder lokale Erhöhungen der Werkstücktemperaturen zur Erzielung maßgeschneiderter Werkstoffeigenschaften [76]

Häufig wird auf die Stellgröße der Werkzeugkorrektur in mehreren Iterationsschleifen zurückgegriffen. Die Form des Umformwerkzeuges wird überarbeitet, sodass die Maßabweichung des Bauteils nach der Rückfederung möglichst gering ist. Für die Nullgeometrie des Werkzeuges wird mit Hilfe von numerischen Berechnungsverfahren eine Korrekturgeometrie ermittelt, was zu einer überbogenen Werkzeuggeometrie führt. Bei der Kompensation ist die Höhe des Korrekturfaktors auf Basis der berechneten Bauteilrückfederung festzulegen. Der Korrekturwert K – Verhältnis aus realem zu errechnetem Rückfederungswert – ist je nach Ausprägung als unter- ($K_i \leq 1$), über- ($K_i \geq 1$) oder proportional ($K_i = 1$) anzugeben.

2.3 Toleranzanalyse bei der Herstellung von Karosseriebaugruppen

Die Herstellung von Karosseriebaugruppen unterliegt fertigungsbedingten Qualitätsschwankungen. Der Kunde beurteilt die Qualität von fugenbildenden Kanten zwischen zwei Außenhautbauteilen anhand der Gleichmäßigkeit und Höhe des Fugenmaßes [77]. Des Weiteren sind Herstellungsprozesse robust zu gestalten. Jeder Fertigungsschritt führt zu Istmaßen, welche von den Sollmaßen abweichen und die in Abschnitt 2.2 aufgeführten Prozessfehler verstärken oder vermindern [77]. Um Aus-

sagen über die maximal zulässige Abweichung der Ist- zu Sollmaße zu tätigen, ist eine Definition von Toleranzbändern mit einer oberen und unteren Toleranzgrenze für die ermittelten Maßabweichungen erforderlich [78]. Gemäß DIN EN ISO 1101 werden die Toleranzarten nach Tabelle 1 wie folgt abgegrenzt: Form-, Lage- und Richtungstoleranzen. Die Toleranzen sind im Sinne einer qualitätskonformen Verbaubarkeit der entstehenden Produkte zu vergeben [12].

Tabelle 1: Klassifizierung ausgewählter Form-, Lage- und Richtungstoleranzen [79]

Formtoleranzen	Lagetoleranzen	Richtungstoleranzen
Geradheit	Position	Parallelität
Ebenheit	Symmetrie	Rechtwinkligkeit
Rundheit	Lauf	Neigung

Bei der Beurteilung von Karosseriekomponenten sind die Form- und Positionstoleranzen von Flächen- und Linienprofilen von besonderer Bedeutung [80]. Im Rahmen dieser Arbeit werden die häufig im Karosseriebau auftretenden wichtigen Freiformflächentoleranzen anhand des Kriteriums Geradheit als ein Element des Toleranzmanagements analysiert. In Bild 12 sind die methodischen Grundlagenarten des Toleranzmanagments aufgeführt.

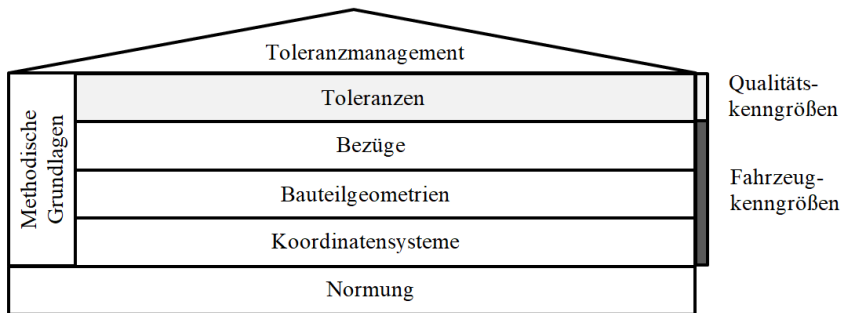


Bild 12: Toleranzmanagement zur Analyse von Qualitäts- und Fahrzeugkenngrößen

Qualitätskenngrößen – wie beispielsweise Toleranzen – werden in einem frühen Zeitpunkt des Produktentwicklungszykluses festgelegt. Das Toleranzmanagement zielt darauf ab, die Erfüllung der Bauteilfunktionen zu gewährleisten und gleichzeitig mit Hilfe eines optimalen Toleranzkonzeptes Karosseriekomponenten kostengünstig herzustellen. Gerade die Einhaltung von Toleranzen von Strukturbauteilen ist bedeutsam, da diese in weiteren Prozessschritten mit weniger eigensteifen Außenhautbauteilen gefügt werden [79]. Die fahrzeugtechnischen Grundlagen ergänzen die Elemente des Toleranzmanagements.

Aufgrund der Bedeutung der Einhaltung vorgegebener Einzel- und Zusammenbautoleranzen gilt es, die Toleranzen bei produzierten Prototypen und im Serienprozess zu prüfen [81] sowie gegebenenfalls Korrekturmaßnahmen mit dem generierten Wissen [82] abzuleiten. Aufgrund der steigenden Produktvielfalt erhöht sich der Absicherungsaufwand. Zukünftig werden reale durch virtuelle Prototypen ersetzt. Daher sind verstärkt digitale Toleranzanalysen wichtig, für welche eine Vielzahl an exakten Eingangsinformationen benötigen werden. Bereits heute verfügbare Toleranzanalysen auf Basis von CAD-Daten weisen automatisierte Berechnungsverfahren auf, ohne die Umform- und Fügehistorie des Zusammenbauprozesses zu berücksichtigen. Zu automatisierten Prognoseverfahren von Zusammenbautoleranzen, basierend auf elastischen Verformungsverfahren, gibt es erste Ansätze nach Litwa [83] und Klinger [84]. Die beiden Ansätze eignen sich, um eine erste Abschätzung über den Einfluss der nominellen Spann- und Fixierkonzepte auf die Maßhaltigkeit der Baugruppen geben zu können. Das elastoplastische Werkstoffverhalten der Fügepartner kann jedoch nicht hinreichend berücksichtigt werden.

2.4 Digitale Prozesskette im Karosserierohbau

Zur Analyse von Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge unter Berücksichtigung der Schwankungen der Eingangsgrößen werden digitale Methoden zur Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses von Karosseriekomponenten verwendet [85]. Durch den Einsatz von FEM können Fehlerquellen bei der Herstellung von Einzelbauteilen und Baugruppen detektiert und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, ohne Prototypenwerkzeuge und prototypische Fügestationen herstellen zu müssen [86]. Im Rahmen einer digitalen Fabrik werden so die Fertigungskosten reduziert und die Anlaufzeit bis zur Serienfertigung verkürzt [87]. Der Einsatz von digitalen Methoden beim Karosserieaufbauprozess nach Pinner [88] wird durch eine verbesserte Rechenleistung, zusätzliche Algorithmen und ständige Verbesserungen der Simulationsmethoden entlang der Fertigungsprozesskette eines Anbauteils ermöglicht [89].

Zur Absicherung des Herstellungsprozesses von Anbauteilen wird gemäß Bild 13 eine Vielzahl von Einzelprozessketten analysiert. Die im Presswerk produzierten Einzelteile werden mittels mechanischer oder thermischer Fügetechniken zu Zusammenbauten gefügt.

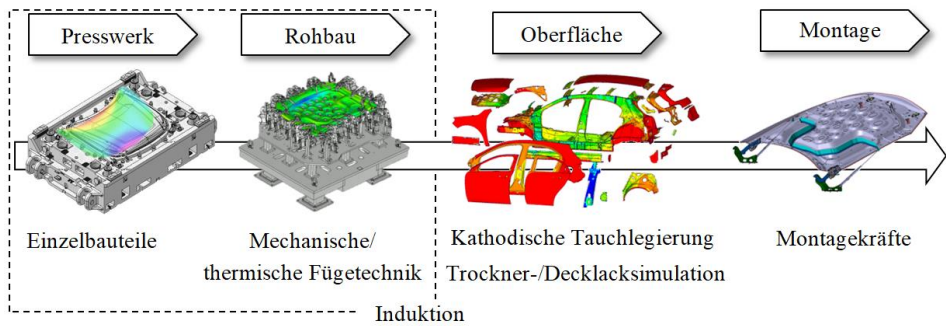


Bild 13: Durchgängige digitale Fertigungsprozesskette von Anbauteilen

Bei dem Rohbauprozess Rollfalzen werden die strukturstEIFen Innenteile mit Außenhautbauteilen (BepLankung) der einzelnen Anbaugruppen formschlüssig unter Verwendung eines Rohbauklebers verbunden [90]. Durch die induktive Wärmebehandlung des Rohbauklebers härtet diese Verbindung anschließend aus. In den Gewerken Oberfläche und Montage folgen Berechnungsmethoden zur simulativen Abschätzung des Einflusses von kathodischen Tauchlegierungen, Trockner, Decklack und Montagekräfte auf die Maßhaltigkeit der Baugruppe.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit steht die Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Einzelteilen und den gefügten Baugruppen im Fokus. Der folgende Abschnitt stellt daher relevante Studien im Bereich der Umform- und Fügesimulation zusammen. Für die FE-Methoden zu Trockner- und Montagesimulationen wird auf [26] verwiesen.

Untersuchungen zu Umformsimulationen

Existierende Simulationsmethoden in der Umformtechnik ermöglichen anhand des Werkstoffflusses, der Blechstärkenverteilungen und den Spannungs- und Dehnungstensoren die Signifikanz von Eingangsgrößen zu beurteilen [91]. Durch numerische Prozesssimulationen werden Werkzeug- und Bauteilgeometrien vor ihrer Anfertigung optimiert und Fertigungskosten eingespart [92]. Die Qualität der Simulationsmethoden und deren Vorhersagegüte hängen von der Werkstoffmodellierung und der Anzahl an Simulationsparametern ab [93]. Vorhandene Studien zur Kontaktmodellierung, kritische Zeitschrittweiten und Netzdichte (Netzfineinheit, Elementformen) lieferten wichtige Beiträge zur Verbesserung der Vorhersagequalität. Auf Basis der ermittelten Standardeinstellungen kann der Fokus auf Variationen der Umform- und Werkstoffparameter liegen.

Untersuchungen zu Fügésimulationen

Gemäß den Forschungsarbeiten im Bereich der Füge-technik gibt es verschiedenste Ansatzmöglichkeiten, den Fügeprozess simulativ zu modellieren. In Abhängigkeit des geforderten Detaillierungsgrades und des Analyseziels werden die Simulationstechniken für Füge-techniken in drei Arten eingeteilt [94]: Prozess-, Werkstoff- und Struktursimulation.

Bei der Prozesssimulation werden bei den mechanischen und thermischen Füge-techniken die Qualitätskriterien der Fügeverbindung sowie die Prozessstabilität beurteilt. Ziel der Werkstoffsimulation ist im Speziellen die Untersuchung des Werkstoffgefüges. Die Struktursimulation berechnet hingegen auf Basis ermittelter Eigenspannungen die Auswirkung des Prozesses auf beispielsweise den Bauteilverzug. Bei Struktursimulationen wird im Gegensatz zu den anderen beiden Formen eine Ersatzmodellierung des Prozesses verwendet. Der Rechenaufwand ist dadurch kleiner.

Veröffentlichungen zu Struktursimulationen des Durchsetzfügens zeigen Ansätze mit Ersatzmodellierungen dieses Fügeverfahrens [95]. In der Literatur finden sich unterschiedliche, mechanische Modellierungsansätze für die Fügepartner und Fügestellen wieder. Den Ansätzen nach Rick [39] oder Govik [96] ist gemein, dass die Fügepartner als Schalen- oder Volumenelemente modelliert werden können. Die Fügestellen werden über direktes Verbinden zweier Knoten oder n Balkenelemente, elastisch oder starr nach [42] realisiert. Der thermische Verzug wird für Balkenelemente [97] oder Schalenelemente [40] anhand entstehender Spannungen kalibriert. Wichtig ist an dieser Stelle, dass anhand von Versuchen mit unterschiedlichen Karosseriebauteilen weitere Verifikationen zu den benannten Fügeersatzmodellen stattfinden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass zu den Einzelprozessen Umformen und Fügen einige Veröffentlichungen über entstehender Formabweichungen zu finden sind. Untersuchungen zu den Ursachen von Maßhaltigkeitsabweichungen sequentieller Fertigungsschritte von Karosseriebaugruppen sind für einzelne Anwendungsfälle singularär vorhanden, aber noch nicht hinsichtlich ihrer Wechselwirkung systematisch analysiert.

Ergebnisse zu Simulationsprozessketten (Umformen und Fügen):

Bisherige Studien untersuchten vorwiegend Faktoren, welche die Maßhaltigkeit bei den Fügeprozessen beeinflussen. Die geometrische Form der Einzelteile nach dem Umformen wird übertragen und als Inputgröße für die Fügésimulationen genutzt. Im Bereich der mechanischen Fügeverfahren schildern Publikationen nach [98] die Relevanz von Eingangsgrößen in Simulation und Experiment. Dabei wird keine Systematik

dargelegt, nach welcher die Parameter beliebiger Baugruppen hinsichtlich der Maßhaltigkeit optimiert werden können. Der Ansatz visualisiert beispielhaft an Referenz- und Realbaugruppen [99] die entstehende Maßhaltigkeitsvarianz mechanisch gefügter Baugruppen in Abhängigkeit einzelner Faktoren.

Weitere Veröffentlichungen zeigen offene Felder im Bereich der Struktur- und Prozessschweißverzugsimulationen am Beispiel einer Heckklappe [100]. Ziel einer solchen verketteten Umform- und Fügeprozesskette ist nach [101] die virtuelle Absicherung der Herstellbarkeit von Karosseriebauteile entlang ihrer Produktionskette. Den Zusammenhang zwischen gefügten Einzelteilen und dem Einfluss des Rollfalzprozesses auf die Maßhaltigkeit der Baugruppen wird anhand verschiedener Publikationen von Kästle zum Herstellungsprozess von Motorhauben dargelegt. Fokus der jeweiligen Veröffentlichung ist die Simulationemethode des Rollfalzens [102], die Analyse des Einfluss der Falzoperationen [103] sowie die Auswirkung nicht-maßhaltiger Pressteile [104] auf die Maßhaltigkeit einer Karosseriebaugruppe.

2.5 Stochastische Analyse von Prozesssimulationen

In vorhandenen Studien zur digitalen Prozesskette im Karosserierohbau wurden Parameterstudien durchgeführt, um den Einfluss einzelner Einflussfaktoren auf das System zu eruieren. Zur Darstellung von Wechselwirkungen und Berücksichtigung der Schwankungen mehrerer Prozesseingangsgrößen sind FE-Methoden auf Basis statischer Versuchsplanung erforderlich.

2.5.1 Grenzen zur statistischen Analyse von Eingangsgrößen mittels Simulationen

Im Rahmen der statistischen Versuchsplanung wird die Anzahl der zu berechnenden Versuchspunkte ermittelt, sodass die Einflussgrößen auf ein definiertes System in den Simulationsvariationen minimiert werden [105]. Auf das System wirken gemäß Bild 14 zwei Typen von veränderbaren und nicht beeinflussbaren Einflussgrößen: Steuer- und Störgrößen [106].

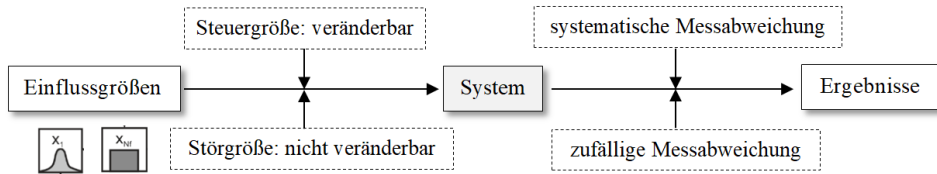


Bild 14: Stochastische Analyse der Eingangsgrößen eines Systems in Anlehnung an [107]

In Abhängigkeit der Streuungen von Eingangsgrößen variieren die Ergebnisse des Systems. Bekannte systematische Messabweichungen sind mittels Korrekturwerte in gleicher Höhe bei den Messungen zu ändern, während zufällige Messabweichungen eine Unsicherheit bezüglich der Messgenauigkeit sind [108]. Oft genutzte Methoden zur statistischen Versuchsplanung sind vollfaktorielle Versuchspläne, Monte-Carlo-Methode oder Latin Hypercube Sampling.

Neben der Auswahl der Methode der statistischen Versuchsplanung und des geeigneten Optimierungstools gilt es, die zu analysierenden Parameter festzulegen. Die Auswahl der Eingangsgrößen ist durch ihre simulative Abbildbarkeit begrenzt.

In den Veröffentlichungen von Roll [109] wird die Implementierung der Faktoren von Umformversuchen in den dazugehörigen Umformsimulationen verglichen und ein Ausblick hinsichtlich notwendiger Entwicklungen in der Blechumformsimulation gegeben. Bei den Werkzeugsteifigkeiten werden die in der Realität elastischen Werkzeuge standardmäßig als starre Werkzeuge in den Simulationen modelliert. Weiterhin sind Ungenauigkeiten bei der Modellierung der Tribologie in Abhängigkeit von der Werkzeug-/Werkstücktemperatur vorhanden. Im Bereich der Materialmodellierung wurden in den letzten Jahren ständig Fortschritte erzielt. Das Werkstoffmodell in der Simulation setzt sich aus vier Bausteinen zusammen: Elastizitätsgesetz, Fließkriterium, Fließregel und einer Verfestigungsregel [110]. Veröffentlichungen zu den Fließkriterien von Barlat 2000 [111], Banabic BBC 2005 [112] oder BBC 2008 [113] zeigen die anhaltende Weiterentwicklung. Im Zuge dieser Arbeit wurde auf die Implementierung eines erweiterten Reibwertmodells sowie eine Berücksichtigung des Temperaturverlaufes bei der Produktion der Einzelteile im Rahmen der Umformsimulation verzichtet.

Nicht jeder Eingangsparameter eines Fertigungsprozesses hat den gleichen Effekt auf die Zielgröße des zu analysierenden Ergebnisses. Der steuer- oder nicht steuerbare Prozessparameter ist einer individuellen prozentualen Streuung unterlegen [114]. Sensitivitätsanalysen von schwankenden Eingangsgrößen verfolgen das Ziel, die Größe des Zusam-

menhanges (Sensitivität) zwischen der Änderung von ursächlichen Eingangsgrößen und der Auswirkung auf die Antwortgrößen zu berechnen [115]. Bei der Analyse werden die nach der Wichtigkeit geordneten Haupt-einflussfaktoren eines Systems ermittelt, um gezielter das FE-Berechnungsmodell anzupassen und vorwiegend relevante Faktoren zu validieren [69].

Abschließend ist festzuhalten, dass einerseits durch eine Sensitivitätsanalyse ein besseres Verständnis von Simulationsmodellen oder Versuchsplänen geschaffen werden kann. Andererseits ist dieser zu erringende Vorteil aber von der ausreichend genauen Kenntnis der Anzahl und Art der wichtigsten Eingangsgrößen eines Systems abhängig [114].

2.5.2 Stochastische Parameteroptimierung einer digitalen Prozesskette

Die aus der Sensitivitätsanalyse gewonnenen Erkenntnisse über das Modellverhalten ermöglichen eine Optimierung der Zielgrößen. Die Optimierung ist entweder direkt oder mit einem Approximationsmodell – fortführend Metamodell genannt – realisierbar. Die Verwendung von Metamodellen begünstigt, dass keine neuen Berechnungen durchgeführt werden müssen. Hierzu gibt es Beispiele in der Literatur zu digitalen Prozessketten mit Karosseriebaugruppen, bei welche die Optimierungszeit durch die Verwendung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen signifikant reduziert wurde [116]. Generell können in Systemen ein oder mehrere Zielgrößen optimiert werden. Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung von gängigen Verfahren zur Lösung von Minimierungsproblemen.

Tabelle 2: Verfahren für Systemoptimierungen mit einer oder mehreren Zielgrößen

Anzahl an Zielgrößen	Verfahrensart	Beispiel	Bemerkungen
Eine Zielgröße	Gradientenbasierte Verfahren	Quasi-Newton-Verfahren	Probleme bei mehreren lokalen Minima, geeignetes Parameterstartset nötig
Mehrere Zielgrößen	Genetische Optimierungsverfahren	Pareto-Front	Keine Zusammenfassung zu einer Zielgröße möglich, Mutationskette

Anwendung finden vermehrt Verfahren zur Optimierung mehrerer Zielparameter, bei denen voneinander unabhängig definierte Zielgrößen optimiert werden. Meist werden einzelne Antwortgrößen verbessert und andere verschlechtert. Die Lösung ist auf die Dominanz einer Faktoreinstellung zu prüfen. Genetische Algorithmen berechnen eine Pareto-Front, bei welcher alle Kompromisslösungen zu einem äquivalenten Ergebnis führen. Je nach Präferenz des jeweiligen Anwendungsfalls werden mehrdimensionale Faktorkombinationen gewählt [107].

Optimierungsstudien von Simulationsprozessketten

In den Einzelprozessen der Tiefzieh- und mechanischen Fügeprozesskette gibt es unterschiedliche Optimierungsansätze auf Basis von FE-Simulationen. Relevante Studien, speziell im Bereich der stochastischen Analysen, sind in Tabelle 3 nach ihrem Themengebiet aufgelistet.

Tabelle 3: Optimierungsstudien von Umform- und Fügeprozessen mit FE-Simulationen

Umformprozesse		
Statistische Analyse eines Umformvorganges	Analyse und Optimierung ausgewählter Prozessparameter	[117]
Robustheitsanalysen von Umformwerkzeugen	Darlegung einer Systematik zur Kategorisierung von Prozessparametern	[105], [69]
Optimierung der Ausgangsplatine	Aufzeigen der Auswirkung der Werkstückgeometrie auf das Bauteilmaßhaltigkeit	[118], [119]
Rückfederungsanalyse und -optimierung	Analyse und Optimierung signifikanter Faktoren auf die Bauteilrückfederung	[120], [121]
Verkettung von Umform- und Crashesimulationen	Weiterverwendung der Umformergebnisse in den Crashesimulationen	[122], [123]
Clinchprozesse		
Werkzeugoptimierung	Optimierung der Werkzeuggeometrie und Bewertung der Parameterstreuung	[114], [124]
Metamodellbasierte Optimierungen	Verbesserung der Werkzeuggeometrie hinsichtlich Verbindungsfestigkeit	[125]
Design of Experiment	Studie zu den Einflussgrößen beim Fügen	[126]

Im Bereich der Umformtechnik sind einige Analysen zur Optimierung von Umformwerkzeugen und Kompensationsmaßnahmen der Einzelteiltrückfederungen vorhanden. Weitere Optimierungsstudien befassen sich mit den Werkstoffeingangsgrößen beim Tiefziehen.

Bei den Optimierungen des Clinchprozesses waren die Optimierungen der Werkzeuge und der Verbindungsfestigkeit der Clinchpunkte die Schwerpunkte. Weitere Studien untersuchten Parameter des FE-Modells hinsichtlich ihrer Effekts auf die berechnete Rückfederung [121].

2.6 Zusammenfassende Bewertung des Standes der Technik

Zusammenfassend kann auf Basis des derzeitigen Forschungsstandes festgestellt werden, dass es zu den einzelnen Prozessketten erste Ansätze für stochastische Analysen gibt, jedoch kaum stochastische Analysen zu gekoppelten Umform- und Fügeprozessketten zu finden sind. Mit Hilfe dieser Analysen könnten unter Berücksichtigung der Schwankungsbreiten Wechselwirkungen und Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge detaillierter untersucht werden.

Weiterhin wurde der geometrische Einfluss von Einzelbauteilen nur in vereinzelteten Prozessen untersucht. Im aktuellen Forschungsstand gibt es Limitationen bei der Analyse des Einflusses von Einzelteilgeometrien in Wechselwirkung mit verschiedensten, punktförmigen Füge- oder Spann-techniken. Erste Ansätze nach [127] verdeutlichen bei bahngeführten Verfahren die Möglichkeit, auf Basis von CAD-Segmenten (Wölbung und Krümmung der Baugruppe) Ergebnisgrößen nach dem bahngeführten Verfahren zu prognostizieren.

Vereinzelte Forschungsarbeiten berücksichtigen karosseriebautypische Randbedingungen (z.B. Verformungen aus dem vorherigen Prozessschritt) bei dem anschließenden Fügeprozess. Hierbei wird die Ergebnisgröße Rückfederung in Bezug zu den Eingangsgrößen beim Fügen analysiert, ohne vertiefend die einzelnen Prozessschritte in der Fügestation bei mechanischen oder thermischen punktförmigen Fügeprozessen zu ergründen. Es fehlt eine aufbauende Optimierungsmethode, um das bis heute erfahrungsmäßig ausgelegte Spann- und Fixierkonzept automatisiert unter Berücksichtigung der variierenden Einzelteile zu verbessern.

Folgende Fragen bleiben dementsprechend unbeantwortet:

- Welche **Prozessschritte in Fügestationen** haben bei **punktförmigen Fügeprozessen** von nicht-maßhaltigen Einzelteilen einen signifikanten Einfluss auf die Maßhaltigkeit?
- Welchen Einfluss haben **verschiedene (nicht-maßhaltige) Geometrieformen** nicht-maßhaltiger Einzelteile auf die Maßhaltigkeit einer gefügten Baugruppe?
- Was sind die notwendigen Schritte, um den **Einfluss von Fertigungs-/Werkstofftoleranzen** eines gekoppelten Umform- und Fügeprozesses auf die Maßhaltigkeit der Baugruppe **stochastisch prognostizieren** zu können?

3 Zielsetzung der Arbeit und Vorgehensweise

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, zu untersuchen, welche Werkstoff- und Prozessfaktoren einen signifikanten Einfluss auf die Maßhaltigkeit von herzustellenden Baugruppen haben. Hauptziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung von Ursachen-Wirkungs-Zusammenhängen zur simulativen Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte von Baugruppen. Das Resultat ist eine baugruppenunabhängige Methodik, mit welcher sich der Einfluss von schwankenden Fügestationsparametern abschätzen lässt. Handlungsempfehlungen in Form von Prozessfenstern zur Gestaltung von Baugruppen mit geringeren Formabweichungen werden generiert.

In diesem Zusammenhang werden Eingangsgrößen von Umform- und Fügeprozessen simulativ und experimentell untersucht. Der Einfluss geometrischer Randbedingungen wird in Wechselwirkung mit dem Werkstoffkonzept anhand der Maßabweichungen von Einzelteilen und Baugruppen bewertet. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist es, aufzuzeigen, welche Prozessschritte von Fügestationen den größten Einfluss auf die Maßhaltigkeit der entstehenden Baugruppe haben.

Das in Bild 15 dargelegte zweistufige Lösungskonzept zur Erarbeitung einer Methodik für die stochastische Analyse relevanter Einflussfaktoren wird auf die Baugruppenmaßhaltigkeit angewandt. Die erste Stufe sieht einen Aufbau von Simulationsprozessketten als Referenz für spätere Parameteruntersuchungen vor. Die gesamte Umform- und Fügeprozesskette wird in ihre einzelnen Prozessketten zerlegt und berechnet. Nach der Durchführung der Prozesskettensimulationen werden die Einzelprozesse durch die Festlegung des Ergebnisübertrags zu einer durchgängigen Prozesskette verknüpft. Durch erste Variationsrechnungen mit zunächst maßhaltigen und später nicht-maßhaltigen Einzelbauteilen werden Zusammenhänge und Abhängigkeit zwischen den einzelnen Fügepartnern erarbeitet.

In der zweiten Stufe wird auf der Basis der aufgestellten Referenzprozesskette eine stochastische Untersuchung relevanter Einflussfaktoren auf die Maßhaltigkeit der Baugruppe realisiert. Für die Analyse ausgewählter verfahrens- und werkstoffbedingter Parameter sind neben der Festlegung des Parametertyps (Steuer-/Störgröße) ihre Verteilungsfunktionen zu ermitteln. Mittels nachgelagerter Best-/Worst-Case Analysen mit verschiedenen deformierten Einzelteilen können hinsichtlich der Reduzierung des

Rechenaufwandes mit einer geringen Anzahl an Fugesimulationen bereits Aussagen über geforderte Einzelteil- und Zusammenbautoleranzen getroffen werden. Weiterhin werden im Rahmen der Arbeit verschiedene Arten von Baugruppen genutzt, um einerseits grundlegende Zusammenhänge zwischen Geometrie, Werkstoff und der resultierenden Formabweichung nach den Prozessschritten darzustellen. Andererseits soll die Anwendbarkeit der aus dem zweistufigen Lösungskonzept entwickelten Methode anhand von realen Karosseriebaugruppen aufgezeigt werden.

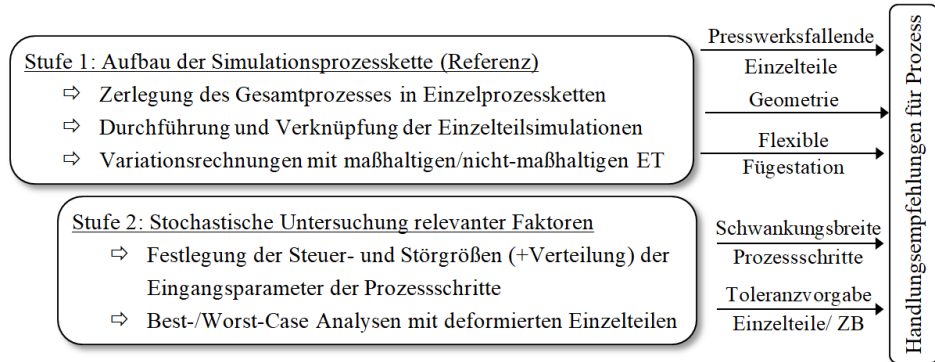


Bild 15: Zweistufiges Lösungskonzept zur Analyse der Einflussfaktoren einer Umform- und Fügeprozesskette unter Berücksichtigung von Parameterschwankungen

Bild 16 zeigt die Vorgehensweise der Arbeit mit den ausführlichen Untersuchungen an der prinzipiellen Baugruppe S-Rail mit einem nicht maßhaltigen Einzelteil. Die gewonnenen Erkenntnisse auf Basis der komplexen Baugruppe mit industriell relevanten geometrischen Formen werden auf die Baugruppe H-Probe mit zwei nicht-maßhaltigen Baugruppen übertragen. Final werden die identifizierten Wechselwirkungen anhand einer realen Karosseriebaugruppe validiert. Diese Karosseriebaugruppe besteht aus mehreren nicht-maßhaltigen Einzelteilen und wird in mehreren Fugeschritten durch die Fertigung einer Unterbaugruppe produziert.

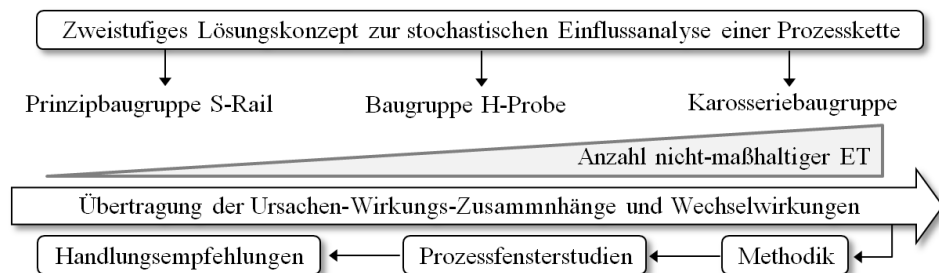


Bild 16: Vorgehensweise zur Übertragung der Erkenntnisse von Prinzipbaugruppen auf reale Karosseriebaugruppen und Generierung von Handlungsempfehlungen

Bei dem Vorgehen sind grundlegende Wirkungsmechanismen und Erklärungen für die auftretenden Ergebnisse zu erarbeiten, um diese als allgemeingültige Erkenntnisse auf andere Zusammenbauprozesse im Rohbau zu übertragen.

4 Versuchswerkstoffe, Versuchsanlagen, Methoden und Simulationsumfeld

In dem folgendem Kapitel werden Basisinformationen zu den eingesetzten Versuchswerkstoffen, Versuchsanlagen zur Herstellung der Prinzipbauteilen/-baugruppen sowie Karosseriekomponenten und Methoden gegeben. Ziel ist es einerseits, die Randbedingungen bei den Versuchen kapitelübergreifend festzuhalten und andererseits, Grundlagen zu den Modellierungstechniken der genutzten Simulationsprogramme zu schaffen. Zudem werden Konventionen für zulässige Prozesseinstellungen bei den Spann- und Fügeprozessen erläutert. Dies dient der Vergleichbarkeit der Versuchs-/Simulationsergebnisse.

4.1 Charakterisierung der eingesetzten Versuchswerkstoffe

Für die experimentellen und simulativen Studien werden typische Vertreter der Struktur- und Außenhautwerkstoffen von Karosseriebaugruppen gewählt. Zur Charakterisierung ihres chargenabhängigen, elastoplastischen Werkstoffverhaltens werden mechanische Werkstoffkenngrößen in Zugversuchen ermittelt. Zum Vergleich werden im Laborumfeld Resonanzfrequenz-Dämpfungsanalysen (RFDA) zur Bestimmung des Materialverhaltens durchgeführt.

Tabelle 4 visualisiert eine Auswahl an wichtigen Werkstoffkennwerten der untersuchten Aluminium- und Stahlwerkstoffe. Für die Analyse des elastischen Werkstoffverhaltens sind Kennwerte der spezifischen Dichte, Systemmodul und Querkontraktionszahl ν aufgeführt.

Tabelle 4: Ausgewählte Kennwerte der untersuchten Struktur- und Außenhautwerkstoffe

Werkstoff	AA5182	AA5251	AA6014	CR3
Dichte ρ kg/mm ³	2,66e-09	2,7e-09	2,86e-09	7,85e-09
Systemmodul in MPa	65572	69500	70324	190796
Querkontraktionszahl ν	0,340	0,330	0,343	0,330
Blechdicke(n) in mm	1,0 - 1,5 - 2,0	0,7 - 1,0 - 2,0	1,0	0,7 - 1,0 - 1,5 - 2,0

In der Kategorie Strukturwerkstoffe wird auf die Aluminiumlegierungen AA5182, AA5251 und den Stahlwerkstoff CR3 zurückgegriffen. Die Strukturbauteile werden gemäß Tabelle 4 mit den Blechdicken s_0 1,0, 1,5 und 2,0 mm gefertigt. Um den Einfluss einer geringen Bauteilsteifigkeit zu untersuchen, findet eine Analyse der Auswirkung von Versuchsproben

mit s_0 von 0,7 mm aus den Werkstoffen AA5251 oder CR3 auf das Verhalten einer Baugruppe statt. Für den Vertreter des Außenhautwerkstoffs wird die Aluminiumlegierung AA6014 mit s_0 von 1,0 mm gewählt. Dies ermöglicht Aussagen über den werkstofflichen Mischbau und die Wechselwirkungen zwischen Außenhaut- und Strukturwerkstoffen zu treffen.

Bei der Querkontraktionszahl treten zwischen den Werkstoffen geringe Unterschiede auf. Die Systemmodule differieren bei den Aluminiumlegierungen von 65,6 GPa (AA5182) bis zu 70,3 GPa (AA6014). Der Werkstoff CR3 hat im Verhältnis zu den Aluminiumlegierungen einen dreifach höheren Systemmodul bei gleichzeitiger etwa dreifacher Dichte.

Quasistatische Flachzugversuche stellen ein wichtiges Verfahren der zerstörenden Werkstoffcharakterisierung dar, bei welchem Zugprobengeometrien in zwei Spannbacken eingespannt und bis zum Bruchversagen gedehnt werden. Gemessen werden unter momentfreier Zugbelastung die Probendehnung und die dazugehörige Prüfkraft. Mittels des Quotienten aus gemessener Prüfkraft F zum aktuellen Probenquerschnitt wird der Spannungswert σ berechnet. Für die Bestimmung des Systemmoduls wurde nach Stichversuchen je Werkstoff sein Auswertebereich anhand der Hookschen Geraden für den jeweiligen Werkstoff angepasst.

Eine Veränderung des E-Moduls, beispielsweise durch chargenbedingte Abweichung in der chemischen Zusammensetzung der Werkstoffe, kann nach Abschnitt 2.2.1 eine signifikante Änderung für die Maßhaltigkeit von Bauteilen bedeuten. Für die Implementierung des elastischen Werkstoffverhaltens in die CAE-Berechnung wurden daher zu Zugversuchen vergleichende RFDA-Messungen getätigt. Vorteilhaft bei dieser Methode nach ASTM 1876-07 zur Bestimmung des E-Moduls ist die Unabhängigkeit der Messwerte von der Steifigkeit der Zugprüfmaschine. Die Messmethode sieht zunächst Auftriebswägungen der einzelnen Prüfkörper vor, um die spezifische Dichte des zu untersuchenden Probekörpers zu ermitteln. Dazu werden aus jedem Werkstoff drei ebene Blechstreifen der Abmessungen 60 x 10 x 1 mm herausgetrennt. Der Prüfkörper darf weder Riefen, Oberflächendefekte noch eine wellige Probenform haben. Während des Prüfzyklus werden Schwingungen im Probekörper angeregt. Aus den entstehenden und in Probenlängsrichtung schwingenden Nodalwellen werden die Eigenfrequenzen des Prüfkörpers gemessen. Schließlich lässt sich der dynamische E-Modul aus Werten der Eigenfrequenz, der spezifischen Dichte und der Querkontraktionszahl bestimmen.

4.2 Versuchsanlagen zur Herstellung von Einzelteilen und Baugruppen

Die prinzipiellen Einzelbauteile wurden am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg oder bei der Forschungseinrichtung Neue Materialien Fürth GmbH (NMF) abgepresst. Die Fertigung der Baugruppen erfolgte je nach Fügetechnik bei NMF oder in den prototypischen Versuchsumgebungen der Daimler AG. Zur Herstellung der Karosserieteile wird auf die sich im Einsatz befindenden Prototypen-/Serienwerkzeuge und Fügestationen zurückgegriffen. Der folgende Abschnitt beschreibt die Anlagen zur Herstellung der Einzelteile und ihrer Zusammenbauten.

4.2.1 Versuchspressen zur Herstellung der Einzelbauteile

Die Umformversuche mit dem in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen S-Rail-Werkzeug wurden ausschließlich an der einfachwirkenden Versuchspresse des Maschinentyps TZP 400 der Firma Lasco bei NMF durchgeführt. Mit einer maximalen Pressenkraft von 4000 kN wird die Presse mit einer maximalen Geschwindigkeit von 250 mm/s weggesteuert verfahren. Die maximal mögliche Blechhalterkraft liegt bei 1600 kN. Die Festlegung der adaptiven Blechhalterkraft erfolgt über das Produkt aus definierter Flächenpressung und der Kontaktfläche des Blechhalters. Für die Werkstoffe wurde sich hierzu an bisherigen Erfahrungswerten zwischen 1 und 2 MPa orientiert. Über die Maschinensteuerung und Sensoren wurden ausgelesen: Stempelweg, Blechhalterkraft und Zeit. Der Aufbau der Pressen ist in Bild 17 zu sehen.

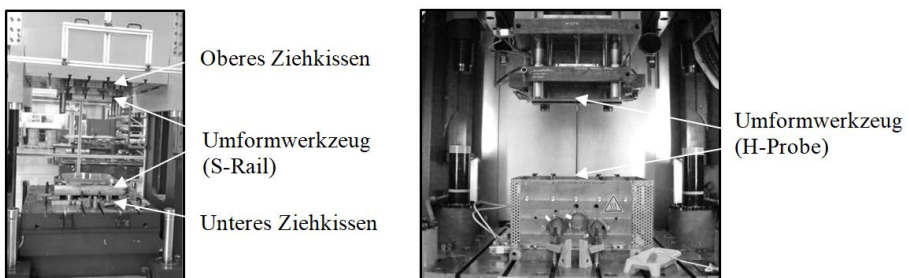


Bild 17: Versuchspressen in den Versuchsumgebungen von NMF (links) und LFT (rechts)

Für weitere Prinzipversuche mit dem H-Proben-Werkzeug wurde auf die hydraulische Tiefziehpresse Hydrap des Maschinentyps HPDzb 630 am LFT zurückgegriffen. Bei einer Nennkraft von 6300 kN betrug die maximale Stoßelgeschwindigkeit 220 mm/s.

4.2.2 Versuchspressen zur Herstellung der Einzelbauteile

Für die Herstellung der Versuchsbauteile wurden die bereits ausgelegten und gefertigten Umformwerkzeuge S-Rail und H-Probe genutzt. Neben der Vergleichbarkeit zu bestehenden Arbeiten mit den Umformwerkzeugen eignen sich die beiden Tiefziehwerkzeuge aufgrund ihrer unterschiedlichen geometrischen Bauweisen. Mit dem H-Proben-Werkzeug lassen sich vereinfachte Prinzipbauteile mit geradlinigen und gleichmäßigen Biegekanten erstellen. Im Gegensatz dazu stellt das S-Rail-Prinzipwerkzeug eine Möglichkeit dar, komplexere Prinzipgeometrien mit konkaven-konvexen und geraden Biegeradien R_{50} und R_{100} zu erstellen. Diese Entwicklungsgeometrie ist der Zwischenschritt vor der Analyse von Karosserieanbauteilen.

Das H-Proben-Versuchswerkzeug ist mit den Werkzeugbestandteilen Stempel, Matrize und Blechhalter in Bild 18 visualisiert. Der Stempelradius R_6 und der Matrizenradius R_{10} waren bei allen Versuchen konstant. Um neben den Prozessparametern Ziehtiefe und Blechhalterkraft verschiedene Blechdicken (1,0, 1,5 und 2,0 mm) von unterschiedlichen Werkstoffe zu untersuchen, wurden Einlegeschaablonen für einen gleichbleibenden Ziehspalt (Ziehspalt: Blechdicke + 0,2 mm) angefertigt.

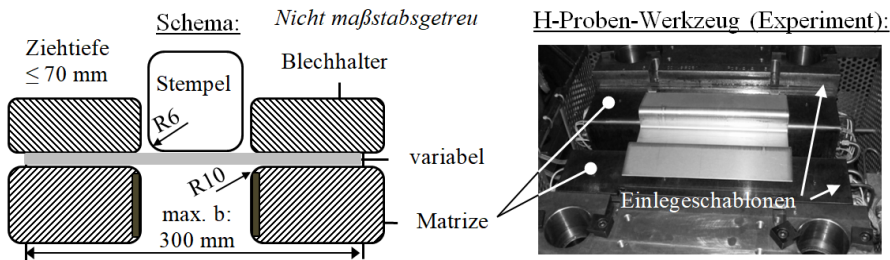


Bild 18: H-Proben-Versuchswerkzeug mit flexiblen Einlegeschaablonen für die Matrize

Beim Einlegeprozess erlauben Anschläge eine höhere Präzision und Positioniergenauigkeit bei einer maximalen Platinenbreite b von 300 mm. Die Länge l der Platinengeometrie darf das Maß von 530 mm nicht überschreiten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher Rechtecksplatinen der Dimensionen $l \times b$ von 270 x 300 mm, 300 x 300 mm und 350 x 300 mm genutzt.

Als zweite Einzelteilart wurden sogenannte S-Rails - Prinzipbauteile mit einem S-Schlag - mit einer fixen Ziehtiefe von 40 mm abgepresst. Charakteristisch bei diesem Prinzipbauteil ist die Kombination aus konkaven und konvexen Radien mit unterschiedlichen Radiusgrößen R_{50} und R_{100} . In Bild 19 ist das Umformwerkzeug mit der initialen Positionierung einer

an die Geometrie angepassten Platinenschablone zu sehen. Hervorgehobene Bereiche von Bild 19 zeigen die Variationsmöglichkeit der x-/y-Platinenposition durch Einlegebleche.

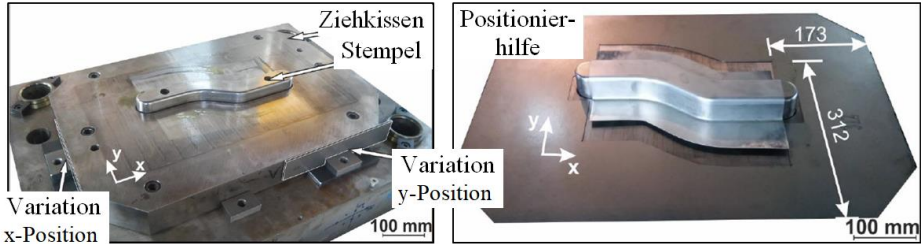


Bild 19: S-Rail-Tiefziehwerkzeug mit Positionierhilfen in x- und y-Position

Um S-Rails mit verschiedenen Blechdicken bis zu 2,0 mm herzustellen, wurde ein neuer Ziehstempel mit Hilfe eines Stempeloffsets konstruktiv mit identischem Stempelradius ausgelegt und gefertigt. Der Ziehspalt s beträgt bei den Versuchen 0,2 mm. Die modulare Bauweise ermöglicht bei Verwendung der Hartfahrplatte und einer Matrizengeometrie den Einsatz unterschiedlicher Stempelgeometrien (links im Bild 20). Die Hartfahrplatte dient dazu, einen ebenen Ziehteilboden und geringe Bauteilverdrillungen zu erreichen. Die Bauteilgeometrie, wie in Bild 20 (rechts) dargestellt, wird nach dem Umformprozess standardgemäß auf eine Bauteillänge von 270 mm mit dem in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Prozess beschnitten. Weiterhin werden Führungslöcher (Rund- und Langloch) des d_0 von 8 mm eingebracht.

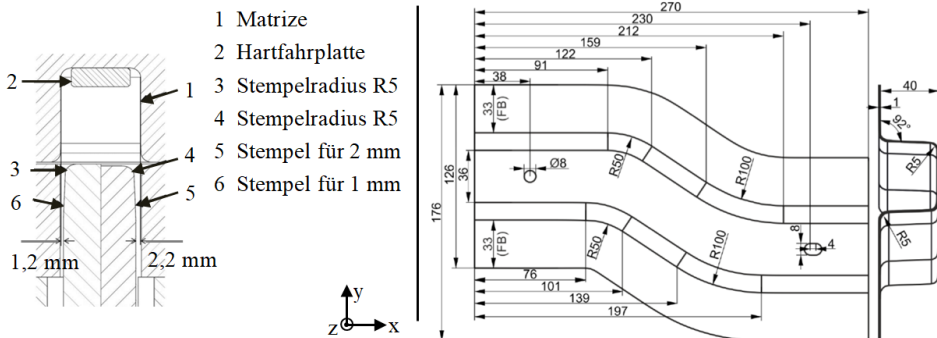


Bild 20: Werkzeuggeometrien (verschiedene Stempelsätze) für die S-Rail-Versuche und Bauteilgeometrie (Standardbauteil mit Laserbeschnitt und so: 1,0 mm)

Zum Studium des Geometrieinflusses auf die Maßhaltigkeit von Bauteilen/Baugruppen erfolgt eine Einteilung des Prinzipbauteils in charakteristische Bereiche. Je nach Flanschseite ergeben sich in positiver x-Richtung verschiedene gerade, konvexe und konkave Bereiche:

Flanschkurve oben: Gerade - Konvex (R50) - Konkav (R100) - Gerade

Flanschkurve unten: Gerade - Konkav (R50) - Konvex (R100) - Gerade

Generell wurden bei den Prinzipversuchen mit dem H-Proben- und S-Rail-Tiefziehwerkzeug die Formplatinen beidseitig mit dem Ziehöl Platinol B804/3 COW-1 von Oest im Kreuzstrich bestrichen. Die Geometrie (siehe Bild 21) der Formplatinen bei den S-Rail-Versuchen differiert je nach Untersuchungszweck: Form A (S-Schlag) und Form B (Parallelogramm).

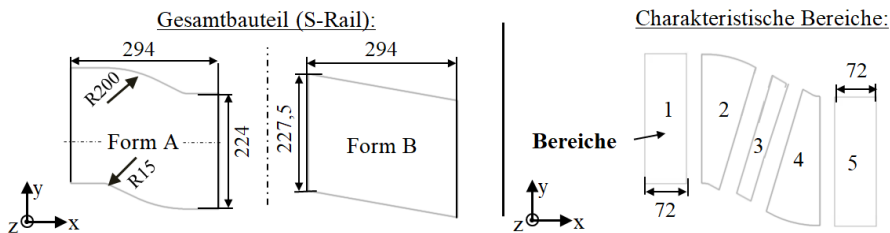


Bild 21: Geometrieformen der Platine für die Untersuchungen am Prinzipbauteil S-Rail

Im Gegensatz dazu werden bei den H-Proben rechtecksförmige Platinen für die Versuche genutzt. Je nach Studie variiert die Platinenlänge der H-Proben zwischen 270 und 350 mm.

4.2.3 Vorrichtungen zum Beschnitt der Prinzipbauteile und -proben

Im Anschluss an die Herstellung der prinzipiellen Versuchsproben ist ein Schneidprozess der Prinzipproben erforderlich. Zum einen sollen definierte Außenkonturen der Einzelteile erzeugt werden. Zum anderen werden in jedes Bauteil definierte Rund- und Langlöcher eingebracht, um anhand von Zentrierungstiften der Fügestationen eine definierte Bauteilaufnahme zu erhalten. Für die Bauteilbeschnitte wurden Vorrichtungen der prinzipiellen S-Rail und H-Proben konstruiert und angefertigt. Die Vorrichtung zum Beschnitt der S-Rail-Bauteile ist für die Blechdicken 1,0 und 2,0 mm in Bild 22 visualisiert. Aufgrund des Ziehstempeloffsets kann für die Blechdicken 1,0 und 2,0 mm dieselbe Vorrichtung für S-Rail-Proben und ihrer einzelnen S-Rail-Segmente genutzt werden. Im Gegen-

satz dazu wurden bei den H-Proben drei separate Vorrichtungen für die Blechdicken 1,0, 1,5 und 2,0 mm gefertigt.

Für den Schneidprozess fand der CO₂-Laser TruLaserCell 7040 mit 3D-Schneidkopf der Firma Trumpf mit einer maximalen Laserleistung von 2,6 kW Verwendung. In Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie wurden Vorschubgeschwindigkeiten zwischen von 0,8 bis 7,5 m/min gewählt, um eine gute Schnittqualität der Schneidkanten zu erhalten. Der Schnittspalt betrug bei allen Blechdicken 0,2 mm und der Stickstoffdruck p von 10 bis 16 bar wurde zugegeben.

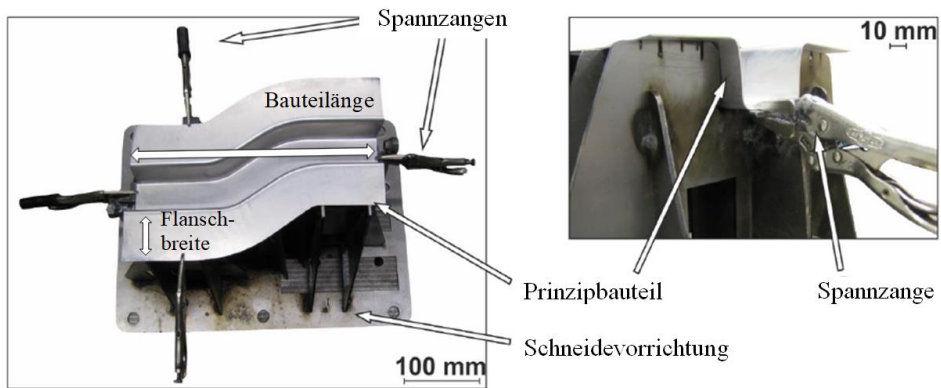


Bild 22: Vorrichtung für den 3D-Laserbeschnitt der Prinzipbauteile S-Rail

Das Prinzipbauteil wird bei dem Prozess zunächst an den einseitigen Anschlägen in Längsrichtung ausgerichtet und anschließend in die Schneidevorrichtung gedrückt. Mittels der dargestellten Spannzangen wird das Bauteil an vier Stellen möglichst kraftfrei gespannt. Eine Auswertung des Einflusses dieses Spannprozesses sowie des thermischen Einflusses auf die Formmaßhaltigkeit findet detailliert in Abschnitt 5.2.5 statt.

4.2.4 Flexible Fügestation ZB S-Rail und ZB H-Probe

In der konstruierten flexiblen Fügestation werden prinzipielle Baugruppen aus Außenteile (AT) – Beplankungsbauteile – und struktursteiferen Innenteilen (IT) gefügt. Ziel der flexiblen Fügestation ist es, folgende Prozess- und Produktszenarien analysieren zu können:

- Untersuchung **verschiedener Prinzipbaugruppen**
- Analyse **des Spann- und Fixierkonzeptes** (Spann- und Fügereihenfolge, Anzahl Spann- und Fügepunkte, Spann- und Fügepositionen, Fügerichtung, Spannerformen)

- Variationen der **Blechdickenkombinationen** aus AT und IT
- Vergleich von **diversen Fügetechniken** in einer Fügestation

Bild 23 zeigt die flexible Fügestation exemplarisch für die genutzte Baugruppe ZB S-Rail, bestehend aus einem umgeformten Außenteil S-Rail und dem ebenen Innenteilblech mit der Außenkontur des S-Rails. Nach dem Einlegen des Innenteils auf die sechs Spannerunterseiten wird das Außenteil unter Positionierung des Bauteils über die zwei Zentrierstifte eingelegt. Es folgt das Schließen aller Spannoberseiten und das formschlüssige Verbinden der Einzelbauteile.

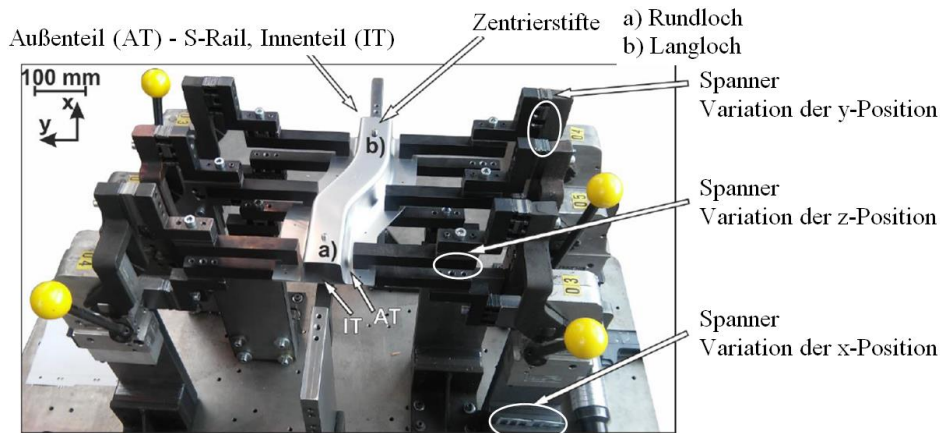


Bild 23: Flexible Fügestation ZB S-Rail und ZB H-Probe mit sechs Spanngruppen

Neben der in Bild 23 dargestellten Prinzipbaugruppe können dank der adaptiven Konstruktion der flexiblen Fügestation einzelne Segmente des S-Rails oder H-Proben mit passenden Innenteil(segment)en gefügt werden. Zusätzlich eingebrachte Lochbilder für die Montage der einzelnen Spanngruppen und der Zentrierstifte ermöglichen diesen Umbau. Im Rahmen dieser Arbeit können so zudem zwei umgeformte H-Proben unter Variation der Fügetechnik formschlüssig verbunden werden.

Des Weiteren zeigt Bild 23 die flexiblen Variationsmöglichkeiten des Spann- und Fixierkonzeptes auf. Im Gegensatz zu konventionellen Fügestationen können die Spannpositionen in allen drei Raumrichtungen mittels Abstandsplatten (sogenanntes „Shimsen“) verschoben werden. Die Anzahl der sechs abgebildeten Spanngruppen kann um zwei seitliche Spanngruppen für die Fixierung des Ziehteilbodens erweitert werden.

4.2.5 Fügestation der (Unter-)Baugruppe einer Motorhaube

In der Arbeit werden zudem Versuche mit Fügestationen von Karosseriebauteilen - im Speziellen mit der Baugruppe einer Motorhaube - realisiert. Bild 24 stellt die oberen und unteren Spannelemente der Vorserienanlage dar, welche als Kniehebelspanner der Firma Trunks ausgeführt sind. Die Details A-C von Bild 24 visualisieren die Abstandsplatten an den unteren und oberen Spannelementen. Diese Kontursteine bestehen bei jedem Spannelement standardmäßig aus einer sogenannten Spacerplatte (zur Einmessung der jeweiligen Koordinatenrichtung) und einem Paket (2-2-1 mm) aus Kontursteinen. Weitere Kontursteine kleinerer Blechdicken werden benötigt, um die Höhe (hier: z-Position) der Spannelemente in Abhängigkeit des Bauteilstandes auf eine Genauigkeit von 0,1 mm einzustellen. Die in Bild 24 veranschaulichte Fügestation der Motorhaube ist eine Kombination, mit welcher die Unterbaugruppe (farbig markierte Spanner) oder das gesamte Innenteil der Motorhaube gefügt werden kann.

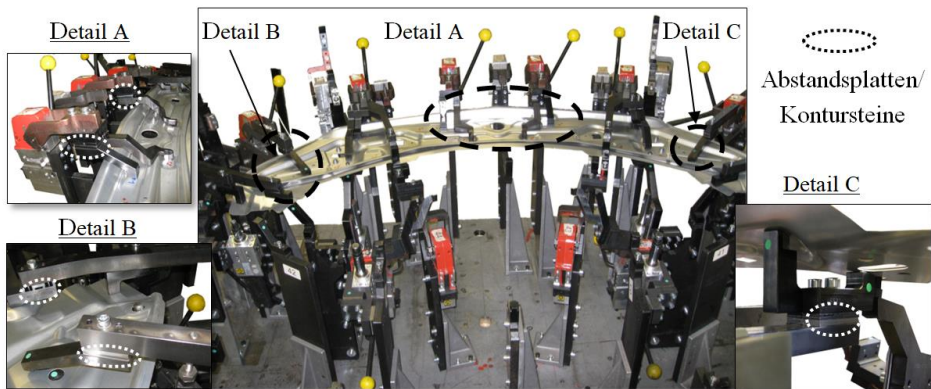


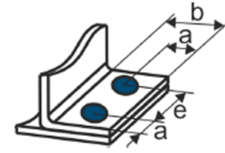
Bild 24: Fügestation der Unterbaugruppe eines Motorhaubeninnenteils

4.2.6 Fügenvorschriften und eingesetzte Fügezangen

Zu den Verfahren Durchsetzfügen-Widerstandspunktschweißen-Robscan gibt es Konstruktions- und Verfahrensvorschriften zu beachten. Die Konstruktionsvorschriften regeln, wie die minimale Gestaltung des Spann- und Fixierkonzeptes aussehen muss. Tabelle 5 fasst die Richtlinien für die Spann- und Fixierkonzepte der analysierten Fügeverfahren zusammen.

Tabelle 5: Konstruktionsrichtlinien der Spann- und Fixierkonzepte beim Fügen

Fügeverfahren	Clinchen	Punkt-schweißen	Robscan
Minimale Blechdicke s_1, s_2 in mm	0,6 - 2,0		
Gesamtblechstärke $s_1 + s_2$ in mm	1,2 - 4,0		
Minimaler Randabstand a in mm	7,0	7,5	
Min. Flanschüberlappung b in mm	16,0	18,5	
Min. Fügepunktabstand e in mm	20,0		55
d der Elektrodenkappen in mm		8/16	
Mindestlänge der Naht in mm			20



Beim Clinchen sind Vorschriften zur Bauteilanordnung einzuhalten. Zum einen ist diejenige Probe mit der höheren Blechdicke stempelseitig anzuordnen (Fügeregel: „dick in dünn“). Zum anderen bedingen verschiedene Werkstoffe eine stempelseitige Anordnung des härtesten Bauteils beim Clinchen (Fügeregel: „hart in weich“). Für die Verfahrensvorschriften des Widerstandspunktschweißens und Robscans wird auf interne Normen verwiesen. Die in der Arbeit genutzten Fügeelemente (Füge-zangen, Roboter) sind in Bild 25 visualisiert.

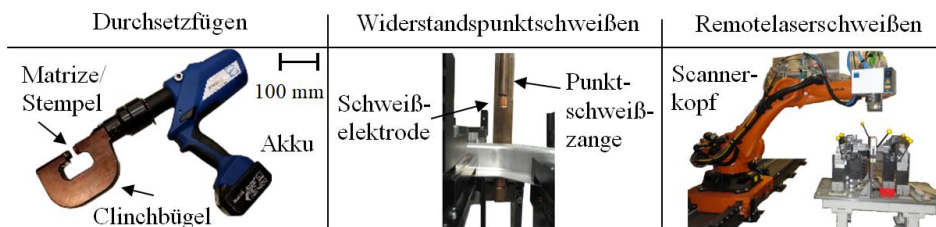


Bild 25: Verwendete Fügeelemente der untersuchten Fügeverfahren

4.3 Taktile und optische Messmethoden zur Bauteilcharakterisierung

Zur Charakterisierung der produzierten Versuchsbauteile und -baugruppen werden verschiedene Methoden der Werkstoff- und Bauteilprüfung eingesetzt. Ziel ist die Untersuchung von Einzelbauteile und Baugruppen hinsichtlich einer prozessbedingten Änderung von Verformungsgrößen. Die Bauteilcharakterisierungen wurden je nach Verfügbarkeit mit Prüfmaschinen und Messmitteln des LFT, von NMF sowie der Daimler AG getätigt.

Taktile Blechdickenmessungen fanden vor und nach den Umform- und Fügeprozessen statt. Ziel der Blechdickenmessung ist es, die Streuung der Inputgröße für experimentelle oder simulative Untersuchung des jeweiligen Prozessschrittes exakt zu implementieren. Schwankungen der Blech-

dicke können je nach Zeitpunkt von den Formplatinen vor dem Umformprozess oder als Eingangsgröße für den Fügeprozess von Bedeutung sein. Zudem wird die Blechdickenmessung zur Simulationsvalidierung genutzt. Für die Blechdickenmessung vor der Umformung der S-Rails fand der elektronische Außenschnelltaster B440 der Firma Kroeplin Verwendung. Die Messgenauigkeit des Messmittels beträgt 0,02 mm. In Analogie zu den Blechdickenmessungen bei den Prinzipversuchen stehen Blechdickenmitschriebe ($n = 277$) ausgewählter Ausgangswerkstoffe für Anbauteile zur Verfügung.

Neben den taktilen Blechdickenmessungen fand für die Auswertung und Digitalisierung der Versuchsergebnisse das optische Messsystem ATOS V8 und die optische Auswertesoftware der Gesellschaft für optische Messtechnik (GOM) Inspect V8 SR1 Anwendung. Die optischen Vermessungen der Prinzipbauteile wurden in den Messräumen des LFT und der Daimler AG durchgeführt, Digitalisierungen von Karosseriekomponenten ausschließlich bei der Daimler AG. Gegenüber taktilen Messungen können mittels des Triangulationsprinzips des optischen Messsystems komplette Messobjekte einseitig oder beidseitig gescannt werden.

Das verwendete ATOS-Messsystem am LFT enthält zwei digitale Kameras, mit welchen aus einer integrierten Lichtquelle ein Streifenmuster auf das Messobjekt projiziert und anschließend die 3D-Koordinaten berechnet werden (vgl. Bild 26). Durch eine Besprühung der Messobjekte mit einem matten, weißen Farblack vor den Versuchen ist sichergestellt, dass ein ausreichendes Kontrastverhältnis zur Objekterkennung vorherrscht. Weiterhin sind mindestens drei Referenzpunkte (externe oder auf dem Messobjekt) in jedem Aufnahmebild vorzusehen.

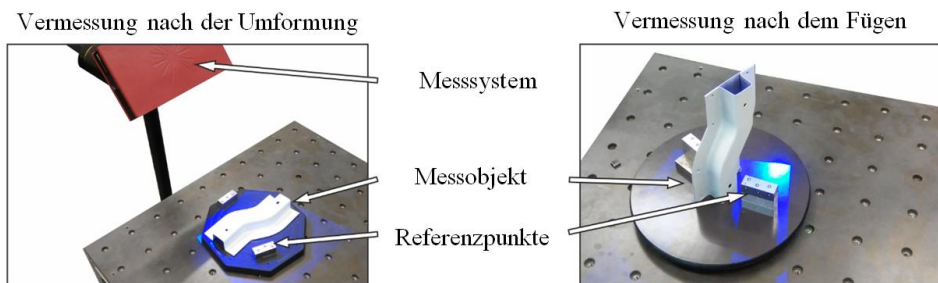


Bild 26: Messaufbau für die Prinzipbauteile/-baugruppen S-Rail (ATOS 3D-Messsystem)

Bei den Vermessungen der Prinzipbauteile und -baugruppen – wie S-Railprofile, H-Proben oder einzelne Segmente – wird in den Messräumen das gleiche Messprinzip angewendet. Aufgrund des geringen

Bauteilgewichtes kann die Baugruppe nach dem Fügen, wie in Bild 26 abgebildet, stehend optisch in einer Messaufnahme digitalisiert werden.

Bei den realen Karosseriebaugruppen wird ein Industrieroboter im Zusammenspiel mit dem GOM-ATOS Tripple Scan-System verwendet, um 10 bis 15 identische Einzelscans reproduzierbar in der Messbox zu tätigen. Es können Bauteiloberseite und die Bauteilunterseite der Objekte gemessen werden. Zudem werden alle Bauteile vor den Messungen gereinigt und mit dem weißen Pulver MR1000 beschichtet, um Reflexionen zu vermeiden. Bild 27 zeigt die bzgl. der Aufnahmepunkte durchgängige Messaufnahme für die Einzelteile sowie für die anschließend gefertigte Unterbaugruppe einer Motorhaube. Die Aufnahmepunkte sind auf Basis des n-2-1 Ausrichteprinzips bei statisch bestimmten Aufnahmen gewählt, um die drei rotatorischen und translatorischen Freiheitsgrade zu beschränken (siehe Abschnitt 2.2). Aufgrund der geringen Eigensteifigkeit der Baugruppe wurde noch ein vierter Z-Punkt (siehe Detail A in Bild 27) hinzugefügt, um ein Verkippen des Messobjektes zu verhindern.

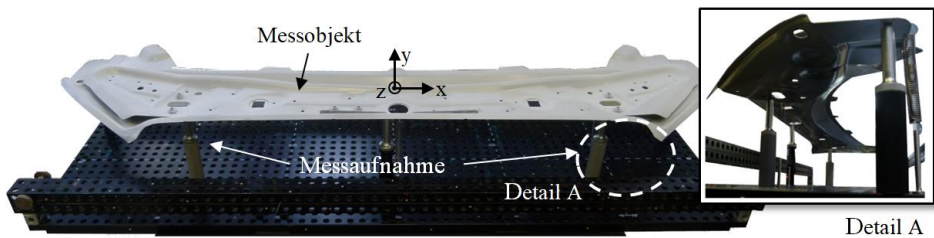


Bild 27: Messaufnahme der Unterbaugruppe einer Motorhaube mit dem n-2-1-Messprinzip

Im Anschluss an die Messungen werden die Aufnahmen polygonisiert und zu einer Stereolithographie(STL)-Datei zusammengefasst. Mit Hilfe des STL-Netzes ist es möglich, quantitative Formabweichungen zu den Sollgeometrien der Messobjekte zu berechnen. Das STL-Format eignet sich für eine analoge Auswertemethode der Simulations-/Messergebnisse.

Für die parallele Bewertung der Maßhaltigkeit von Versuchsbauteilen oder Ergebnissen aus der FE-Simulation ist eine reproduzierbare Ausrichtung der Ist-Daten erforderlich. Dazu werden mittels eines Best-Fit-Algorithmus mögliche Ausrichtungsfehler zwischen Ist- und Soll-Daten verkleinert. Es erfolgt eine je nach Bauteil möglichst exakte Referenzpunktausrichtung. Neben den Auflagepunkten wird jeweils ein Rund- und Langloch festgelegt, um Verschiebungen und Rotationen in die drei Raumachsen x, y und z zu verhindern.

Mit den ausgerichteten Messdaten werden verschiedenste Auswertestrategien mit einem maximalen Ausrichtungsfehler von 0,1 mm verfolgt. Der erste Schritt stellt den Flächenvergleich zwischen der Ist- und Sollgeometrien dar, indem die vom Soll- zum Ist-Element projizierte Abweichung in Normalenrichtung (dN) berechnet wird. Die weiteren Strategien zur Auswertung der Flanschkurven, Bauteilschnitte, Winkel und singulärer Punkte sind in Bild 28 am Beispiel des S-Rails dargestellt.

Durch offsetierte Flanschkurven können über den Verlauf der Formabweichung geometriebasierte Aussagen getroffen werden. Der Wert des Offsets variiert je nach Untersuchungszweck. Deren Einfluss der Bauteilradien, wie Stempel- oder Matrizenradien, wird durch senkrecht zu den Flanschkurven gesetzte Sektionsschnitte gezeigt. Weitere quantitative Aussagen lassen sich anhand definierter Winkel entlang der Sektionschnitte treffen. Vorteilhaft bei den Winkelauswertungen ist die Unabhängigkeit von der gewählten Flanschbreite.

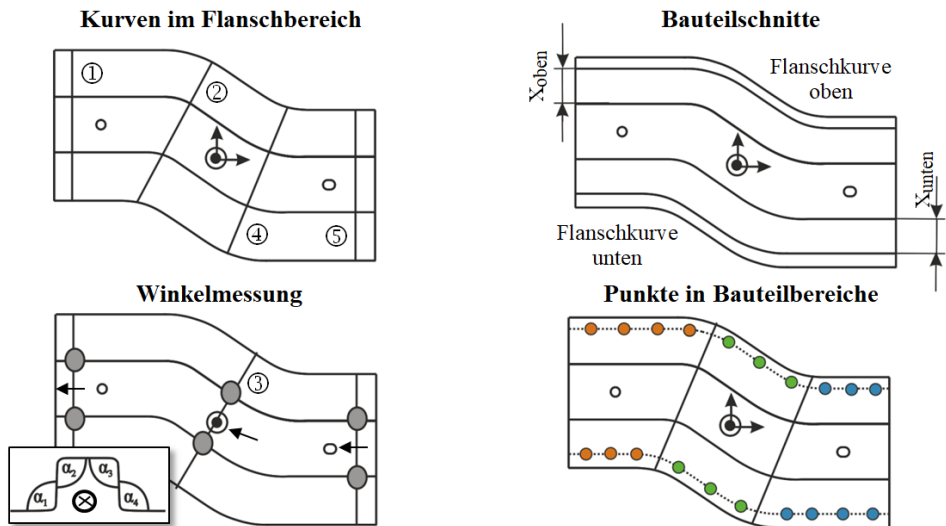


Bild 28: Schemata zu den Auswerteprozessen der Maßabweichungen für die Prinzipbauteile

Anhand einer weiteren Auswertemethode wird die resultierende Blechdicke mittels der optisch vermessenen Bauteil- oder Baugruppenober-/unterseiten analytisch bestimmt. Dreidimensionale Bauteilnetze werden durch eine Überlagerung der beiden Komponentenseiten mittels externen Referenzpunkten und einer identischen Werkstückposition erzeugt. Die an dem S-Rail dargelegten Messprinzipien und Auswertestrategien

werden des Weiteren bei der Prinzipbaugruppe H-Proben und den gefertigten Karosseriekomponenten genutzt.

4.4 Methoden zur Verknüpfung von Einzelprozessen zu einer durchgängigen Prozesskette

Im Rahmen dieser Arbeit werden neben den Einzelprozessen des Umformens und Fügens die Wechselwirkungen einer Umform- und Fügeprozesskette untersucht. Bei Verwendung der gleichen FE-Software können die Ergebnisgrößen zweier unterschiedlicher Prozesse (Umformprozess-Fügeprozess) gemäß dem Stand der Technik ohne größeren Aufwand übertragen werden. Bei Verwendung verschiedener FE-Tools oder der Digitalisierung von Messergebnissen für weitere Berechnungsschritte bedarf es Methoden zur Verknüpfung der erzeugten Daten. Mit den implementierten Methoden und Tools können die geometrische Form des Ergebnisses eines stationären elastoplastischen Werkstoffzustands, und Ergebnisgrößen wie Blechdickenverteilungen, Dehnungs- und Spannungszustände übertragen werden.

4.4.1 Geometrisches Mapping

Zur Übertragung der Formabweichungen nach Messungen oder Simulationen sind kleinere Anpassungen des Ergebnisses vorzunehmen. Teilweise freihängende Knoten sind aus den Netzen der Simulationsergebnisse zu löschen. Die freien Knoten entstehen durch die in der Simulationstechnik eingesetzte adaptive Netzverfeinerung und dienen zur genaueren Modellierung des Netzes an Kontaktflächen von umzuformenden Werkzeugelementen. Zudem werden Netzfehler in der Topologie von Messdaten behoben. Weiterhin ist vor der Übertragung der geometrischen Probenform eine initiale Ausrichtung über den Best-Fit-Algorithmus analog zu Abschnitt 4.3.2 durchzuführen.

Für das geometrische Mapping werden verschiedene Schritte angewendet. Abhängig ist die Vorgehensweise von Kriterien, wie beispielsweise der Übereinstimmung der Rand- und Löcherkonturen der Ist- mit den Soll-Daten. Bei Bauteilen mit hohen Ziehtiefen werden bei der Projektion der Knotenkoordinaten des Ist- auf das Soll-Netz in einem ersten Schritt die Zargenbereiche/Flanken (Grenzwinkel $\alpha \leq 30^\circ$) von der Knotentransformation ausgenommen. Zudem werden fehlende Projektionspunkte des Ist- auf das Soll-Netz anhand der Nachbarelemente interpoliert. Mit

der Anzahl an Inkrementen wird die relative Schrittweite des zu übertragenden Geometrieabstands festgelegt.

Die alternativ angewandte Methode zur Geometrieübertragung über projizierte Verschiebung der Soll- zu den Ist-Daten ist eine Übertragung des Mess-/Simulationsergebnisses durch die Verwendung von Federelementen der Firma inpro. Gemäß Bild 29 wird das Soll-Netz in die Form des Ist-Netzes (Simulations-/Messergebnisse) über unterschiedlich steife Federn gezogen. In Abhängigkeit zur ursprünglichen geometrischen Formabweichung ist eine verschieden hohe Anzahl an Iterationsschritten zu durchlaufen, bis das Ergebnis einem vorab zu definierenden, maximalen Abstandswert zwischen dem Ist- und dem Soll-Netz entspricht.

Bei diesen Iterationsschritten werden die Knoten des Soll-Netzes über ihre Knotennormale auf das Ist-Netz projiziert. Die Länge der Knotennormale entspricht dabei nicht dem Knotenabstand. Daher wird die Länge der Feder über das Produkt der Länge der Knotennormale und dem Kosinuswert des Winkels zwischen Knotennormale und -abstand berechnet. Über eine definierte Federsteifigkeit wird das Ist-Netz an das Soll-Netz gemäß der Federlänge gezogen. Für die Weiterberechnung mit dem Netz der neutralen Faser wird gegebenenfalls nach dem geometrischen Mapping noch ein Offset zur Generierung der Bauteilmittelfläche durchgeführt. Ergebnisse zu Abweichungen des ursprünglichen Simulations- oder Messergebnisses zum Netz nach dem geometrischen Mapping sind im Abschnitt 6.2 ausgeführt.

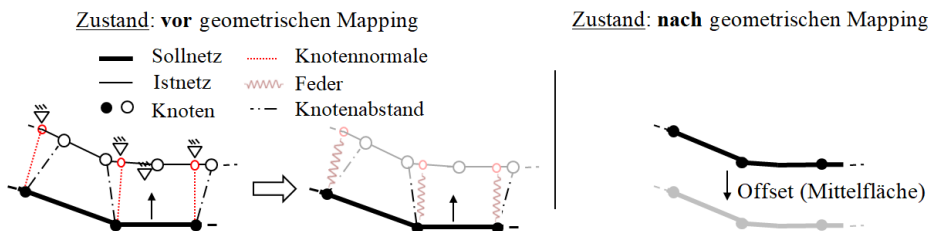


Bild 29: Schematische Darstellung zur Übertragung geometrischen Formen nach [128]

4.4.2 Übertragung von Dehnungen und ausiterierten Spannungen

Um den elastoplastischen Werkstoffzustand vorheriger Prozessschritte in anderen nachfolgenden FE-Programmen zu berücksichtigen, ist neben der Übertragung der geometrischen Informationen eine Übertragung ausgewählter Ergebnisgrößen Blechdicken, Dehnungs- und Spannungs-

größen sinnvoll. In Bild 30 sind die zwei Übertragungsoperationen der Dehnungen, Blechdicken und der ausiterierten Spannungen aufgelistet. Visualisiert ist das Beispiel der ausiterierten Spannungen am Beispiel des ZB S-Rail.

Bei der Übertragung der Spannungen gilt es, mit mehreren Iterationen ein Spannungsgleichgewicht zu finden, bei welchem keine zusätzlichen Verformungen durch den Übertrag induziert werden. Inpro stellt für die Enhanced Stress Mapping Methode ein Tool zur Verfügung. Bild 30 zeigt für die Übertragungsgröße der von Mises Vergleichsspannungen, dass durch die Anwendung der Methode der geometrische gemappte Zustand nicht verändert wird.

Die rechten beiden Abbildungen in Bild 30 zeigen, dass durch die Übertragung von ausiterierten Spannungen der Fehler einer ungewollten Formabweichung bis zu 0,5 mm im Bereich des Bauteilflansches vollständig reduziert werden kann. Die Methodik wurde zudem erfolgreich bei realen Karosseriekomponenten einer Motorhaube angewandt.

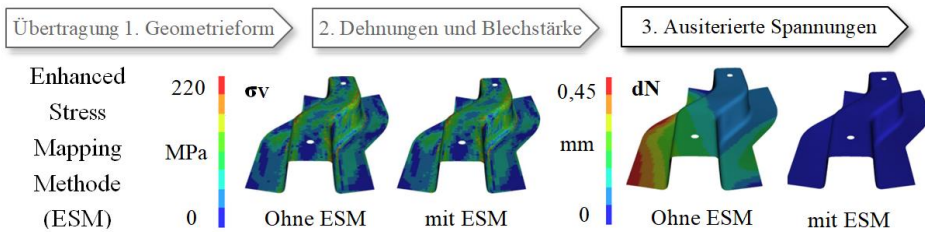


Bild 30: Übertragung von Ergebnisgrößen am Beispiel der ausiterierten Spannungen [129]

4.5 Simulationsumfeld und Modellbildung

Zusammenbausimulation

Anstelle von Experimenten wird unter Einsatz von FE-Methoden eine Produkt- und Prozessabsicherung zu einem frühen Produktentwicklungszeitpunkt durchgeführt. Simulationen können bereits auf Basis von Konstruktionsdaten eingesetzt werden, wenn noch keine physikalischen Pressenwerkzeuge oder Fügestationen gefertigt sind. Die Analyse des Einflusses schwankender Eingangsgrößen auf die Maßhaltigkeit von Baugruppen wäre zudem nur mit einem vergleichsweise hohen experimentellen Aufwand möglich. Im Folgenden sind daher das Simulationsumfeld und Implementierungen aufgeführt.

Verwendete Simulationsumgebung

Aufgrund der verschiedenen Implementierungsmöglichkeiten in den einzelnen FE-Programmen werden unterschiedliche Simulationenmethoden und Programme eingesetzt. Die Vorgehensweise zur Identifikation relevanter Eingangsgrößen auf die Maßhaltigkeit nach den einzelnen Prozessschritten ist unabhängig von den verwendeten FE-Programmen. Für die zu analysierende Prozesskette der Prinzip- und Karosseriekomponenten wird für die numerische Berechnung des Umformprozesses auf die Simulationsprogramme AutoForm® (Release R6.0) und LS-DYNA® (R8.0.0) zurückgegriffen. Bei den anschließenden Fügeprozessschritten finden die FE-Solver LS-DYNA® und Abaqus® 6.14 Anwendung. Bild 31 zeigt zusammenfassend die verwendeten FE-Programme der Umform- und Fügeprozesse in dieser Arbeit.

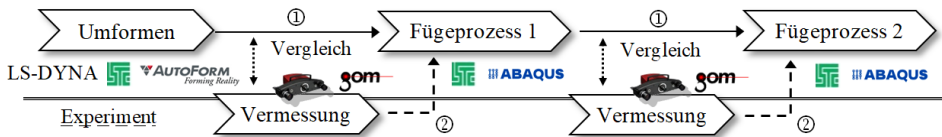


Bild 31: Simulationslandschaft und verschiedene Prozessrouten zur Verknüpfung der Umform- und Fügeprozesssimulationen oder zur Verwendung von Messergebnissen

Je nach Verfügbarkeit können unterschiedliche Prozessrouten zur Simulation einer Umform- und Fügeprozesskette genutzt werden. Die erste Prozessroute (Bild 31 oben) stellt die Simulationsprozesskette unter der ausschließlichen Verknüpfung von Simulationsergebnissen dar. Je nach Konsistenz der FE-Programme gilt es, dazwischen Methoden zur Übertragung von Ergebnisgrößen anzuwenden. Nach jedem Prozessschritt können die experimentellen Ergebnisse den Simulationsergebnissen gegenübergestellt werden. Bei größeren Differenzen von Messungen und Simulationen, oder falls keine Simulationen vorliegen, können alternativ die zweite Prozessroute (Bild 31 unten) digitalisierte Messergebnisse als geometrischer gemappter Input für aufbauende Simulationen genutzt werden.

Simulationsprozesskette anhand der Prinzipbaugruppe S-Rail

Bei der Simulationsprozesskette (visualisiert am Beispiel ZB S-Rail) wurde im Rahmen dieser Arbeit die in Bild 32 schematisch dargelegte Prozessreihenfolge durchlaufen. Die Simulationsprozesskette ist hinsichtlich der Anzahl an Prozessschritten modular aufgebaut, sodass jederzeit die Anzahl an Tiefzieh-, Beschnitt-, Einlege-, Füge oder Spannschritten variiert werden kann. Im Idealfall werden die in Bild 32 aufgezeigten Schritte in demselben FE-Programm (hier: LS-DYNA®) durchlaufen,

indem die Endergebnisse des vorherigen Prozessschrittes als Eingangsgröße im Ergebnisformat (.dynain) für den nächsten Prozessschritt genutzt werden. In diesem Ergebnisformat sind die gebildete Geometrie sowie Spannungs- und Dehnungsgrößen enthalten. Weiterhin sind in Bild 32 die jeweils genutzten Zeitintegrationsverfahren implizit und explizit für eine gesamtheitliche Simulation in LS-DYNA® dargestellt. Die Spann- und Fügeschritte der Einzelteile zu einer Baugruppe können implizit oder explizit berechnet werden. Die Simulationen mit impliziten (expliziten) Zeitintegrationsverfahren werden in LS-DYNA® mit der Single (Double) Precision Solverversion berechnet.

Unabhängig von der FE-Software werden in der Arbeit vollintegrierte Schalenelemente als Elementtyp für die numerische Berechnung ausgewählt, um Rechenzeit gegenüber Volumenelementen zu sparen [36]. So werden in der Schalenebene eine definierte Anzahl an Integrationspunkten (je nach Prozessschritt 5, 7 oder 11) äquidistant über die Blechdicke positioniert. Diese Modellierungsweise wird vorwiegend bei dünnwandigen Elementen mit einem mehrachsigen Belastungszustand angewendet. Das notwendige Kriterium dünnwandig ist erfüllt, da die Elementdicke im Vergleich zu den Längen-/Breitenabmessungen des Elements wesentlich kleiner ist. Weiterhin ist durch die adaptive Netzverfeinerung an feinen Radien beim Umformprozess eine hinreichende Netzfeinheit für die Abbildbarkeit des Bauteilverhaltens gegeben [130]. Die Netzfeinheit wird als geometrische Form des Messergebnisses oder der Simulation auf vernetzte Konstruktionssolldaten übertragen. Bei der initialen Vernetzung werden Bauteilradien, Konturlöcher und Falzflansche mit den Elementkantenlängen vernetzt, welche den Simulationsanforderungen der Prozesse entsprechen.

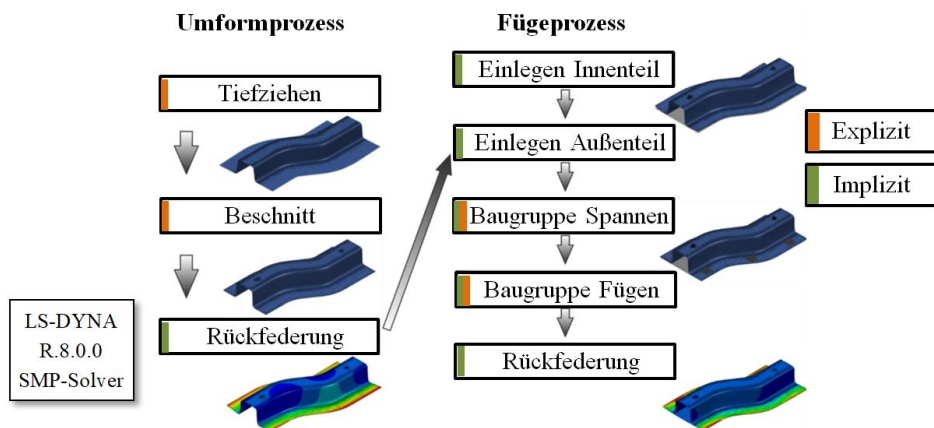


Bild 32: Grundsätzlicher Aufbau der Simulationsprozesskette Umformen und Fügen

Aufbau Umformprozesskette

Der erste Schritt der gesamten Simulationsprozesskette ist die Umformsimulation, welche im Rahmen dieser Arbeit aus den Vorgängen Tiefziehen, Beschnitt und Rückfederung besteht. Bild 33 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der genutzten Umformsimulationen.

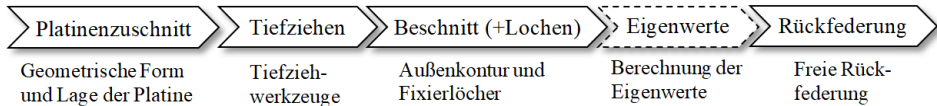


Bild 33: Grundsätzlicher Aufbau der eingesetzten Umformsimulationen

Die Ausgangsplatine wird auf der Matrize positioniert, bevor mittels der Werkzeuge Tiefziehstempel und Blechhaltergeometrie die Tiefziehsimulation realisiert wird. Die Umformwerkzeuge sind mit starren Schalenelementen (LS-DYNA®: Belytschko-Tsay-Elemente, Elementtyp: 2) modelliert. Der anschließende Beschnitt der Kontur und der Befestigungslöcher erfolgt durch die Eliminierung der Elemente außerhalb eines definierten Netzes. Der glatte, finale Bauteilrand entsteht durch die automatische Netzverfeinerung derjenigen Elemente, welche bei dem Beschnittvorgang geteilt wurden. Die finalen Schritte setzen sich aus einer Eigenwertberechnung des beschnitten Bauteils sowie einer Rückfederungsberechnung zusammen. Die Berechnung der Eigenwerte erfolgt an einem sich in dem Raum frei befindenden Bauteil. Alle Eigenmoden und Starrkörperverschiebungen werden nach der Berechnung unter einer Grenzfrequenz entfernt und die Rückfederung bestimmt. Die freien Rückfederungswerte sind so unabhängig von gewählten Auflagerpunkten.

Aufbau Fügeprozesskette und Modellbildung

Der nächste Schritt der Simulationsprozesskette ist die Fügeoperation mehrerer umgeformter Einzelbauteile zu einer Baugruppe. Die Füge-simulation gliedert sich gemäß Bild 34 modular in: Einlegevorgänge, Spannvorgänge, Fügevorgänge und Rückfederungsberechnung.

Zunächst wird sequentiell jedes Einzelteil unter Berücksichtigung der Gewichtskraft und ihrer Struktursteifigkeit auf die unteren Spannflächen einer Fügestation eingelegt. Bei dem FE-Programm LS-DYNA® findet zusätzlich eine Autopositionierung auf die unteren Spannflächen statt. Des Weiteren werden die Bauteile über definierte Fixierlöcher positioniert.

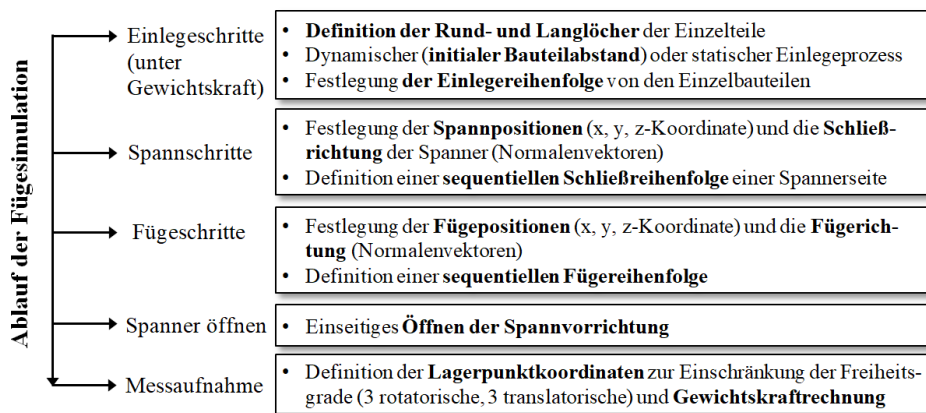


Bild 34: Grundsätzlicher Ablauf und Schritte der Fugesimulationen

Als nächstes werden die zu fügenden Bauteile an festgelegten Positionen mit einer definierten Schließrichtung modular gespannt. In LS-DYNA® erfolgt das Schließen der starr modellierten Spanner bei expliziter Rechnung geschwindigkeitsgesteuert. Die Schließgeschwindigkeit der Spanner nimmt bis zur definierten Zielgeschwindigkeit stetig zu. In Abaqus® wird den Spannschritten ein Ausschwingvorgang vorgelagert, um Bauteilschwingungen aufgrund dynamischer Effekte nach dem Einlegen abzu-dämpfen. Gemäß der Spannermodellierung von Bild 35 entspricht der initiale Abstand der oberen und unteren Spannfläche der Gesamtblechdicke der Fügepartner. Mittels des Keywords *Contact Interference werden in Abaqus® die links im Bild 35 dargestellten Durchdringungen des nicht-maßhaltigen Bauteils₁ mit der Spannfläche schrittweise beim Spannerschließen abgebaut. Je nach der Größe der Formabweichungen der Einzelteile, kann das Spannerschließen zu einem plastischen Materialverhalten führen.

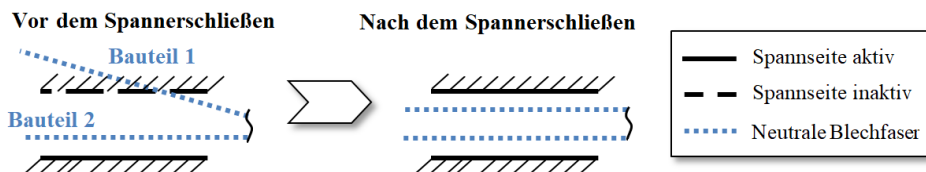


Bild 35: Ersatzmodellierung des Spannprozesses - Kontaktflächen und Schließen (Abaqus®)

Nach dem Spannvorgang folgt der Fügeprozess, bei welchem je nach Fügeverfahren mechanische Ersatzmodelle mit und ohne Fügezangen eingesetzt werden (siehe Bild 36). Für Robscan wird das in Bild 36 links visualisierte Fügemodell ohne Fügezangen verwendet, bei den Verfahren

Durchsetzfügen und Widerstandspunktschweißen wird das rechte Modell mit der Implementierung einer Fügezange genutzt. Bild 36 visualisiert den Setzvorgang des Balkenelementes nach geschlossenen Spannern und Zangen. Der nach dem Spannen verbleibende Spalt wird an den Fügestellen mittels Konnektoren und Balkenelementen geschlossen.

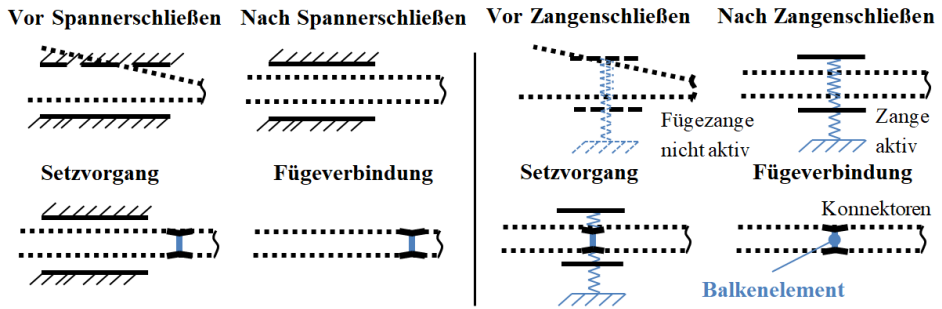


Bild 36: Ersatzmodellierung der Fügepunkte - ohne (links) und mit (rechts) einer Fügezange

Das rechts in Bild 36 dargestellte adaptierte Fügeersatzmodell berücksichtigt den lokalen Einfluss der Fügezange. Anhand von zwei starren kreisförmigen Flächen wird die Fügezange modelliert und mit ihrem Wirkflächendurchmesser versehen. Eine der beiden kreisförmigen Wirkflächen wird über ein Federelement mit geringer Federsteifigkeit an den Koordinaten des Fügepunktes gehalten. Die andere Wirkfläche der Fügezange wird über eine steife Feder im Abstand des Blechpakets der Fügezangen erzeugt. Nach dem Schließen der Fügezange wird der Kontakt zwischen den kreisförmigen Wirkflächen und den beiden Fügepartnern aktiviert. Analog zum Fügeersatzmodell ohne Fügezange wird ein Balkenelement über Konnektoren an die beiden Fügepartner angebunden. Konnektoren haben den Vorteil, dass die Krafteinleitung über die einzelnen Knoten verteilt wird und nicht netzadaptierte Umformnetze an der Fügestelle gefügt werden können. Das Öffnen der Fügezange ist der letzte Füge-schritt, wodurch die Kontaktbedingung zwischen den Wirkflächen der Fügezange und den Blechpartnern entfernt wird. Das Balkenelement mit einer hohen Steifigkeit bleibt zurück. Es folgt das sequentielle Öffnen der Bauteilspanner und eine gespannte oder freie Rückfederung unter Berücksichtigung der Gewichtskraft. Das Auflagekonzept für die Rückfederung ist gemäß den Eigensteifigkeiten und dem Messkonzept als sinnvoll zu definieren. Zudem ist oft eine Ausrichtung an den Fahrzeugpunkten benachbarter Baugruppen mittels Ausrichtepunkten geeignet.

5 Einflussgrößen des Umformprozesses auf die Maßhaltigkeit von Einzelteilen

Im Rahmen dieser Arbeit gilt es, die Zusammenhänge zwischen der Maßhaltigkeit der Einzelbauteile und der resultierenden Maßhaltigkeit von Baugruppen zu erörtern. Um ein besseres Verständnis für die Wechselwirkungen der Ergebnisse von den Prozessketten Umformen und Fügen zu erlangen, ist zunächst eine detaillierte Analyse der Einflussgrößen der Prozesskette Umformen erforderlich. Systematisch werden einzelne Prozess-, Werkstoff- und Geometrieparameter von prinzipiellen Einzelteilen variiert und hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Formabweichung der Rückfederung ausgewertet. Das Kapitelende umfasst Sensitivitätsanalysen von Umformprozessen sowie die Übertragung der erarbeiteten Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge von prinzipiellen auf reale Karosseriekomponenten.

5.1 Methodische Vorgehensweise zur Ermittlung relevanter Einflussgrößen des Umformprozesses

Zur Generierung von Ursachen-Wirkungs-Zusammenhängen bei Blechumformprozessen werden die Arten von Eingangsgrößen auf den Prozess kategorisiert und gemäß der Vorgehensweise in Bild 37 singular variiert. Die Auswahl der zu prüfenden Parameter orientiert sich an den gewonnenen Erkenntnissen des Stands der Technik zu Eingangsgrößen von realen Tiefziehprozessen, verbunden mit den Grenzen ihrer simulativen Abbildbarkeit.

In einem ersten Schritt werden Grundsatzuntersuchungen zur Beeinflussung des Rückfederungsergebnisses realisiert. Als Hauptziel wird definiert, den Einfluss der verschiedenen Parameterkategorien auf die Formabweichungen zu quantifizieren. Um überlagernde Parametereffekte bei der Analyse des Tiefziehens komplexer Karosseriebauteile zu vermeiden, eignen sich für die Studien vereinfachte Bauteile wie S-Rails oder H-Proben gemäß Abschnitt 4.2.2. Zudem wird in dem ersten Schritt ein Vergleich der Simulations- und Messergebnisse bei den Variationen der Prozessparameter und Werkstoffeigenschaften angestellt. Versuche mit prinzipiellen Geometrieformen werden genutzt, um Zusammenhänge zwischen Krümmungsform, Radien und resultierender Bauteilrückfederung zu ermitteln. Mit validierten Simulationsmodellen werden folgend

Sensitivitätsanalysen mit dem Bauteil S-Rail durchgeführt. Über die Sensitivitäten der zu variierenden Parameter erhält der Methodenplaner ein Modellverständnis zur Ableitung von Kompensationsmaßnahmen für die Rückfederung.

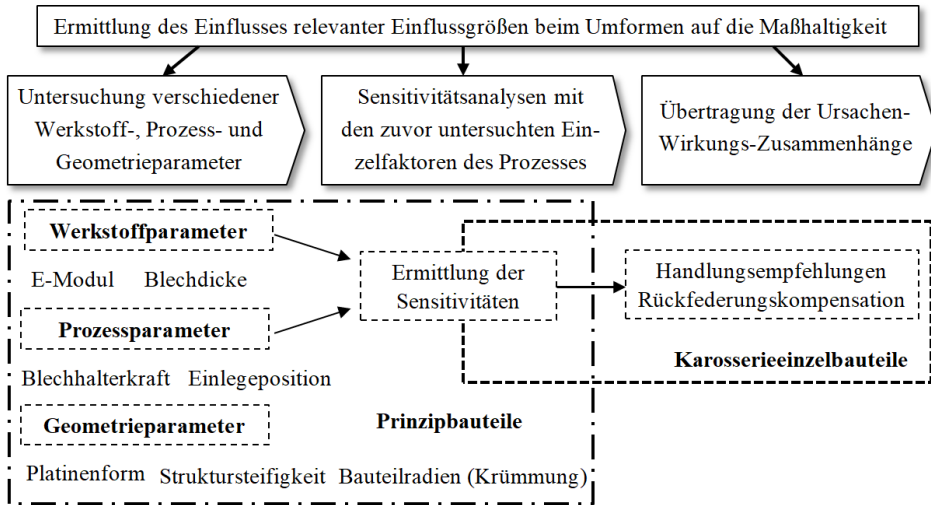


Bild 37: Methodische Vorgehensweise zur Ermittlung relevanter Einflussfaktoren von Prinzipbauteilen und Karosseriekomponenten

Aufbauend auf den Grundlagenstudien findet eine Verifikation des methodischen Ansatzes mit verschiedenen Einzelteilen der Anbaugruppe einer Rohkarosserie statt. Letztendlich zeigen Optimierungen an den beiden Baugruppenarten das Potential einer gezielten Steuerung von relevanten Faktoren auf das Rückfederungsergebnis nach dem Umformprozess.

5.2 Werkstoffcharakterisierungen als Eingangsgrößen für die Umformsimulationen und zur Beurteilung der Experimente

Die Resultate der Umformversuche und FE-Simulationen sind abhängig von den Werkstoffeingangsdaten. Daher wurden für die Werkstoffe Flachzugversuche, E-Modul-Messungen (siehe Abschnitt 4.1) und Blechdickenmessungen durchgeführt (siehe Abschnitt 4.3).

Bild 38 zeigt die ermittelten mechanischen Werkstoffkennwerte der Flachzugversuche bei der Probenentnahme von 0° zur Walzrichtung (WR). Zur Bestimmung der Anisotropiekenngrößen r_0 , r_{45} und r_{90}

und des Verfestigungsexponenten n wurden je Winkel drei Proben geprüft.

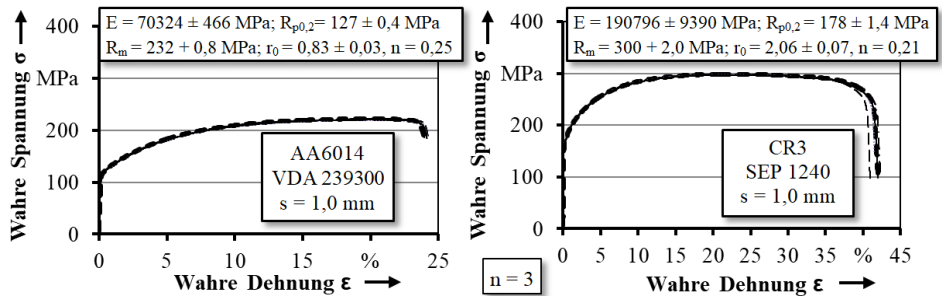


Bild 38: Ergebnisse ermittelter Festigkeits- und Verformungsverläufe der genutzten Werkstoffe AA6014 und CR3 (0° zur WR) bei einer Blechdicke von 1,0 mm

Auf Basis der experimentellen Flachzugversuche werden Fließkurven bis zu höheren Umformgraden extrapoliert. Der Umformgrad wurde experimentell bis $\phi = 0,2$ bestimmt. Bild 39 visualisiert die extrapolierten Fließkurven als Eingangsgrößen für die FE-Simulationen sowie die genutzten Extrapolationsansätze. Geeignete Extrapolationsansätze sind bei den Modellen von Hollomon, Voce, Ghosh, Hockett-Sherby oder Ludwik zu finden [131].

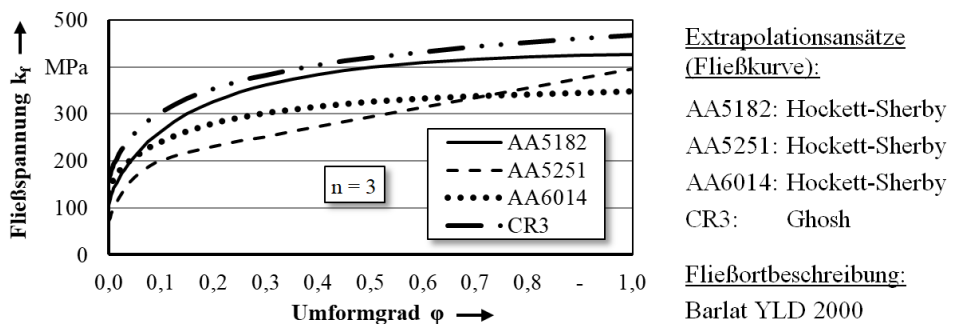


Bild 39: Extrapolierte Fließkurven der Werkstoffe AA5182, AA5251, AA6014 und CR3

Bei dem Verfestigungsverhalten sind signifikante Unterschiede bezüglich der einzelnen Werkstoffe zu erkennen. So weist der naturharte Werkstoff AA5182 gegenüber der aushärtbaren Aluminiumlegierung AA6014 einen stärkeren Anstieg der Fließspannung k_f auf. Die Anfangsfließspannung liegt bei dem Werkstoff AA5251 bei 73 MPa, wohingegen sie bei CR3 178 MPa beträgt. Aufgrund von Vorversuchen wurde bei den genannten Aluminiumwerkstoffen in dieser Arbeit kein dehnratenabhängiges Mate-

rialmodell verwendet. Das isotrop-kinematisches Materialmodell Barlat 2000 wird für die Modellierung des Fließortes genutzt.

Zur Charakterisierung der eingesetzten Versuchswerkstoffe sowie zur Identifizierung herstellbedingter Abweichungen wurden Resonanz-Dämpfungsanalysen für die Werkstoffe AA6014 (2 Hersteller), AA5251 und CR3 der Sollblechdicken von 1,0 mm durchgeführt. Tabelle 6 zeigt die berechneten Mittelwerte ($n = 3$) und Standardabweichungen von 210 bis 400 MPa für den dynamischen E-Modul je Werkstoff sowie Herstellerabweichungen in der Größenordnung von 700 MPa.

Tabelle 6: Resonanz-Dämpfungsanalysen für verschiedenste Werkstoffe nach ASTM 1876

E-Modul in GPa	AA6014 - Hersteller A	AA6014 - Hersteller B	AA5251	CR3
Mittelwert	71,47	70,77	68,07	209,0
Standardabweichung	0,40	0,21	0,29	0,26

Zum Vergleich der Ergebnisse von Simulation und Messung wurden Blechdickenmessungen mit den Werkstoffen AA6014 und CR3 getätigt. Die Blechdickenauswertung nach der Umformung erfolgte mit 17 Messpunkten an definierten Schnittebenen des S-Railsbauteils. Für die Messungen wurde der Dickenmesstaster D220 der Firma Kroeplin mit einer Messgenauigkeit von 0,01 mm eingesetzt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird von einer ausreichenden, guten oder sehr guten Übereinstimmung von Simulation und Experiment gesprochen, falls die Abweichung der Simulationen weniger als 20, 10 oder 5 % beträgt. Adaptionen dieses Bewertungsmaßstabes sind in Abhängigkeit von der Genauigkeit des Messmittels zu treffen. Die in Bild 40 ausgewerteten Messschnitte zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der Blechdicke zwischen Simulation und Experiment. Bei Experimenten mit dem Werkstoff CR3 wurde in Bild 40 eine sehr gute Übereinstimmung der taktilen Messwerte mit den Materialmodellen nach Hill 48, Hill 90, Barlat 89, Barlat 2000 aufgezeigt.

Die größten Abweichungen der Simulationen von den taktilen Messwerten sind im Bereich stark gekrümmter und konvexer Radien zu erkennen. Trotz der geringen Unterschiede bei der Materialmodellierung in LS-DYNA® zeigen die Materialmodelle nach Hill 90 und Barlat 2000 die besten Ergebnisse bei dem Blechdickenvergleich zwischen Simulation und Experiment. Aufgrund kürzerer Berechnungszeiten wird die Fließhypothese Barlat 2000 genutzt.

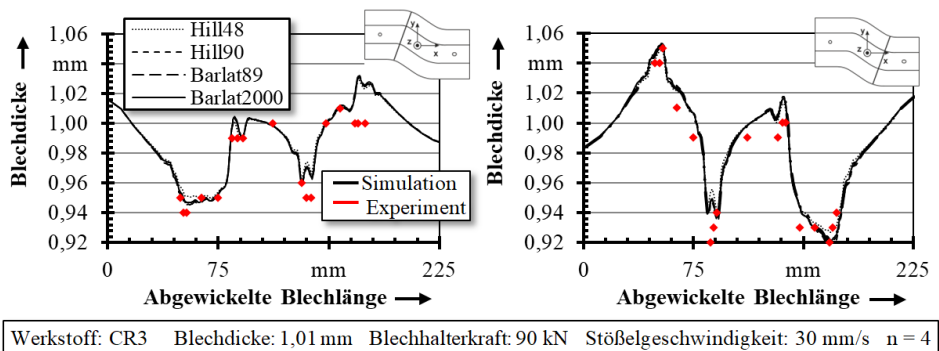


Bild 40: Vergleich einer taktil gemessenen Blechdickenverteilung eines S-Rail zu Simulationsergebnissen mit verschiedenen Materialmodellen in LS-DYNA®

5.3 Einfluss ausgewählter Eingangsgrößen auf die Rückfederung von Einzelteilen

Die Faktorstufen der zu variierenden Eingangsgrößen orientieren sich an Erfahrungswerten zu den Schwankungen der Eingangsgrößen von Karosserieumformprozessen. Tabelle 7 zeigt die ausgewählten Eingangsgrößen mit ihren Faktorstufen zur Analyse ihrer Sensitivität gegenüber der resultierenden Formabweichung. Variationen der Parameter werden a) mit Experimenten und Simulationen oder b) ausschließlich simulativ untersucht.

Tabelle 7: Übersicht über die Variationen der Eingangsgrößen des Prinzipbauteils S-Rail beim Umformprozess (Simulation und Experiment)

Parameter	Variationen des Parameters	
	a) Experiment und Simulation	b) Nur in Simulation
Werkstoff/E-Modul	AA6014; AA5251; CR3	---
Blechdicke	0,7; 1,0; 2,0 mm	---
Blechhalterkraft	30,60; 85,5; 90; 94,5; 120; 150 kN	---
Einlegeversatz (x-/y-Position)	-5 bis 5 mm	---
Platinenform	A und B	---
Bauteillänge nach dem Beschnitt	---	190; 230; 270 mm
Flanschbreite nach dem Beschnitt	---	20; 33; 45 mm

Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, hat die Wahl des E-Moduls (Aluminium/Stahl) und der Blechdicke (0,7 bis 2,0 mm) einen erheblichen Einfluss auf die elastische Rückfederung nach dem Biegen von ebenen Blechen. Es wird daher gezielt an dem Bauteil S-Rail analysiert, inwieweit sich diese Erkenntnisse auf die in der Arbeit zu analysierenden Prinzip-

und Realprozesse übertragen lassen. Dies ist Voraussetzung, um eine systematische Analyse der beiden Werkstoffparameter auf die Rückfederung nach dem Fügeprozess zu tätigen. Erkenntnisse werden dann über die Wechselwirkungen der Prozesse Umformen und Fügen abgeleitet.

Neben den Werkstoffparametern werden folgende Prozessparameter des Tiefziehens variiert: Einlegeposition der Platine, Blechhalterkraft sowie Form der Platine. Eine Variation der Einlegeposition der Platine ist in Anlehnung an den Serienprozess sinnvoll, da die Platinenposition abhängig von der Lagetoleranz der konstruierten und als Grobeinweiser bezeichneten Führungselemente ist. Je nach Krümmung der Umformwerkzeuge variiert die Position in der Ebene um mehrere Millimeter zu ihrer ursprünglichen Sollposition und hat dementsprechend einen verschieden hohen Einfluss auf die resultierende Formabweichung. Die Blechhalterkraft ist als Steuer- oder Störgröße zu definieren. Aufgrund dessen werden bei dem Werkstoff AA6014 und der Blechdicke von 1,0 mm sowohl kleinere Schwankungen (Schwankung von 5 % um den Nominalwert von 90 kN), als auch gezielte Variationen der Blechhalterkraft von 30 kN bis 90 kN eingestellt. Der rechte Teil von Tabelle 7 beinhaltet diejenigen Parametervariationen, welche nach der Validierung des FE-Modells nur simulativ untersucht werden.

Um zudem die Struktursteifigkeiten einzelner Prinzipproben zu berücksichtigen, werden Versuche und Simulationen mit S-Rail-Segmenten und H-Proben der Tabelle 8 realisiert.

Tabelle 8: Übersicht über die Umformvariationen bei S-Rail-Segmenten und H-Proben

Parameter	Bauteile	Variationen des Parameters (n ≥ 3 Versuche)
Werkstoff/ E-Modul	S-Rail-Segmente (1-5)	AA6014; CR3
	H-Proben	AA5182; CR3
Blechdicke	S-Rail-Segmente (1-5)	1,0; 2,0 mm
	H-Proben	1,0; 1,5; 2,0 mm
Flächenpressung/ Blechhalterkraft	S-Rail-Segmente (1-5)	2 MPa bzw. 90 kN
	H-Proben	1,2; 2; 2,8 MPa bzw. 180; 300; 420 kN
Ziehtiefe	H-Proben	20; 40; 60 mm
Bauteillänge	H-Proben	230; 270; 310; 350 mm

Im Vergleich zu den Ergebnissen zusammenhängender Bauteilkonturen werden einzelne Segmente (konkave-konvexe-gerade) des S-Rail-Bauteils mit geringeren Struktursteifigkeiten umgeformt. Die simulativen und experimentellen Auswertungen werden mit der Flächenpressung von 2 MPa für die Werkstoffe AA6014 und CR3 und der Blechdicke 1,0 mm realisiert. Analog dazu werden Untersuchungen mit H-Proben durchgeführt, um neben dem Einfluss des Werkstoffes (AA5182/CR3) und der

Blechdicke (1,0 oder 2,0 mm) die Auswirkung der Ziehtiefen in Kombination mit variierenden Flächenpressungen (1,2 bis 2,8 MPa) auf umgeformte Bauteile zu analysieren. Verschiedene Bauteillängen der H-Proben (230 bis 350 mm) sind erforderlich, um den Einfluss geänderter Spann- und Fixierkonzepte zu erforschen.

Bei den Prinzipversuchen mit dem S-Rail-Werkzeug sind die Ziehtiefe mit 40 mm und die Ziehgeschwindigkeiten mit 10 mm/s konstant. Zur Überprüfung der Ziehgeschwindigkeit und der Kraft-Weg-Verläufe werden zu den wichtigsten Parametervariationen die Presseninformationen über Sensoren aufgenommen und mit den Eingangswerten verglichen. Neben der Reproduzierbarkeit der eingestellten Prozessparameter gilt es, zu eruieren, ob regelungstechnische Abhängigkeiten von der Ziehgeschwindigkeit des Tiefziehprozesses bestehen.

Im linken Diagramm von Bild 41 werden repräsentative ($n = 3$) Kraft-Weg-Verläufe anhand des Verfahrensweges des unteren Ziehkissens des Umformwerkzeuges für die Ziehgeschwindigkeit von 10, 15 und 20 mm/s bei 90 kN aufgezeigt. Auf der rechten Seite ist der durch jeweils drei Versuche statistisch abgesicherte Vergleich der Blechhalterkräfte von 30, 90 und 150 kN bei einer Ziehgeschwindigkeit von 10 mm/s aufgelistet.

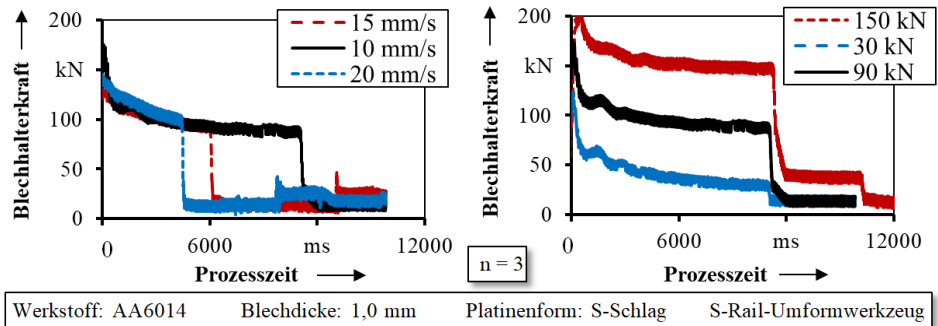


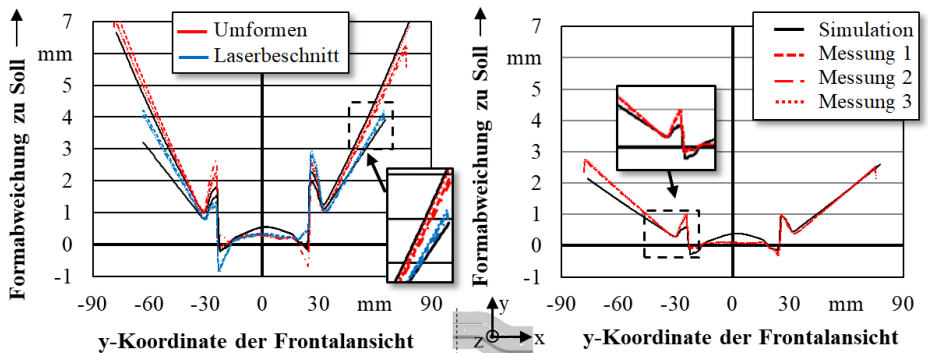
Bild 41: Einfluss der Ziehgeschwindigkeit und einer Änderung der Blechhalterkraft beim Umformprozess von S-Rail-Bauteilen im prototypischen Versuchsumfeld

Die Ergebnisse des Blechhalterkraftverlaufes zeigen, dass langsamere Ziehgeschwindigkeiten bei den Prinzipversuchen regelungstechnisch zu bevorzugen sind. Bei niedrigeren Ziehgeschwindigkeiten wird in den Versuchen eine konstantere Blechhalterkraft während der Zeit des Umformprozesses nachgewiesen. Für eine Übertragung der Ergebnisse wird im prototypischen Versuchsumfeld die Mindestziehgeschwindigkeit von 10 mm/s nicht unterschritten.

5.3.1 Variation des Werkstoffs/Elastizitätsmoduls

Die Nicht-Maßhaltigkeit von Einzelteilen hängt von ihrem elastoplastischen Werkstoffverhalten ab. Daher wird der Einfluss verschiedener Werkstoffklassen auf das Rückfederungsverhalten nach den einzelnen Schritten der Umformprozesskette (Tiefziehen-Beschnitt) quantifiziert. Angestrebt wird es, den Einfluss des Elastizitätsmoduls zu erörtern.

Am Beispiel des Prinzipbauteils S-Rail wird in Bild 42 links der Abgleich zwischen den Tiefzieh-/Laserbeschnittsimulationen und den Experimenten anhand eines definierten Bauteilschnittes visualisiert. Dazu passend ist im rechten Diagramm das Rückfederungsverhalten bei der Substitution von AA6014 durch CR3 bei konstanter Blechdicke von 1,0 mm visualisiert.



Werkstoff: AA6014/CR3 Blechdicke: 1,0 mm Blechhalterkraft: 90 kN $\mu=0,05/0,07$ Barlat YLD2000

Bild 42: Effekt der Werkstoffänderung (links: AA6014, rechts: CR3) auf das Ergebnis nach dem Tiefzieh-/Beschnittprozess von S-Rail-Bauteilen anhand von Bauteilschnitten

Die Streuung der Experimente (drei pro Umformprozesskettenschritt) mit identischen Versuchsrandbedingungen wird mit maximal 0,2 mm auf Basis von Bild 42 als gering bewertet. Bei den nachfolgenden Untersuchungen des Umformprozesses ermöglichen drei bis fünf Versuche eine repräsentative Versuchsauswertung und die Bildung von arithmetisch gemittelten Kurvenverläufen, ohne die Angabe ihrer Standardabweichungen.

Bei der Analyse des Bauteilschnittes an den Bauteilenden ist zu erkennen, dass die Flanschbereiche gegenüber den Bauteilzargen eine um 0,4 mm höhere Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation (Δ Zarge: 0,6 mm zu Δ Flansch: 0,2 mm) aufweisen. Begründet wird dies gemäß Bild 42 mit dem Messfehler bei dem optischen Messsystem in den Bauteil-

radien. Die Messungenauigkeiten sind durch die Projektionsmethode begründet. Im Radiusbereich wird der Abstand vom Soll- zum Ist-Element in Normalenrichtung ermittelt. Zudem ist anzumerken, dass die Bauteilschnitte ein lokales Abbild hinsichtlich Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation und des Bauteilverhaltens andeuten. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit verstärkt Kurven entlang der Bauteilflansche ausgewertet. Die Formabweichungen an den Bauteilflanschen sind von besonderer Bedeutung, da anschließende Fügeoperationen – wie die Verfahren Durchsetzfügen/Rollfalzen – in den Flanschbereichen stattfinden.

Zunächst wird daher allgemeingültig für die Werkstoffe AA6014 und CR3 untersucht, welchen Einfluss der E-Modul auf die Formabweichung eines Prinzipbauteils in Wechselwirkung mit ihren geometrischen Formen hat. Bild 43 stellt Flanschkurvenverläufe für die Blechdicke von 1,0 mm dar. Die Kurven sind 30 mm-Offsets von den Matrizenradienausläufen.

Die Ergebnisse von Bild 43 zeigen eine qualitativ gute Übereinstimmung für die charakteristischen Kurvenverläufe von Simulationen und Experimenten ($n = 3$) für die Werkstoffe AA6014 und CR3. Nach dem Umformprozess kann die Rückfederung des Werkstoffes CR3 tendenziell geringfügig besser vorhergesagt werden als bei AA6014. Die Simulationen überschätzen in Bild 43 die Maßabweichungen nach den Experimenten.

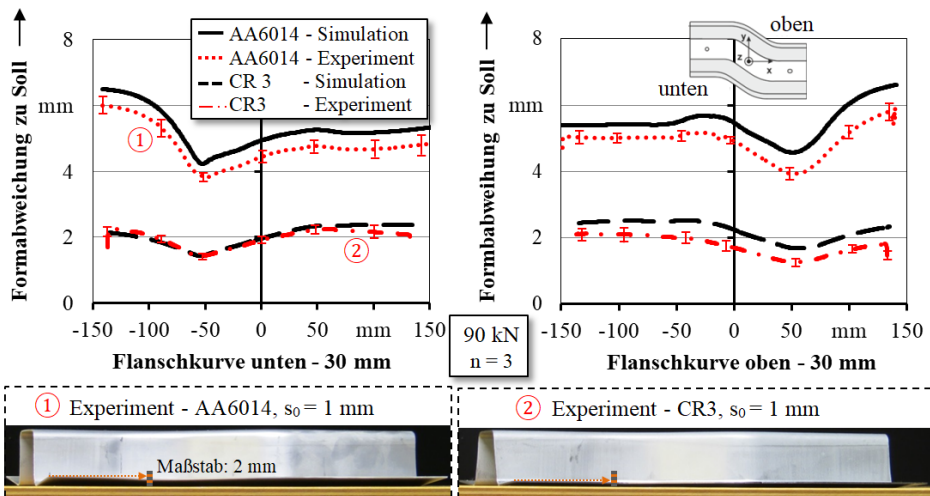


Bild 43: Formabweichungen zur Sollgeometrie bei Änderung des Werkstoffes des S-Rail-Prinzipbauteils anhand ausgewählter Flanschkurven nach dem Umformprozess

Weiterhin ist zu erkennen, dass die Welligkeit (als Maß für die Kurvenänderung) in den beiden Flanschen bei steigendem E-Modul reduziert wird. Ursächlich sind die abnehmenden elastischen Dehnungen bei der Zunahme des E-Moduls, was zu einer geringeren Rückfederung des Bauteils führt. Des Weiteren ist festzuhalten, dass generell das Rückfederungsverhalten bei dem Werkstoff CR3 um 60 bis 65 % gegenüber dem Wert bei AA6014 zurückgeht, was einer Verdreifachung des E-Moduls gegenübersteht. Die Ergebnisse decken sich mit der Theorie nach [28], bei welcher ein um zwei Drittel niedriger E-Modul bei CR3 zu einem niedrigeren elastischen Dehnungsanteil ε_e an der Gesamtdehnung führt. Gemäß Abschnitt 2.2.1 ist dies die Ursache für den beschriebenen Effekt der Rückfederungsreduzierung. Darauf aufbauend werden die Skalierungsfaktoren in Abhängigkeit von konvexen, konkaven und geraden Geometrieformen detailliert ergründet. Die Auswertung erfolgt anhand der Schnittpunkte von Bauteilschnitten und Flanschkurven. Skalare Werte werden in ihren charakteristischen Bereichen verglichen und Aussagen abgeleitet.

Gemäß Abschnitt 4.3 werden zur Identifikation der Wechselwirkungen von Elastizitätsmodul und Geometrieform die Schnittpunkte von drei repräsentativen Schnitten (1, 2 und 4) und zwei Flanschkurven mit einem Offset von 30 mm berechnet. Anhand dieser fünf charakteristischen Punkte wird das Bauteilverhalten in den konkaven, konvexen und geraden Bauteilbereichen mit den Krümmungsradien R_{50} und R_{100} in Bild 44 analysiert.

Gemäß Bild 44 induziert der Werkstoff AA6014 in den konvexen und konkaven Bereichen gegenüber CR3 14 bis 29 % höhere Maßabweichungen in Normalenrichtung (dN). Begründet wird dies durch die gegenüber konkaven Regionen höhere Materialverdrängung in den konvexen Bauteilabschnitten nach dem Tiefziehen. Hervorgerufen wird der Effekt durch die Zug-Druck-Spannungsverteilung in den Biegeradien aufgrund höherer Materialeinzüge. Restspannungen in Form von Eigenspannungen resultieren durch das aufgebrachte Biegemoment. Zusätzlich wird deutlich, dass die Ausprägung der Größe des Krümmungsradius einen dazu verhältnismäßig kleinen Einfluss auf die Maßabweichung hat. Gemäß der Biegetheorie nimmt nach [28] bei kleinere Bauteilradien der Anteil des plastifizierenden Bereiches in Richtung der neutralen Blechfaser zu. Diese höhere Plastifizierung reduziert die Rückfederung. Eine entscheidende Rolle spielt die Struktursteifigkeit der Bereiche. Bei den geraden, bezüglich der Membranspannungen spannungsneutralen, Bauteilsegmenten führt die geringere Struktursteifigkeit zu höheren Rückfederungswerten und bestätigt bisherige Studienergebnisse [61]. Der gerade Geometrie-

bereich wird aufgrund der höchsten Rückfederungswerte als Referenz angesehen. Dazugehörige prozentuale Unterschiede sind in der Tabelle von Bild 44 abzulesen.

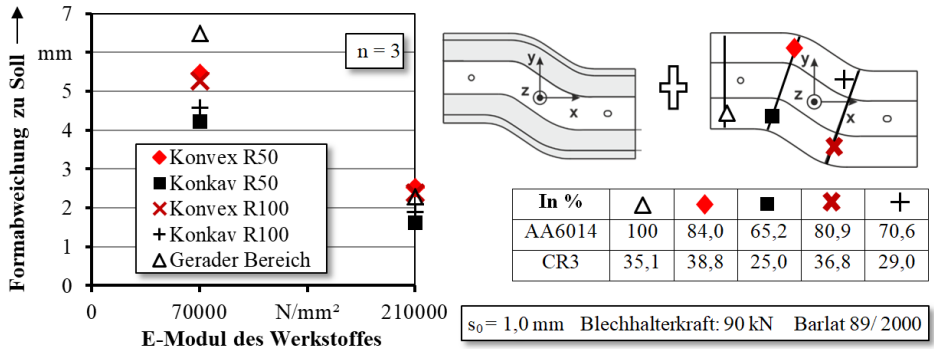


Bild 44: Einfluss des E-Moduls in Abhängigkeit geometrischer Formen beim Umformprozess eines Prinzipbauteils

Bei detaillierter Analyse der Ergebnisse fällt auf, dass bei dem Werkstoff CR3 ähnliche Tendenzen auftreten: geringere Formabweichungen bei konkaven als bei konvexen Geometrieformen. Der Einfluss der Höhe des Krümmungsradius (R_{50}/R_{100}) bei konkaven/konvexen Geometrieformen ist gegenläufig, aber identisch bei beiden Werkstoffen: Zunahme der Rückfederung bei Verdopplung der konkaven Krümmungsradien und Abnahme der Rückfederung bei halbierten konvexen Krümmungsradien. Zudem lässt sich gemäß Bild 44 folgern, dass ähnliche Effekte bei CR3 und AA6014 in einem Skalierungsfaktor von 0,35 bis 0,45 auftreten.

Zur Erklärung dieser Effekte auf das Rückfederungsverhalten des Prinzipbauteils wird die Blechdicke in den charakteristischen Bereichen 2 und 4 ausgewertet. In Abhängigkeit der dort vorherrschenden Spannungs- und Dehnungszustände entstehen gemäß Abschnitt 2.1.2 unterschiedliche Blechdickenänderungen, was mit einer Änderung der Rückfederung korreliert. Im Bereich 2 ist bei AA6014 die Materialaufdickung im konvexen Radius R_{50} (+8,3 %) im Maximum geringer als die Materialausdünnung im konkaven R_{50} (-10,1 %). Bei CR3 ist dies in skaliert Form (+5,9 %, -7,3 %) zu finden. In den konvexen Bereichen ist die relative Blechdickenänderung bei Substituierung von AA6014 durch CR3 etwa doppelt so hoch wie in den konkaven Bereichen. Dies entspricht den höheren Rückfederungswerten beim berechneten Verhältnis der Bauteilradien R_{50}/R_{100} : 14 bis 29 % bei AA6014 und 27 bis 56 % bei CR3.

5.3.2 Variation der Blechdicke

Aufgrund des signifikanten Einflusses einer Blechdickenänderung auf die entstehende Maßabweichung ist hierzu eine detaillierte Analyse erforderlich. Der Effekt der Ausgangsblechdicke von 1,0 oder 2,0 mm auf die Formabweichung wird anhand des Werkstoffes AA5251 in Kombination mit verschiedenen Geometrieformen verglichen. Dazu werden in Bild 45 die repräsentativen Formabweichungen von zwei charakteristischen Flanschkurven (Offset zu Matrizenradien: 30 mm) bei 90 kN Blechhalterkraft und dem Werkstoff AA5251 ausgewertet.

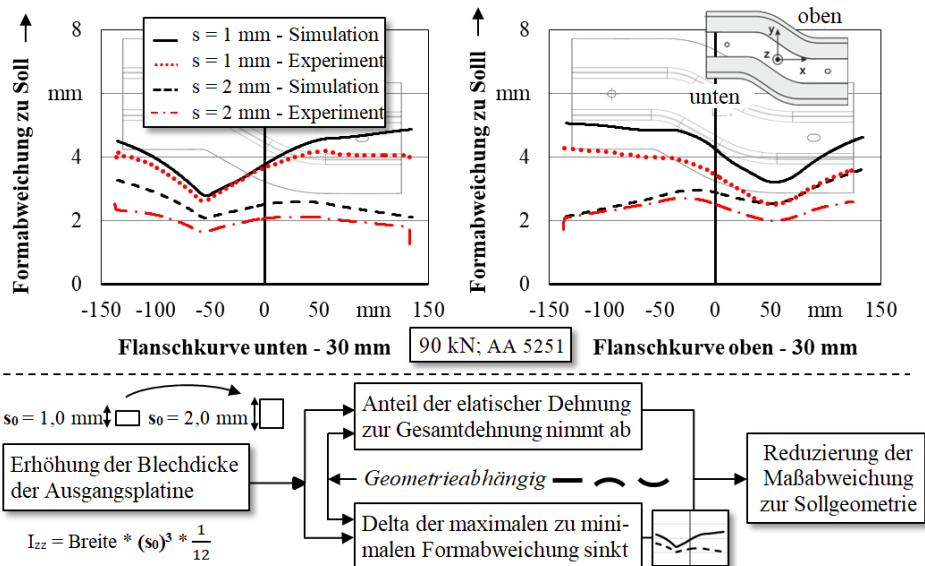


Bild 45: Normalenabweichungen zur Sollgeometrie bei der Blechdickenvariation des S-Rail-Prinzipbauteils anhand ausgewählter Flanschkurven nach dem Umformprozess

Die simulativen Ergebnisse stimmen für beide Blechdicken qualitativ mit den Simulationen überein. Analog zu den Variationen des Werkstoffes überschätzen die Simulationen partiell die Experimente. Aufgrund des sinkenden Anteils der elastischen Dehnung an der Gesamtdehnung führt die doppelte Blechdicke bei den Experimenten und Simulationen zu einer geringeren Maßabweichung. Entlang der Flanschkurven treten bei den x-Koordinaten $x = -60$ und $x = 55$ mm jeweils Tiefpunkte bei den Kurvenverläufen im Bereich der Scheitelpunkte der konkaven Bauteilbereiche auf. Ursächlich ist die Geometrieform der Bauteilzarge, welche die Flanschfläche partiell umschließt und so das Widerstandsbiegemoment analog zu einer Verrippung erhöht. Weiterhin ist anzumerken, dass im Gegensatz zu der Substitution von AA6014 durch CR3 eine Erhöhung der

Blechdicke des Strukturwerkstoffes nur eine geringfügige Verbesserung der Welligkeit in den beiden Flanschkurven bewirkt. Dies ist in dem gleichen Werkstoffmodell bei Änderung der Blechdicke begründet. Die Blechdickenänderung skaliert die Rückfederung im Gegensatz zur Änderung des Werkstoffs nicht linear in allen geometrischen Bereichen. Mit zunehmender Ausgangsblechdicke steigt die Rückfederung in den geometrischen konvexen Bereichen stärker als in den konkaven Bereichen an. Ursächlich für die reduzierte Rückfederung bei einer höheren Ausgangsblechdicke ist nach Oehler/Kaiser [132] das veränderte Biegeradius-Blechdicken-Verhältnis. Dieser steigende Quotient geht mit einem höheren plastifizierenden Bereich über der Bauteilblechdicke einher. Die Rückfederung des tiefgezogenen Bauteils sinkt. Nachgewiesen ist dies an geraden Werkstückbereichen, ohne die auftretenden Querkräfte in der Bauteillängsachse bei konvexen/konkaven Bereichen.

Bild 46 visualisiert anhand des Außenhautwerkstoffes AA6014 die quantitativen Zusammenhänge zwischen einer Blechdickenänderung, den geometrischen Formen und der resultierenden Formabweichung des Bauteils. Untersucht werden die Blechdicken 1,0 und 2,0 mm.

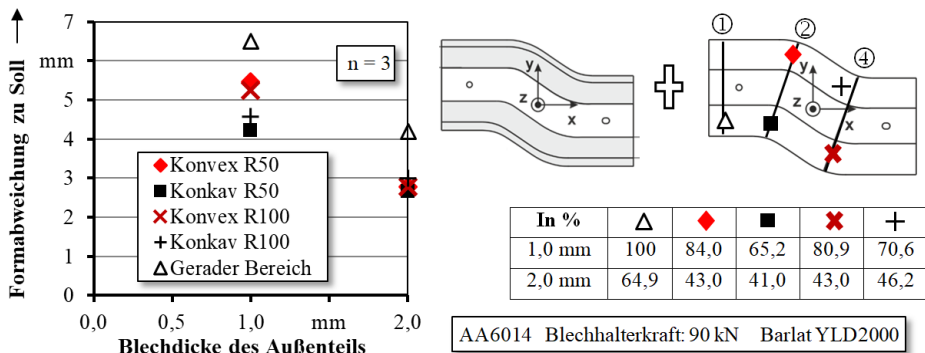


Bild 46: Einfluss der Blechdicke in Abhängigkeit geometrischer Formen beim Umformprozess eines Prinzipbauteils

Bei der Erhöhung der Blechdicke von 1,0 auf 2,0 mm sind im Gegensatz zur Substitution von AA6014 durch CR3 bei gleicher Ausgangsbasis andere Ergebnisse der Formhaltigkeit zu erkennen. In den Flanschbereichen führt die Blechdickenänderung von konvexen und konkaven Geometriebereichen zum einen zu einer geringeren Kompensation der Normalenabweichung. Zum anderen werden die konvexen Bereiche betragsmäßig stärker kompensiert als die konkaven Bereiche des Prinzipbauteils. Zudem differiert die Maßhaltigkeit des geraden Bereiches signifikant beim Vergleich der Blechdicken- zur Werkstoffänderung. Abschließend

werden die Erkenntnisse zu den Werkstoff- und Geometrieparametern in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Erkenntnisse zu den Einflussfaktoren E-Modul, Blechdicke und Geometrieform

Nummer	Auswirkung von E-Modul, Blechdicke und Geometrie auf die Formhaltigkeit
1	Ein höherer E-Modul bedingt durch geringere, elastische Dehnungen eine kleinere Bauteilrückfederung, was zu einer Reduktion der Welligkeit von Flanschkurven führt.
2	Im Vergleich zur Struktursteifigkeit hat die Größe des Krümmungsradius einen verhältnismäßig kleinen Einfluss auf die Maßabweichung von umgeformten Bauteilen.
3	Signifikante Unterschiede der Formhaltigkeit von konkaven gegenüber konvexen Bauteilabschnitten aufgrund verschieden hoher Materialverdrängung nach dem Tiefziehen.
4	Eine Blechdickenänderung skaliert die Formhaltigkeit – im Gegensatz zur Änderung des Werkstoffs – nicht linear in allen geometrischen Bereichen.
5	Im geraden, geometrischen Bereich ist die Formabweichung des umgeformten Prinzipbauteils bei einer doppelten Blechdicke geringer als bei einem dreifachen E-Modul.

5.3.3 Einlegeposition und Blechhalterkraft

Neben den Werkstoffparametern gilt es, den Einfluss der Prozessparameter des Umformprozesses auf die Maßhaltigkeit von Einzelbauteilen zu untersuchen. Daher werden für die Ermittlung grundlegender Zusammenhänge die Einlegeposition, Blechhalterkraft experimentell und simulativ verändert und die entstehende Formabweichung am Bauteil S-Rail beurteilt.

Die Parametervariation der Einlegeposition der Platine erfolgt entweder in positiver oder in negativer x- oder y-Koordinatenrichtung. Ziel ist es, zu ergründen, welchen Einfluss die resultierenden geänderten Verhältnisse der Flächenpressungen an den beiden Flanschseiten auf die Formabweichung nach der Rückfederung haben. In den Diagrammen von Bild 47 sind dazu die aus drei Messungen gemittelten Flanschverläufe sowie die dazugehörige Standardabweichung als Fehlerbalken aufgelistet. Für die Ermittlung des Zusammenhanges mit den konvexen und konkaven Geometrieformen der Radien R50 und R100 werden die Abmessungen entsprechend ihrer Ausbreitung in x-Koordinatenrichtung markiert.

Beginnend mit der Studie des x-Versatzes zur ursprünglichen Platinenposition (Einlegeversatz $x = 0$) zeigt Bild 47 den Effekt eines negativen x-Versatzes für die Rückfederung des Bauteils in den Flanscbereichen.

Das linke Diagramm von Bild 47 lässt erkennen, dass ein x-Versatz zur ursprünglichen Platinenposition von 4 mm eine unterschiedliche Veränderung der Formabweichungen entlang der Flanschkurve bewirkt. Am negativen Bauteilende treten im geraden Bereich mit Anschluss zum konkaven Bereich Reduktionen der Rückfederung von bis zu 0,4 mm auf.

Dahingegen sind im konkaven Bereich R50 kaum Unterschiede aufgrund der Platinenverschiebung in negativer x-Richtung zu erkennen. Im anschließenden konvexen Bereich R100 ist eine Erhöhung der Rückfederung zu verzeichnen. Begründet werden diese Effekte dadurch, dass im Bereich negativer x-Koordinaten der Bauteilabschnitt verlängert und im positiven verkürzt wird. Die Verkürzung oder Verlängerung des Bauteilflansches führt zu einer Veränderung der Flächenpressung in dem Bereich. Die geänderte Flächenpressung ruft andere Spannungsverteilungen in den Bauteilradien hervor und bedingt so Änderungen der Formabweichungen von bis zu 30 %. Anzumerken ist weiterhin, dass die ursprüngliche Position und Form der Platine bei diesem Prinzipbauteil bereits voroptimiert ist, sodass bei der Referenzposition eine möglichst homogene Flächenpressung über die Flanschflächen vorliegt.

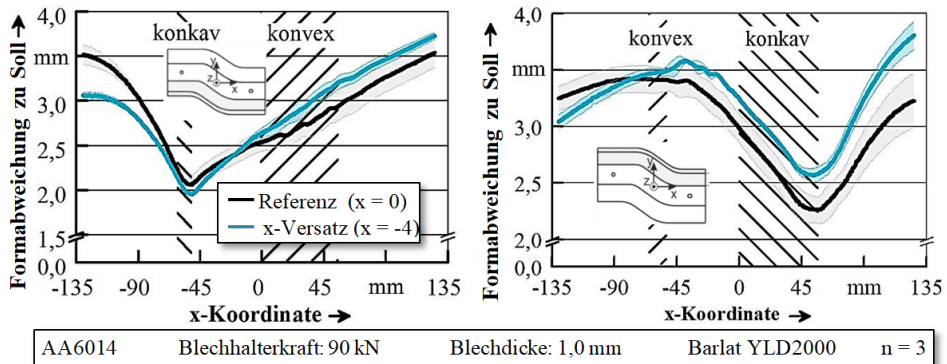


Bild 47: Einfluss eines veränderten x-Einlegeversatzes der Platine auf das Rückfederungsergebnis nach dem Umformprozess bei AA6014 und einer Blechdicke von 1,0 mm

Bei der Auswertung der Flanschkurven des rechten Diagrammes von Bild 47 sind analoge Tendenzen für das Bauteilverhalten zu erkennen. Die gerade geometrische Form wird in positiver x-Koordinatenrichtung verkürzt, wodurch eine erhöhte Formabweichung zur Referenzkurve von bis zu 0,8 mm am Bauteilende entsteht. Aufgrund der veränderten Flächenpressung resultiert unter Berücksichtigung des Zug-Druck-Spannungszustandes eine höhere Rückfederung im konkaven Bauteilbereich. Es entsteht ein leichtes Verkippen der Flanschkurven. Weiterhin ist festzustellen, dass die Standardabweichung der Versuche mit dem x-Versatz von -4 mm auf beiden Flanschseiten gegenüber den Referenzversuchen geringer ausfällt. Zudem lassen sich die geometrischen Einflüsse der Umformradien deutlich erkennen.

Zusätzlich zur Variation der x-Position gilt es, die Auswirkung einer veränderten Platineneinlegeposition zu verstehen. Bild 48 verdeutlicht die Effekte einer y-Verschiebung um ± 4 mm. Im Vergleich zum x-Versatz wird das Bauteilverhalten beim y-Versatz inhomogener. Grund hierfür ist die variierende Flächenpressung quer zur x-Koordinate.

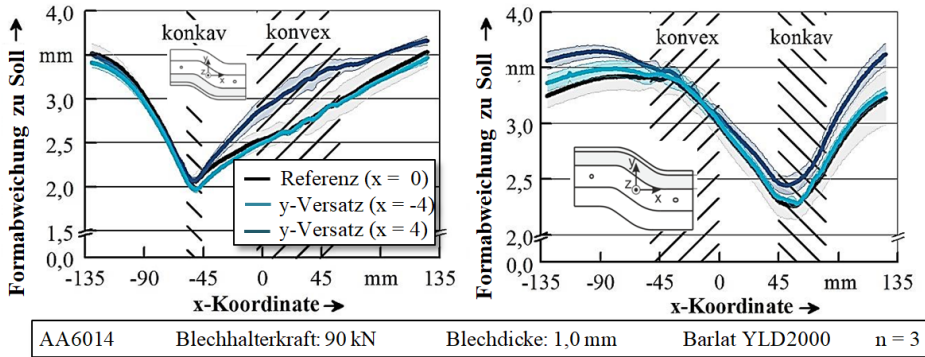


Bild 48: Einfluss eines veränderten y-Einlegeversatzes der Platine auf das Rückfederungsergebnis nach dem Umformprozess bei AA6014 und einer Blechdicke von 1,0 mm

In diesem Fall wirkt sich der betragsmäßig gleiche negative Versatz in y-Richtung geringer auf die Formabweichung zur Sollgeometrie aus. Bei dem y-Versatz von 4 mm zur Referenzlage ist die maximale Differenz der Formabweichungen auf 0,1 mm in den beiden Flanschkurven oben und unten zu beziffern. Die Versuche mit negativem oder positivem y-Versatz weisen gemäß den Auswertungen in Bild 48 bis zu 15 % höhere Rückfederungen auf. Begründet werden die höheren Formabweichungen durch die im Vergleich zur Referenz lokal, größeren Flanscbreiten nach dem Umformprozess. Dieser ist die Folge einer inhomogen verteilten Blechhalterkraft auf den beiden Flanschflächen. Es entstehen in partiellen Bauteilbereichen höhere Vergleichsspannungen bei gleichzeitig steigendem Anteil der elastischen Dehnungen. Bei den Experimenten mit dem y-Versatz führen die Bauteilenden der oberen Flanschkurve zu einer stärkeren Rückfederung als bei einem negativen x-Versatz der Ausgangsplatine (siehe rechtes Diagramm in Bild 48). Nach der Einflussanalyse des Platineneinlegeversatzes ist zu beobachten, dass aufgrund der geänderten Homogenität der Flächenpressung partiell um maximal 0,5 mm höhere Rückfederungen die Folge sind.

Als weiterer in der Literatur identifizierter, relevanter Prozessparameter ist die Blechhalterkraft zu nennen. In der folgenden Auswertung wird die Blechhalterkraft bewusst als Steuergröße (60-120 kN) bei den Tiefziehoperationen zur Einstellung des Werkstoffflusses genutzt.

Im Bild 49 werden drei Blechhalterkräfte entlang vier Flanschverläufen in den Abständen 5, 18, 30 und 45 mm zur Einsatzlinie des Matrizenradius ausgewertet. Anhand der Ergebnisse werden Rückschlüsse des Einflusses der Blechhalterkraft auf die resultierenden Formabweichungen getroffen. Effekte bezüglich Faltenbildungen werden an dieser Stelle nicht ausgewertet, da es hierzu in der Literatur zahlreiche Ergebnisse gibt (vgl. Abschnitt 2.2).

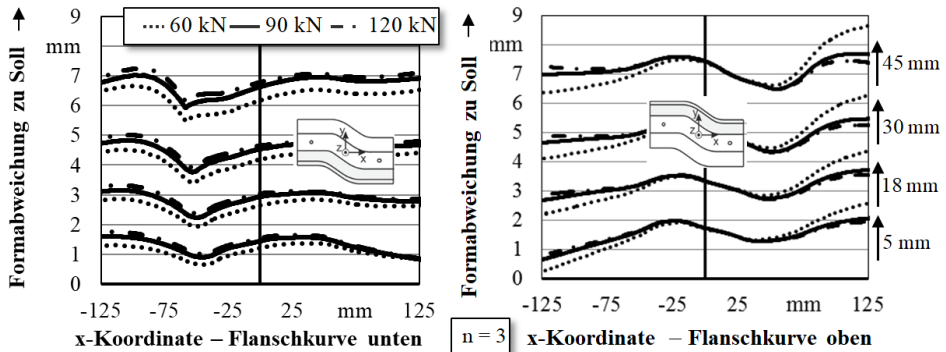


Bild 49: Einfluss von verschiedenen Blechhalterkräften auf die Formabweichungen nach dem Umformprozess bei dem Werkstoff AA6014 und der Blechdicke von 1,0 mm

Die Kurvenverläufe aus Bild 49 zeigen den im Vergleich zu den Werkstoff- und Prozessparametern mit maximal 7 % geringen Einfluss der Blechhalterkraft auf die entstehende Formabweichung bei dem S-Rail-Bauteil. Die lokalen Minima des konkaven Flanschbereiches ($x = 45$ mm) in der Flanschkurve des rechten Diagrammes bleiben bei sich ändernder Blechhalterkraft in den vier Flanschverläufen konstant. Variationen der Formabweichungen auf Basis einer korrigierten Niederhalterkraft zeichnen sich vorwiegend in den geraden Flanschbereichen an den Bauteilen ab. Wird die Blechhalterkraft von 90 kN auf 30 kN reduziert, führt dies auf der unteren Flanschkurve zu einer abnehmenden Normalabweichung zur Sollgeometrie. Auf der oberen Flanschkurve induziert dies eine Verkipfung der Flanschkurve (negativer Bereich: $dN \downarrow$, positiver Bereich: $dN \uparrow$). Bei Erhöhung der Blechhalterkräfte auf 120 kN ist eine geringere Abweichung zur Referenzsimulation mit 90 kN in positiver Normalenabweichung zu verzeichnen.

Zur Erklärung dieser Effekte werden für die drei Blechhalterkräfte die resultierenden Formabweichungen gegenübergestellt. Bei einer steigenden Blechhalterkraft ($90 \rightarrow 120$ kN) nimmt die Blechdurchdünnung aufgrund des gehemmten Blecheinzuges vor allem im Zargenbereich zu. Die partiell geringeren Blechdicken induzieren größere Eigenspannungen,

welche höhere Rückfederungen in den Flanschbereichen verursachen. Nachteilig ist die zunehmende Tendenz von Bauteilreißen bei Überschreitung der kritischen Blechausdünnung im Zargenbereich. Eine Reduzierung der Blechhalterkraft (90 → 60 kN) verursacht eine geringe Beeinträchtigung des Blecheinzuges und der Blechdickenänderung. Die tendenzielle Erhöhung der Blechdicke führt zu einer Materialanhäufung in den Zargen und einer geringeren Rückfederung im Flanschbereich. Zu beachten ist die erhöhte Gefahr der Faltenbildung.

Resümierend ist festzuhalten, dass aufgrund der hohen Bauteilsteifigkeit dieses Prinzipbauteil eine geringe Veränderung der Formhaltigkeit durch Prozessparameter erzielt werden kann. Daher wird insbesondere für die stochastischen Analysen und der Ermittlung der Streubreiten der Blechhalterkraft (als Störgröße) die Blechhalterkraft um den Wert von 90 kN variiert. Abschließend umfasst Tabelle 10 ermittelte Zusammenhänge zwischen der Ausprägung der Prozessparameter Einlegeposition und Blechhalterkraft und der Formhaltigkeit von Bauteilen.

Tabelle 10: Erkenntnisse zu den Prozessparametern Einlegeposition und Blechhalterkraft

Nummer	Auswirkung der Einlegeposition und Blechhalterkraft auf die Formhaltigkeit
6	Eine geänderte Einlegeposition führt durch die Flanschverkürzung/-verlängerung und resultierende Flächenpressung zu einer signifikanten Zu-/Abnahme der Formhaltigkeit des Bauteils.
7	Der Effekt der Einlegepositionsverschiebung in x- und y-Richtung auf die Formhaltigkeit ist abhängig von den geometrischen Randbedingungen des Bauteils.
8	Die Auswirkung einer modifizierten Blechhalterkraft ist abhängig von der prozentualen Blechausdünnung/-aufdickung in Folge der geometrischen Formen des Bauteils.
9	Die größten Unterschiede in Bezug auf die resultierende Formabweichung sind bei der Blechhalterkraftvariation vorwiegend an den Enden der Bauteilflansche zu finden.

5.3.4 Platinenform und Struktursteifigkeit von Prinzipgeometrien und -segmenten

Ein weiterer Schritt zur Bestimmung von relevanten Einflussfaktoren auf den Umformprozess bildet die Analyse geometrischer Parameter, wie die Platinenform (Bild 50).

Die Studie soll ermitteln, inwieweit eine andere Form (Form A oder B) der Ausgangsplatine die Abweichungen (z-Verschiebung) zur Sollgeometrie verändert. Hintergrund sind nicht hinsichtlich eines homogenen Blechhalterdrucks optimierte Platinen oder Schwankungen ihrer geometrischen Form, welche nach der Platinenschneideoperation auftreten.

Im Hinblick auf die Wechselwirkung der Platinenform mit konvexen und konkaven Bauteilradien werden für die Bauteilschnitte 2 und 4 die Blechdickenänderung und die resultierende z-Verschiebung nach der freien Rückfederung in Bild 50 bestimmt. Im Bereich der kleineren Radien R₅₀ (Schnitt 2) weist die Platinenform des Parallelogramms (Abmaße der Form B siehe Abschnitt 4.2.2) eine in negativer x-Richtung verschobene Kurve der Blechdickenänderung entlang der abgewickelten Blechlänge auf. Die Extremwerte unterscheiden sich in der Höhe der Blechdickenänderung geringfügig um 0,01 mm, lediglich im geraden Bereich nahe des konvexen Radius ($x \geq 170$ mm) ist eine um 1,1 mm höhere Rückfederung festzustellen. Analog dazu zeigen sich im rechten Diagramm von Bild 50 lokal veränderte Rückfederungswerte bei dem Einsatz des Parallelogramms anstelle der S-Schlag-Platinenform A. Im Detail weisen die hergestellten Prinzipbauteile aus parallelogrammförmigen Platinen in den äußeren geraden Bereichen (negativ/positiv) eine um 1,8 mm höhere Rückfederung auf.

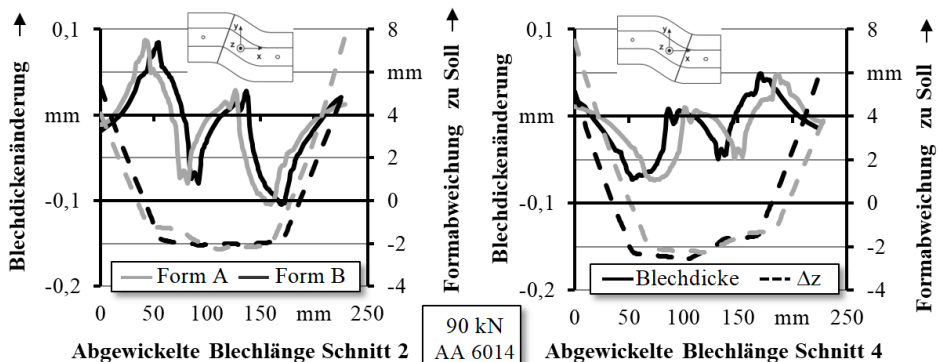
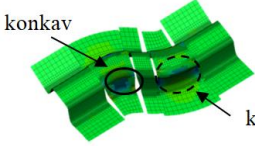
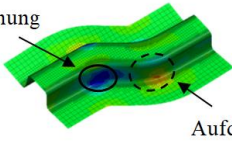
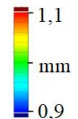
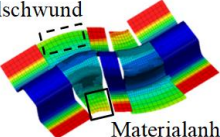
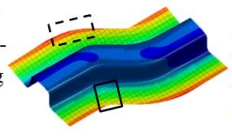
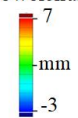


Bild 50: Einfluss der Platinenform auf die Formabweichungen nach dem Umformprozess für die Platinenform A (S-Schlag) und Platinenform B (Parallelogramm)

Studien zu E-Modul- und Blechdickenvariationen in den vorherigen Kapiteln haben gezeigt, dass die Geometrieform eine große Bedeutung für die Formabweichung nach dem Umformprozess hat. Daher wird der Einfluss von verschiedenen Struktursteifigkeiten der einzelnen charakteristischen Bereiche eines gesamten Prinzipbauteils bewertet. Gemäß Abschnitt 4.2.2 werden einzelne Platinensegmente in die Umformpresse eingelegt und mit zum Gesamtbauteil äquivalenten Flächenpressungen tiefgezogen. Für jedes dieser Segmente werden für die charakteristischen Bauteilschnitte die Blechdickenänderung, die plastische Vergleichsdehnung sowie die von Mises Vergleichsspannung in Tabelle 11 bestimmt.

Für ein grundsätzliches Verständnis und zur Ermittlung von Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge werden qualitative Falschfarbenbilder der Ergebnisgrößen von den Segmenten und dem Gesamtbauteil in Tabelle 11 erzeugt.

Tabelle 11: Falschfarbenbilder für Vergleiche der S-Rail-Segmente zum Gesamtbauteil

Ursache: Geometrieform		Wirkung: Blechdickenverteilung	
			
		Blechdicke 	
Wirkung: Rückfederung Segmente		Wirkung: Rückfederung Gesamtbauteil	
			
		z-Abweichung 	

Zur Ergründung der auftretenden Phänomene wird entlang der abgewinkelten Blechlänge der Bereiche 1, 2, 4 und 5 die plastische Vergleichsdehnung und von Mises Vergleichsspannung zur Interpretation herangezogen. In den geraden Bereichen sind die Vergleichsspannungen im Gesamtbauteil deutlich höher als in den einzelnen S-Rail-Segmenten. Folgende Ergebnisse sind zu entnehmen:

- **Einfluss der Geometrieform auf die Blechdickenverteilung**
 1. An den konvexen und konkaven Wölbungen kommt es in den separat umgeformten Segmenten zu Aufdickungen und Ausdünnungen im Gesamtbauteil.
 2. Die Blechdickenänderungen treten im Gesamtbauteil im Vergleich zu den Einzelsegmenten an den gleichen Stellen, aber proportional verstärkt auf.
- **Vergleich der Rückfederung der einzelnen Segmente zum Gesamtbauteil**
 1. Die Geometrieform ist ursächlich für die Verdrillung in Form einer gegensätzlichen Verdrehung um die positive/negative x-Achse an den Bauteilenden.
 2. Die Rückfederung in den geraden Bereichen ist in den einzelnen Segmenten aufgrund der niedrigeren Struktursteifigkeit geringer als beim Gesamtbauteil.
 3. Bei den einzelnen Segmenten weisen die konvexen Krümmungsradien höhere Rückfederungen auf als die konkaven Krümmungsradien.

Neben diesen qualitativen Aussagen werden quantitative Zusammenhänge für das Rückfederungsverhalten der Segmente im Verhältnis zu den Gesamtbauteilen abgeleitet. Ausgewertet werden die Flanschkurven oben und unten. Der Abstand der Flanschkurven vom Radiusaustritt beträgt 30 mm. Bild 51 visualisiert die Abweichung in Normalenrichtung vom Soll- zum Ist-Element für die Flanschkurven der einzelnen Segmente im Vergleich zum Gesamtbauteil.

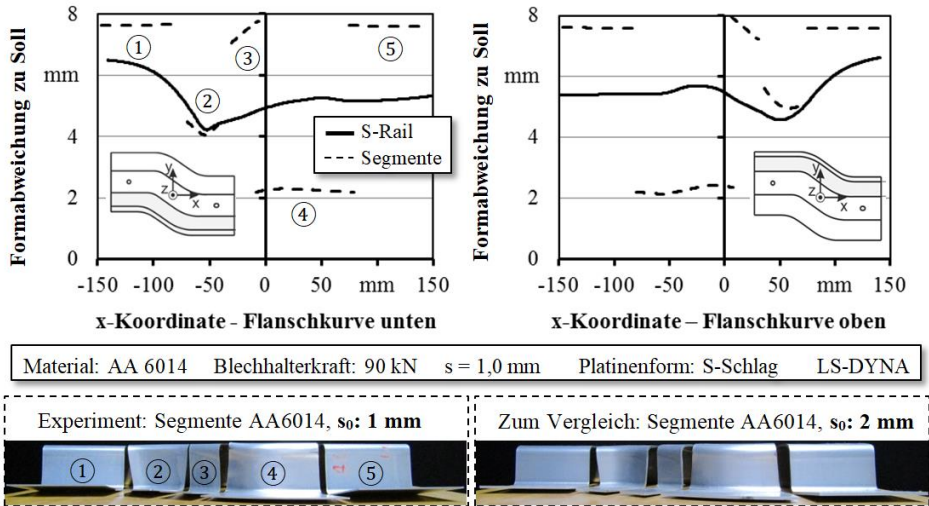


Bild 51: Vergleich der Umformergebnisse des S-Rail-Prinzipbauteils zu den einzelnen Segmenten anhand der unteren/oberen Flanschkurve mit einem Offset von 30 mm

Die Rückfederungsergebnisse der einzeln umgeformten konkaven Bereiche sind mit den Formabweichungen des gesamten S-Rails in ihrem Verlauf und in ihrer Höhe nahezu identisch. Zudem deuten die Formabweichungen der einzelnen konvexen Segmente eine geringe Abhängigkeit von der Bauteilwölbung (R_{50} und R_{100}) im Mittel unter 1 % an. Signifikante Unterschiede sind im Vergleich zu der Rückfederung des gesamten S-Rails in den konvexen Bauteilbereichen zu verzeichnen. Begründet wird dies anhand der simulativen Auswertungen mit unterschiedlich hohen Eigenspannungen in Abhängigkeit von der geometrischen Form. Die Verhältnisse der ermittelten Formabweichungen zum Soll betragen bei den charakteristischen Geometriebereichen der spezifischen S-Rail-Geometrie nach dem Umformprozess:

- 1,04 (Konvex R_{50} / Konvex R_{100}) bei der Erhöhung der **konvexen** Wölbung
- 0,92 (Konkav R_{50} / Konkav R_{100}) bei der Erhöhung der **konkaven** Wölbung

- 0,87 (Konkav R50 / Konvex R50) bei Austausch **kleiner** Krümmungsformen
- 0,78 (Konkav R100 / Konvex R100) bei Austausch **großer** Krümmungsformen

Die Struktursteifigkeit der einzelnen Bauteilsegmente steht in Zusammenhang mit diesen Krümmungsformen. In Anlehnung an das gerade Bauteilsegment des S-Rails werden gemäß Tabelle 8 Referenzversuche mit H-Proben bei einer Ziehtiefe (ZT) von 40 mm und einer Flächenpressung von 2 MPa durchgeführt. Neben der Breite des Tiefziehteilbodens differiert der Matrizenradius R_{10} im Vergleich zu den S-Rail-Proben mit dem Radius R_5 . Um die Auswirkungen von H-Proben differierender Struktursteifigkeiten aus AA5182 und CR3 auf die resultierende Formhaltigkeit nach dem Umformen aufzuzeigen, wird als weiterer geometrischer Parameter beim Umformprozess die Ziehtiefe (20, 40 und 60 mm) verändert.

Die Ergebnisse der Umformexperimente im Vergleich zu den Simulationen der H-Proben sind in Bild 52 aufgeführt und zeigen eine gute Übereinstimmung. Neben dem Geometrieparameter Ziehtiefe wird die Blechdicke s und der E-Modul der tiefgezogenen H-Proben variiert. Die Referenzeinstellungen sind: Ziehtiefe: 40 mm, $s_0 = 1,5$ mm und $E = 70$ GPa.

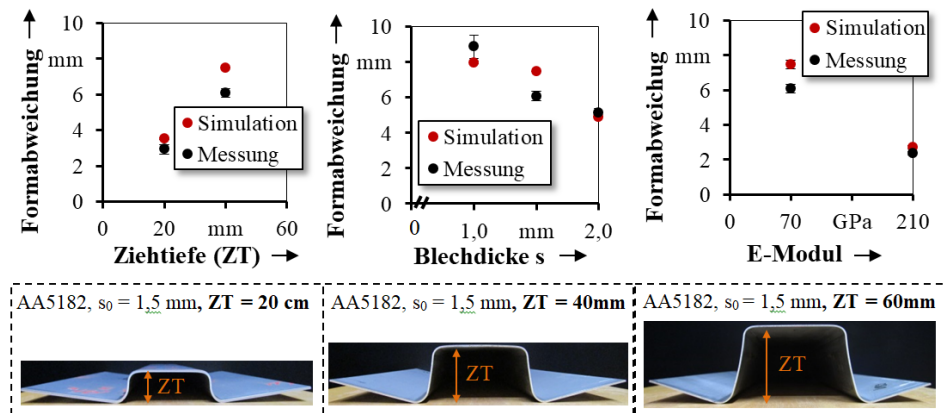


Bild 52: Einfluss verschiedener Geometrie- und Werkstoffparameter auf das Ergebnis tiefgezogener und laserbeschnittener H-Proben (Simulation und Experiment)

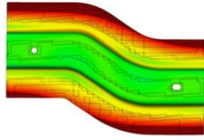
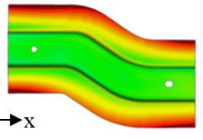
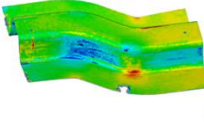
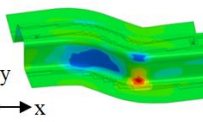
Insbesondere die Wahl des geometrischen Parameters Ziehtiefe signalisiert die Signifikanz des Einflussfaktors auf die Maßhaltigkeit von Einzelteilen nach den Umform- und Beschnittprozessen. Bei einer Erhöhung der Ziehtiefe von 20 auf 40 mm steigt die Rückfederung als gemittelter Wert der oberen und unteren Flanschkurve des Offsets 25 mm um den Faktor 2 an.

5.3.5 Einfluss des Beschnittprozesses tiefgezogener Bauteile

Bei dem Vergleich der Tiefziehsimulationen zu den Experimenten zeichnen sich, bezogen auf den Verlauf der Formabweichung, gute Übereinstimmungen ab. Neben den Formabweichungen wird weiterhin die Blechdicke nach dem Umformexperimente gemäß der Vorgehensweise von Abschnitt 4.3 optisch bestimmt und mit den simulativen Umformresultaten verglichen. Der Blechdicke ist als farbiges Falschfarbenbild in Tabelle 12 visualisiert.

Der Abgleich zwischen Simulation und Experiment von ausgewählten Inspektionsschnitten nach dem Tiefziehprozess erzielte in Bild 42 Übereinstimmungen von über 90 %. Anhand der Ergebnisse aus Tabelle 12 wird daher gefolgert, dass die partiellen Abweichungen bei der simulativen Vorhersage der Formabweichung nach dem Beschnittprozess zu begründen sind. Bei dem zweiten Validierungskriterium der resultierenden Blechdicken nach dem Umformprozess wird diese quantitative Größe sehr gut durch die Simulation vorhergesagt. So können in den Simulationen auf Basis geänderter Spannungs- und Dehnungszustände und Blechdickenänderungen Aussagen über die Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge getroffen werden.

Tabelle 12: Vergleich der Formabweichungen nach dem Tiefzieh- und Beschnittprozess sowie der Blechdicke nach dem Umformprozess in Simulation und Experiment

Formabweichung nach dem Umformprozess		Blechdicke nach dem Umformprozess	
Simulation	Messung (n = 3)	Simulation	Messung (n = 3)
			
Normalenabstand zu Soll		Blechdicke	
+4 mm -4		1,1 mm 0,9	
Werkstoff: AA6014 Blechhalterkraft: 90 kN s = 1,0 mm LS-DYNA (4 mm Elementkantenlänge)			

Nachfolgend wird explizit auf prozessbedingte Ursachen für die kleineren Abweichungen zwischen der Beschnittsimulation und ihrem Experiment eingegangen. Diskrepanzen zwischen simulativem und experimentellem Vorgehen sind beim Beschnitt denkbar, welche aufgrund der Tatsache vorgegeben sind, dass bei den genutzten prinzipiellen Tiefziehwerkzeugen primär keine werkzeugseitigen Beschnittvorgänge vorgesehen sind. Im Gegensatz zur Simulation wird beim Experiment das zurückgefedernde Prinzipbauteil gemäß Abschnitt 4.2.3 in die jeweilige Beschnittvorrichtung auf Soll gedrückt. Nach dem Laserbeschnitt, welcher wegen

der Fixierlöcher erforderlich ist, federt das Werkstück ein zweites Mal zurück. Thermische Einflüsse sind in der mechanischen Umformsimulation nicht implementiert.

Ziel einer detaillierten, experimentellen Untersuchung jedes Schrittes der Umformprozesskette, bestehend aus den Einzelschritten Tiefziehen, Spannprozess und Laserbeschnitt ist es, ihren Einfluss auf die Formhaltigkeit zu prüfen. Die optischen Vermessungsergebnisse jedes Schrittes des Beschnittprozesses sind vergleichend zu der Tiefzieh- und Laserbeschnittsimulation in Bild 53 aufgelistet. Zur besseren Vergleichbarkeit wird ein skalarer Wert aus den 22 Punkten je Flanschseite als durchschnittliche z-Verschiebung ermittelt.

Die Tiefziehsimulation bildet den experimentellen Tiefziehvorgang mit Berücksichtigung der Versuchsstreuungen bei der Blechdicke von 1,0 mm und dem Werkstoff AA6014 sehr gut ab. Im Gegensatz zu einer leichten Erhöhung der Bauteilrückfederung (+2 %) nach der Beschnittsimulation führt die Kombination aus Spannen und Beschnitt im Experiment zu einer deutlichen Reduzierung der Formmaßhaltigkeit. Bei der genaueren Analyse wird deutlich, dass der reine Einspannvorgang der Bauteile keinen signifikanten Einfluss auf das Bauteilverhalten hat. Lediglich der thermische Einfluss des Bauteilbeschnitts hat einen deutlichen Effekt auf die Maßabweichung der Bauteile an den oberen und unteren Bauteilflanschen.

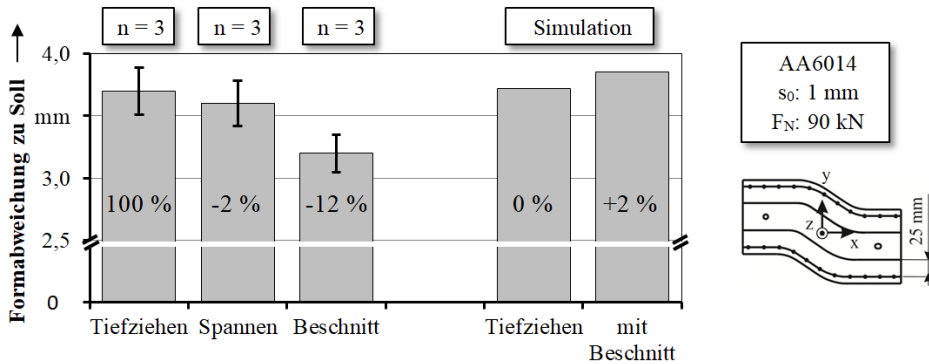


Bild 53: Einfluss der einzelnen Prozessschritte beim Laserbeschnitt der S-Rail-Bauteile auf die Maßhaltigkeit am Bauteilflansch nach dem jeweiligen Prozessschritt

Zusammenfassend könnte eine Verbesserung der Güte der simulativen Berechnung durch die Implementierung des thermischen Einflusses des Laserbeschnittes erzielt werden. Die damit verbundene höhere Rechenzeit ist der Grund, warum im Rahmen dieser Arbeit in Hinblick zu tätiger stochastischen Analysen mit einer hohen Anzahl an Simulationsdurchläufen vereinfachend kein thermischer Einfluss angenommen wird.

Das Ergebnis der prototypischen Studien verschiedener Parametersettings beim Tiefziehprozess (Werkstoff, Blechdicke, Platinenform und -verschiebung) sind unterschiedlich hohe Blecheinzüge an den Flanschbereichen. Beschnittlinien sind notwendig, um einheitliche Abmaße der tiefgezogenen Bauteile und Segmente zu erzeugen, welche mit Innenteilen definierter Außenkonturen passgenau gefügt werden. Die Bauteilbeschnittskontur in Längs- und Breitenrichtung wird für die Experimente und Simulationen so definiert, dass die Parametervariationen zum Vergleich den identischen Außen- und Innenbeschnitt (Fixierlöcher) aufweisen.

Zur Klärung des Effektes der Beschnittkontur werden mehrere Beschnittszenarien für die Werkstücklängen und -breiten des S-Rails sowie für ihre einzelnen Segmente mit dem Werkstoff AA6014 erforscht. Die Ausgangsblechdicke der Platine beträgt 1,0 mm. Anfangs wird der Einfluss der Flanschbreite und der Flanschlänge auf das Rückfederungsverhalten anhand der charakteristischen Segmente aus Abschnitt 4.2.2 ausgewertet. Bei den geraden Bauteilbereichen führen Flanschbreiten von 20, 33 und 45 mm zu ähnlich hohen Formabweichungen im Vergleich zur Sollgeometrie. Bei den Bereichen 2 und 4 ist eine leichte Verdrehung im Tiefziehboden bei der Erhöhung der Flanschbreite von 20 auf 33 mm zu beobachten. Weiterhin zeigt sich, dass die Formabweichungen zur Sollgeometrie in den konkaven Bereichen abnehmen, dagegen in den konvexen zunehmen. In Abhängigkeit der Struktursteifigkeit der einzelnen Bauteilsegmente entstehen unterschiedlich hohe Eigenspannungen.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird der Einfluss der Flanschbreite (20-33-45 mm) und der Gesamtlänge (190-230-270 mm) des S-Rail-Bauteils zu den hervorgehobenen Referenzeinstellungen ergründet. Bild 54 zeigt die z-Verschiebungen nach der freien Rückfederung für die genannten Versuchskonfigurationen mit AA6014 und s_0 von 1,0 mm.

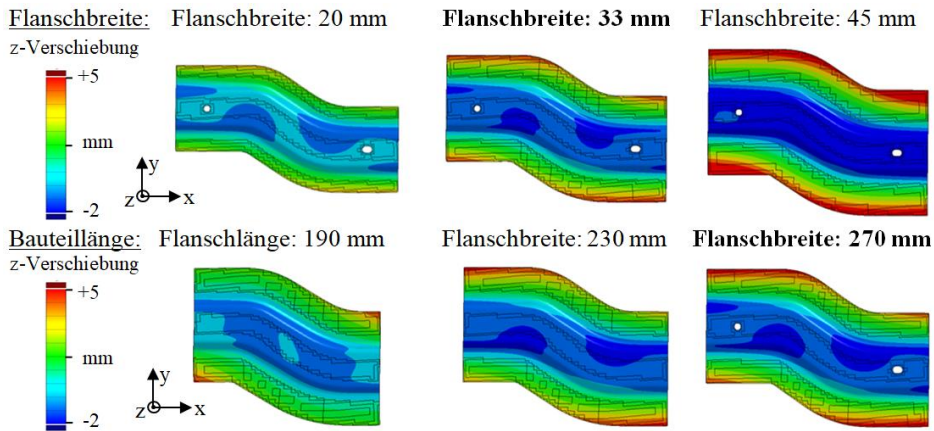


Bild 54: Einfluss des Flanschbreite und der Bauteillänge tiefgezogener S-Rails mit dem Werkstoff AA6014 und einer Ausgangsblechdicke von 1,0 mm

Bei der Bewertung entstehender Spannungen sind deutliche Unterschiede in Folge variiert Flanschbreiten und -längen des Gesamtbauteils zu erkennen. Nach dem Tiefziehprozess führen zunehmende Flanschbreiten zu einer Erhöhung der von Mises Vergleichsspannung. Vorwiegend ist dies in den konvexen und konkaven Flanschbereichen festzustellen, was zu den Rückfederungen in Bild 54 führt. Zudem ist zu erkennen, dass eine Flanschbreite von 20 mm (Basis: Flanschbreite von 33 mm) zu einer höheren Verdrillung im Tiefziehteilboden führt.

Die Bauteilrückfederung steigt bei zunehmender Gesamtbaulänge an. Am deutlichsten ist der Unterschied zwischen den Bauteillängen von 190 und 230 mm. Bei der Bauteillänge von 190 mm ist bei der Auswertung des Flächenvergleiches erkennbar, dass die konvexen und die angrenzenden geraden Bereiche aufgrund höherer Flächenpressung (190 mm: 2,6 MPa, 230 mm: 2,3 MPa) und resultierender, geringerer Eigenspannungen kleinere Rückfederungswerte ausweisen. Mit den Ergebnissen des Einflusses des Beschnittprozesses konnte so die Abhängigkeit der ermittelten Ergebnisse von einer idealen Beschnittkontur aufgezeigt werden. Für die Referenzfügeversuche wird daher die Flanschbreite auf 33 mm und die Bauteillänge auf 270 mm festgelegt. Abweichende Laserbeschnitte des presswerkfallenden Prinzipbauteils sind für die Beurteilung des Einflusses der singulären Fügestationsparameter oder Spezifika der Fügetechniken erforderlich. Tabelle 13 stellt final die wichtigsten Erkenntnisse zu den Auswirkungen des Beschnittvorgangs auf die Formhaltigkeit von Bauteilen dar.

Tabelle 13: Erkenntnisse zu dem Einfluss des Beschnittprozesses tiefgezogener Bauteile

Nummer	Auswirkung des Beschnittprozesses auf die Formhaltigkeit von Bauteilen
10	Eine größere Flanschbreite führt zu einer höheren Bauteilrückfederung und umgekehrt. Besonders signifikant fällt die Steigerung der Bauteilrückfederung an konvexen und konkaven Bauteilgeometrien in Folge veränderter Vergleichsspannungswerten aus.
11	Eine größere Bauteillänge bewirkt eine deutliche Erhöhung der Bauteilrückfederung an den geraden Geometriebereichen aufgrund der niedrigeren Flächenpressung.

5.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus der Untersuchung singularer Werkstoff-, Prozess- und Geometrieparameter

Der folgende Abschnitt fasst die Erkenntnisse aus den singulären Untersuchungen zu ausgewählten Werkstoff-, Prozess- und Geometrieparametern in Bild 55 zusammen. Anhand eines Netzdiagrammes wird die Auswirkung der Parameteränderung zum Referenzversuch auf die Änderung der Formabweichung zur Sollgeometrie aufgezeigt. Es resultieren die Effekte hinsichtlich veränderter Rückfederungswerte (höhere/niedrigere Werte zur Referenz).

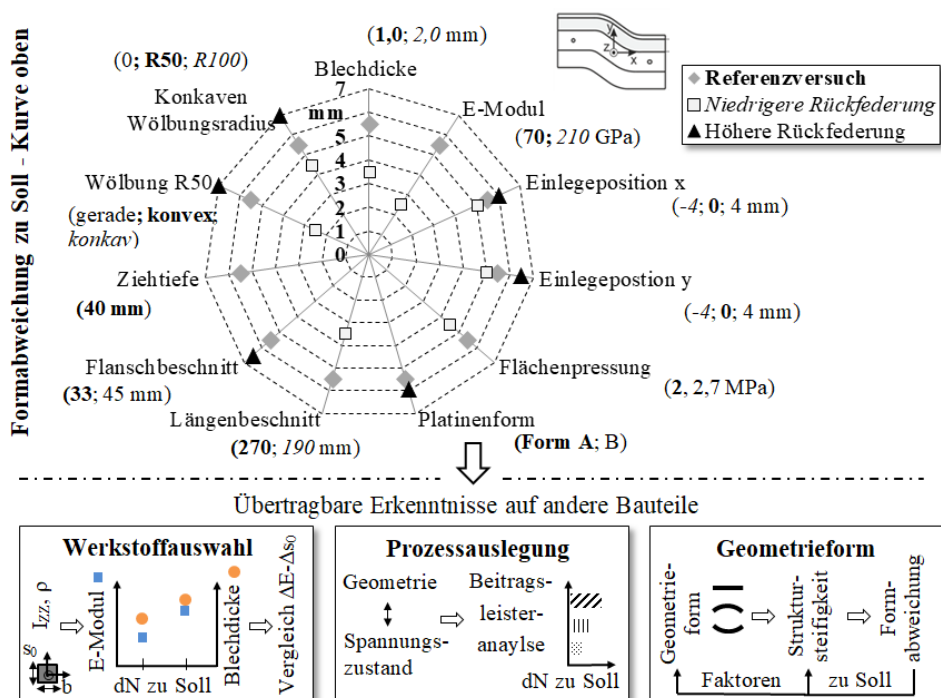


Bild 55: Qualitative Bewertung der Auswirkungen unterschiedlicher Parameter auf das Rückfederungsergebnis nach dem Umformen anhand des Prinzipbauteils S-Rail

Bei der Gegenüberstellung der Effekte der einzelnen Parameter ist ein signifikanter Einfluss der Formabweichungen von der Blechdicke, den elastischen Werkstoffeigenschaften und den geometrischen Formen der Prinzipbauteile zu folgern. Prozessparameter, wie die Platinenform oder die initiale Platinenpositionierung (x-, y-Richtung) haben einen geringeren Einfluss auf die Formhaltigkeit nach dem Umformprozess. Weiterhin haben bei dieser qualitativen Auswertung und der Verwendung des Prinzipbauteils nicht alle Faktoren innerhalb des Variationsraumes einen nennenswerten Einfluss auf den Umformprozess, was einer Reduktion der zu beachtenden Einstellparameter bei diesem Prinzipbauteil zulässt. Die Auswertung von Bild 55 könnte dahingehend erweitert werden, dass entweder verschiedene Prinzipbauteile oder geometrische Segmente auf Basis unterschiedlicher Struktursteifigkeiten oder Karosseriekomponenten verglichen werden. Für die erarbeiteten allgemeingültigen Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge der Faktoreinstellungen sei auf die Ausführungen in Abschnitt 5.3 verwiesen. Die Erkenntnisse können für die Werkstoffauswahl, die Auslegung des Fertigungsprozesses oder die Bewertung von Geometrieformen verwendet werden (siehe Bild 55). In Abhängigkeit des Flächenträgheitsmomentes I_{zz} des zu untersuchenden Bauteils ist für die ermittelten Stützstellen des E-Moduls (1,0 und 2,0 mm) und der Blechdicke (1,0 und 2,0 mm) eine vergleichbare Bewertung hinsichtlich der Leichtbaugüte und Formabweichungen möglich. Des Weiteren können Aussagen für die Prozessauslegung in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie und des Spannungszustandes getroffen werden. Die qualitativen Ergebnisse der Methodik dienen als Beitragsleisteranalyse für die einzelnen Prozessparameter. Bei anderen Bauteilgeometrien, wie beispielsweise bei der Auslegung des Tiefziehprozesses der H-Probe, ist eine vergleichende Einordnung in das Netzdiagramm von Bild 55 denkbar. Zudem geben die ermittelten Rückfederungsfaktoren in Abhängigkeit von verschiedenen geometrischen Formen und der Struktursteifigkeit Hinweise für die Geometrieauslegung.

Mit den Einzeluntersuchungen konnten so qualitative Auswertungen hinsichtlich der Relevanz einzelner Parameter getroffen werden, ohne die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Parametertypen analysieren zu können. Hierfür wird in den nächsten Schritten mittels Sensitivitätsanalysen die Abhängigkeit zwischen den untersuchten Parametern erforscht. Weiterhin wurden in diesem ersten Schritt keine Schwankungsbreiten der Steuer- und Störgrößen berücksichtigt. Mit der Zielstellung von robusten Fertigungsprozessketten, sieht der zweite Schritt des

methodischen Ansatzes die stochastische Analyse ausgewählter Eingangsgrößen auf den Umformprozess von Prinzip- und Realbauteilen vor.

5.5 Stochastische Analysen mit ausgewählten Eingangsgrößen der Tiefziehprozesse eines Prinzip- und eines Realbauteils

Für eine optimale Gestaltung und reelle Abbildung von Fertigungsprozessen ist es wichtig, die oberen und unteren Schwankungsgrenzen der wesentlichen Eingangsgrößen sowie deren Verteilungsfunktionen zu kennen. Gemäß Bild 56 werden durch Sensitivitätsanalysen mit den stochastischen Daten die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Größen sowie die Höhe des Effekts einer Parametervariation abgeschätzt. Dieser quantitative Analyseschritt kann basierend auf skalaren oder vektoriellen Auswertgrößen durchgeführt werden.

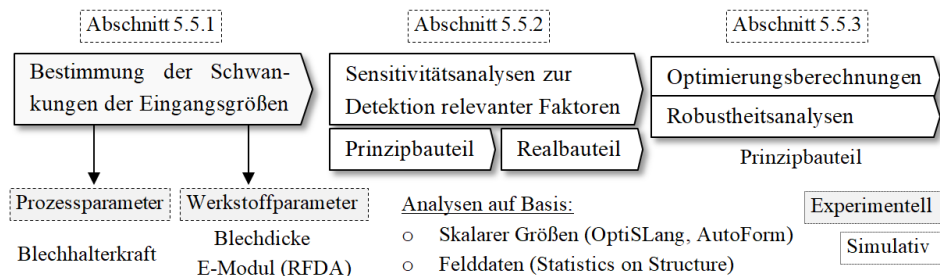


Bild 56: Vorgehensweise zur stochastischen Analyse und Optimierung ausgewählter Einflussgrößen bei der Herstellung prinzipieller und realer Karosseriekomponenten

Auf Basis der Erkenntnisse aus den Sensitivitätsanalysen werden in einem abschließenden Schritt stochastische Optimierungen und Robustheitsanalysen realisiert. Die Bestimmung der Parameterschwankungen erfolgt experimentell. Die Berechnungen der Sensitivitäten, der optimalen Parametereinstellungen hinsichtlich gewünschter Zielwerte und die Einschätzung der Prozessrobustheit erfolgt simulativ an prinzipiellen und realen Karosseriekomponenten.

5.5.1 Bestimmung von Parameterschwankungen des Umformprozesses

Bei der Identifikation der Schwankungen der Einflussgrößen wird beachtet, diejenigen Abweichungen vom Sollwert, welche zufällig und nicht steuerbar variieren, von den systematischen Abweichungen zu tren-

nen. Bei den stochastischen Analysen wird bei den Prozessparametern die Platinenposition als Steuergröße angesehen. Im Gegensatz dazu weicht die gemessene Blechhalterkraft bei den S-Rail-Prinzipversuchen mit der Versuchsanlage TZP 400 der Firma Lasco (siehe Abschnitt 4.2.1) zufällig von dem Sollwert 90 kN ab. Im nachfolgenden Bild 57 ist der arithmetische Mittelwert der Blechhalterkraft F_N sowie die Standardabweichung bei einer Grundgesamtheit von 41 Versuchen ausgewertet.

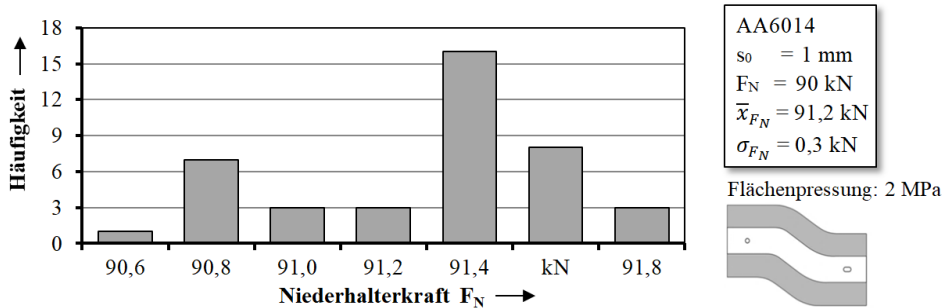


Bild 57: Gemessene Blechhalterkraftschwankung bei der Sollkraft von 90 kN (AA6014)

Bei den Messungen der Blechhalterkraft wird mit $91,2 \pm 0,3$ kN eine Standardabweichung von 1,6 % festgestellt. Bei dieser geringen Schwankung der Blechhalterkraft wird auf Basis der Vorversuche kein großer Effekt auf die Formhaltigkeit des Bauteils nach dem Tiefziehprozess erwartet. Des Weiteren ist anzunehmen, dass abhängig von der Bauweise der Versuchsanlagen bei anderen TryOut-Pressen oder im Serienprozess mit einer größeren Hubzahl höhere Schwankungen aufgrund sich ändernder Bauteil- und Werkzeugtemperaturen zu erwarten sind. Deshalb werden in einer zweiten Versuchscharge (siehe Tabelle 7) die arithmetischen Mittelwerte und Standardabweichung der Rückfederungen auf Basis der Blechhalterkräfte von 95 % (85,5 kN) und 105 % (94,5 kN) vom Sollwerte experimentell mit drei Versuchen bestimmt. Die Schwankungsbreite der Ergebnisse ähnelt der ersten Charge mit arithmetisch gemittelten Blechhalterkräften von $86,9 \pm 0,2$ kN und $95,2 \pm 0,1$ kN.

Neben den Prozessparametern weisen erfahrungsgemäß Werkstoffparameter hersteller- und chargenbedingte Abweichungen zu ihren Sollwerten auf. Basierend auf den Vorkenntnissen zu den Ursachen aus Maßhaltigkeitsabweichungen (siehe Abschnitt 2.2) wird zusätzlich zu der Blechhalterkraftmessung für jede Formplatte (S-Schlag) die Ausgangsblechdicke mittels drei taktilen Blechdickenmessungen entlang der Symmetrieachsen innerhalb einer Produktionscharge analysiert. Die Ergebnisse sind in Bild 58 bei s_0 von 1,0 mm visualisiert.

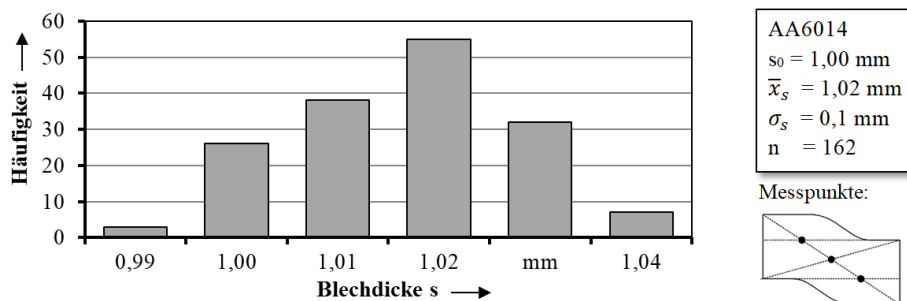


Bild 58: Gemessene Ausgangsblechdickenschwankung (Sollwert: 1,00 mm)

Die Streuung des Werkstoffparameters Blechdicke liegt mit einem Schwankungsbereich um den Mittelwert $1,02 \pm 0,1 \text{ mm}$ in dem Bereich der erlaubten Liefervorschrift des Werkstoffes mit einer maximal zulässigen Abweichung von $\pm 10 \%$ um den Sollwert. Die experimentell ermittelten Daten des Werkstoffes AA6014 decken sich mit den Inlinemessungen eines Aluminiumherstellers für Karosserieaußenhautkomponenten mit einer Schwankungsbreite von $1,01 \pm 0,15 \text{ mm}$ ($n = 277$). Für den Strukturwerkstoff AA5182 streut der Mittelwert um die Ausgangsblechdicke von $0,99 \pm 0,005 \text{ mm}$ ($n = 118$) in einem geringen Umfang. Für den Werkstoff CR3 ist eine Variation der Eingangsblechdicke von $\pm 6 \%$ erlaubt.

Zur Modellierung des elastoplastischen Werkstoffverhaltens sind neben der Blechdicke noch weitere Werkstoffparameter notwendig. Die mittels RFDA nach ASTM 1876 ermittelten dynamischen E-Modulschwankungen der Werkstoffe AA6014 (2 Hersteller), AA5251 und CR3 sind in Tabelle 6 mit Mittelwerten und Standardabweichungen gelistet. Im Rahmen weiterer Recherchen werden die in Tabelle 14 zusammengetragenen Streuungen von Werkstoffparametern für die Werkstoffe AA6014, AA5251 und CR3 gegenübergestellt.

Tabelle 14: Parameterstreuungen bei den Werkstoffen AA6014, AA5251 und CR3 mit Mittelwerten und Standardabweichungen in Anlehnung an [69] und EN 485

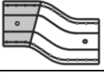
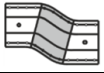
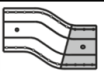
Werkstoff	R_e in MPa	R_m in MPa	A_g in %	A_{80} in %	r_0	r_{45}	r_{90}	n
AA6014	$113 \pm 7,4$	223 ± 10	≥ 20	25 ± 1	$r_m \geq 0,6$			$\geq 0,26$
AA5251	60-95	≥ 140	≥ 16	≥ 19	$r_m \geq 0,6$			$\geq 0,26$
CR3	$166 \pm 13,5$	$295 \pm 9,5$		$42,4 \pm 2$	$1,8 \pm 0,1$	$1,3 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,2$	$0,2 \pm 0,1$

Für fehlende bzw. nicht messbare Werte werden in Orientierung an internen Normen und dem Leitfaden von AutoForm Sigma® für Sensitivitäts- oder stochastische Analysen gewählt.

5.5.2 Sensitivitätsanalysen zu Eingangsgrößen von Tiefziehsimulationen

Im Gegensatz zu den singulären Studien aus Abschnitt 5.3 werden bei den folgenden Sensitivitätsanalysen mehrere Eingangsgrößen unter Anwendung des Advanced Latin Hypercube Sampling (siehe Abschnitt 2.5) verändert. Innerhalb der gewählten Prozessgrenzen von Tabelle 14 wird für den Werkstoff AA6014 und dem Prinzipbauteil S-Rail exemplarisch die Wirkung schwankender Eingangsgrößen auf die Zielgröße der Rückfederung aufgezeigt. Die Ergebnisse der Beitragsleistanalyse mit dem FE-Programm LS-DYNA® nach dem Umformprozess sind in Tabelle 15 aufgeführt. Als Bewertungskriterium findet der Coefficient of Prognosis (CoP) Anwendung, mit welchem auf Basis einer Kreuzvalidierung der Einfluss der Parametervarianz einer Eingangsgröße auf die Zielgröße abgeschätzt werden kann [133].

Tabelle 15: Ergebnisse der Beitragsleistanalyse auf die Normalenabweichung umgeformter S-Rail-Bauteile für die Variation von Werkstoff- und Prozesseingangsgrößen

CoP $\geq$ 90 %	Blechhalterkraft	x-Einlegeversatz	y-Einlegeversatz	Blechdicke	E-Modul	Alle Parameter
CoP $\geq$ 70 %						
CoP $\geq$ 50 %						
CoP $\geq$ 10 %						
Bereich 1 	0,2 %	0,6 %	10,0 %	49,1 %	34,9 %	87,9 %
Bereich 2 	0,7 %	1,6 %	2,3 %	76,7 %	12,4 %	92,2 %
Bereich 3 	0,7 %	1,5 %	3,1 %	58,2 %	10,2 %	88,5 %
Alle Bereiche	0,2 %	0,4 %	5,0 %	73,8 %	11,1 %	90,0 %

Die Auswertung der Knoten zeigt unterschiedlich hohe skalare Rückfederungswerte in Abhängigkeit der drei definierten geometrischen Bereiche. Konträr zu Blechhalterkraft und x-/y-Einlegeversatz haben die Blechdicke und E-Modul mit 73,8 und 11,1 % einen höheren Einfluss auf die Formabweichung, was deshalb detaillierter in Bild 59 inspiziert wird.

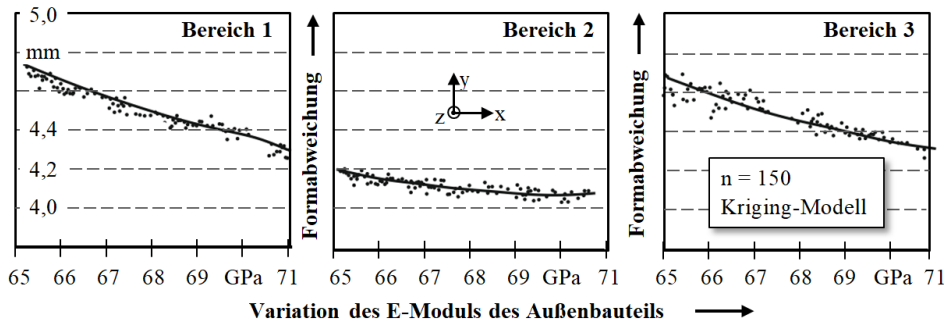


Bild 59: Einfluss der Variation des E-Moduls in Abhängigkeit der geometrischen Bereiche auf die Rückfederung des Außenteils bei AA6014 und der Blechdicke von 1,0 mm

Bei der detaillierten Auswertung des Einflusses der E-Modulvariation anhand 150 durchgeführter Simulationen zeichnet sich ein linearer Zusammenhang zu der resultierenden Formabweichung ab. Dies lässt sich über eine vereinfachte Berechnungsformel des Rückfederungswinkels β erläutern, welcher durch den Quotient aus Produkt des Ausgangswinkels und der auftretender Spannung und dem Produkt aus Blechdicke und E-Modul im Nenner bestimmt wird. So führt eine Erhöhung des E-Moduls zu einer Verringerung der Formabweichung am Bauteilflansch. Weiterhin ist die Signifikanz des Eingangsparameters gemäß Tabelle 15 von der geometrischen Bauteilform abhängig. Der mittlere Bauteilbereich hat aufgrund der eingeschlossenen Bauteilkrümmungen im Vergleich zu den äußeren Bereichen 1 und 2 niedrigere Formabweichungen. Besonders im Bereich 1 hat der E-Modul einen verhältnismäßig hohen Einfluss auf die Zielgröße, bei welchem gleichzeitig der Einfluss der Blechdicke mit 49,1 % gegenüber den Bereichen 2 und 3 geringer ist.

Um nicht nur lokale skalare Ergebnisgrößen hinsichtlich ihrer Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge zu beurteilen, werden ergänzend statistische Ergebnisgrößen auf Basis der Felddaten erhoben. Sogenannte Zufallsfelder $H(x)$ in Anlehnung an [134] implementiert in Statistics on Structure (SoS), ermöglichen eine Korrelationsanalyse räumlich verteilter Eingangsparameter zu den Ergebnisgrößen Blechdicke, Vergleichsdehnungen und Formabweichungen in Bild 60. Die Ergebnisse der Feldgrößen (Mittelwert $\bar{H}(x)$, Standardabweichung $\sigma_H(x)$) der realisierten Sensitivitätsanalyse des S-Rail-Bauteils sind unten visualisiert.

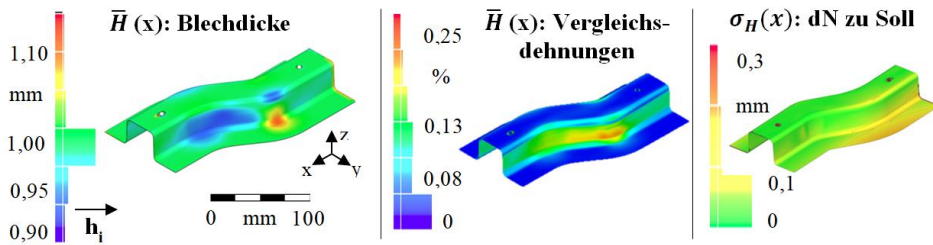


Bild 60: Statistische Ergebnisse (Mittelwerte, Standardabweichungen) der Blechdickenverteilung (links), Dehnungsverteilung (mitte) und Normalenabweichungen (rechts)

Der Mittelwert $\bar{H}(x)$ der analysierten Blechdickenverteilung ist vorwiegend um die Ausgangsblechdicke $s_0 = 1,0 \pm 0,02$ mm angehäuft. Die aus den Umformparametern auftretenden Vergleichsdehnungen weisen im Bereich der Bauteilzarge ihr Maximum im konvexen Bauteilbereich auf. Die Schwankung der Ergebnisgrößen Blechdicke und Vergleichsdehnung führt vorwiegend zu einer Schwankung der Normalenabweichung im Flanschbereich, visualisiert in der rechten Abbildung von Bild 60. Anhand der Felddaten der Blechdicke und der plastischen Vergleichsdehnungen sowie den dazugehörigen Schwankungen der Größen kann der Einfluss der Blechdicke auf die Rückfederung des Bauteils des S-Rails erklärt werden.

Zur Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf gefertigte Karosseriekomponenten wird eine Sensitivitätsanalyse mit den zwei Einzelteilen (Vorderteil und Verstärkung) der Unterbaugruppe einer Motorhaube ausgeführt. Die beiden anschließend zu clinchenden Bauteile sind Bestandteil des sechsteiligen Innenteiles der untersuchten Motorhaubenbaugruppe. Mit der Unterbaugruppe, folgend als ZB-vorne bezeichnet, wird zur Komplexitätsreduzierung in den späteren Kapiteln der Hauptanteil an Sensitivitäts- und Toleranzanalysen durchgeführt.

Um den Einfluss von Prozessparametern in Wechselwirkung mit einer Blechdicken- und E-Modulschwankung auf die Maßhaltigkeit von Bauteilen zu eruieren, werden für die Einzelteile des ZB-vorne die Parameter in Tabelle 16 unter Annahme von Normalverteilungen variiert.

Tabelle 16: Variierte Prozess- und Werkstoffparameter bei der stochastischen Analyse der Einzelteile einer Motorhaubenunterbaugruppe

Parameter	Blechdicke	E-Modul	x-Einlegeversatz	y-Einlegeversatz	Blechhalterkraft
Vorderteil	0,95-1,05 mm	69 GPa $\pm$ 5%	0 $\pm$ 2 mm	0 $\pm$ 2 mm	640 $\pm$ 64 kN
Verstärkung	1,19-1,31 mm	69 GPa $\pm$ 5%	0 $\pm$ 2 mm	0 $\pm$ 2 mm	800 $\pm$ 80 kN

Die Schwankungen der Prozess- und Werkstoffparameter bewirken, dass prozentual die gleichen Variationsbreiten bei den Einzelbauteilen Vorderteil und Verstärkung auftreten. Für den Erhalt der Ergebnisse in Bild 61 der zwei Karosseriekomponenten Vorderteil und Verstärkung werden 200 Iterationen in AutoForm Sigma R6 realisiert und die wichtigsten Einflussgrößen auf das Rückfederungsergebnis ausgewertet.

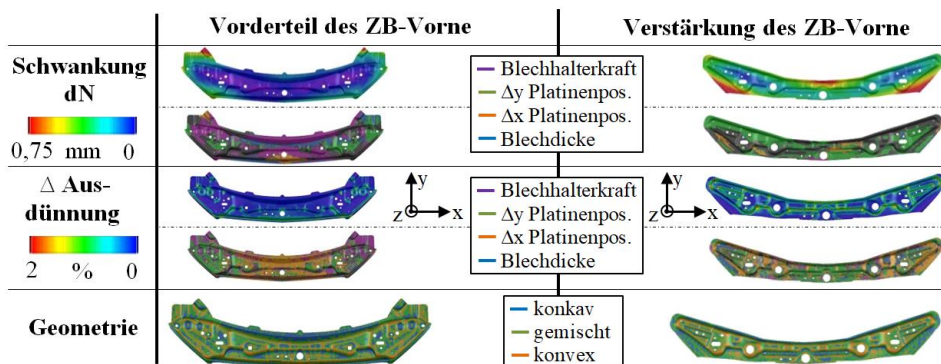


Bild 61: Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen der beiden Karosseriekomponenten Vorderteil und Verstärkung des Unterzusammenbaus einer Motorhaube

Für die beiden Strukturbauteile sind die Haupteinflussgrößen analog zu dem Prinzipbauteil S-Rail abhängig vom geometrischen Bereich der jeweiligen Karosseriekomponente. Bei dem Vorderteil wird die stochastisch verteilte Blechhalterkraft in den gemischt konvex und konkaven auftretenden Bauteilbereichen als Haupteinflussfaktor für die resultierende Bauteilrückfederung des Vorderteils identifiziert. Im Gegensatz dazu ist bei der maßbestimmenden Verstärkung die Schwankung der initialen y-Positionierung in vielen Bauteilbereichen für die Rückfederungsschwankung der Karosseriekomponente verantwortlich.

Generell ist festzustellen, dass die Rückfederung und die Blechdickenänderung in Folge des Umformprozesses bei dem Verstärkungsbauteil stärker als beim Vorderteil schwanken. Des Weiteren hat die Blechdicke innerhalb der analysierten Schwankungsgrenzen eine mindere Auswirkung auf die in Bild 61 dargelegten Ergebnisgrößen in der Sensitivitätsanalyse.

Für die Toleranzanalyse werden zur Abschätzung des Einflusses der Rückfederungsvariation in Kapitel 7 zwei Extremfälle aus diesen Sensitivitätsanalysen weiterverwendet. Zum einen wird diejenige Faktorkombination ausgewählt, die betragsmäßig die größte (Extrem I) und die geringste (Extrem II) Formabweichung dN zur Sollgeometrie aufweist.

5.5.3 Robustheitsanalyse und Optimierung des Umformprozesses eines Prinzipbauteils

Auf Basis mathematischer Modellzusammenhänge aus der Sensitivitätsanalyse können hinsichtlich einer geringeren Bauteilrückfederung optimierte und robuste Parameter ermittelt werden. Dies ist mit Hilfe eines Metamodells möglich, ohne die bereits getätigten Simulationen neu zu berechnen. Der Robust-Design-Optimization (RDO) Ansatz kombiniert nach [134] zwei Stoßrichtungen. Neben der Minimierung des gewünschten Zielwertes wird gleichzeitig ein zuverlässigkeits- und varianzbasierendes Optimum ermittelt. Dazu wird mittels der Analyse der Zielwertstreuung ein robustes Setting für die Eingangsgrößen gesucht. Bisherige Untersuchungen zeigten, dass die Streuungen von signifikanten Eingangsgrößen stark die Streuung von Zielwerten beeinflussen [135]. Eine Berücksichtigung der Streuung der Einflussgrößen ist für die Ermittlung der Prozessrobustheit unumgänglich.

Die Ergebnisse einer an dem Prinzipbauteil S-Rail durchgeführten Robust-Design-Optimierung sind in Bild 62 veranschaulicht. Die Ausgangssituation gibt das ursprüngliche Referenzset mit einer Niederhalterkraft F_N von 90 kN und keine Verschiebung der Platinenposition bei einer nominellen Blechdicke von 1,0 mm wieder. Auf Basis der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse (Abschnitt 5.5.2) wurde ein Metamodell erstellt. Dieses Metamodell wird eingesetzt, um ein robustes Optimum der Eingangsgrößen hinsichtlich der Rückfederung zu finden. Die Parameterwerte für ein robustes Parameterset sind als Ergebnis in Bild 62 rechts aufgeführt. Das Resultat der Robust-Design-Optimierung zeigt eine partielle Verbesserung der Einzelteilmaßhaltigkeit in der z-Koordinatenabweichung am oberen Flansch. Die Studie verdeutlicht somit einerseits die Möglichkeit, Kompensationsmaßnahmen mit dem Optimierungsansatz abzuleiten, und andererseits gleichzeitig die Robustheit des Fertigungsprozesses einzuhalten.

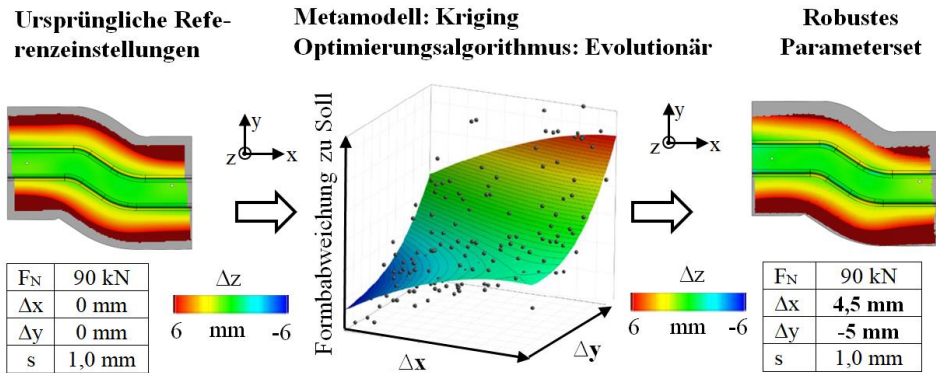


Bild 62: Ergebnisse der Robust-Design-Optimization des Prinzipbauteils S-Rail

Programmauswahl für Sensitivitäts- und Robustheitsanalysen von Umformprozessen

Zur Optimierungs- und Robustheitsanalyse von Umformprozessen stehen nach heutigem Stand einige kommerzielle Programme zur Verfügung. Für den Umformprozess S-Rail wird ein identischer Workflow der Sensitivitäts- und Robustheitsanalyse in bekannten Programmen mittels der FE-Solver AutoForm und LS-DYNA® realisiert. Anhand einer subjektiven Nutzwertanalyse werden die stochastischen Analyseprogramme LS-OPT®, AutoForm-Sigma® und optiSLang® in Tabelle 17 gegenübergestellt.

Mittels einer gewichteten Entscheidungsmatrix wird eine Bewertung der drei Kategorien *Implementierungsaufwand*, *Berechnungsprozess* und *Ergebnisdarstellung/-analyse* vorgenommen. Tabelle 17 zeigt die Bewertung der Programme zur stochastischen Analyse des Umformprozesses eines Prinzipbauteils. Die prozentuale Gewichtung der Kategorien entspricht den Prioritäten für diesen speziellen Anwendungsfall. Aus den Einzelevaluierungen (gering (1) bis sehr gut (4)) der jeweiligen Kriterien einer Oberkategorie wird der arithmetische Mittelwert errechnet und zu einem Nutzwert, unabhängig von den jeweilig angebundenen FE-Solvern nach dem Scoring-Modell, zusammengefasst.

Bei dem Vergleich der drei Optimierungsprogramme ist festzuhalten, dass die Optimierungsprogramme 1 und 2 bei den Analysemöglichkeiten der Optimierungsergebnisse ihre Vorteile haben. Zusätzlich ist die Auswahl bei den Optimierungsalgorithmen gegenüber dem Program 3 größer. Die Auswahl des Programms ist des Weiteren vom FE-Solverwunsch abhängig. Die komplette Umform- und Fügeprozesskette ist ausschließlich mit den Programmen 1 und 2 abbildbar. Daher werden in dieser Arbeit die Optimierungsprogramme 1 und 2 für die stochastische Analyse der Umform- und Fügeprozesskette bevorzugt.

Tabelle 17: Nutzwertanalyse von ausgewählten stochastischen Analyseprogrammen

Wie gut werden die Kriterien erfüllt?				Optimierungs- programm 1	Optimierungs- programm 2	Optimierungs- programm 3
1: Gering	2: Teilweise	3: Gut	4: Sehr gut			
Implementierungsaufwand (30 %)						
Bedienungsfreundlichkeit				2	3	4
Fehleranfälligkeit (Human-error tolerant)				3	2	3
Vorgefertigte Strukturen / Templates				4	3	2
Adaptivität zu spezifischen Problemstellungen				3	4	1
Auswahlmöglichkeiten Sampling-Algorithmus				3	4	1
Auswahlmöglichkeiten Metamodelltyp				3	4	1
Schnittstellen zu verschiedenen FE-Solvern				3	4	1
				3,0	3,4	1,9
Berechnungsprozess (10 %)						
Berechnungszeit				3	2	4
Speicherbedarf der Einzelberechnungen				1	2	4
Möglichkeit der Analyse von Teilrechnungen				2	3	1
				2,0	2,3	3,0
Ergebnisdarstellung/-analyse (60 %)						
Bewertungsmöglichkeit Metamodell Sampling				3	3	1
Strukturierung der Ergebnisgrößen				3	4	1
Zugang zu den erzeugten numerischen Daten				3	3	2
Auswertepotential stochastischer Analysen				4	4	2
				3,3	3,5	1,5
Nutzwert (gesamt)				3,1	3,4	1,8

5.6 Erkenntnisse bei der Umformung realer Karosseriekomponenten und Analyse der Struktursteifigkeit

Die Abstraktion von Realgeometrien durch prinzipielle Geometrien erlaubt eine detaillierte Auseinandersetzung mit den in Abschnitt 5.3 ausgewählten Inputgrößen einer Umformprozesskette. Dennoch gibt es Faktoren, wie beispielsweise den Einfluss unterschiedlicher Eigensteifigkeiten großflächiger Einzelteile, welche sich ausschließlich mit realen Karosseriekomponenten untersuchen lassen. Zusätzlich treten im Laufe des Produktentwicklungszykluses eines Anbauteils Änderungen, beispielsweise in Form der Werkstückgeometrie und in der Qualität der bereitgestellten Daten, auf. Diese gilt es, bei der Entwicklung einer Methodik zu berücksichtigen.

Zur Beurteilung verschiedener Simulationsvarianten ist zunächst ein Abgleich zwischen den Umformsimulationen und den Experimenten einer Anbaugruppe zu tätigen. Im Rahmen dieser Arbeit werden vorwiegend Studien mit den presswerkfallenden Einzelteilen der Karosserieanbaugruppe von Bild 63 realisiert. Die dargestellte Validierung erfolgt durch eine identische Ausrichtung der Simulationen und durch Experimente

an den vier z-Auflagepunkten in GOM gemäß der optischen Auswertemethode aus Abschnitt 4.3.4. Die freien Rückfederungssimulationen des Umformprozesses werden auf den vier Auflagepunkten unter Gewichtskraft in einem Messlagerjob eingelegt. Positive Formabweichungen sind in positiver Koordinatenrichtung aufgetragen.

In der Gesamtheit ist eine qualitativ sehr gute Übereinstimmung der Simulationen (links) mit den Messungen (rechts) zu sehen. Bei den vorderen Bauteilen Vorderteil und Verstärkung ist der Effekt der Geometrieabweichung in den Bauteilmitten in den Simulationen gegenüber den Messungen minimal überhöht. Die Seitenteile, Vorderteile und das Hinterteil der Anbaugruppe haben bei Analyse der Falschfarbenbilder nahezu ein identisches Abweichungsverhalten zur Sollgeometrie, wodurch eine hinreichende Übereinstimmung der Experimente und Simulationen gegeben ist. Lediglich das mittige Innenteil weist im Anschluss zum Hinterteil in der Simulation eine Durchbiegung auf, welche in der Realität nicht vorhanden ist.

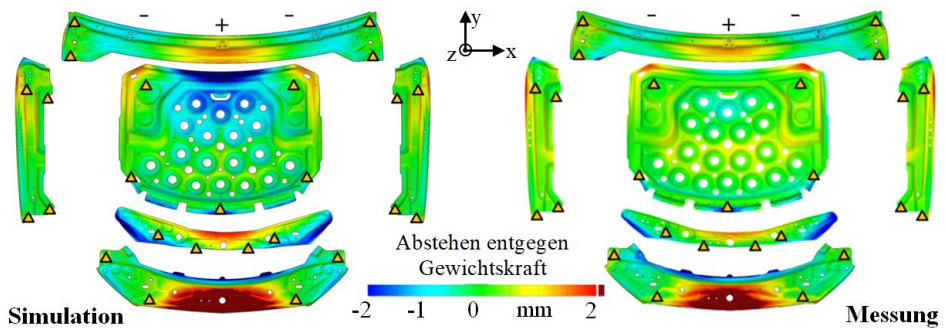


Bild 63: Vergleich ausgerichteter Umformsimulationen mit den Experimenten der sechs Einzelteile einer Motorhaube unter Berücksichtigung der Schwerkraft

Diese Validierung zur Abbildbarkeit des Umformprozesses in der Simulation wird in dieser Arbeit auf Grundlage des Konstruktionsdatenstandes für ein digitales Bestätigungsfahrzeug des hinterlegten Produktentwicklungszykluses vorgenommen. Gemäß den Stadien einer Fahrzeugentwicklung (siehe Bild 64) bei einem Automobilhersteller sind die Datenqualität und deren Verfügbarkeit der Baugruppe bei diesem Datenstand sehr weit fortgeschritten. Ein fixer Freigabestand erlaubt eine Beurteilung der Wechselwirkung zwischen den Einzelteilen und ihrer Zusammenbauten auf Basis einer gegebenen Datenkonsistenz.

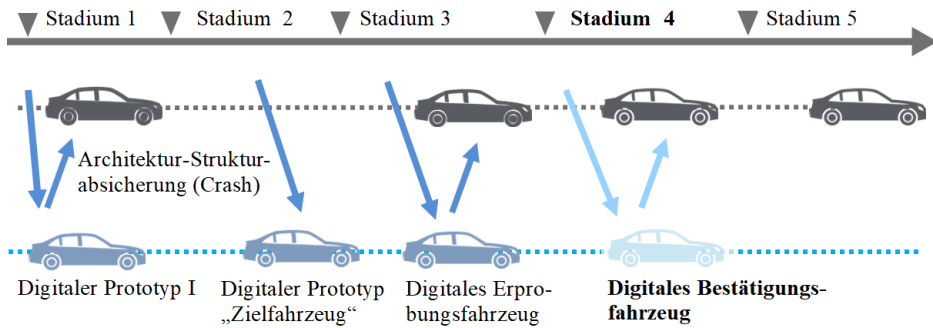


Bild 64: Stadien einer Fahrzeugentwicklung mit unterschiedlichen Absicherungszielen

Bereits in den früheren Produktstadien 1 bis 3 werden digitale und experimentelle Absicherungen mit geringen Reifegraden der Daten der Anbaugruppen durchgeführt. In Hinblick auf die stochastische Analyse und detaillierte Erarbeitung der Wechselwirkung zwischen Einzelteilen und Fügestationsparametern wird im Rahmen dieser Arbeit vorzugsweise auf den Datenstand des Stadiums 4 zurückgegriffen.

Die Validierung der Umformsimulationsmethode der Motorhaube anhand der Experimente ist die Grundlage für anschließende Ausführungen in den Fügeschritten. Im Rahmen der Fahrzeugentwicklungsstadien ändert sich das Öffnen der Konstruktionsdatensatz, ohne dass die Umformmethode im gleichen Ausmaß jedes Mal aktualisiert werden kann. Aufgrund der Relevanz einer solchen geometrischen Änderung des Pressteils (siehe Abschnitt 5.4 bei einem Prinzipbauteil S-Rail) sind methodische Ansätze zu erarbeiten, um zügig die Auswirkung der Struktursteifigkeit von großflächigen Bauteilen auf die Formabweichungen zu detektieren.

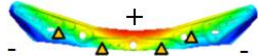
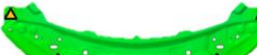
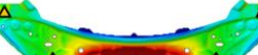
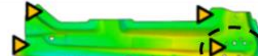
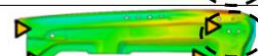
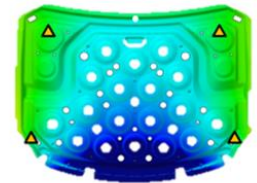
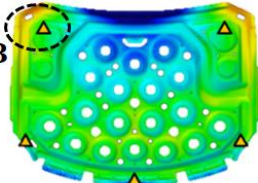
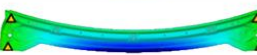
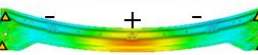
Das zweistufige Konzept zur Beurteilung der Struktursteifigkeit sieht folgende Schritte vor:

- **Schritt 1:** Gewichtskraftrechnung der Einzelbauteile mit Auflagebedingungen
- **Schritt 2:** Durchführung der Umformsimulationen und Berechnung des Einlegeschnittes der deformierten Einzelbauteile unter Gewichtskraft in der Messaufnahme
- **Schritt 3:** Ergebnisvergleich mit/ohne Einfluss des Fertigungsprozesses Umformen

Der erste Schritt kann bereits vor der Methodenplanung des Umformprozesses umgesetzt werden, um eine erste Aussage über die Struktursteifigkeit von Karosserieteilen zu erlangen. Exemplarisch ist dies im Folgenden an den Einzelteilen der Motorhaube aufgezeigt.

Dazu werden in Tabelle 18 die Resultate der Gewichtskraftrechnungen und der Umformprozesse anhand der Formabweichungen zum Soll Datensatz gegenübergestellt.

Tabelle 18: Struktursteifigkeiten von Einzelteilen unter Berücksichtigung der Gewichtskraft und des Umformprozesses, Werkstoff: AA5251

Bauteilbezeichnung	Blechdicke	Schritt 1: Gewichtskraft	Schritt 2: Fertigungsprozess
Vorderteil	1,0 mm		
Verstärkung	1,25 mm		
Innenteil Seite rechts	0,9 mm		
Innenteil Seite Links	0,9 mm		
Innenteil Mitte	0,7 mm 		
Innenteil Hinten	1,25 mm		
Bewertungsmaßstab in mm	dN Abweichung zu Soll -2 -1 0 mm 2		

Die Bauteile differieren in ihren Blechdicken (0,7 bis 1,25 mm) und in den geometrischen Formen bei gleichem Werkstoff AA5251. Die Rahmenbauweise ermöglicht konträr zu einer Bauweise mit einem einteiligen Innenteil die gezielte Verstärkung des Motorhaubeninnenteils und eine belastungsgerechte Konstruktion basierend auf beispielsweise Fußgänger-Airbags. Von den sechs Einzelteilen der Motorhaube kennzeichnen sich die Innenteile Mitte und Hinten im Gegensatz zu den anderen struktursteiferen Innenteilen durch Durchbiegungen von bis zu 2 mm aufgrund der wirkenden Gewichtskraft. Verursacht werden diese Effekte durch die geringe Anzahl an Versteifungen an dem großflächigen Innenteil Mitte und an dem konvex gekrümmten Innenteil Hinten. Beide Einzelteile haben ihre maximalen Formabweichungen an ihren Vorderkanten in

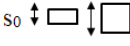
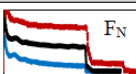
Richtung der Gewichtskraft. Die Ergebnisse dieser Falschfarbenbilder sind in diesem Zusammenhang mit der Wahl der Auflagepunkte (Dreiecke in Tabelle 18) und den Ausrichte- bzw. Bezugspunkten an Fahrzeugkomponenten verknüpft. Diese Bezugspunkte legt das Toleranzmanagement in einer frühen Produktphase in Abstimmung mit dem Spann- und Fixierkonzept fest. Die Methode bietet die Möglichkeit, Handlungsempfehlungen bezüglich einer optimierten Wahl der Bezugsstellen auf Grundlage der CAD-Daten zu geben.

Mit den Erkenntnissen aus der Struktursteifigkeitsanalyse werden in einem Folgeschritt die Umformsimulationen von den sechs Pressteilen mit Berücksichtigung der Gewichtskraft realisiert, um das Rückfederungsverhalten in Wechselwirkung mit dem elastoplastischen Werkstoffmodell und den geometrischen Konturen zu erklären. Die größten Formabweichungen treten in den Einzelteilen des ZB-Vorne (Vorderteil und Verstärkung) auf. Das Vorderteil hat ein tordierendes Verhalten mit negativer Maßveränderung an dem linken und rechten Außenbereich und positiver Maßabweichung in der Bauteilmitte (x-Richtung). Das Pressteil Verstärkung hat ebenfalls in der Bauteilmitte eine hohe Formabweichung in Z-Richtung, welche in dem nachfolgenden Fügeschritt mit dem nichtmaßhaltigen Vorderteil interagiert und im Kapitel 6 Analysebestandteil ist. Ebenfalls werden die Formabweichungen der Innenteile Mitte, Links und Rechts an den Bauteilecken (Details A und B) von Tabelle 18 durch die Experimente bestätigt. Das Verformungsverhalten, induziert durch die Gewichtskraft, wird bei den weniger eigensteifen Innenteilen Mitte und Hinten an den vorderen Bauteilkanten wegen den zurückbleibenden Eigenspannungen nach dem Tiefziehvorgängen partiell reduziert.

Zusammenfassend zeigt die Übersicht von Tabelle 19 die Auswirkungen von wichtigen Einflussfaktoren auf die Maßhaltigkeit von umgeformten Prinzip- und Karosserieanbauteilen. Durch die erarbeiteten Ursachen für die Formabweichungen lassen sich bei der Bauteilauslegung und der Prozessgestaltung Maßnahmen zur Herstellung maßhaltiger Bauteile ableiten. Die Erkenntnisse werden gegliedert zu den Kategorien geometrische Merkmale, Werkstoffkenngrößen und Prozessführung aufgeführt. Zunächst lässt sich bei Prinzip- und Karosseriebauteilen eine signifikante Abhängigkeit der Formhaltigkeit von der Bauteilstruktursteifigkeit erkennen. Deutlich wird dies durch separate Berechnungen des Gewichtskrafts- und des Fertigungsprozesseinflusses der verschiedenen Bauteile. So nimmt das Widerstandsbiegemoment durch das Einbringen von Verprägungen und Verrippungen oder durch die Vermeidung großflächiger, ebener Bereiche zu (siehe Innenteil Mitte von Tabelle 18). Dadurch sinkt

die resultierende Formabweichung. Zur Rückfederungskompensation stellt sich die Zusammensetzung des Bauteils aus geometrischen Formen als weiteren Stellhebel heraus. Bauteilauslegungen mit einem vermehrten Einsatz von konvexen und konkaven Geometrieformen induzieren durch lokale Blechdickenänderungen geringere Formabweichungen.

Tabelle 19: Zusammenfassung der Einflussgrößen auf die Maßhaltigkeit von prinzipiellen Umform- und Karosserieanbauteilen

		Ursachen für eine Formabweichung zur Sollgeometrie	
		Prinzipielle Umformbauteile	Karosserieanbauteile
Geometrische Merkmale			
Bauteilstruktursteifigkeit ↑		Widerstandsbiegemoment ↑ → Formabweichung ↓	Einfluss der Gewichtskraft und des Fertigungsprozesses ↓
Geometrische Formen	Gerade —	-	-
	Konvex 	Blechaufdickung ↑	
	Konkav 	Blechausdünnung ↑	
Werkstoffkenngrößen			
Blechdicke ↑	s_0 	Biegeradius/Blechdickenverhältnis ↑ → plastifizierender Anteil ↓ → Formabweichung ↓	Flächenträgheitsmoment ↑ → Formabweichung ↓
E-Modul ↑		Elastische Dehnungsanteil ↑ → Formabweichung ↑	-
Prozessführung			
Blechhalterkraft ↑		Hemmung des Blecheinzugs und Blechausdünnung ↑ → Formabweichung ↓	Hemmung des Blecheinzugs und Blechausdünnung ↑ → Formabweichung ↓
Einlege-Position ↔↑		Flächenpressungen ↓ → Spannungsverteilung ↓ → Formabweichungen ↓	Geringer Einfluss

Aus weiteren Untersuchungsergebnissen mit Prinzipbauteilen wird deutlich, dass höhere Blechdicken oder eine E-Modulerhöhung beträchtliche Auswirkungen auf die Maßhaltigkeit von Bauteilen haben. Beispielsweise führt ein verändertes Verhältnis Biegeradius zu Blechdicke (s_0 ↑) zu einer Abnahme des plastifizierenden Anteils an der Gesamtdehnung. Als Folge davon geht die Formabweichung des Bauteils zur Sollgeometrie zurück. Analoges gilt für ein erhöhtes Flächenträgheitsmoment aufgrund einer Blechdickenerhöhung bei Karosserieanbauteilen. Als weitere Reduktionsmöglichkeit der Bauteilrückfederung eignet sich außerdem die Anpassung der Prozessführung mit einer adaptierten Blechhalterkraft oder Einlegeposition. Eine erhöhte Blechhalterkraft führt bei den Untersuchungen mit Prinzip- und Karosserieanbauteilen wegen verminderter Blecheinzüge zu niedrigeren Maßabweichungen. Des Weiteren zeigen die abschließenden

Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen mit schwankenden Werkstoff- und Prozesseinflussfaktoren ihre hohe Signifikanz zum Erhalt maßhaltiger Karosserieanbauteile. Im Fokus steht hierbei ein Werkstoffauswahlprozess, bei welchem bei der Auslegung des Umformprozesses die Schwankungsbreiten der Werkstoffkenngrößen mit berücksichtigt werden.

Für die Anwender bedeutet dies konkret, dass der Bauteilkonstrukteur bei der Auslegung und Dimensionierung der Karosseriebauteile die Auswirkungen der Verwendung verschiedener geometrischer Formen beim Umformen berücksichtigen sollte. Mit Hilfe von Krümmungsanalysen und der Bewertung der geometrischen Zusammensetzung kann abgeschätzt werden, welche Rückfederung nach dem Umformprozess zu erwarten ist. Zur Verifikation sind die ersten Ergebnisse der Umformsimulationen des Methodenplaners mit den Konstrukteuren der Karosseriebauteile zu diskutieren. Des Weiteren ist in gemeinsamen Gesprächen des Bauteilentwicklers und des Planers der Umformmethode zu klären, inwieweit das Flächenträgheitsmoment relevanter Bauteilquerschnitte optimiert werden kann. Dazu ist eine Abwägung aus maximaler Blechdicke in Kombination mit dem jeweiligen E-Modul zu treffen. Auf Basis ermittelter Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge ist das Ziel, die Formabweichung durch eine perfektionierte Konstruktion und Werkstoffauswahl für das Karosseriebauteil zu reduzieren. Im Anschluss daran ist es die Aufgabe des Methodenplaners, den Umformprozess des Bauteils zu verbessern. Dies umfasst die Position der eingelegten Blechplatte sowie die notwendige Blechhalterkraft einzustellen, sodass das Ergebnis unter Berücksichtigung der Prozess- und Werkstoffschwankung eine geringe Formabweichung des Karosseriebauteils zu Soll ist.

6 Einflussgrößen des Fügeprozesses auf die Maßhaltigkeit von Baugruppen

Nachdem in Kapitel 5 relevante Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge für Eingangsgrößen von Umformprozessen systematisch erörtert wurden, sieht Kapitel 6 darauf aufbauend mit der Variation von Fügestationsparametern die Generierung eines grundsätzlichen Verständnisses für Stellhebel zur Verbesserung der Maßhaltigkeit der Baugruppe vor. Im Anschluss an die Detektion relevanter Faktoren der Einzelprozesse Umformen und Fügen werden bei der Verkettung der Prozesse identifizierte Wechselwirkungen aus nicht-maßhaltigen Einzelteilen und Parametern des Fügeprozesses erläutert. Generalisiertes Ziel ist die Formabweichungen zur Soll-Baugruppe nach dem Fügen zu reduzieren. Studien zur stochastischen Optimierung der Fügestationsparameter in Wechselwirkung mit den Schwankungen von Einzelteile schließen dieses Kapitel 6 ab.

6.1 Methodische Vorgehensweise zur Ermittlung der Stellhebel einzelner Fügestationsparameter

In Analogie zu den Studien der Einflussfaktoren auf die Maßhaltigkeit nach dem Umformprozess wird in Bild 65 die Vorgehensweise zur Variation der Spannbedingungen und Fügebedingungen dargestellt. Sinnvolle Parametergrenzen sind durch normative Regelungen vorgegeben. Neben Anzahl, Reihenfolge und Position von Spann- und Fügepunkten wird der Stellhebel bei veränderten Spannergeometrien oder bei einem Überdrücken („Shimsen“) auf die Maßabweichungen zur Soll-Baugruppe durch Simulationen und Experimente abgeschätzt. Anschließend wird einerseits der Effekt von verschiedenen Blechdicken und E-Modulen der Einzelteile auf die Maßhaltigkeit ausgearbeitet. Andererseits gilt es, die Wechselwirkungen differierender Rückfederungswerte mit den Fügestationsparametern zu erforschen. Basierend auf der Rückfederung gefügter Baugruppen können Vorhaltemaße für die Überbiegung der Werkzeughälften der Umformwerkzeuge oder die Wahl von Fügestationsparametern und ihre Adaptionen definiert werden.

Je nach gewünschtem Detaillierungsgrad können die Dehnungen, Spannungen und die Verteilung der Blechdicke für die nächsten Prozessschritte genutzt werden. Diese werden je nach Bedarf an die sich dem Umform-

prozess anschließenden Fügeschritte der digitalen Fertigungsprozesskette weitergegeben.

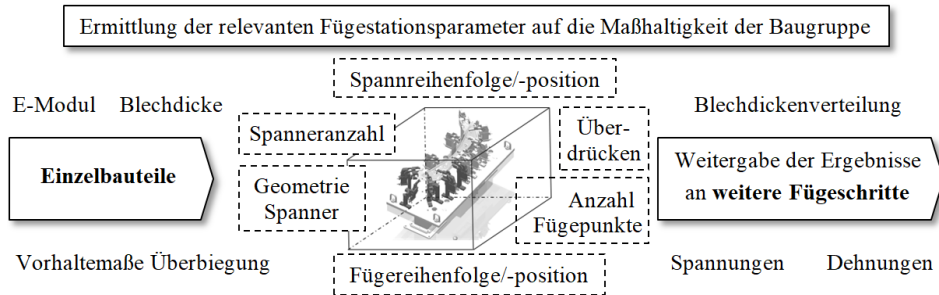


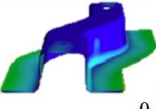
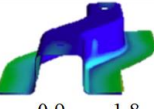
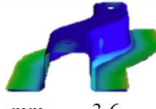
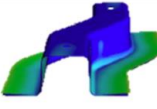
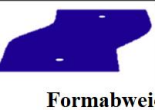
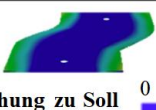
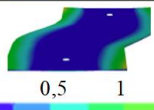
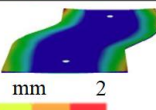
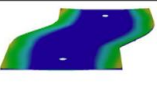
Bild 65: Methodische Vorgehensweise zur Quantifizierung des Stellhebels von verschiedenen Fügeparametersparametern auf die resultierende Maßhaltigkeit von Baugruppen

Bei den angewandten Methoden zur Übertragung geometrischer Formen, skalaren und vektoriellen Größen (siehe Abschnitt 4.4), entstehen Abweichungen der zu übertragenden Ergebnisse. Notwendig sind die Methoden aufgrund unterschiedlicher FE-Programme. Unabhängig von den zu variierenden Umform- und Fügeparametersparametern wird überprüft, welche Signifikanz die Übertragung einzelner Größen auf die Vorhersage der geometrischen Abweichungen hat. Dazu werden die Resultate folgender fünf Fälle für Clinchsimulationen mit demselben Ausgangszustand nach dem Umformprozess (Solver: LS-DYNA®) gegenübergestellt:

- **Fall 0:** Keine Übertragung von Ergebnisgrößen auf den nächsten Prozessschritt
- **Fall 1:** Übertragung der Geometrieform nach dem Umformen, nominelle Blechdicke
- **Fall 2:** Übertragung der Geometrieform nach dem Umformen, Blechdickenverteilung
- **Fall 3:** Übertragung der Geometrieform nach dem Umformen, Blechdickenverteilung und Umformgrade
- **Fall 4:** Übertragung der Geometrieform nach dem Umformen, Blechdickenverteilung, Umformgraden **und** ausiterierte Spannungen (vgl. Abschnitt 4.4.2)

Visualisiert am Beispiel einer struktursteifen Prinzipbaugruppe S-Rail weist Tabelle 20 Differenzen bei der Vorhersage der Formabweichungen auf. Die größten geometrischen Abweichungen sind im Fall 0 konträr zu den Fällen 1 bis 4 zu erkennen.

Tabelle 20: Ergebnisse der Rückfederungsanalyse für fünf Fügefälle - Separate Auswertung des Außen- und Innenteils nach dem Fügen der Prinzipbaugruppe S-Rail

	Fall 0	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
Außen- teil (AT)					
	Formabweichung zu Soll 0 0,9 1,8 mm 3,6				
Innen- teil (IT)					
	Formabweichung zu Soll 0 0,5 1 mm 2				
AA6014; initiale Blechdicke AT: 1,0 mm; $F_N = 90 \text{ kN}$; LS-DYNA® R8.0 und Abaqus®					

Der größte Genauigkeitsgewinn für die Rückfederungsvorhersage einer digitalen Fertigungsprozesskette ist für das Außen- und Innenteil bei der Übertragung der geometrischen Formabweichung aus den Vorgängerprozessen zu verzeichnen. Erklärt werden kann dies durch die eingefrorenen Eigenspannungen und plastischen Vergleichsdehnungen nach der Berechnung eines neuen Gleichgewichtszustandes. Durch die Ersatzmodellierung findet beim Fügeprozess kein Materialfluss in Form von plastischem Fließen statt, wodurch die zusätzliche Berücksichtigung der aktuellen Blechdicke, Spannungs- und Dehnungsverteilung für das Ergebnis der geometrischen Änderung keinen sehr hohen Einfluss hat. Bei nachfolgenden Rohbauschritten, wie Rollfalzen und induktive Wärmebehandlung sowie bei Crashuntersuchungen ist ein anderes quantitatives Maß für den Einfluss auf die Formhaltigkeit denkbar. Zudem können Wechselwirkungen zwischen Prozessketten besser auf die Veränderungen der Werkstoffeigenschaften des vorherigen Prozessschrittes zurückgeführt werden.

Zusammenfassend ist als Erkenntnis der Studie die hohe Bedeutung der Übertragung der Formabweichungen aus den vorangestellten Prozessschritten festzustellen. Im Folgenden wird daher der Übertragungsfehler für die geometrische Form qualitativ beurteilt. Die Prüfung des methodischen Fehlers des geometrischen Mappings (siehe Abschnitt 4.4.1) wird anhand der Werkstoffe AA6014 und CR3 mit der Blechdicke von 1,0 mm inspiziert. Im Anschluss an eine gemäß Abschnitt 4.3 getätigte Hauptausrichtung werden die Normalabstände zwischen dem geometrisch gemappten Umformnetz (Soll-Netz: CADo-Netz als Basis) und dem Netz aus der Umformsimulation berechnet.

Bei dem umgeformten Prinzipbauteil S-Rail treten die höchsten Normalenabweichungen im Bereich der Bauteilzargen sowie an den äußeren Ecken der beiden Bauteilflansche auf (siehe Bild 66). Die Werkstoffe sind: AA6014 und CR₃ bei $s_0 = 1\text{ mm}$.

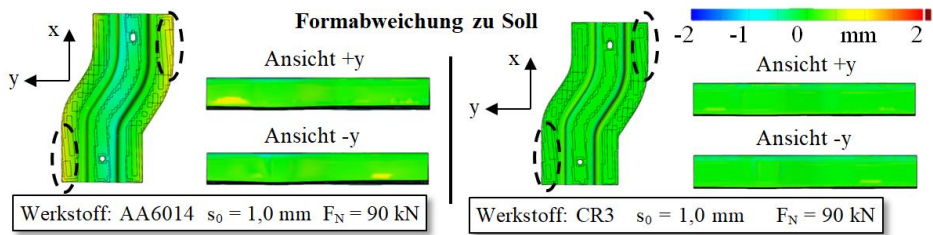


Bild 66: Delta der Formabweichung nach geometrischen Mapping von S-Rail-Bauteilen

6.2 Einfluss ausgewählter Eingangsgrößen des Fügeprozesses auf die Maßhaltigkeit von Baugruppen

Unter Einhaltung des erforderlichen Ergebnisübertrags und Beachtung der Abweichung bei der übertragenen geometrischen Form werden bei den prinzipiellen Versuchsproben S-Rail, S-Rail-Segmente und H-Proben verschiedene Eingangsgrößen des Fügeprozesses variiert. Neben Werkstoffkenngrößen wird der Effekt der Änderung der Prozessgrößen von flexiblen Fügestationen (siehe Abschnitt 4.2.4) in Wechselwirkung mit den Einzelbauteilen erforscht. Weiterhin wird gemäß Tabelle 21 die Möglichkeit zur Verbesserung der Maßhaltigkeit des Zusammenbaus durch geometrische Änderungen der Spannerfläche oder Geometrie der Kniehebelspanner eruiert. Die Übersicht zeigt diejenigen Faktorkombinationen bei dem Fügeprozess der S-Rail-Prinzipbaugruppe, welche simulativ und experimentell oder ausschließlich in der Simulation untersucht werden.

Tabelle 21: Übersicht über die Variationen der Eingangsgrößen der Prinzipbaugruppe S Rail beim Fügeprozess (Simulation und Experiment)

Experiment/ Simulation	Werkstoff Außenteil	Blechdicke Außenteil	Werkstoff Innenteil	Blechdicke Innenteil	Fügestationsparameter
Einheit	-	mm	-	mm	-
Parameter- variation (n=3) ↓	AA6014	1,0	AA6014	1,0; 0,7	Spannerposition/-anzahl
	AA5251	1,0; 2,0	AA5251	0,7; 1,0; 2,0	Fügeposition/-anzahl
	CR 3	1,0; 2,0	CR3	1,0; 2,0	Fügereihenfolge
					Spannreihenfolge
					Spannfläche/-geometrie

Durch die Einstellungen der Fügestationsparameter können in den Prozessschritten (Einlegen-Spannen-Fügen-Rückfederung) gezielt die Abweichungen zur Sollbaugruppe beeinflusst werden, ohne die Maßhaltigkeit der Einzelteile verbessern zu müssen. Mit einer systematischen Analyse der Einzelfaktoren lassen sich anhand von Einzelteilen gleicher Formhaltigkeit Erkenntnisse gewinnen. Die Faktoreinstellungen der E-Module und Blechdicken der Werkstoffe orientieren sich an häufig auftretenden Paarungen bei Karosseriekomponenten. Die Bandbreite je Fügestationsparameter wird unter Einhaltung verfügbarer Gestaltungsvorschriften hinsichtlich Position, Zugänglichkeit und Fügerichtung so gewählt, dass eine konstante Qualität der Clinchverbindungen gewährleistet wird. Dadurch wird die Übertragung der Ergebnisse auf reale Karosseriekomponenten nicht eingeschränkt.

Neben der Prinzipbaugruppe S-Rail werden Experimente und Simulationen von Baugruppen aus einzeln umgeformten S-Rail-Segmenten ausgewertet. Ziel ist es, Erklärungen für die auftretenden Effekte der Formänderungen zu erarbeiten. Die Referenzwerte für die Experimente sind in Tabelle 22 hervorgehoben.

Tabelle 22: Parametervariation beim Fügen von S-Rail-Segmenten und H-Proben

S-Rail-Segmente (1-5)	Werkstoff Außenteil	Blechdicke Außenteil	Werkstoff Innenteil	Blechdicke Innenteil
Einheit	-	mm	-	mm
Parameter-variation ↓	AA6014	1,0	AA6014	1,0
	CR3	2,0	CR3	2,0

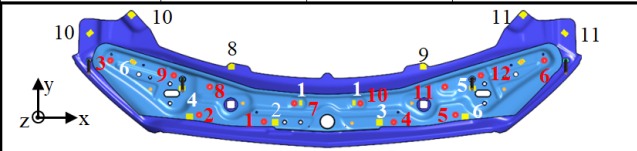
Intention der zusätzlichen Prinzipbaugruppen ist es, die Auswirkung niedriger Struktursteifigkeiten auf die Veränderung der Formhaltigkeit nach dem Fügen zu erörtern. Bei der S-Rail-Baugruppe stehen die Wechselwirkungen des Fügeprozesses mit geometrischen Krümmungsradien und -formen im Vordergrund. Im Gegensatz dazu wird beim Fügen von S-Rail-Segmenten und insbesondere von H-Proben die Idee umgesetzt, allgemeingültige Erkenntnisse zum Fügepunktabstand und zum Abstand zwischen Spann- und Fügepunkten zu erzielen.

Um letztendlich Handlungsempfehlungen für die Optimierung der Spann- und Fixierkonzepte für Karosseriekomponenten auf Basis der Grundlagenversuche abzuleiten, werden Variationsrechnungen zu Fügestationsparametern des Unterzusammenbaus einer Motorhaube getätigt (siehe Tabelle 23). Die gefertigten Einzelteile Vorderteil und Verstärkung des Motorhaubeninnenteils haben nach Tabelle 18 in den Bauteilmitten hohe Abweichungen zu ihren CAD-Datensätzen und eignen sich daher

für Studien zur Analyse der Wechselwirkungen von Einzelteilen und den Settings von Fügestationen.

Der Referenzversuch des Unterzusammenbaus Motorhaube sieht 11 Spanngruppen und 12 Fügepunkte, sowie keine Verschiebungen (x, y, z) vor. Gemäß der festgelegten Spann- und Fügereihenfolge werden die einzelnen Elemente des Spann- und Fixierkonzeptes aufsteigend von 0 bis 11 beziehungsweise 0 bis 12 nummeriert. Einzelne Spannelemente werden zu Spanngruppen zusammengefasst, um die Zugänglichkeit für die Fügungen zu verbessern und die Taktzeit durch gleichzeitiges Schließen von Spannelementen zu verkürzen.

Tabelle 23: Variierte Fügestationsparameter beim Unterzusammenbau einer Motorhaube

Fügestationsparameter	Referenz	Entfernte Spannstellen	Entfernte Fügepunkte	Spannreihenfolge (SRF)	Fügereihenfolge
Vorderteil: AA5251 $s_0 = 1,0 \text{ mm}$ Verstärkung: AA5251 $s_0 = 1,25 \text{ mm}$ ■ Spannstellen ● Clinchpunkte ● Stifte ▲ Auflagepunkte ● Auslinchpunkte	- 11 Spanngruppen - 12 Fügepunkte - Spannreihenfolge <u>1:</u> 1-11 - Fügereihenfolge <u>1:</u> 1-12 - Geopunkte vs. Auslinchpunkte	2,3	1,4	<u>2:</u> Alle Spanner gleichzeitig	<u>2:</u> 10, 7, 4, 1, 11, 8, 5, 2, 12, 9, 6, 3
		4,5	8,11		<u>3:</u> 3, 6, 9, 12, 2, 5, 8, 11, 1, 4, 7, 10
		12,13	7,10	<u>3:</u> (4,5,8,9) und (1,2,3,6,7,10,11)	<u>4:</u> 10, 7, 6, 3, 4, 1, 12, 9, 11, 8, 5, 2
		Spannerunterseiten 4,5	1,4,7,10		<u>5:</u> 11, 5, 8, 2, 4, 1, 12, 9, 10, 7, 6, 3
		Spanneroberseiten 1,4,5	1,4,7,8,10,11		<u>6:</u> 10, 7, 11, 8, 12, 9, 6, 3, 4, 1, 5, 2
					

Die Ergebnisse der Einzelstudien werden im Abschnitt 6.2 näher erläutert. Diese umfassen beispielsweise das Entfernen von Spannstellen oder Fügepunkten sowie geänderte Spann- und Fügereihenfolgen. Potentielle Einflussgrößen auf die Maßhaltigkeit von Baugruppen werden durch experimentelle und simulative Untersuchungen hinsichtlich ihrer Ursachen strukturiert erörtert. Zusätzlich zu den in Tabelle 23 dargelegten Parametern können die Positionierungen der Ober- und Unterseiten von Spanngruppen an die Richtung der Formabweichungen der Einzelteile für jeden Bauteilstand angepasst werden. Im Abschnitt 6.2.3 wird die Einflussmöglichkeit der Spannpositionen auf die Maßhaltigkeit des ZB S-Rail mit der beim Unterzusammenbau des Motorhaubeninnenteils verglichen.

6.2.1 Validierung der Fügeprozesse von Prinzip- und Realbaugruppen

Für die simulative Abbildbarkeit des Durchsetzfügeprozesses ist eine hinreichende Übereinstimmung mit den Experimenten erforderlich. Anschließend findet eine systematische Analyse der Einflussfaktoren der Spann- und Fügeprozesse statt. Im Hinblick auf die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für reale Karosserieteile sind qualitativ validierte Modelle für die in den Prinzipbaugruppen und Anbauteilen auftretenden Fügeverfahren notwendig. Ergebnisse ausgewählter Experimente und Simulationen des Verfahrens Durchsetzfügen werden anhand von Falschfarbenbildern in Bild 67 gegenübergestellt. Analysiert werden geclinchte ZB S-Rail und Unterbaugruppen einer Motorhaube mit den standardmäßigen Spann- und Fixierkonzepten der jeweiligen Baugruppe.

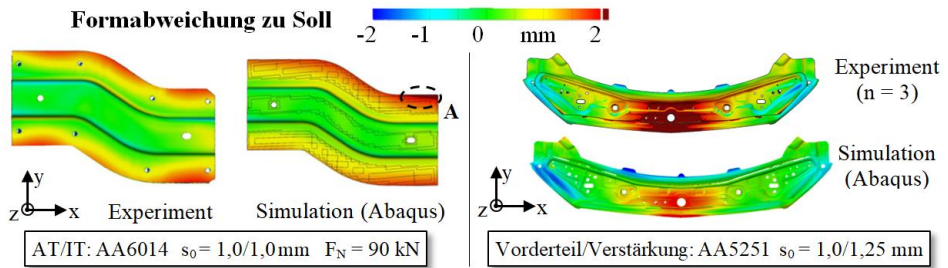


Bild 67: Vergleich der qualitativen Formabweichungen der Prinzipbaugruppe S-Rail (a) und der Unterbaugruppe einer Motorhaube (b) in Versuch und Simulation

Simulationen mit dem Ersatzmodell der Fügechnik Durchsetzfügen erreichen bei beiden Baugruppen hohe Übereinstimmungen mit den Experimenten. Beim Vergleich der beiden linken Abbildungen von Bild 67 sind kleinere Abweichungen im Bereich der Bauteilecken des Details A vom ZB S-Rail zu erkennen. Des Weiteren haben die Clinchsimulationen weniger struktursteifer Karosseriebaugruppen eine hinreichende Genauigkeit für qualitative Aussagen. Dadurch lässt sich exemplarisch der Einfluss verschiedener Fügeparameters in Abhängigkeit von charakteristischen Geometriebereichen prognostizieren.

6.2.2 Spannprozess und deren Reihenfolge

Zielstellung des Spannprozesses ist es, die Einzeilbauteile in die geometrische Sollage der Baugruppe zu bringen, um nach dem Abbau der elastischen und teilweise plastischen Dehnungen einen Zusammenbau mit geringen Formabweichungen zu erhalten. Der Schließvorgang jeder

einzelnen Spanngruppe minimiert vorwiegend lokal die Differenz zwischen der Ist- und Sollgeometrie im gespannten Zustand.

In der frühen Produktphase ist mithilfe validierter Methoden für die mechanische Fugesimulation eine Aussage über die Auswirkung jedes einzelnen Spannschrittes möglich. Ohne reale, prototypische Aufbauten der Fugestationen erlaubt die sequentielle Untersuchung der Schritte Einlegen und Spannen eine Aussage über den lokalen und globalen Stellhebel beim Spannen der Baugruppe. Bild 68 visualisiert die zunehmende globale Reduzierung der Formabweichungen nach jedem Spannschritt. Aufgrund der konvex-konkaven Krümmungsradien des Bauteils S-Rails eignet sich das S-Rail zur detaillierten Analyse geometrischer Formen beim Fügen.

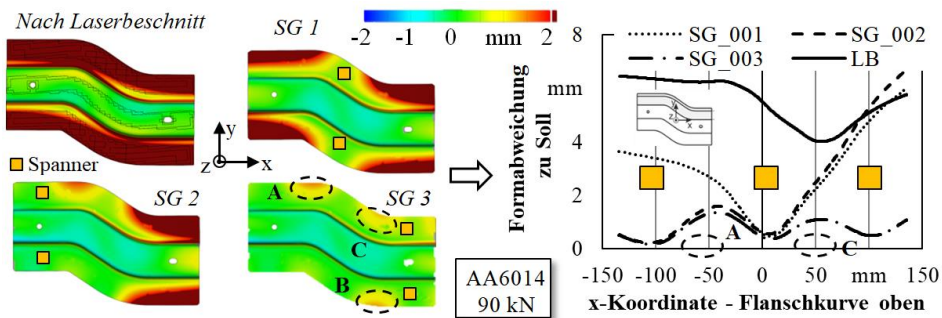


Bild 68: Formabweichung zur Sollgeometrie nach dem Schließen der einzelnen Spanngruppen eines Prinzipalbauteils unter Verwendung des Werkstoffes AA6014 für AT und IT

Ausgehend von dem laserbeschnittenen S-Rail-Bauteil ($s_o = 1 \text{ mm}$) und ebenen Unterblechen ($s_o = 1 \text{ mm}$) werden in drei Schritten zum Ursprung punktsymmetrische Spannpaare (Ober- und Unterseite) auf einen Sollabstand von 2 mm gebracht. Das Schließen der Oberseiten der Spanngruppe (SG) 1 weist neben dem symmetrischen, lokalen Einfluss um die Spannungspunkte eine Reduzierung der Formabweichung zu den Ecken der Bauteilflansche auf. Im Bauteilbereich um Spanngruppe 1 kann der Spalt und die Formabweichung des umgeformten Einzelteils vollständig kompensiert werden. Bei dem Referenzversuch von Bild 68 bleiben nach dem Schließvorgang von Spanngruppe 2 und 3 die Formabweichungen umliegender lokaler Bauteilbereiche der Details A-C bestehen. Diese werden nicht komplett auf das Sollmaß der Baugruppe niedergespannt. Ursächlich sind höhere Formabweichungen aufgrund der Zug-Druck-Spannungszustände in den konvexen Bauteilbereichen A und B. In diesen Bereichen führen radial überlagerte Zugspannungen zu einem verminderten Materialfluss in der Blechebene und Eigenspannungen nach dem Tiefziehen. Durch

den Spannprozess werden in den konvexen Radien von Mises Vergleichsspannungen (bis zu 160 N/mm^2) oberhalb der Fließgrenze erzeugt. In den Bereichen A und B tritt eine Plastifizierung des Werkstoffs ein. Bei dieser Spannerkonfiguration resultieren höhere Formabweichungen mit bis zu $0,5 \text{ mm}$. Diese Vorgehensweise wird an der Unterbaugruppe einer Motorhaube in Bild 69 fortgeführt.

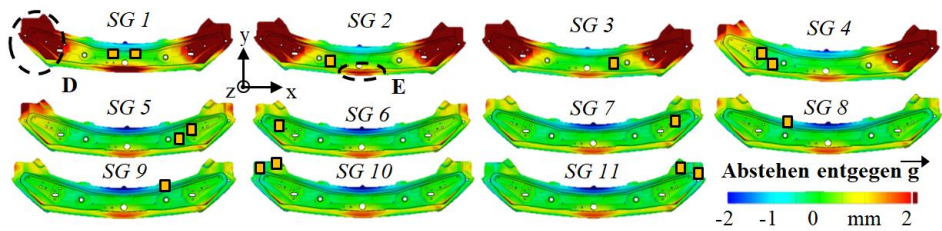


Bild 69: Schrittweise Analyse des Spannprozesses der Unterbaugruppe einer Motorhaube

Die Ergebnisse des sequentiellen Spannvorgangs ($\text{SG } 1 \rightarrow \text{SG } 11$) visualisieren die Auswirkung der einzelnen Schritte des Spannprozesses. Selbst wenn aus Taktzeitgründen das gleichzeitige Schließen der Kniehebelspanner bei der Prozesskonfiguration des Clinchens der Idealfall ist, können mit dieser Analysemethode die signifikanten Spanngruppen hinsichtlich des zu schließenden initialen Bauteilabstandes zur Sollgeometrie erarbeitet werden. Die mindestens notwendige Spanneranzahl bei der in Bild 69 abgebildeten Karosseriebaugruppe wird in Abschnitt 6.2.3 ermittelt. Bei der qualitativen Auswertung von Bild 69 fällt auf, dass insbesondere der Schließvorgang der ersten fünf Spanngruppen temporär zu einer hohen, elastischen Kompensation der Formabweichungen der Einzelteile führt.

Unter Bezugnahme der Einzelteilverformungen aus Tabelle 18 kann anhand von Bild 69 festgestellt werden, dass die Bedeutung eines Bauteilspanners von der betragsmäßigen Normalenabweichung der zu fügenden Einzelteile abhängig ist. Im Bereich der Spanngruppe 1 haben das Verstärkungsteil und das Vorderteil hohe Formabweichungen zur Sollgeometrie. In diesem Bereich sind daher höhere elastische und plastische Dehnungen aufzubringen, um die Einzelteile durch das Spannkonzert in eine korrekte Lage zu bringen. Nach dem Schließen von Spanngruppe 1 ist ein zur y-Achse symmetrisches Bauteilverhalten sowie ein Aufstellen der Bauteilecken D in Bild 69 zu erkennen. Gemessen an den Größenabmessungen der Karosseriebaugruppe zum ZB S-Rail demonstrieren die einzelnen Spanngruppen eine globalere Wirkung auf den Spaltschluss. Die Begründung liegt in der niedrigen Struktursteifigkeit großflächiger

und flacher Motorhaubeneinzelteile. Die geringe Anzahl an geometrischen Elementen von größeren Niveausprüngen (Stufen) und kleineren Niveausprüngen (Verprägungen) korreliert mit der im Vergleich zum S-Rail niedrigeren Struktursteifigkeit.

Spanngruppe 2 und 3 werden zur gezielten lokalen Stellung der Vorderseite des Unterzusammenbaus einer Motorhaube (siehe Detail E) genutzt. Die SG 4 und 5 sind erforderlich, um die hochstehenden Bauteilecken in Anlage zu bringen. Die weiteren Bauteilspanner werden vom Rohbauplaner bereitgehalten, um auf Änderung der Maßhaltigkeit Einzelteile mit Korrekturmaßnahmen zu reagieren. Sie haben bei dem Geometriedatensatz keinen Einfluss auf die Rückfederung vor dem Setzen der Fügepunkte. Bei Problemen mit der Zugänglichkeit der Fügezange werden mit der Studie Potentiale für die Änderung der Spanneranzahl aufgezeigt.

Im Gegensatz zur Serienfertigung werden prototypische Baugruppen oft mit einer definierten Spannreihenfolge (SRF) gefertigt. Da alle Experimente mit einer prototypischen Fügestation und Basis des passenden CAD-Datenstandes der Einzelteile realisiert werden, ist der Unterschied variierender Spannreihenfolgen in Bild 70 herauszustellen.

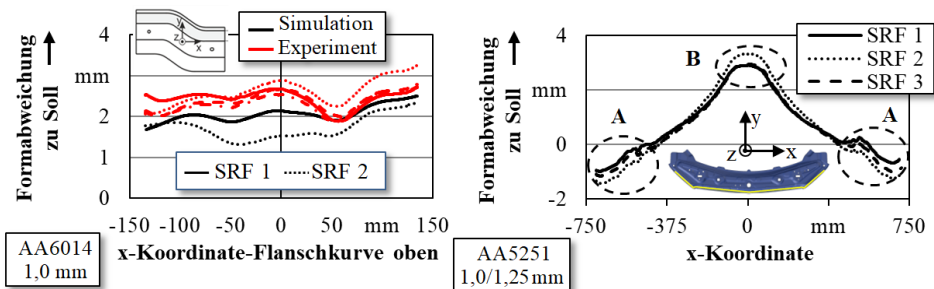


Bild 70: Auswirkung der Variation der Spannreihenfolge bei Prinzip- und Realbaugruppen

Bei der Auswertung der Spannreihenfolgen SRF 1 (Referenz: von innen nach außen) und SRF 2 (alle Spanner gleichzeitig) bestätigt sich bei den Versuchen des ZB S-Rail die Reduzierung der Normalabweichung zum Soll in der Simulation in einem geringeren Umfang. Im linken Diagramm von Bild 70 ist generell eine gute quantitative Übereinstimmung der Flanschverläufe von Experiment und Simulation der Referenzreihenfolge zu erkennen. Zudem ist anzumerken, dass die Versuche unter Verwendung des Werkstoffes AA6014 und der Blechdicke 1,0 mm eine geringe Streuung haben. Im Anwendungsfall des Prinzipbauteils S-Rail hat die Spannreihenfolge keine nennenswerte Veränderung der experimentell

ermittelten Formhaltigkeit nach dem Fügen zur Folge. Als Grund ist die durch die Geometrieelemente induzierte Struktursteifigkeit in Verbindung mit den Spannerabständen anzugeben.

Zur Übertragung dieser Erkenntnis auf den Prozess der Karosseriebaugruppe ZB Vorne werden drei Spannreihenfolgen (SRF 1: Referenz, SRF 2: alle Spanner gleichzeitig, SRF 3: 2 Spannschritte) im rechten Diagramm von Bild 70 gegenübergestellt. Marginale Unterschiede bei der Bewertung der Maßhaltigkeit nach dem Fügen sind in den äußeren Bereichen A und im inneren Bereich B anhand eines Bauteilschnittes zu erkennen. Der Schnitt hat ein Offset von 10 mm zur Vorderkante. In abgeschwächter Form wird die Bauteilverdrillung (A: niedrigere, B: höhere Formabweichung) in den Experimenten bestätigt. Im Hinblick auf den geringen Unterschied zwischen der Spannreihenfolge im Serienprozess (alle gleichzeitig) und im prototypischen Umfeld (sequentiell) wird kein erheblicher methodischer Fehler durch die Annahme eines sequentiellen Spannerschließens bei den Studien festgestellt.

6.2.3 Anzahl, Position und Geometrie von Kniehebelspannern

Neben der Reihenfolge ist eine Änderung des Spannkongzeptes in Form einer differierenden Anzahl an Kniehebelspannern, deren Position sowie Geometrie denkbar. Konträr zum Einsatz von Fügepunkten sind Spannungspunkte ein temporäres Mittel, um nicht-maßhaltige Einzelteile in die gewünschte Position zu bringen.

Im Gegensatz zur Prinzipbaugruppe S-Rail kann der Einfluss einer veränderten Spanneranzahl durch die höhere Anzahl an Kniehebelspannern bei der Motorhaube besser erläutert werden. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die einzelnen Bauteilspanner in Abhängigkeit der Planarität der einzelnen Bauteilbereiche verschieden große geometrische Auflageflächen haben. Bei der Analyse eines sequentiellen Schließens der einzelnen Auflageflächen einer Unterbaugruppe Motorhaube (siehe Bild 69) wird identifiziert, welche Spanner einen höheren und welche einen geringeren Effekt auf den Spaltschluss nach dem Spannen haben. In einem weiteren Schritt gilt es, anhand der in Bild 71 dargestellten Simulationsergebnisse zu ermitteln, welche Formabweichung durch eine Änderung der Spanneranzahl entsteht.

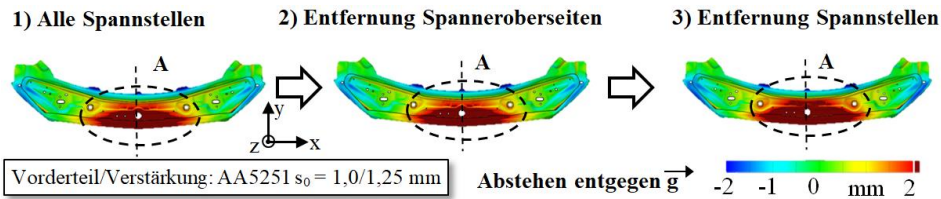


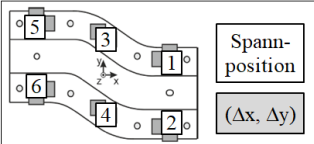
Bild 71: Effekt einer Änderung der Spannstellenanzahl auf die Baugruppenmaßhaltigkeit

Dazu werden in einer Variante 2 von allen Geometriespannern die Oberseiten der äußersten Bauteilspanner entfernt, sodass lediglich ihre Unterseiten als Auflagefläche dienen. Bei diesen Versuchsbedingungen mit Verzicht der äußeren Spannstellen (Variante 3) ist keine maßgebliche Verschlechterung der Formhaltigkeit der Baugruppe zu erkennen. Erklärbar ist dies durch die geringe Formabweichung der beiden Einzelteile in diesem Bauteilbereich, wodurch kein Spannvorgang auf die CADo-Positionen notwendig ist. Zusätzliche Bauteilspanner im Bereich der größten Formabweichung der Einzelteile zueinander ermöglichen hingegen einen höheren Spielraum bei der Optimierung des Bauteilverhaltens.

Besteht aufgrund einer guten Zugänglichkeit der Fügwerkzeuge kein Bedarf, die Anzahl an Spannern zu verändern, ist dennoch eine optimale Positionierung vorhandener Spannpunkte sinnvoll. Die ideale Anordnung der Spanner umfasst die Positionierung auf der Bauteilfläche (x-y-Ebene) und normal zur Oberfläche (z-Position). Bei den Karosseriebaugruppen ist die Spannerposition auf der Bauteiloberfläche durch die Konstruktion eingeschränkt. Für die Ermittlung allgemeingültiger Zusammenhänge wird daher auf den ZB S-Rail mit sechs Bauteilspannern in planaren Flanschbereichen zurückgegriffen.

Zur Abschätzung des Effekts veränderter x- oder y-Spannpositionen in den Bereichen mit großen Formabweichungen nach dem Umformen werden Versuche mit dem ZB S-Rail realisiert. Die Werte Δx und Δy der Tabelle 24 halten interne Konstruktionsrichtlinien ein.

Tabelle 24: Versuchsplan zur Ermittlung der Effekte von Spannerschiebungen (Δx , Δy)

		Spanner 1+2	Spanner 3+4	Spanner 5+6
	Versuch 1 in mm	(0/10),(0,-10)	(0/0),(0,0)	(0/10),(0,-10)
	Versuch 2 in mm	0	(-15/11),(15,-11)	0
	Versuch 3 in mm	0	(15/-11),(-15,11)	0

Die Spannerverschiebungen für die drei Versuche erfolgt mittels Abstimmplatten. Die Einstellgenauigkeit beträgt 0,1 mm. Das Untersuchungsziel des ersten Versuches (Versuch 1 in Bild 72) ist die Quantifizierung der Auswirkung einer Verschiebung der Spanner 1, 2, 5, 6 um 10 mm zur Referenz nach außen. Die Erforschungen der Versuche 2 und 3 zeigen den Effekt einer Verschiebung der mittleren Spanner 3 und 4 in konvexe oder konkave Bauteilbereiche. Für jede Versuchskonfiguration werden drei Versuche getätigt und die Mittelwertlinien sowie die dazugehörige Prozessschwankung in Form der Standardabweichung ermittelt. Ausgewertet werden die obere und untere Flanschkurve mit einem Offset von 25 mm.

Bei Versuch 1 führt die Verschiebung der Spannpositionen Δy um 10 mm nach außen zu einer höheren Formabweichung entlang der x-Koordinate. Weiterhin fällt auf, dass in der Umgebung von $x = -125, -45, 52,5$ und 125 mm die Formhaltigkeit verbessert wird. Dies beruht auf dem Setzvorgang der Fügepunkte. Die größten mittleren Formabweichungen sind in den Bereichen A.1 und A.2 zu erkennen, welche mit den geometrischen Krümmungsradien des Prinzipbauteils einhergehen. In den konvexen Bereichen ist der Effekt der Spannerverschiebung prozentual höher als in konkaven Bereichen. Verstärkt wird diese Auswirkung durch eine Erhöhung des konvexen Krümmungsradius von R_{50} (Detail A.1) auf R_{100} (Detail A.2). Die Prozessschwankungen sind in Bezug auf die Formabweichung der Referenz (Flanschkurve oben: $1,28 \pm 0,15$ mm; Flanschkurve unten $1,17 \pm 0,15$ mm) im oberen Bereich mit $1,36 \pm 0,18$ mm ähnlich, während unten die Versuche mit $1,47 \pm 0,4$ mm stärker streuen.

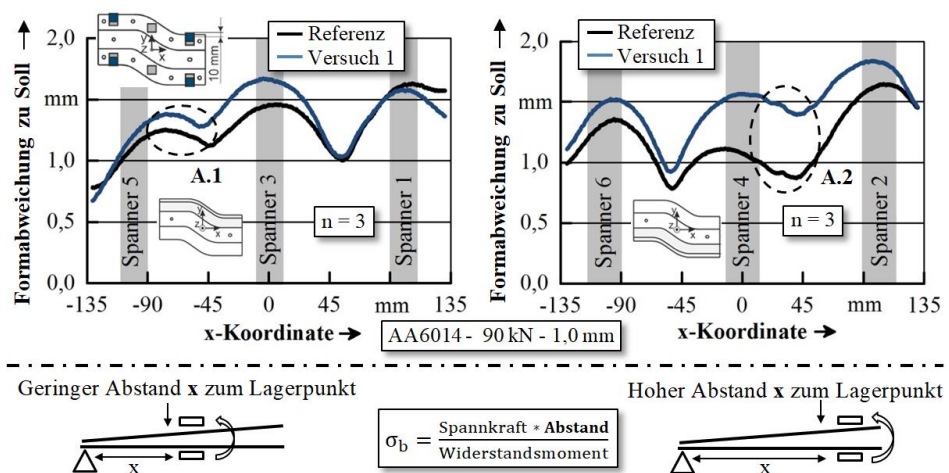


Bild 72: Effekt einer Spannerverschiebung nach außen (Δy) auf die Formabweichung

Die Ursache für die höheren Formabweichungen kann vereinfacht anhand der Biegespannung σ_b eines idealen Biegebalkens erklärt werden. Die Biegespannung wird über den Quotienten des Produktes aus Spannkraft und dem Abstand x des Kraftwirkungspunktes zum Lagerpunkt sowie dem Divisor des Widerstandsmomentes W bestimmt. Die Verschiebung des Spanners zum Bauteilrand erhöht gemäß Bild 72 den Abstand x zum Lagerpunkt und führt zu einer höheren Biegespannung. Es resultiert eine höhere Rückfederung im Flanschbereich. In den äquivalenten Simulationen ist in den konvexen Bauteilbereichen eine signifikante Erhöhung der resultierenden Vergleichsspannung zu beobachten.

Als weiterer Faktor der Fügestation wird die x -Verschiebung von einzelnen Bauteilspannern in den Versuchen 2 und 3 der Tabelle 24 experimentell und simulativ erörtert. Die Ergebnisse einer Spannerverschiebung von 15 mm in Richtung der konvexen oder konkaven Bauteilbereiche der Prinzipbaugruppe S-Rail sind im nachfolgenden Bild 73 aufgeführt.

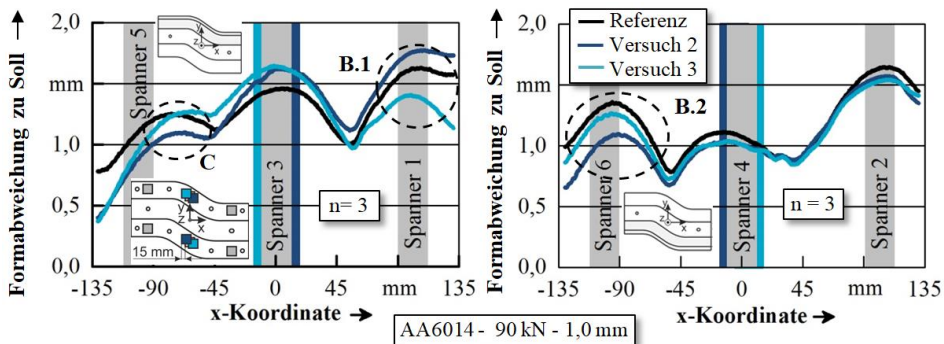


Bild 73: Effekt einer Spannerverschiebung Δx auf die Formabweichung (Versuch 2 und 3)

Im Gegensatz zu der Spannerverschiebung zum Bauteilrand ist der Effekt der beiden Versuchsvarianten auf die Formabweichung der gefügten Baugruppe geringer. Differenzen ergeben sich vorwiegend im Bereich der Bauteilränder B.1 und B.2. Eine Verschiebung der Bauteilspanner 3 und 4 in die konkaven Bauteilbereiche (Versuch 2) führt partiell zu niedrigeren Formabweichungen als eine Verschiebung in die konvexen Bauteilbereiche (Versuch 3). Die Formabweichungen der Flanschkurve liegen bei den einzelnen Versuchen gemäß des rechten Diagramms von Bild 73, mit Ausnahme des Bereichs B.2, innerhalb der Prozessschwankungen. Bei dem detaillierten Vergleich der Versuche 2 und 3 sind lokale Differenzen der Formabweichungen im konvexen Bauteilbereich C bei der x-Koordinate von -50 mm in der oberen Flanschkurve zu erkennen. Die kleinere

(größere) Entfernung des Spanners 3 (4) zum konvexen Bereich bewirkt geringere (höhere) Abweichungen zur Sollgeometrie.

Die Ursache liegt in der Verteilung der von Mises Vergleichsspannung nach dem Spannerschließen. Bei der Auswertung der beiden Simulationen treten für Versuch 2 großflächig von Mises Vergleichsspannungen über 200 N/mm^2 auf, was aufgrund des elastoplastischen Werkstoffmodells eine plastische Deformation in diesem Bereich induziert. Bei Versuch 3 treten in demselben Bauteilbereich im gespannten Zustand niedrigere Vergleichsspannungen auf. Bei der Auswertung der Spannkkräfte der Simulationen ist gemäß Versuch 2 eine vierfach höhere Spannkraft gegenüber Versuch 3 zu erwarten. Nach dem Öffnen aller Kniehebelspanner federt so die Baugruppe von Versuch 3 stärker als bei Versuch 2 zurück.

Des Weiteren werden Versuche und Simulation zu geänderten Spannflächen ($20 \times 20 \text{ mm}$ zu $10 \times 10 \text{ mm}$) durchgeführt und anhand der Flanschkurven oben/unten in Bild 74 ausgewertet.

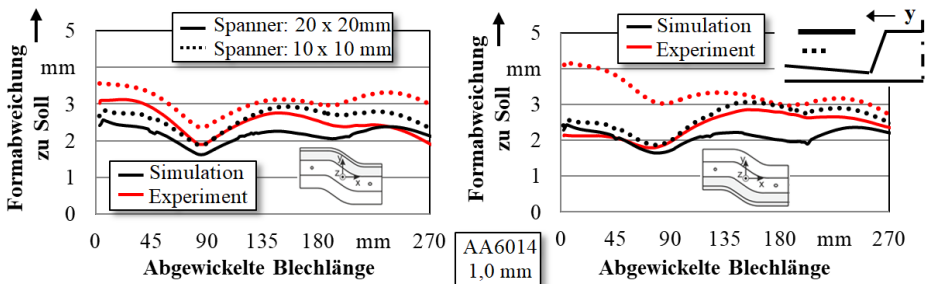


Bild 74: Auswirkung der Änderung der Spannergeometrie auf die Formabweichung [86]

Kleinere Spannflächen ($10 \times 10 \text{ mm}$) führen bei gleichem Kraftangriffspunkt an den äußeren y-Geometrieenden in den Simulationen und Experimenten zu höheren Formabweichungen.

6.2.4 Programmierung der Fügepunkte, Fügereihenfolge und Fügezeitpunkt

Neben den Spannpunkten sind im Spann- und Fixierkonzept die Fügestellenpositionen sowie deren Prozessreihenfolge festzulegen. Beim Setzen von Fügepunkten können offline programmierte und geteachte Fügepunkte getrennt werden (siehe Bild 75). Ursprünglich werden vom Bauteilkonstrukteur die Koordinaten der Fügepunkte für den Zusammenbau hinterlegt. Aufgrund der Nicht-Maßhaltigkeit der Einzelteile weichen die

realen Fügekoordinaten in Form der z-Koordinate ab. Für das Schließen der Fügezange stehen verschiedene Implementierungsvarianten in der Simulation für die Sollfügeposition gemäß Bild 75 zur Verfügung.

Bei der Variante A wird die Fügezange in eine definierte Richtung (Einlege- oder Gewichtskraftrichtung) verschoben, um keine zusätzlichen Fügekräfte zu induzieren. Implementiert ist dies anhand einer aktivierten oder deaktivierten Federkraft. Das Vorgehen der Variante A mit einer aktivierten Feder entspricht dem Fügen ohne Robotersteuerung, wie es bei der Anfertigung von prototypischen Karosseriebaugruppen der Fall ist.

Im Gegensatz dazu werden bei deaktivierten Federn die Einzelteile um den Betrag der Nicht-Maßhaltigkeit in die ursprünglich definierte Position der Fügezange gezogen und dort gefügt. Variante C vereint die beiden Ansätze, indem in Anlehnung an den Serienprozess die Definition der Fügepunktpositionen direkt an den realen Einzelbauteilen erfolgt.

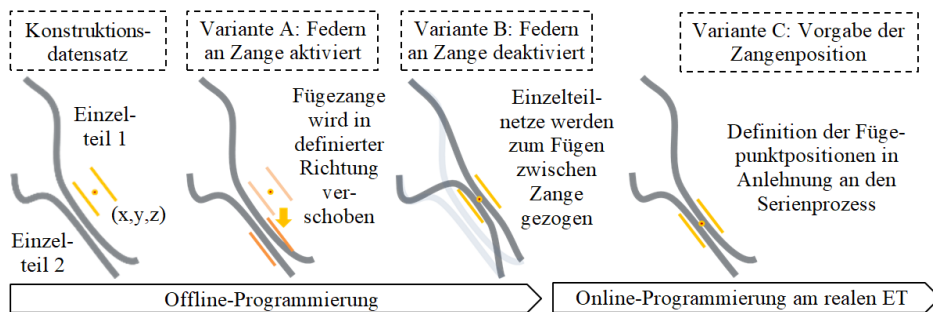


Bild 75: Möglichkeiten zur Programmierung der Fügezangenposition in der Simulation

Die Ergebnisse der Varianten B und C verschiedener Zangenpositionierungen und Implementierungen sind in Bild 76 anhand des Flanschkurvenverlaufes des ZB S-Rail aufgeführt. Bei der Offlineprogrammierung entstehen partiell höhere Formabweichungen zum Soll.

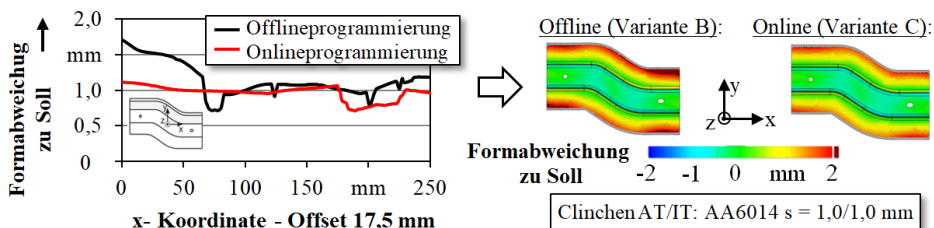


Bild 76: Effekt der Zangenposition basierend auf einer Online-/Offline-Programmierung

Als weiterer Faktor ist die Setzreihenfolge der Fügepunkte zu untersuchen. Begründet wird die Festlegung einer Fügereihenfolge aufgrund einer gewünschten geringen Anzahl von zu beschaffenden Fügezangen. Je nach Zeitpunkt des Setzvorgangs wird zwischen geometrischen Fügepunkten (kurz: Geo(füge)punkte) im gespannten Zustand oder im anschließenden ungespannten Zustand (kurz: Aus(füge)punkte) differenziert.

Der Einfluss der Fügereihenfolge ist abhängig von der angewandten Füge-technik. Daher wird dieser Parametereinfluss separat bei den punktförmigen Fügetechniken Clinchen und Widerstandspunktschweißens untersucht. Ein detaillierter Vergleich mit dem Verfahren Remotelaserschweißen mit dem Abgleich von Simulation und Realität ist in Abschnitt 6.3 näher beschrieben. Für die Studie von Bild 77 werden Clinch- und Widerstandspunktschweißversuche zu zwei Fügereihenfolgen realisiert.

Bei der Fügereihenfolge „von innen nach außen“ wird ein Werkstoffein-schluss aufgrund geringer Fügepunktabstände zueinander verhindert. Der minimale Fügepunktabstand ist gemäß Abschnitt 4.2 auf 20 mm beschränkt. Komplementär wird die Auswirkung der Fügereihenfolge „von außen nach innen“ auf die Maßhaltigkeit an der oberen Flanschkurve erörtert.

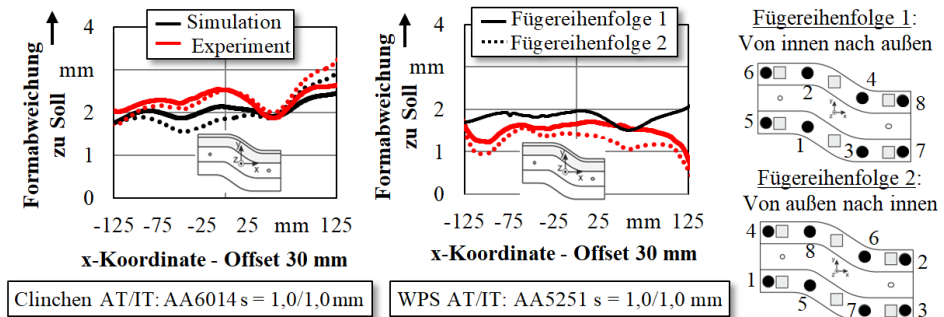


Bild 77: Auswirkung der Fügereihenfolge bei geometrischen Fügepunkten (Clinchen/WPS)

Die Variation der Fügereihenfolge beim Setzen geometrischer Clinch- oder Widerstandspunktschweißpunkte zeigt keine signifikante Auswirkung auf die Formabweichungen am oberen Fügeflansch in der Simulation und im Experimente. Bestätigt wird diese Erkenntnis durch die Simulationen und Experimente am Unter-Zusammenbau der Motorhaube.

Bei den bisherigen Fügeauswertungen anhand von optischen Oberflächen- und Blechdickenmessungen stand vorwiegend die Ursachen-Wirkungs-Analyse von Einflussfaktoren auf die Formhaltigkeit im Vordergrund. Zur funktionalen Absicherung der gefügten Baugruppen ist weiterhin das Spaltmaß zwischen den gefügten Zusammenbauten entscheidend. Die Auswertemethode ermöglicht, eine Aussage über den Abstand der Kontaktfläche (Außenteilunterseite-Innenteiloberseite) zu treffen. Unter der Annahme einer geringeren Blechdickenänderung an den Fügeflanschen werden die Spaltmaße als Differenz der Koordinaten der um die Blechdicken offsetieren Ober- und Unterseiten ermittelt. Idealerweise ist das Spaltmaß Null.

Zur Ergründung der Auswirkung des Setzzeitpunktes von Fügepunkten bieten Spaltmaße, in Kombination mit der Formhaltigkeit der Bauteiloberflächen, einen zusätzlichen Informationsgewinn. Prozesstechnisch können nach dem Spanneröffnen Fügepunkte dort positioniert und gefügt werden, wo die Zangenzugänglichkeit zuvor beschränkt war. Basierend auf den Ergebnissen aus dem Abschnitt 6.2.1 sollen die Formabweichungen in den Flanschsmiten ($x = 0$) durch zusätzliche Ausfügepunkte in Bild 78 beim ZB S-Rail reduziert werden.

Bei dem Setzen von zwei Ausfügepunkten je Flanschseite nach den geometrischen Punkten wird die lokale Formhaltigkeit im Bereich C um bis zu 35 % reduziert (siehe Bild 78 links). Durch die aufgebrachte Fügezangenkraft wird der lokale Fügespalt nachträglich vermindert.

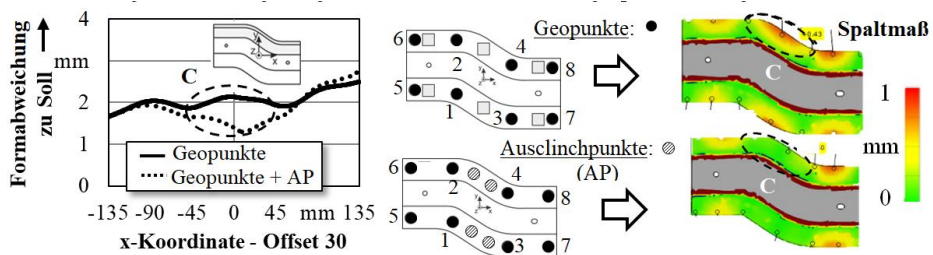


Bild 78: Auswirkung des zusätzlichen Setzens von Ausfügepunkten beim Durchsetzfügen

Das Bauteil wird im Bereich C mittels der Werkzeugflächen in die Soll-fügeposition gebracht. Das Spaltmaß reduziert sich von 0,75 mm auf 0,13 mm. Im Falle des Produktionsprozesses einer Karosseriebaugruppe gilt es, die Verbesserung bei den Qualitätskriterien der erhöhten Produktionszeit gegenüber zu stellen. Für eine vertiefte Untersuchung dieses Effekts wird die Anzahl an geometrischen Fügepunkten anhand des Unterzusammenbaus Motorhaube variiert.

6.2.5 Anzahl an Geofügepunkten, Fügeposition und Fügepunktabstand

Das initial definierte Fixierkonzept mit einer festgelegten Anzahl und Position geometrischer Fügepunkte kann neben der prozesstechnischen Steuerung von Abschnitt 6.2.4 konzeptionell verändert werden. Unter Bezugnahme der Auswirkung eines veränderten Fixierkonzeptes auf die vorhandene Bauteilfestigkeit ist prinzipiell eine Anpassung von Fixierpunkten in den einzelnen Bauteilbereichen im geringen Umfang denkbar.

Anhand des Zusammenbau vorne der Motorhaube (siehe Abschnitt 4.2.5) wird die Anzahl an Fügepunkten geändert, um Wechselwirkungen mit den Einzelteilverformungen aufzuzeigen. Sind die Einzelteile an den zu fügenden Stellen vor dem Setzvorgang bereits maßhaltig, bewirken die Fügepunkte neben der Erhöhung der Bauteilsteifigkeit keine Verbesserung der lokalen Formhaltigkeit. Die Einzelteilverformungen treten entweder in gleicher oder entgegengesetzter Gewichtskrafttrichtung auf. Für die verschiedenen Szenarien werden vier Versuchsfälle in Bild 79 simulativ verglichen.

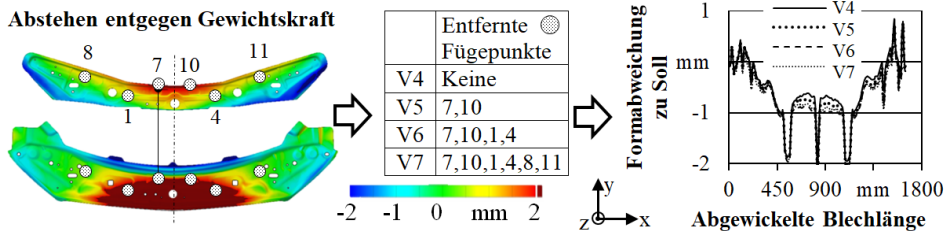


Bild 79: Fügepunktzahl in Abhängigkeit der Einzelteilverformungen beim Durchsetzfügen

Bei der Entfernung der mittleren Fügepunkte 7 und 10 (Versuch 5) zeigt sich lokal um die Fügepositionen eine betragsmäßig größere Formabweichung zur Sollgeometrie des Vorderteils. Durch das Entfernen der Clinchpunkte fehlt ein Ausgleich der unterschiedlichen Einzelteilverformungen nach dem Tiefziehen. Die Formabweichung nach dem Fügen nimmt zu. Die schrittweise Reduktion der Fügepunkte bei den Versuchen 6 und 7 führt zu einem ähnlichen Bauteilverzug wie bei Versuch 5. Die Fügepunkte 1, 4, 8 und 11 sind somit nicht maßgeblich für den Ausgleich der Verformungen der Einzelteile.

Die Auswirkung von Fügepunkten ist stets von den Formabweichungen an ihrer Bauteilposition abhängig. Um allgemeingültige Zusammenhänge zwischen der Fügeposition, Nicht-Maßhaltigkeit von Fügepartnern und

ihrer Auswirkung auf die Zusammenbaumaßhaltigkeit abzuleiten, werden daher weitere Experimente mit der Prinzipbaugruppe S-Rail realisiert. Unter Berücksichtigung der Gestaltungsrichtlinien aus Tabelle 5 werden Experimente mit Fügepunktpositionen nahe den Flanschrändern des Bauteils sowie in entgegengesetzter y-Positionierung in der Nähe der Flanschwinkel durchgeführt (siehe Bild 8o).

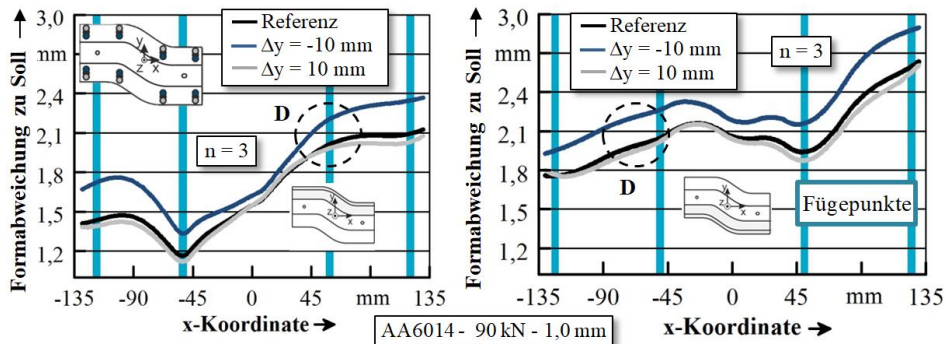


Bild 8o: Effekt einer Fügepunktverschiebung nach innen oder außen (Δy) beim ZB S-Rail

Die y-Positionierung der Fügestunkte zur Bauteilmitte ($\Delta y = 10$ mm) induziert eine höhere Rückfederung an den beiden Bauteilflanschen. Die gegenüber den Referenzversuchen höhere Rückfederung ist anhand der um etwa 0,2 mm zur Referenz verschobenen Schnittkurve am oberen Flansch zu erkennen. Bei der unteren Flanschkurve wird bei den Experimenten vorwiegend im Bereich D die Rückfederung erhöht. Werden die Fügestunkte weiter nach außen gesetzt ($\Delta y = -10$ mm), führt dies in Bild 8o zu marginalen Maßhaltigkeitsverbesserungen.

Parallel wird eine Studie zur x-Verschiebung der Fügestunkte beim ZB S-Rail getätigt. Basierend auf den Ergebnissen der Spannerschiebung in x-Richtung werden die Fügestunkte 1 und 4 um 30 mm in Richtung der konvexen Geometriebereiche verschoben (Bild 8i).

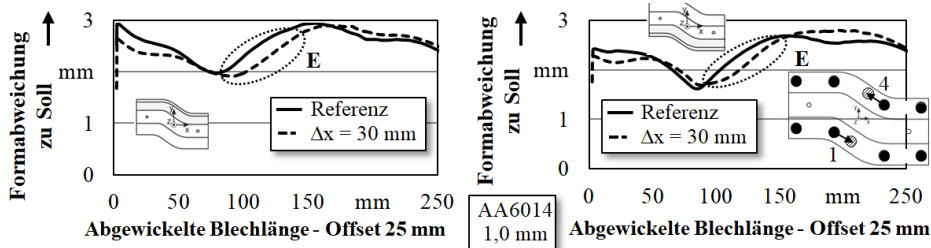


Bild 8i: Fügepunktverschiebung (Δx) in Abhängigkeit von geometrischen Bereichen

Im Gegensatz zu der Spannerschiebung führen Positionsänderungen bei Fügepunkten zu partiellen Verbesserungen der Formhaltigkeit nahe des Radius R50 (siehe Bereich E). Ursächlich ist die globale Wirkung von Fügepunkten auf den resultierenden Baugruppenverzug. Nach dem Öffnen der Bauteilspanner ergibt sich das jeweilige Spannungsgleichgewicht in Abhängigkeit von den definierten Positionen der Geofügepunkte.

In der bisherigen Abhandlung zum Fügen ist hauptsächlich der Einfluss einer Veränderung des Spann- oder des Fixierkonzeptes untersucht worden. Bestehende Konstruktionsrichtlinien geben obgleich Hinweise auf Wechselwirkungen zwischen Füge- und Spannpunkten, da die minimalen Abstände zueinander oder zum Bauteilrand beschränkt sind. Bei großflächigen Karosseriekomponenten werden im Zuge einer Kostenoptimierung kürzere Prozesszeiten mit einer geringeren Anzahl von Fügepunkten angestrebt. Weiterhin ist die Erhöhung der Fügepunktanzahl durch die Gestaltungsgrenzen mit parallelen Bauteilflanschen und der Fügezugangszugänglichkeit beschränkt. Mit der Studie wird daher experimentell und simulativ die Auswirkung von erhöhten Clinchpunktabständen auf die Formhaltigkeit eruiert.

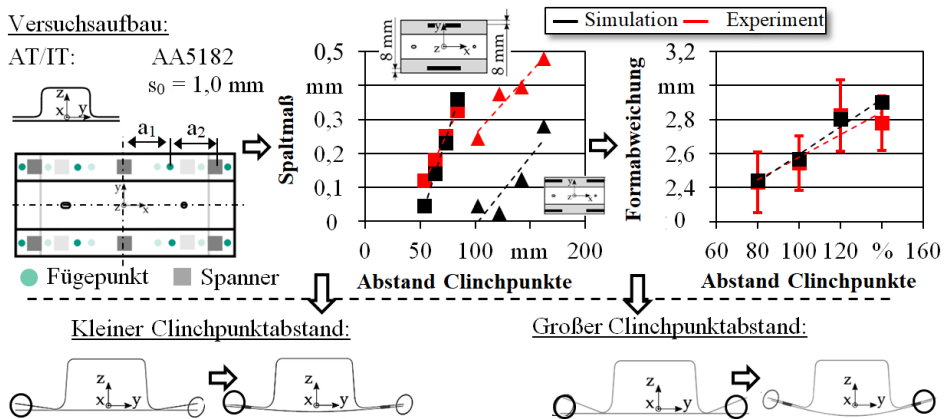


Bild 82: Studienergebnisse zur Auswirkung des Fügepunktabstandes bei geclinchten H-Proben in Abhängigkeit von den Spannerpositionen

Die Clinchpunktabstände werden gemäß Bild 82 nach einem festgelegten Schema vergrößert und H-Proben mit den Bauteillängen 230-270-310-350 mm verwendet. Die Annahme eines äquivalenten Bauteilverhaltens wird mit dem ebenen Verzerrungszustand (großes Längen- zu Dickenverhältnis) in der x-Ebene vor dem Clinchen begründet. Die Spanner- und Fügekonfigurationen werden zudem symmetrisch zur Bauteilmitte geändert. Dazu bleibt das Verhältnis a_1/a_2 konstant. Die Abstände der Clinch-

punktmitte zum Bauteilrand und zur Spannermitte sind 10 mm und 32,5 mm. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse ist eine kombinierte Verschiebung von Spanner und Fügepunkt für eine Verbesserung der Formhaltigkeit sinnvoll.

Als Bewertungskriterien wird für verschiedene Clinchpunktabstände einerseits das Spaltmaß zwischen den beiden Einzelbauteilen an den inneren und äußeren Fügepunkten ausgewertet. Der Abstand Spanner-Fügepunkt wird im Gegensatz zu den inneren bei den vier äußeren Clinchpunkten nicht geändert. Als Ergebnis zeigt sich ein linearer Anstieg des Spaltmaßes. Dieses ist bei kleineren Abständen geringer als bei größeren Clinchpunktabständen. Andererseits ändert sich die Normalenabweichung zum Soll linear mit einem prozentualen Anstieg des Clinchpunktabstandes. Die Simulationen stimmen für beide Auswertungsansätze sehr gut mit der Realität überein. Erklärungen für den Effekt des Clinchpunktabstandes zeigen die Schemen von Bild 82. Die Vergrößerung des Clinchpunktabstandes führt zu einem größeren Spaltmaß nach dem Spannen. Dadurch steigt der elastische Anteil an der Gesamtdehnung nach dem Setzen des Fügepunktes. Eine höhere Rückfederung ist die Konsequenz.

6.2.6 Elastizitätsmodule der Fügepartner

Neben den Prozessparametern einer Fügestation ist gemäß Bild 65 in einem zweiten Schritt der Einfluss von E-Modul, Blechdicke und Struktursteifigkeit der einzelnen Fügepartner herauszuarbeiten. In Analogie zur Identifikation der Wechselwirkungen von Elastizitätsmodul und Geometrieform werden nach dem Fügen die Schnittpunkte dreier repräsentativer Bauteilschnitte (1, 2 und 4) und Flanschkurven (Offset: 30 mm) berechnet. Ziel ist es, allgemeingültige Aussagen anhand gefügter ZB S-Rails mit zwei Werkstoffen auszuarbeiten. Passend dazu werden in den Diagrammen von Bild 83 bis Bild 86 die Fügeergebnisse von konvexen, konkaven und geraden Bauteilbereichen und Krümmungsradien R_{50}/R_{100} ausgewertet.

Bild 83 stellt die Auswirkung eines geänderten E-Moduls des Außenteils der zu fügenden Prinzipbaugruppe dar. Der E-Modul des Innenteils bleibt konstant. Die Ergebnisse der einzelnen Bereiche werden zum Referenzwert des geraden Bereiches (100 %) mit dem Werkstoff AA6014 und der Blechdickenpaarung 1,0-1,0 mm verglichen.

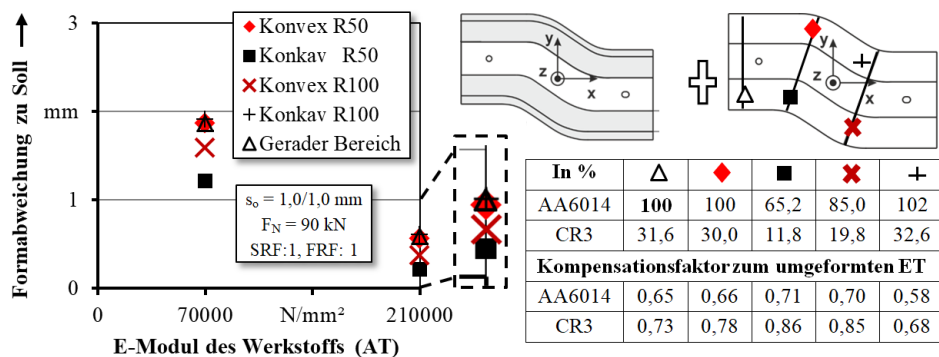


Bild 83: E-Moduleinfluss eines umgeformten Außenteils in Abhängigkeit geometrischer Formen auf das Ergebnis des Durchsetzfügeprozesses einer Prinzipbaugruppe

Die Resultate von Bild 83 verdeutlichen eine signifikant bessere Maßhaltigkeit mit einem Außenteil aus CR3 gegenüber dem Werkstoff AA6014 bei allen geometrischen Formen der geclinchten Baugruppen. Ursächlich sind die geringeren Formabweichungen der CR3-Bauteile nach dem Umformen und tendenziell höhere Kompensationsfaktoren zu den umgeformten Einzelteilen. Bild 84 visualisiert komplementär die E-Moduländerung des Innenteils.

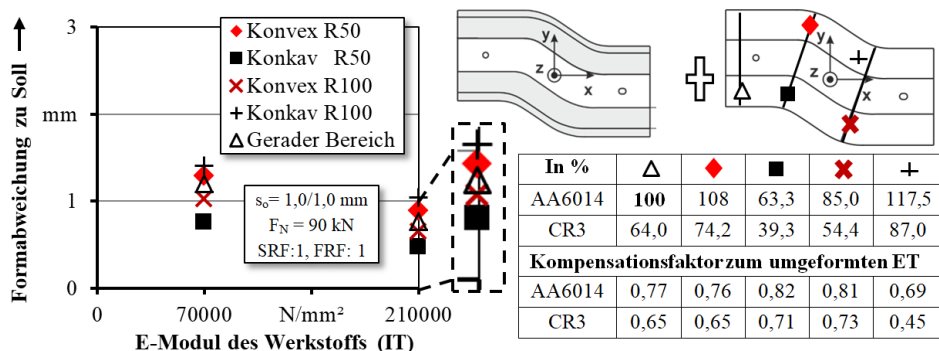


Bild 84: E-Moduleinfluss eines ebenen Innenteils in Abhängigkeit geometrischer Formen auf das Ergebnis des Durchsetzfügeprozesses einer Prinzipbaugruppe

Die Änderung des E-Moduls des Innenteils bewirkt eine Reduzierung der Maßabweichungen zu den Sollwerten in den geometrischen Bereichen. Im Gegensatz zu der Veränderung des Steifigkeitsmoduls des Außenteils führt eine Änderung der Innenteilwerkstoffeigenschaften zu geringeren Kompensationsfaktoren, relativ zur Referenz mit dem Innenteilwerkstoff AA6014. Eine Begründung ist die verschiedene Struktursteifigkeit des ebenen oder umgeformten Werkstücks. Weiterhin sind die Kompensationsfaktoren für die E-Moduländerung des Innenteils (AA6014, CR3) in

dem Bereich von 0,65 bis 0,82 zum Ausgangsbauteil unabhängig von dem geometrischen Bereich. Die Ausnahme stellt das geringe Kompensationsverhältnis beim konkaven Krümmungsradius R_{100} mit 0,45 dar. Den beiden Studien zur E-Moduländerung eines Fügepartners ist gemein, dass die Rückfederungskompensation gefügter gerader Bauteilbereiche nur geringfügig von den konvexen Bereichen R_{50} differiert. Bereiche mit konkaven Krümmungen R_{50} haben stets die niedrigsten Formabweichungen.

Weitere Auswertungen der Fügesimulationen zeigen, dass bei einem höheren E-Modul des Innenteils die Spaltmaße zwischen den gesetzten Fügepunkten vergrößert werden und die Welligkeit minimal in den einzelnen geometrischen Bereichen steigt. Deutlicher wirkt sich eine Erhöhung der Strukturfestigkeit des Außenteils durch die Verminderung der Welligkeit der Kurvenläufe in Form der Spaltmaße zwischen Außen- und Innenteil aus.

6.2.7 Blechdicke der Fügepartner

Bezogen auf die Leichtbaugüte aus Abschnitt 2.2.1 kann eine Erhöhung der Bauteilsteifigkeit außerdem durch eine Veränderung der Blechdicke des Fügepartners erreicht werden. In einem ersten Schritt wird in Bild 85 der Effekt einer Blechdickenerhöhung des Außenteils von 1,0 auf 2,0 mm in Abhängigkeit der fünf charakteristischen Geometriebereiche ermittelt.

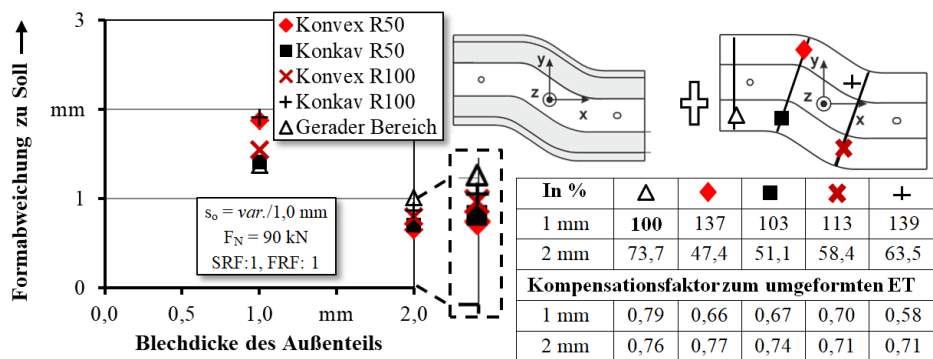


Bild 85: Blechdickeneinfluss eines umgeformten Außenteils in Abhängigkeit geometrischer Formen auf das Ergebnis des Durchsetzfügeprozesses einer Prinzipbaugruppe

Niedrigere Formabweichungen zur Sollgeometrie nach dem Umformen bei einer erhöhten Blechdicke von 2,0 mm (Referenz: 1,0 mm) bewirken bei allen fünf Geometriebereichen niedrigere Formabweichungen nach dem Fügen. Zurückzuführen ist dies auf ein höheres Flächenträgheitsmoment des Bauteilquerschnittes. Auffällig sind in diesem Zusammen-

hang die nahezu konstanten Kompensationsfaktoren nach dem Fügen bei beiden Blechdicken 1,0 und 2,0 mm. Tendenziell sind die Kompensationsfaktoren bei der Blechdicke von 2,0 mm etwas höher und liegen insgesamt schwankend um den Wert von 0,7 mm.

Weiterhin wird in einer Studie die Blechdicke des Innenteils variiert, um die Auswirkungen bei einer gegenüber dem Außenteil niedrigeren Struktursteifigkeit auf die einzelnen geometrischen Bereiche darzustellen. Die Ergebnisse sind in Bild 86 aufgelistet.

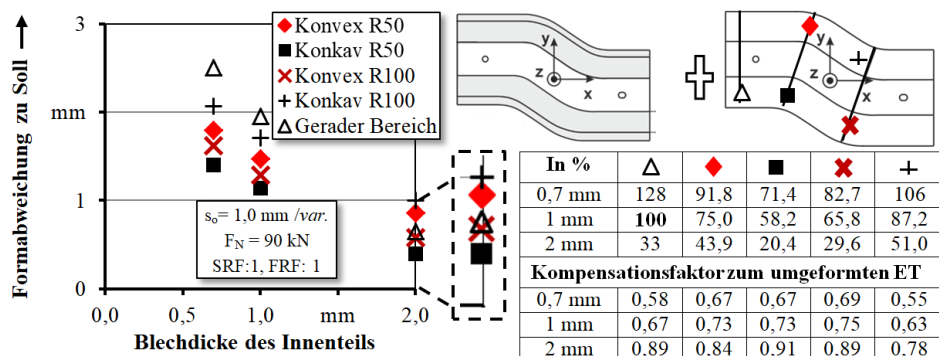


Bild 86: Blechdikeneinfluss eines ebenen Innenteils in Abhängigkeit geometrischer Formen auf das Ergebnis des Durchsetzfügeprozesses einer Prinzipbaugruppe

Bei der Analyse der fünf Bereiche induzieren die konkaven Geometrien bei allen Blechdicken Formabweichungen, welche zwischen denjenigen der konvexen Geometrieformen liegen. Im Gegensatz zu den konvexen Bauteilbereichen bedingt der Zug-Zug-Spannungszustand eine geringere Rückfederung nach dem Tiefziehen und folglich auch nach dem Fügen. Die geraden Bauteilbereiche haben bei den Varianten tendenziell die höchsten Rückfederungswerte, während die konkaven Bereiche die geringsten Formabweichungen zum Soll herausstellen. Weiterhin ist anhand der Tabelle von Bild 86 ersichtlich, dass die Kompensationsfaktoren wegen höheren Flächenträgheitsmomenten (steigende Blechdicke) nahezu linear ansteigen. Dazugehörige Simulationsauswertungen zeigen, dass der Fügespalt zwischen Außenteil und Innenteil bei Verdopplung von s_0 um 0,2 bis 0,3 mm in den Mitten der Flanschbereiche zunehmen.

6.2.8 Struktursteifigkeit der Fügepartner

In der letzten Kategorie der analysierten Einflussfaktoren auf den Fügeprozess wird der Effekt der Struktursteifigkeit verschiedener geometrischer Formen auf die Maßhaltigkeit erörtert. Die Geometrieform hat

gemäß den obigen Variationen des Fügeprozesses einen signifikanten Anteil an den Fügeresultaten und dem Kompensationsverhältnis zu den Einzelteilabweichungen zur Sollgeometrie.

Fortführend zu den Umformergebnissen aus Bild 51 werden je nach Variante einzelne, umgeformten S-Rail-Segmente oder das gesamte S-Rail-Bauteil mit den Außenkonturen entsprechenden Innenbauteil-(segment)en gefügt. Die Simulationsergebnisse sind in Bild 87 visualisiert. Die charakteristischen Bereiche 1, 2 und 4 werden mit einer Flächenpressung von 2 MPa umgeformt und stellen Eingangsdaten für die Fügesimulationen dar. Insbesondere weicht die Formabweichung des Bereiches 1 aufgrund der geringeren Eigensteifigkeit deutlich von der Gesamtbau- gruppe mit dem S-Rail ab.

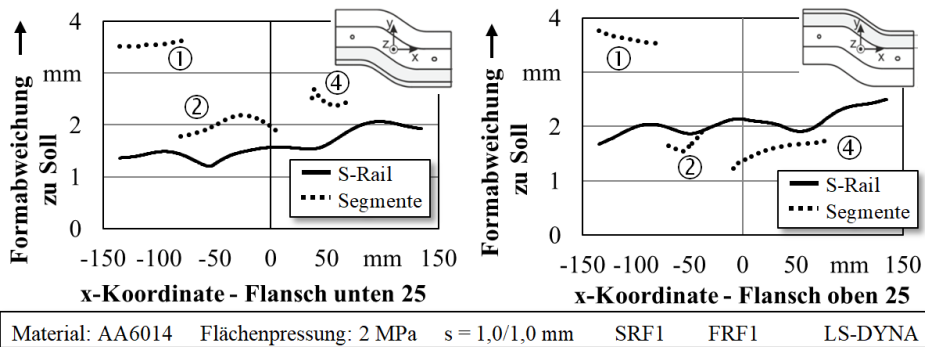


Bild 87: Vergleich der Clinchergebnisse der S-Rail-Prinzipbaugruppe zu den einzelnen Segmenten mit äquivalenten Außenbeschnitten der IT und dem Werkstoff AA6014

Weitere Erkenntnisse der Fügestudie sind wie folgt zusammengefasst:

Vergleich der Rückfederung der gefügten Segmente zur Gesamtbau- gruppe

- Die Unterschiede der Formabweichungen gefügter Einzelsegmente zur gefügten Gesamtbau- gruppe sind in den Bereichen 2 und 4 geringer als in Bereich 1.
- Die Baugruppenmaßhaltigkeit nach dem Fügen ist abhängig von den konvexen Bauteilbereichen bei analogen Fügeergebnissen der Segmente und ZB S-Rail.

Qualitative Kompensationsmaße nach dem Fügen im Vergleich zum Umformen

- Marginale Veränderung der Rückfederungen in den konvexen Bauteilbereichen (Flansch unten: ④ und oben: ②)
→ Kompensationsfaktor: sehr gering

- Deutliche Reduzierung des Aufsprungmaßes nach dem Fügen bei den geraden und konvexen Bauteilbereichen
→ Kompensationsfaktor: hoch (0,5 bis 0,6)

Wegen des häufigen Vorkommens in Karosseriekomponenten wird das gerade S-Rail-Segment 1 für AA6014 und CR3 entlang der Prozesskette Umformen-Laserbeschnitt-Fügen im Detail untersucht. In Bild 88 werden die Zargen- und Flanschwinkeländerungen am Außenteil (gerades Segment) zum Sollwinkel von 90° nach den Einzelprozessen ermittelt. Durch den arithmetischen Mittelwert der Winkel (Flansch-/Zargenwinkel) bei der Flanschseiten werden Interpretationsfehler durch Bauteilverkippen vermieden.

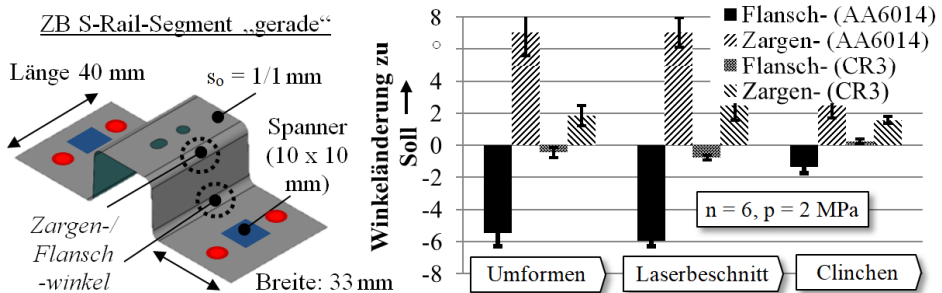


Bild 88: Winkeländerungen nach der Umform- und Fügeprozesskette mit geraden S-Rail-Segmenten ($s_o = 1,0$ mm) und ebenen Bodenblechen ($s_o = 1,0$ mm) – AA6014/CR3

Die Ergebnisse bestätigen, dass die Winkelabweichungen zur Sollgeometrie bei den Einzelbauteilen und gefügten Baugruppen bei Verwendung des Werkstoffes AA6014 deutlich höher sind als bei CR3. Weiterhin führt der zweite Prozessschritt des Laserbeschnittes bei den Experimenten nur zu marginalen Erhöhungen der Winkelabweichungen bei den Zargen- und Flanschwinkeln bei beiden Werkstoffen. Gleichzeitig waren die Abweichungen der Zargenwinkel bei allen Prozessschritten und beiden Werkstoffen höher als die der Flanschwinkel.

Der resultierende Aufsprungwinkel kann für jede Kombination aus der Differenz aus Zargen- und Flanschwinkel berechnet werden. Die Differenz ist bei den umgeformten Einzelteilen von AA6014 mit $12,5 \pm 0,6^\circ$ zu CR3 mit $2,3 \pm 0,3^\circ$ deutlich höher. Auffällig ist, dass die Formabweichung am Flansch aus der Superposition von Zargen- und Flanschwinkelabweichung resultiert. Bei den Versuchskonfigurationen sind Hohlzüge auf Basis von ausgewerteten Messungen vereinfachend zu vernachlässigen. Die relativen Abweichungen von Flansch- und Zargenwinkel sind bei CR3 aufgrund der geringeren Formabweichung höher als bei AA6014.

6.2.9 Zusammenfassende Erkenntnisse aus Werkstoff-, Prozess- und Geometriestudien

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten 6.2.2 bis 6.2.7 einzelne Werkstoff- und Prozessparameter variiert wurden, stellt Bild 89 anhand einer qualitativen Bewertung die Effekte verschiedener Abänderungen der Referenzeinstellungen des Fügeversuchs bei der Prinzipbaugruppe S-Rail gegenüber. Analog zur Analyse der Eingangsparameter auf dem Umformprozess von Bild 55 werden die Effekte anhand veränderter Rückfederungswerte (niedrigere/höhere) in einem Netzdiagramm beurteilt. Es werden Parameter variiert, welche die beiden Prozessstufen Umformen und Fügen betreffen (z.B.: E-Modul, Ausgangsblechdicke), und ausschließliche Parameter der Spann- und Fügeschritte, wie die Fügereihenfolge, bewertet. Zur Reduktion der Maßabweichungen des Umformens kristallisieren sich in beiden Prozessstufen die Werkstoffparameter Blechdicke und E-Modul des Außenteils als große und relevante Stellhebel zur Reduktion der Maßhaltigkeit nach dem Fügeprozess heraus.

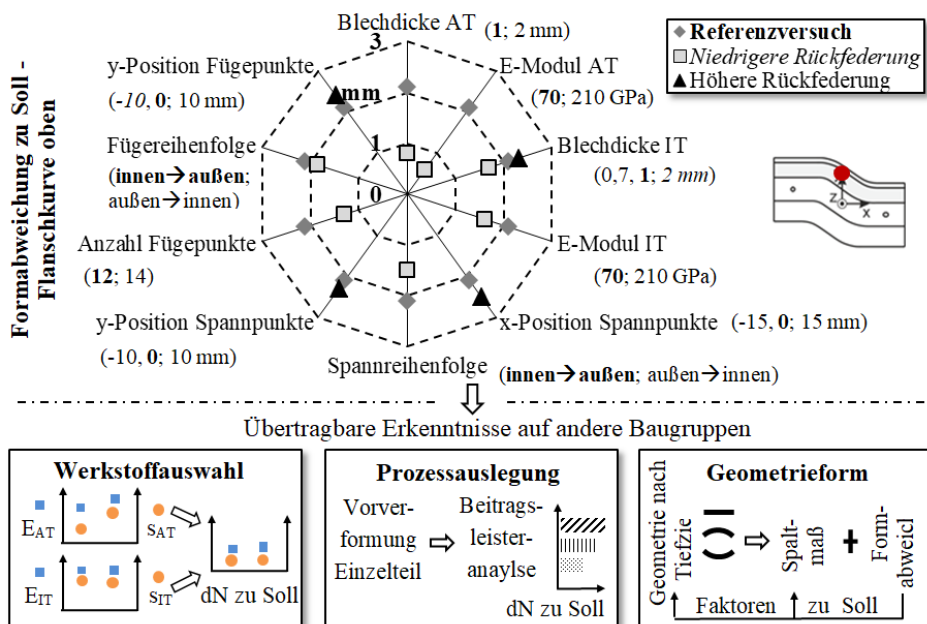


Bild 89: Qualitative Bewertung der Auswirkungen unterschiedlicher Parameter auf das Rückfederungsergebnis nach dem Fügen für die Prinzipbaugruppe S-Rail

Durch ein optimiertes Spann- und Fixierkonzept (Position-, Anzahl der Fügepunkte) wird die Formhaltigkeit nach dem Fügen verbessert, ohne in den vorgeschalteten Umformprozess eingreifen zu müssen. Des Weiteren

lässt sich aufgrund der Ergebnisse der Variation des Innenteils bei einem nicht-maßhaltigen Einzelbauteil konstituieren, dass die durch den Umformprozess erzeugte Struktursteifigkeit ein wesentlicher Bestandteil für maßhaltige Zusammenbauten ist.

Generell war bei den Simulationen und Experimenten eine signifikante Abhängigkeit bezüglich den geometrischen Bauteilformen (Krümmungsart und -radius) gegeben. Infolgedessen wird in Bild 90 der Einfluss des Krümmungsradius für konvexe und konkave Bereiche auf den Referenzfügeversuch der Prinzipbaugruppe S-Rail aufgegriffen.

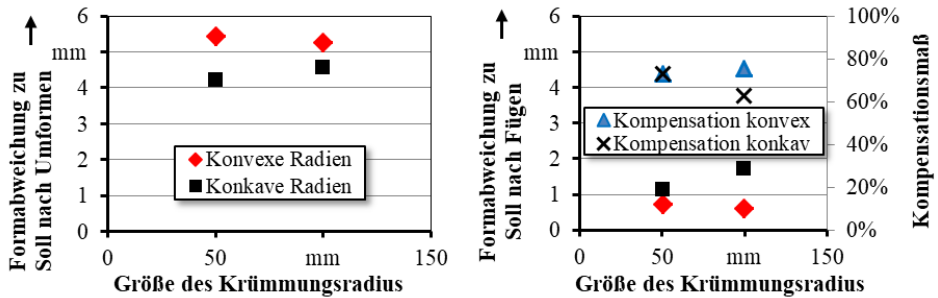


Bild 90: Einfluss der Größe des Krümmungsradius auf die Formabweichungen bei der Fertigungsprozesskette ZB S-Rail im Vergleich Umformen (links) zu Fügen (rechts)

Bei dem Standardumformversuch mit den Referenzeinstellungen nähern sich bei zunehmenden Krümmungsradius die resultierende Formabweichung dem Soll an. Im Gegensatz dazu werden durch den Fügeprozess Kompensationsmaße von 60-80 % erzeugt: Das exakte Kompensationsmaß ist abhängig von der geometrischen Form und Größe des Krümmungsradius.

Den Ergebnissen sind zusammenfassend für die Werkstoffe AA6014 und CR3 Gestaltungshinweise zu entnehmen, welche Werkstoff- und Blechdickenkombination der einzelnen Fügepartner zu welcher Maßhaltigkeit der Baugruppe führt. Ergebnisse sind in Abhängigkeit von der Struktursteifigkeit vorhanden. Mit den Kompensationsfaktoren aus Abschnitt 6.2.6 und 6.2.7 lässt sich abschätzen, welche Wechselwirkungen es zwischen der Bauteilwölbung und dem Werkstoffkonzept gibt. Bei dem gleichen Werkstoffmix liefern die Ergebnisse Hinweise, welche Fügestationsparameter bei der Prozessauslegung beachtet werden sollten. Die Resultate bestätigen die Annahme, dass bei mechanischen Fügevorgängen die Schließreihenfolge „von innen nach außen“ sinnvoll ist. Des Weiteren stellt die Spannerschiebung oder Änderung der Spannerfläche in denjenigen Bauteilbereichen eine Maßhaltigkeitsverbesserung dar, in

welchen die Formabweichungen der Einzelteile hoch oder entgegengesetzt sind.

6.3 Einfluss verschiedener Fügetechniken auf die ZB-Maßhaltigkeit

Die systematische Parameterstudie zu den Einflussfaktoren einer Fügestation wird überwiegend mit dem mechanischen Verfahren des Durchsetzfügens umgesetzt. Hintergrund ist das initial implementierte, punktuelle Ersatzmodell ohne Berücksichtigung des thermischen Einflusses. Zusätzlich zu dem Verfahren Durchsetzfügen finden weitere punktförmige Verfahren, wie das Widerstandspunktschweißen oder das Verfahren des Remotelaserschweißens Anwendung. Die Reduzierung des Rückfederungsverhaltens und die Minimierung entstehender Fügespalte in den Produktionsprozessen werden angestrebt.

Zielsetzung dieses Abschnittes ist, eine Vorhersage des Rückfederungsverhaltens für ausgewählte punkt- und linienförmige sowie ausgewählte thermische Fügetechniken von Prinzip- und Realbaugruppen zu bewerkstelligen. Die Vorhersage der Variation der Fügetechnik stellt ein zweites Mittel in der Methodik zur Reduzierung der Formhaltigkeit beim Fügen dar, falls optimierte Einstellungen des Spann- und Fixierkonzeptes in Kombination mit dem Werkstoffmix nicht zum gewünschten Ziel führen. Für die erforderliche Weiterentwicklung der Fügeersatzmodelle wird die methodische Vorgehensweise von Bild 91 angewandt.

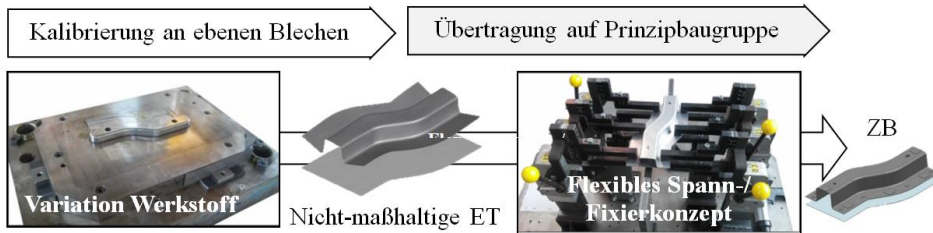


Bild 91: Methodische Vorgehensweise zur Weiterentwicklung der Fügeersatzmodelle

Um für Struktursimulationen der Fügetechniken ein adäquates Ersatzmodell zu entwickeln, wird das Fügeersatzmodell und der Fügeverzug initial an ebenen Blechen kalibriert. Die nächsten Schritte sehen die Übertragung auf prinzipiellen Baugruppen und Karosseriebaugruppen vor. Die Ergebnisse verschiedener Fügetechniken sind in Bild 92 zu finden.

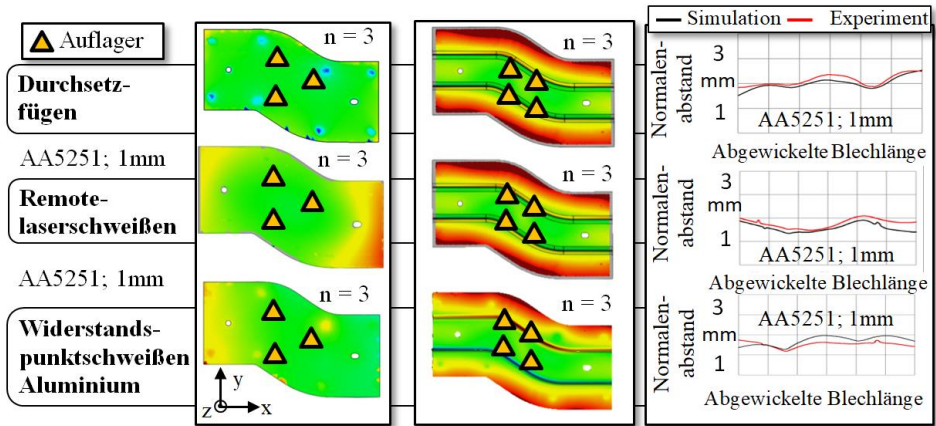


Bild 92: Versuchsergebnisse zum Vergleich der Fügeverfahren Clinchen-Robscan-WPS

In Bild 92 ist der Fügeeinfluss auf die Formabweichung visualisiert. Ausgewertet wird sequentiell der Fügeverzug an ebenen Blechen und dem ZB S-Rail an der oberen Flanschkurve. Als Referenzfüge- und Referenzspannreihenfolge werden „von innen nach außen“ vier Fügeelemente bei drei Spannelementen je Flanschseite gesetzt.

Im Gegensatz zu dem statisch bestimmten Ausrichtekonzept beim Fügen ebener Blechen (drei Auflagepunkte) sind beim S-Rail aufgrund der durch den Umformprozess entstehenden Bauteilverdrillungen vier Auflagepunkte notwendig. Prinzipiell stimmen bei allen drei Verfahren die Experimente und Simulationen der Fügeverfahren gut überein. Die größten Vorhersagefehler von bis zu 0,7 mm sind bei den realisierten Punktschweißversuchen mit dem Werkstoff AA5251 entlang der oberen Flanschkurve zu finden. Des Weiteren lassen die Experimente erkennen, dass beim Robscan und Widerstandspunktschweißen mit einem Blechdickenstapel von 2 mm ein großer Bauteilverzug an den Bauteilrändern erzeugt wird. Auswertungen gefügter Prinzipbaugruppen mit den drei Fügeverfahren weisen zudem ein unterschiedlich hohes Maß an Formabweichungen zu den Sollgeometrien auf. Für einen sinnvollen Vergleich werden in den Experimenten von Bild 93 für das Robscanverfahren Schweißnähte der Nahtlänge von 10 mm und punktförmige Fügeelemente des Widerstandspunktschweißens und des Clinchens eingesetzt. Simulativ werden die einzelnen Durchmesser der Fügwerkzeuge mit angepassten Werkzeugwirkflächen modelliert.

Für den Vergleich der Fügeverfahren werden für das linienförmige Robscanverfahren Strichnähte der Längenabmessung von 10 mm und die analoge Spann Technik mit Kniehebeln von quadratischen Spannflächen

von 20 x 20 mm genutzt. Die Durchmesser der Fügeelemente sind bei den Studien der punktförmigen Verfahren Widerstandspunktschweißen ($\varnothing 7$ mm) und Clinchen ($\varnothing 16$ mm) in Bild 93 identisch. Die Spann- und Fügereihenfolge entspricht der Referenz aus Abschnitt 6.2.1: „von innen nach außen“ bei gleichzeitigem, sequentiellem Schließen von zwei Spannflächen.

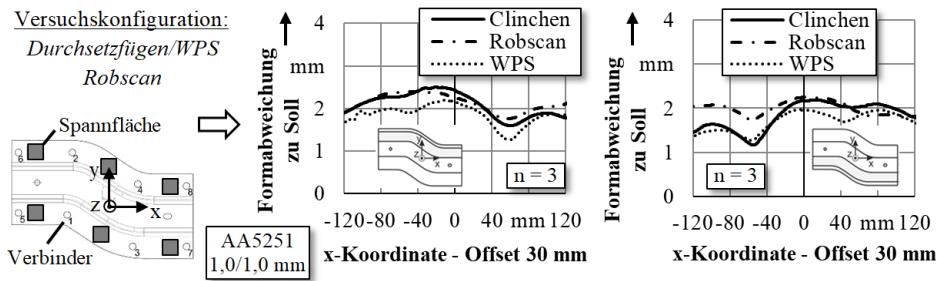


Bild 93: Vergleich der Formabweichungen ausgewählter punktueller und linienförmiger Fügeverfahren für den Werkstoff AA5251 und die Blechdicken 1-1 mm

In Bild 93 sind lokale Unterschiede in den Formabweichungen von den repräsentativen Mittelwertkurven der beiden Flanschkurven bei den Clinch- und Robscanexperimenten zu erkennen. Tendenziell weist das Widerstandspunktschweißverfahren bei diesen Versuchskonfigurationen die geringsten Formabweichungen zur Sollgeometrie auf.

Bei dem Robscanverfahren werden, im Gegensatz zum Widerstandspunktschweißen und entgegen bisheriger Studien, die Experimente und Simulationen mit verfahrensspezifischen Spannelementen durchgeführt. Um Verfahrensunterschiede und deren Auswirkungen zu detektieren, werden in Bild 94 die Spann- und Fixierkonzepte des Widerstandspunktschweißens (zusätzliche Zangenfügekraft) und des Robscans analysiert.

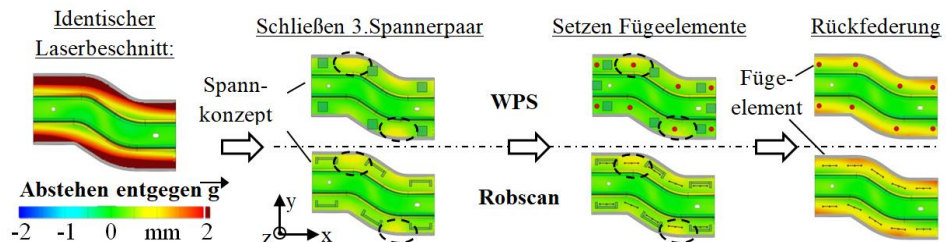


Bild 94: Auswirkung verschiedener Spann- und Fixierkonzepte bei den Verfahren WPS und Robscan anhand von Falschfarbenbildern selektierter Schritte des Fügeprozesses

Bei der schrittweisen Fügeprozessanalyse sind nach dem Schließen des 3. Spannerpaares beider Konzepte geringe Unterschiede bei der Beurtei-

lung der Formhaltigkeit zu beobachten (siehe Bild 94). Die fehlende Fügekraft (modelliert durch die Fügezangen) führt beim Robscanverfahren in den konvexen Bereichen bei gleicher Maßhaltigkeit nach dem Spannen zu einer höheren Rückfederung der Baugruppe. Die Simulationmethode bietet so die Möglichkeit, aufzuzeigen, inwieweit ein Spannkonzzept für das einzelne Fügeverfahren geeignet ist. Die simulative Analyse weiterer Spezifika der Fügeprozesse Widerstandspunktschweißen und Robscan und die Detektion ihres Einflusses werden im Folgenden aufgeführt.

Widerstandspunktschweißen:

Zur Kalibrierung des Ersatzmodells des Widerstandspunktschweißverfahrens werden neben Versuchen mit ebenen Blechen Experimente mit verschiedenen Innenteilblechdicken der S-Railbaugruppe realisiert. Diese Studie ermöglicht, die Vorhersagequalität des mechanischen Ersatzmodells mit variierenden Flächenträgheitsmomenten von Fügepartnern abzuschätzen. Die Resultate mit umgeformten Prinzipbauteilen ($s_0 = 1,0 \text{ mm}$) sind in Bild 95 dargelegt.

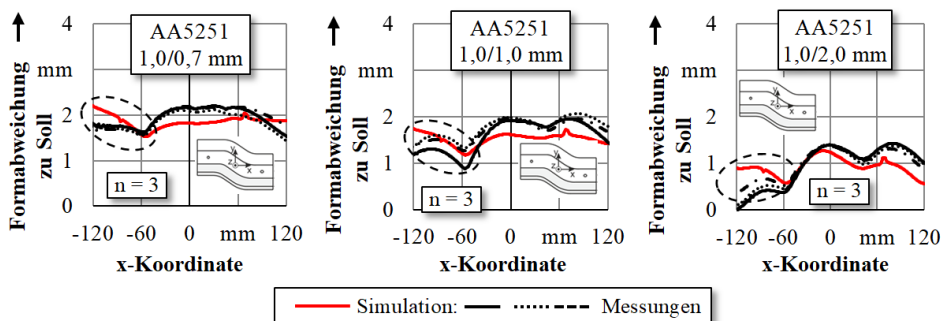


Bild 95: Übereinstimmung des mechanischen WPS-Ersatzmodells (zur Realität) mit unterschiedlichen IT-Struktursteifigkeiten (IT-Blechdicke: 0,7-2,0 mm) des ZB S-Rail

Zur Überprüfung des Ersatzmodells für das Widerstandspunktschweißen wird entlang der Flansche die Normalenabweichung anhand von Bauteilschnitten für Experimente und Simulationen ausgewertet (siehe Bild 95). Durch die zunehmende Biegesteifigkeit des Innenteil (so↑: von 0,7 auf 2,0 mm) werden die Normalenabweichungen zum Soll in den Simulationen und Messungen von durchschnittlich 2 mm auf 1 mm entlang des Messchnittes reduziert. Des Weiteren nimmt die Welligkeit zwischen 0 und 60 mm der x-Koordinate zu. Die Simulationsergebnisse stimmen hierzu mit den Experimenten überein. Die Verkipfung der Flanschkurven im Bereich A ist in den Experimenten stärker ausgeprägt als in den äquivalenten Simulationen. Eine Ursache liegt in der Nichtberücksichtigung der lokalen Plastifizierung des Werkstoffes, welche durch den Schließvor-

gang der Punktschweißzange induziert wird. Zudem bleiben die thermischen Wärmeeinträge von Bild 96 für die Fügebereiche unberücksichtigt.

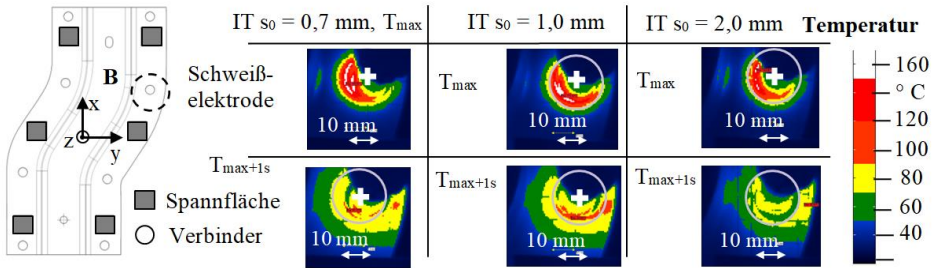


Bild 96: Bereiche des Wärmeeintrags anhand verschiedener IT-Blechdicken des ZB S-Rail

Zur Abschätzung der Größe der werkstofflich veränderten Bereiche werden thermographische Messungen mit den Versuchskonfigurationen von Bild 95 realisiert. Zur Quantifizierung wird auf den mit weißem Decklack besprühten Außenteilen der Emissionskoeffizient von 0,91 mit der Thermographiekamera sowie mit Thermoelementen bestimmt. Weiterhin wird ein Messraster im Abstand von 10 mm aufgebracht. Um den ungewollten elektrischen Kontakt zwischen Schweißelektroden und besprühten Bauteilstellen zu vermeiden, werden die Stellen der Fügeelemente ausgespart. Die Auswertungen eignen sich daher ausschließlich für qualitative Aussagen, da der Emissionskoeffizient unter der Schweißelektrode nicht bestimmbar ist und somit der Peak bei den Maximaltemperaturen nicht vorhergesagt werden kann. Für diesen qualitativen Vergleich wird die Größe der Temperaturverteilung zwischen 150 °C und Raumtemperatur bei der Maximaltemperatur sowie eine Sekunde danach ausgewertet. Es deutet sich bei den Versuchen an, dass der durch den Wärmeeintrag beeinflusste Bereich für großflächige Bauteilbereiche in konzentrischen Regionen mit einer kleinen Ausbreitung der Maximaltemperatur unter der Schweißelektrode zu finden ist. Zudem ist zu erkennen, dass eine Erhöhung des Blechstapels zu einer geringeren Verteilung des Temperaturbereichs 70 bis 90 °C in einer Sekunde nach der Maximaltemperatur führt.

Die Ergebnisse liefern auf Basis der lokalen Begrenzung des Wärmeeinflusses ($R = 25\text{mm}$) einen Erklärungsansatz für das mechanische Ersatzmodell mit den obigen Experimenten. Zur weiteren Verbesserung der Simulationsgüte werden verschiedene Modifizierungsansätze an ebenen und umgeformten Prinzipproben getestet. Durch die Anbindung des Ober- an das Unterblech mit fünf Balkenelementen (Standard: 1 Balkenelement) ist eine geringfügige Verbesserung der Übereinstimmung Simulation-Realität zu erkennen. Balkenelemente mit vergrößerten Durch-

messern oder höheren E-Modulen bringen nur marginale Verbesserungen gegenüber dem Standarddurchmesser des Fügepunktes und den E-Modulen der Fügepartner.

Remotelaserschweißen:

Analog dazu werden verschiedene Modellierungstechniken des mechanischen Fügeersatzmodells für das Remotelaserschweißen getestet. Beurteilt wird die Güte des Simulationsmodells zum einen an der Vorhersage der Formabweichungen am Bauteilflansch. Zum anderen ist das Spaltmaß zwischen Außen- und Innenteil der Baugruppe entscheidend für den Formschluss. Die Nahtlänge wird bei den Versuchskonfigurationen von Bild 97 auf 30 mm fixiert und entweder über eine oder drei Balkenelemente (BE) in der Simulation dargestellt.

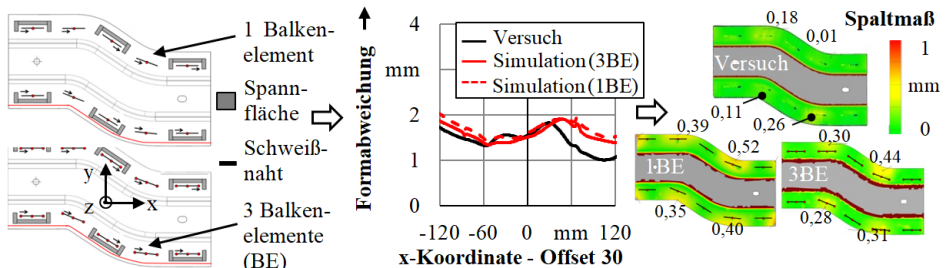


Bild 97: Effekt zweier Fügeersatzmodellierungen des Verfahrens Robscan auf die Vorhersagequalität von Formabweichungen und die Spaltmaße beim ZB S-Rail

Zur Quantifizierung des Modellierungseffektes werden zwei Ergebnisgrößen am ZB S-Rail ausgewertet: die Formabweichung und das Spaltmaß zwischen Außen- und Innenteil. Die höhere Anzahl an Balkenelementen (3 Stück: Anfang-Mitte-Ende der Fügenaht) führt in der Simulation zur großflächigeren Anbindung der beiden Fügepartner. Neben einer marginalen Verringerung der Maßabweichung zwischen Simulation und Experiment wird der nach dem Fügen zurückbleibende Fügespalt besser vorhergesagt (siehe Bild 97). In der Forschungsarbeit werden daher 30 mm langen Robscansschweißnähte mit drei Verbindern abgebildet.

Ein weiterer Ansatz sieht eine Kalibrierung des durch den Wärmeeintrag induzierten Bauteilverzugs anhand von Baugruppen ebener Bleche vor. Für eine mechanische Ersatzlast werden ein geeigneter Angriffspunkt, Wirkrichtung und deren Größe untersucht. Ebene Bleche eignen sich, um diese Komponenten unabhängig von vorangegangenen Umformvorgängen zu bestimmen. Das zugrunde gelegte Vorgehen ist in den drei Schemen in Bild 98 visualisiert.

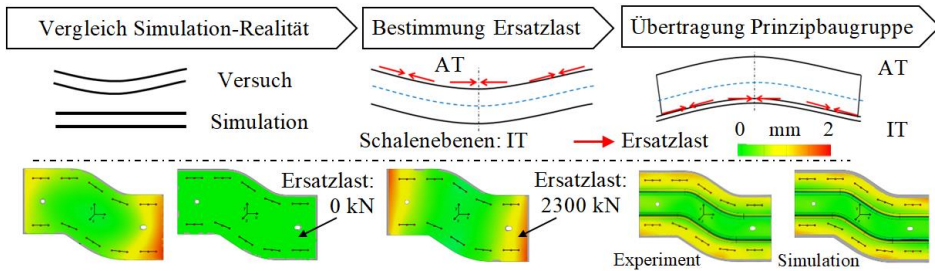


Bild 98: Kalibrierung des mechanischen Robscan-Ersatzmodells (Simulation-Experiment) durch das Einbringen einer Ersatzlast beim Fügen ebener Versuchsbleche

Anhand der beiden linken Falschfarbenbilder von Bild 98 ist festzustellen, dass der nach dem Fügen resultierende Schweißverzug an den Baugruppenenden initial nicht korrekt dargestellt wird. Es werden daher entlang der Schweißnahtlängsachsen sequentiell gegenläufige Ersatzlasten zur Schrumpfung der Nähte implementiert, ohne dass eine Starrkörperbewegung aufgrund eines Kräfteungleichgewichts an den Referenzknoten entsteht. Nach Iterationen mit verschiedenen Ersatzlastwerten wird der experimentelle Schweißverzug mit einer Ersatzlast von 2300 kN qualitativ am besten vorhergesagt. Eine Übertragung auf die Prinzipbaugruppe zeigt eine gute Übereinstimmung von Simulation und Experiment. Des Weiteren ist festzuhalten, dass bei Baugruppen mit hohen Struktursteifigkeiten die Verbesserung durch eine Berücksichtigung der Ersatzlasten gegenüber weniger eigensteifen Zusammenbauten geringer ausfällt.

Schweißnahtform

Nach erfolgreicher Kalibrierung des Robscan-Ersatzmodells mit drei Verbinderelementen wird als verfahrensspezifische Charakteristik die Auswirkung der Schweißnahtform auf die Formhaltigkeit gefügter Baugruppen geprüft. Als Geometrieformen stehen Strichnähte und Kreissegmente zur Auswahl. Die Linienform führt bei der Strichnaht zu keiner statisch bestimmten Anbindung. Trotz der Torsionssteifigkeit der Fügenähte sind Verdrillungen entlang einer Rotationsachse zwischen Außen- und Innenteil möglich. Bei der geometrischen Form des Kreissegments ist durch die flächige Anbindung keine Verdrillung möglich. Die Nähte werden bei den Versuchen in Bild 99 näher am Radiusauslauf der Flansche konstruiert.

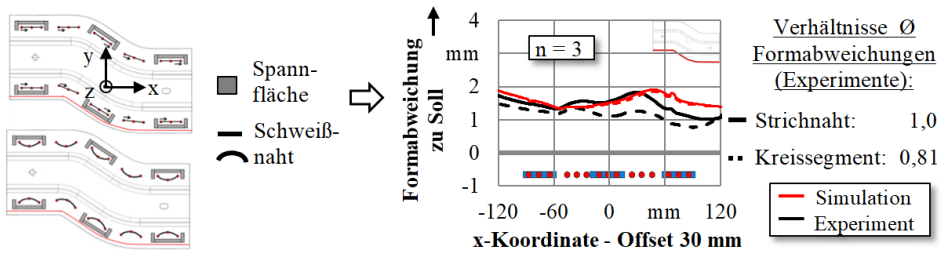


Bild 99: Auswirkung der Schweißnahtformen Strichnaht oder Kreissegment auf die Formhaltigkeit gefügter Prinzipbaugruppen in Simulation und Experiment

Im Gegensatz zu Fugesimulationen ist durch die Verwendung von Kreissegmentschweißnähten bei den Experimenten eine Verbesserung der Formhaltigkeit an der unteren Flanschkurve auf Basis der genannten Ursachen zu erkennen.

6.4 Geometrische Wechselwirkung der Nicht-Maßhaltigkeit von Einzelteilen

In den Abschnitten 6.2 und 6.3 wurde untersucht, inwiefern durch gezielte Einstellungen der Spann- und Fügebedingungen, des Werkstoffkonzeptes oder der Wahl einer geeigneten Füge­technik die Formhaltigkeit von Baugruppen verbessert werden kann. Im Folgenden werden geometrische Wechselwirkungen bei mehreren nicht-maßhaltigkeiten Einzelteilen ausgearbeitet. Dazu werden die Studienergebnisse sowie der identifizierte Stellhebel der geometrischen Bauteilform des Einzelbauteils genutzt.

Gemäß Bild 100 wird im nächsten Schritt der Einfluss von geometrischen Änderungen der Prinzipbauteile erarbeitet. Ziel ist es, anhand der Ergebnisse gefügter Prinzipbaugruppen Vorgaben für die Struktur des Fügepartners im Sinne einer Verbesserung der Formhaltigkeit zu geben. Weitergeführt wird die Vorgehensweise durch die Erhöhung der Anzahl an nicht-maßhaltigen Einzelbauteilen. Durch den mechanischen Clinchprozess zweier H-Proben werden gezielt Kompensationsmöglichkeiten unabhängig von konvexen und konkaven Bauteilwölbungen idealisiert generiert. Abgerundet wird der Abschnitt mit der Studie von mehreren Komponenten (verschiedene BauteilstEIFigkeiten/Blechdicken) eines Motorhaubeninnenteils.

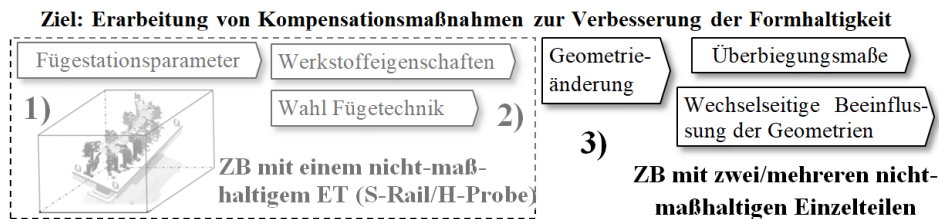


Bild 100: Methodische Vorgehensweise zur Identifikation der geometrischen Wechselwirkungen der Formabweichungen von Einzelbauteilen

6.4.1 Zusammenfassende Erkenntnisse aus Werkstoff-, Prozess- und Geometriestudien

Wie die bisherigen Untersuchungen zeigen, treten nach den verschiedenen Schritten einer Umform- und Fügeprozesskette Rückfederungen aufgrund des Abbaus des jeweiligen elastoplastischen Werkstoffzustandes nach den Einzelprozessen auf. In der Umformtechnik existieren eine Vielzahl an Methoden für die Rückfederungskompensation von Einzelbauteilen, indem beispielsweise bei der Anfertigung von Umformwerkzeugen Vorhaltemaße eingefräst werden. Parallel dazu sind methodische Ansätze denkbar, bei welchen Einzelbauteile gefordert werden, welche lokal nicht den ursprünglich definierten Sollmaßen entsprechen. Einzelteile mit überbogenen Einzelbauteildatensätzen werden anhand von Erfahrungswerten gefügter Zusammenbauten der Anbauteilkategorie definiert.

Für die Ergründung allgemeiner Zusammenhänge des Effekts verschiedener Überbiegungsmaße von Eingangsbauteilen werden S-Rail-Bauteile oder H-Proben-Außenteile mit überbogenen Innenteilen verschiedener Überbiegungsradien geclincht. Neben simulativen Untersuchungen werden nach Tabelle 25 ausgewählte Experimente realisiert.

Tabelle 25: Konfigurationen von Simulationen/Experimenten zu Einzelbauteilen mit verschiedenen Überbiegungsmaßen anhand des ZB S-Rail und ZB H-Probe

Simulation (S)/ Versuch (V)	Prinzipbaugruppe	Werkstoff Außenteil/Innenteil	Blechdicke Außenteil/Innenteil	Überbiegung Innenteil
<i>Einheit</i>	-	-	<i>mm</i>	
V	S-Rail	AA6014/AA6014	1,0/1,0	R250/R500
S+V	H-Probe	AA5182/AA5182	1,5/1,5	R200
S+V	H-Probe	AA5182/CR3	1,5/1,5	R200
S+V	H-Probe	CR3/AA5182	1,0/1,5	R200/R400
S+V	H-Probe	CR3/CR3	1,0/1,5 + 1/1,0	R400

Für die Experimente werden ebene, lasergeschnittene Platinen in Formen der Außenkontur der Außenteile um die Längsachse gebogen. Hinter-

grund für den Laserbeschnitt ist neben den zu den Außenteilen passenden Kantenlängen die Einbringung von Rund- und Langlöcher zur Fixierung in den flexiblen Fügestationen. Bei dem anschließenden Herstellungsprozess an einer Rundbiegemaschine werden die ebenen Bleche mit 0° zur WR in positiver x-Richtung zwischen zwei Rundwalzen eingespannt. Durch eine reproduzierbare Anpassung des Höhenversatzes der dritten Walze entsteht in mehreren iterativen Schritten aufgrund eines Vorschubes die gewünschte Platinenform. Vergleiche der gebogenen Platinen mit in CAD konstruierten Schablonen für die einzelnen Krümmungsradien verbessern ihre Wiederholbarkeit. Ergebnisse von Versuchen mit gebogenen S-Rail-Innenteilen sind in Bild 101 aufgeführt.

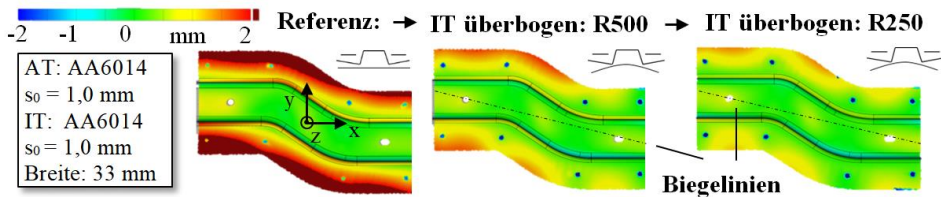


Bild 101: Formabweichungen der S-Rail-Clinchversuche mit überbogenen Innenteilen (IT)

Aus den Experimenten lässt sich die Aussage ableiten, dass sich durch die Veränderung des Krümmungsradius von ebenen Platinen ($R \sim \infty$) die globale Formhaltigkeit prinzipieller Clinchproben gegenüber dem vorgegebenen Sollwert verbessern lässt. Bei der Reduzierung des Krümmungsradius des überbogenen Innenteils ($R_\infty \rightarrow R_{500} \rightarrow R_{250}$) wird der Aufsprung zwischen den Fügepunkten signifikant verbessert. Das asymmetrische Verhalten der gefügten Baugruppen bleibt aufgrund der charakteristischen Geometrieformen des Außenhautbauteils erhalten und könnte durch die gezielte Anpassung der Biegelinien noch weiter optimiert werden. Dies ist aber nicht Gegenstand dieser Forschungsarbeit.

Im Anschluss an diese Versuche werden verschiedenste Prinzipversuche mit einer H-Probe als Außenteil und einem gebogenen Innenteil (siehe Bild 102) realisiert. Die Studie umfasst verschiedenste Konfigurationen aus Krümmungsradius, Blechdicken und Werkstoffen des Innenteils, welche unterschiedliche Struktursteifigkeiten gegenüber dem Außenteil aufweisen. Ziel ist es, mit überbogenen Einzelteilen maßhaltige Zusammenbauten zu erreichen.

Bei den Untersuchungen aus Bild 102 und Bild 103 werden bei Simulationen und Experimenten ($n = 3$) die Formabweichungen anhand des Verlaufes der gemittelten Flanschkurven oben und unten ausgewertet.

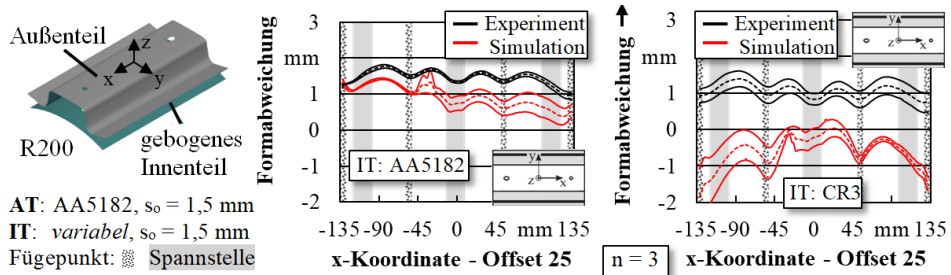


Bild 102: Formabweichungen anhand von Flanschkurven gefügter ZB H-Proben mit verschiedenen Werkstoffen des überbogenen Innenteils (Krümmungsradius R_{200})

Bei der Variation des Werkstoffes und einem Krümmungsradius R_{200} wird der Normalenabstand zur Sollbaugruppe reduziert. Der qualitative Verlauf der Formabweichung wird durch die Simulationen zwischen den Füge- und Spannungspunkten gut abgeschätzt. Eine weitere Verbesserung der Maßhaltigkeit wird bei Verwendung eines CR₃-Außenteils erreicht (siehe Bild 103).

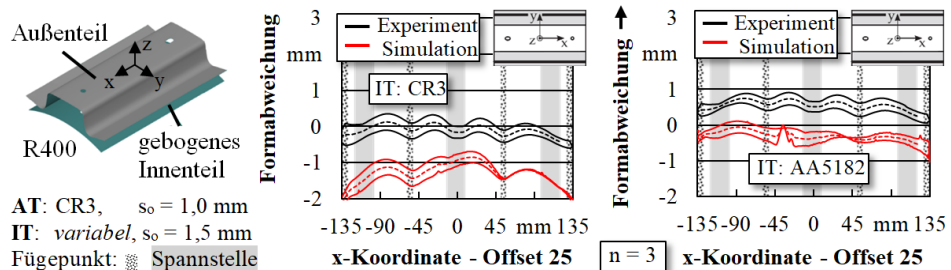


Bild 103: Formabweichungen anhand von Flanschkurven gefügter ZB H-Proben mit verschiedenen Werkstoffen des überbogenen Innenteils (Krümmungsradius R_{400})

Bei einer Substitution des Innenteilwerkstoffes von CR₃ durch AA₅₁₈₂ führt dies zu einer höheren Formabweichung in Normalenrichtung. Gemäß simulativer Auswertungen bewirkt ein größerer Krümmungsradius R_{400} gegenüber R_{200} generell eine geringere relative Fügekompensation der initialen Formabweichungen. Als Gründe für diese Effekte sind die geringeren Struktursteifigkeiten der überbogenen Innenteile wegen niedrigeren Eigenspannungen und plastischen Dehnungszuständen aufzuführen. Als Fazit wird konstituiert, dass die aufgezeigte Methode prinzipiell die Möglichkeit bietet, auf Basis von Zusammenbausimulationen, Vorhalte im Zuge von überbogenen Einzelteilen abzuleiten.

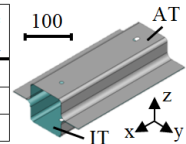
Die quantitativen Formabweichungen (Offset der Kurven) zwischen Experiment und Simulation werden durch die Nicht-Berücksichtigung der Umformhistorie aus dem Rundbiegeverfahren oder Übertragungsungenauigkeiten beim geometrischen Mapping begründet.

6.4.2 Gegenseitige geometrische Beeinflussung zweier umgeformter Einzelbauteile

Bei den bisherigen Grundlagenstudien wurde vorwiegend ein Umformbauteil und ein ebenes Blech verwendet. Zur Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf Karosseriekomponenten sind weiterführende Analysen mit mehreren nicht-maßhaltigen Einzelteilen notwendig. Dazu werden gemäß Tabelle 26 experimentelle und simulative Studien mit zwei nicht-maßhaltigen H-Proben unter Variation von Werkstoff, Blechdicke und Ziehtiefe realisiert. Die Referenzeinstellungen mit gleichen Werkstoffeigenschaften (Außenteil/Innenteil) sind hervorgehoben.

Tabelle 26: Variationsmatrix (Werkstoff, Blechdicke, Ziehtiefe) zur Untersuchung des gegenseitigen geometrischen Einflusses zweier nicht-maßhaltiger H-Prinzipproben

H-Proben	Werkstoff	Blechdicke	Ziehtiefe	Werkstoff	Blechdicke	Ziehtiefe
	Außenteil	Außenteil	Außenteil	Innenteil	Innenteil	Innenteil
Einheit	-	mm	-			
Parameter- variation	AA5182	1,0	20	AA5182	1,0	20
	CR3	1,5	40	CR3	1,5	40



Der gesamte Fügevorgang wird sequentiell anhand optischer Messungen eines Zusammenbaus mit mehreren Umformbauteilen validiert, bevor die Eingangsgrößen des mechanischen Fügeprozesses variiert werden. Bild 104 zeigt die Übereinstimmung von Simulation und Realität anhand der Formabweichungen nach dem Schritt Spannen-Fügen-Rückfederung.

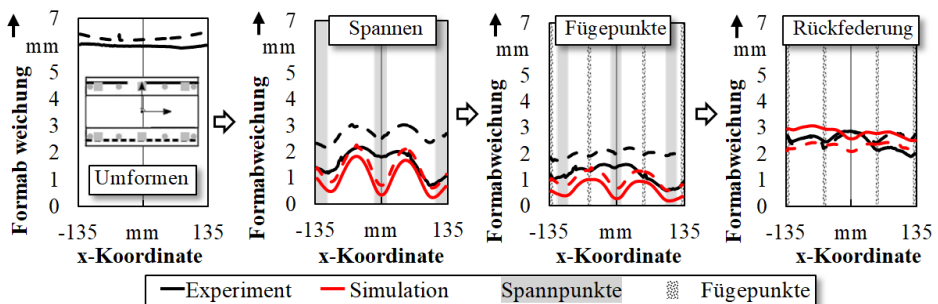


Bild 104: Übereinstimmung der Formabweichungen des AT von Simulation und Realität nach den einzelnen Fügeprozessschritten des Referenzzusammenbaus der H-Proben

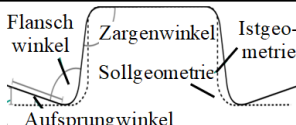
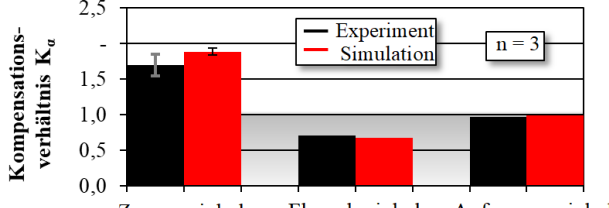
Der qualitative Verlauf wird in den einzelnen Fügeprozessschritten mit Ausnahme des mittleren Bereiches ($x = 0$) von beiden Flanschkurven in der Simulation mit Abaqus® gut vorhergesagt. Bei weiteren Auswertungen jedes Spannschrittes sind die größten quantitativen Abweichungen beim Schließen des ersten mittleren Spannerpaares 1 zu erkennen. Die Ursachen für die Abweichungen dieses Prozessschrittes sind in der elasto-

plastischen Material- und Spannmodellierung von Abaqus® oder in der Asymmetrie der umgeformten H-Proben begründet. Diese Abweichung setzt sich in den Ergebnissen der Maßabweichungen nach dem Schließen des letzten Fügepunktes und der Rückfederung des Zusammenbaus in geminderter Form fort.

Mit der Analysemethode der beidseitigen Flanschkurven werden die hinsichtlich der Maßhaltigkeit bedeutendsten Schritte der Fügeprozesskette identifiziert. Die Flanschkurven sind für eine geometrische Ursachenanalyse der resultierenden Form- und Lageabweichung an den Formflanschen nur bedingt geeignet. Die Rückfederungen an den Bauteilflanschen sind abhängig vom Abstand des analysierten Messpunktes zum Radiusauslauf. Daher wird bei den folgenden Untersuchungen gezielt die Veränderung der über den Flansch gemittelten ($n = 3$) Zargen- und Flanschwinkel zur Sollgeometrie erforscht. Zudem wird die Winkeländerung in Abhängigkeit zu den Werten nach dem Umformen relativiert.

Für das Verhältnis aus kompensierter Abweichung zur Anfangsabweichung wird hierzu das Kompensationsverhältnis K_α eingeführt. Die möglichen Wertebereiche für K_α sind in Tabelle 27 aufgeführt. Anzustreben ist ein Kompensationsverhältnis nahe dem Wert 1, bei welchem der Sollwinkel nach dem Durchlaufen der Umform- und Fügeprozesskette erreicht wird. Der Studie liegt die Annahme zu Grunde, dass kein signifikanter Hohlzug in den Bauteilzargen entsteht. Die Ergebnisse für die gefügte Referenzbaugruppe sind in Tabelle 27 aufgeführt.

Tabelle 27: Wertebereiche für die Kompensationsverhältnisse K_α der Zargen-, Flansch- und Aufsprungwinkel der Referenzbaugruppe aus zwei nicht-maßhaltigen H-Proben

Wertebereiche	Interpretation für das Fügeergebnis	Bewertung ZB-Maßhaltigkeit												
$K_\alpha > 1$	Anfangsabweichung wird überkompensiert													
$K_\alpha = 1$	Idealverhältnis, Anfängliche Abweichung wird komplett kompensiert (Ist = Soll)													
$0 < K_\alpha < 1$	Zu geringe Kompensation													
$K_\alpha < 0$	Anfängliche Abweichung wird vergrößert													
<u>Außenteil:</u> AA5182 $s_0 = 1,5 \text{ mm}$ ZT: 40 mm <u>Innenteil:</u> AA5182 $s_0 = 1,5 \text{ mm}$ ZT: 40 mm	 <table><caption>Daten aus dem Bar Chart (Tabelle 27)</caption><thead><tr><th>Winkel</th><th>Experiment (K_α)</th><th>Simulation (K_α)</th></tr></thead><tbody><tr><td>Zargenwinkel</td><td>~1,7</td><td>~1,8</td></tr><tr><td>Flanschwinkel</td><td>~0,7</td><td>~0,7</td></tr><tr><td>Aufsprungwinkel</td><td>~1,0</td><td>~1,0</td></tr></tbody></table>		Winkel	Experiment (K_α)	Simulation (K_α)	Zargenwinkel	~1,7	~1,8	Flanschwinkel	~0,7	~0,7	Aufsprungwinkel	~1,0	~1,0
Winkel	Experiment (K_α)	Simulation (K_α)												
Zargenwinkel	~1,7	~1,8												
Flanschwinkel	~0,7	~0,7												
Aufsprungwinkel	~1,0	~1,0												

Die Resultate verdeutlichen einerseits die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment mit marginalen Unterschieden bei den

experimentellen ($K_\alpha = 0,96 \pm 0,03$) und den simulativ ($K_\alpha = 0,98 \pm 0,03$) berechneten Aufsprungwinkel. Andererseits zeigt die getrennte Auswertung des Winkelzuges aus Flansch- und Zargenwinkel deren erhöhte Aussagekraft und Analysepotentiale. Die Formabweichungen des Zusammenbaus mit zwei baugleichen nicht-maßhaltigen Einzelteilen entstehen primär durch die maßbestimmenden Kompensationsverhältnisse der Zargenwinkel und weniger aus der Flanschwinkeländerung.

Diese absoluten Aufsprungwinkel werden für die in Tabelle 26 aufgeführten Konfigurationen (E-Modul, Blechdicke, Ziehtiefe) nach dem Fügeprozess in Bild 105 ermittelt. Das Innenteil der Baugruppe hat konstante Werkstoff- und Geometrieigenschaften: AA5182, Ausgangsblechdicke $s_0 = 1,5$ mm und Ziehtiefe 40 mm.

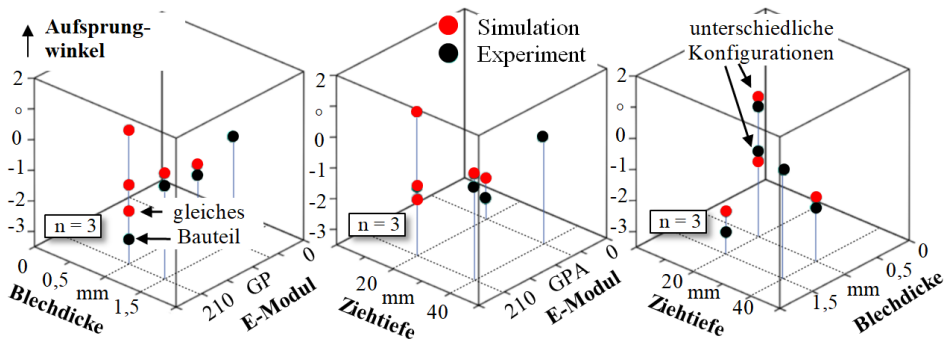


Bild 105: Aufsprungwinkel zur Analyse der Wechselwirkungen von zwei nicht-maßhaltigen ET bei Variation von Blechdicke, Ziehtiefe und Werkstoff beim ZB H-Proben

Bis auf die Variante mit gleichzeitiger Änderung des Werkstoffes und der Blechdicke können die Aufsprungwinkel für alle Versuchskombinationen gut simulativ abgeschätzt werden. Bei gleicher Blechdicke führt der höhere E-Modul zu einem geringeren Aufsprungwinkel. Des Weiteren bewirken Einzelvariationen im Gegensatz zu paarweisen Variationen geringe Änderungen des Aufsprungwinkels. Exakte geometrische Wechselwirkungen lassen sich wegen überlagernder Effekte aus den Parameterkombinationen nur tendenziell angeben.

Zur Erfassung des Geometrieinflusses von nicht-maßhaltigen Einzelteilen werden die an vermessenen Bauteilversuche (Tabelle 26) angelehnte Hutprofilgeometrien in CAD idealisiert konstruiert. Bild 106 visualisiert die Variationen des Zargenwinkels der Außenteile.

Für den Referenzversuch der Baugruppe mit zwei H-Proben (AA5182, $s_0 = 1,5$ mm, Ziehtiefe: 40 mm und Zargenwinkel: 100°) bringt der Abgleich zwischen dem Experiment und den FE-Simulationen mit ver-

messen oder idealisierten Geometrien nur marginale Abweichungen beim resultierenden Aufsprungwinkel hervor. Die Vernachlässigung der nach den Umformversuchen auftretenden Biegungen am Ziehteilboden, minimalen Bauteilasymmetrien sowie negativer Hohlzüge in den Bauteilzargen führen zu keinen Interpretationsfehlern.

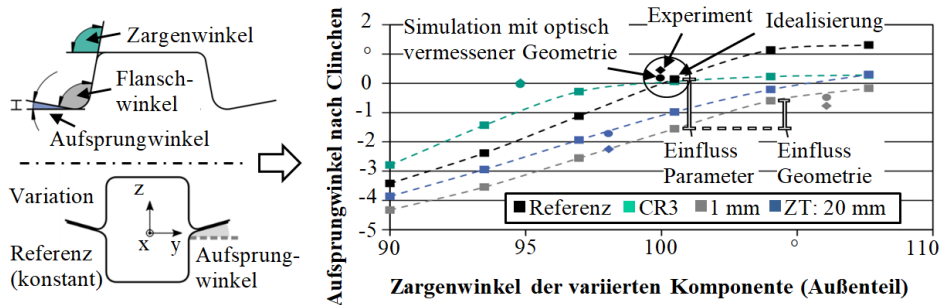


Bild 106: Simulativer Ansatz zur Bestimmung des Geometrieinflusses anhand der Formabweichungen zweier geclinchter, idealisierter Umformbauteile (ZB H-Probe)

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird der Effekt der Zargenwinkeländerung eines Fügepartners bei einer Veränderung des Werkstoffes (AA5182 $\rightarrow$ CR3), der Blechdicke (1,5 $\rightarrow$ 1,0 mm) oder der Ziehtiefe (40 $\rightarrow$ 20 mm) untersucht. Ziel ist es, den Einfluss der geometrischen Änderung in Abhängigkeit von der Parameteränderung zu prüfen.

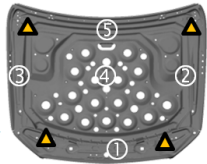
In Bild 106 ist für alle Parameterkombinationen ein linear, ansteigender Zusammenhang zwischen der Zargenwinkeländerung und dem resultierenden Aufsprungwinkel nach dem Fügen zu interpretieren. Bei der Werkstoffwahl CR3 hat die Zargenwinkeländerung gegenüber dem Werkstoff AA5182 ein früheres Sättigungsverhalten bei steigendem Zargenwinkel zur Folge. Erklärbar ist dies anhand der Hooke'schen Geraden unter Annahme elastischer Verformungen beim Spannprozess durch den dreifach höheren E-Modul. Aufgrund der geringen Unterschiede in der Streckgrenze AA5182/CR3 wird bei dem Werkstoff CR3 die Fließgrenze früher erreicht.

6.4.3 Formhaltigkeit beim Fügen mehrerer Karosserieteile

Variationsrechnungen mit mehreren Einzelteilen des Motorhaubeninnenteils sind der letzte Schritt zur Analyse der geometrischen Wechselwirkungen unterschiedlicher Einzelteile. Diese werden mit den Formabweichungen durch die Gewichtskraft oder des Fertigungsprozesses Umformen (nach Tabelle 18) zur Baugruppe ZB Innenteil gefügt. Als

Zwischenschritt ist noch der Fertigungsprozess der Unterbaugruppe ZB Vorne zu nennen, bei welcher die Komponente ① aus den Einzelteilen Vorderteil und Verstärkung hergestellt wird. Tabelle 28 visualisiert die weiteren Komponenten des ZB Innenteils mit folgender Einlegereihenfolge der Einzelbauteile: ④, ⑤, ③, ②, ①

Tabelle 28: Untersuchungsbaugruppe zur Identifikation der Wechselwirkungen nicht-maßhaltiger Einzelteile auf das mechanische Durchsetzfügergebnis

Baugruppe: ZB Innenteil   Auflage		Bezeichnung Einzelbauteile	Werkstoff	Blechdicke
		1) (Unter-)ZB Vorne	AA5251	1 + 1,25 mm
		2) Innenteil Seite rechts	AA5251	0,9 mm
		3) Innenteil Seite links	AA5251	0,9 mm
		4) Innenteil Mitte	AA5251	0,7 mm
		5) Innenteil Hinten	AA5251	1,25 mm

Die Einbaureihenfolge ist so ausgelegt, dass die Durchsetzfügezange möglichst nicht gedreht werden muss und ebenso die Gestaltungsrichtlinien bei dem mechanischen Fügeprozess eingehalten werden.

In Übereinstimmung mit der Analyse der Struktursteifigkeiten von Einzelteilen werden zunächst die nach dem Konstruktionsdatensatz ideal maßhaltigen Einzelbauteile zu einer Baugruppe in Bild 107 gefügt. Das Falschfarbenbild zeigt eine hohe Kompensation der Formabweichung der Einzelteile Innenteil Mitte und Innenteil Hinten (siehe Tabelle 18). Die Durchbiegung im Bereich des Innenteils bleibt im verminderten Maße bestehen. Komplementär ist bei der Fügeoperation mit dem gesamten Spektrum der nicht maßhaltigen Einzelteile eine hohe negative Normalenabweichung im oberen Bauteilbereich (Innenteil Hinten) zu erkennen. Es liegt generell bei allen Studien ein zur yz-Ebene symmetrisches Bauteilverhalten gemäß den Formabweichungen nach dem Fügen vor.

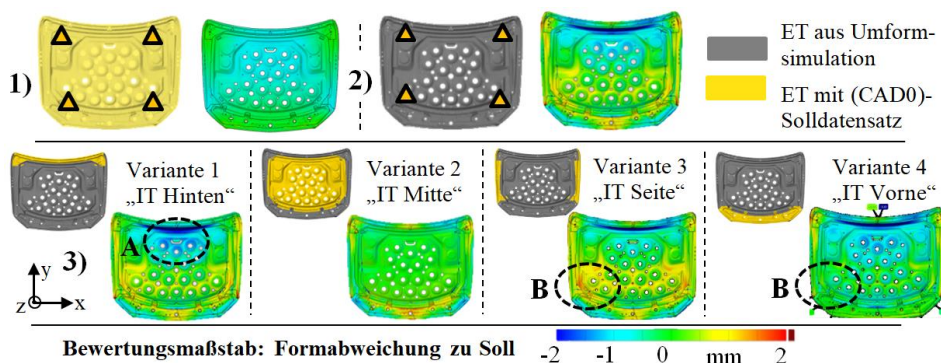


Bild 107: Variantenrechnungen mit einer unterschiedlichen Anzahl an deformierten Einzelteilen der Innenteilzusammenbaugruppe einer Motorhaube

In einem dritten Schritt werden in vier Varianten nicht maßhaltige durch ideal maßhaltige Einzelbauteile ersetzt. Ziel ist es, die hinsichtlich der ZB-Maßhaltigkeit maßbestimmenden Einzelbauteile zu identifizieren. Um den Aufwand und somit die Kosten für Bauteiländerung zu reduzieren, sollten die Kompensationsmaßnahmen primär an den signifikanten Einzelbauteilen erarbeitet und angewandt werden.

Wird das deformierte Innenteil Hinten durch ein ideal maßhaltiges Innenteil ersetzt, verstärkt sich der Effekt der Durchbiegung im Bereich A. Aufgrund der geringeren Struktursteifigkeit des Innenteils Mitte hat dieses kaum geometrische Wechselwirkungen mit den anderen Innenteilen (siehe Variante 2). Dem entgegen steht der Einfluss von ideal maßhaltigen Seitenteilen Links/Rechts und Unterzusammenbau Vorne, welche aufgrund ihrer höheren Struktursteifigkeiten geometrische Wechselwirkungen mit anderen Fügepartnern haben. Die Einzelteile sind somit für die gemäß den Toleranzvorgaben einzuhaltenden Form- und Lageabweichungen maßbestimmend.

Als Fazit ist bei der Herstellung des ZB Innenteils darauf zu achten, maßhaltige Innenteile Seite und ZB Vorne je nach Anforderung zu produzieren oder gegebenenfalls Vorhaltemaße für die Überbiegung dieser Einzelteile zu definieren.

6.5 Stochastische Analysen von ausgewählten Fügestationenparametern mit anschließender Optimierung

Vergleichbar zum Fertigungsprozess Umformen wird für weitere Analysen die statistische Schwankung der Eingangsgrößen des Fügens ermittelt. Diese umfasst zum einen die Prozessparameter des Fügeprozesses (Füge-/Spannposition x/y) und zum anderen die Parameterschwankung der Werkstoffdaten. Die Schwankung der mechanischen Kennwerte (inklusive Blechdicke) ist in Abschnitt 5.5.1 aufgeführt und wird für jedes Einzelteil des Zusammenbaus hinterlegt. Bild 108 demonstriert den nächsten Schritt der Sensitivitätsanalysen zur Identifikation der Wechselwirkungen der schwankenden Eingangsgrößen und der Formabweichung als Ergebnisgröße. Optimierungsstudien zu signifikanten Parametern der flexiblen Fügestation ZB S-Rail runden den Abschnitt ab: Füge- und Spannposition in x/y -Richtung.

Die Berücksichtigung der Prozess- und Werkstoffschwankungen entlang der Umform- und Fügeprozesse ermöglicht als Erweiterung gegenüber singulären Parameterstudien, deren Einfluss auf das Fügeergebnis darzu-

legen. Die Übertragung sowie die anschließenden Analysen des Fügeergebnisses können entweder mit skalaren Größen oder Feldgrößen realisiert werden.

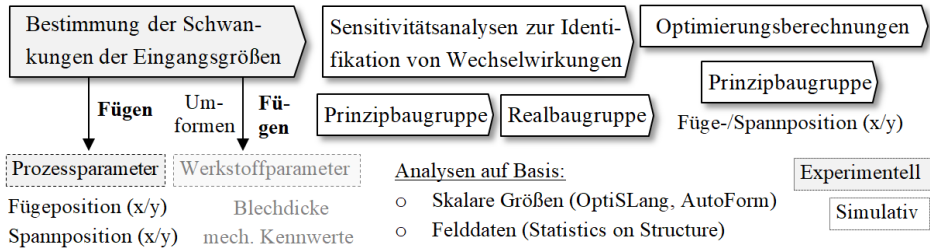


Bild 108: Methodische Schritte der stochastischen Analyse ausgewählter Fügestationsparameter prinzipieller und realer Karosseriekomponenten

6.5.1 Bestimmung von Parameterschwankungen beim Fügeprozess

Bei den Experimenten in der flexiblen Fügestation treten auf Basis der Handhabbarkeit der Fügezange ungewollte Schwankungen der Fügeposition auf. Für die Sensitivitätsanalyse einer veränderten Fügeposition wird die Streuung in x- und y-Koordinatenrichtung bestimmt. Die Genauigkeit der einzelnen Fügeposition bei den S-Rail-Versuchen ist in Bild 109 angegeben.

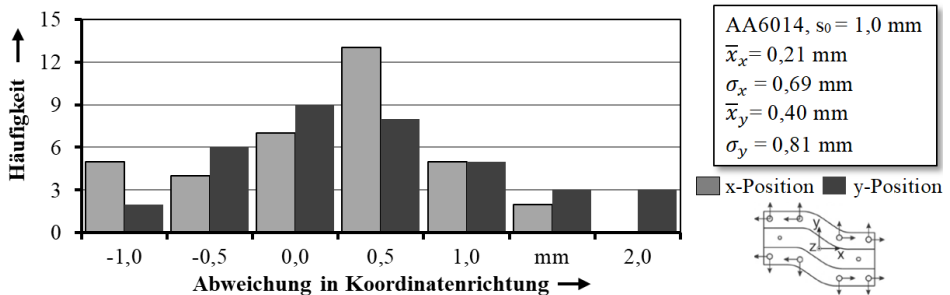


Bild 109: Abweichung der Fügestellen (x/y) von der Sollposition in der flexiblen Fügestation

Die Fügeposition schwankt in x-Koordinatenrichtung um 0,21 mm und in y-Richtung um 0,40 mm um den definierten Fügemittelpunkt. Eine Abhängigkeit der Schwankungsbreite der Fügepositionen von der gewählten Fügestelle ist nicht zu erkennen. Die Positioniergenauigkeit der robotergesteuerten Fügezange ist bei Fügestationen von Karosseriekomponenten mit vorhandenen Aufbautoleranzen der Fügestationen zu vergleichen.

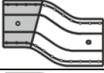
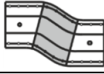
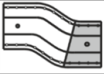
Es wird daher für jeden Fügepunkt die gleiche Streuung ihrer Positionen in den stochastischen Analysen hinterlegt.

6.5.2 Sensitivitätsanalysen und Optimierungsstudien

Um die Wechselwirkungen zwischen den variierten und streuenden Umformparametern und den Eingangsgrößen des Spann- und Fixierkonzeptes beim mechanischen Fügen zu ermitteln, werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Anhand ihrer Ergebnisse werden Empfehlungen für einen optimalen Bereich der jeweiligen Parameterauswahlmöglichkeit gegeben.

Für die Sensitivitätsanalysen der Umform- und Fügeprozesskette des ZB S-Rail werden diverse Strategien verfolgt. Gemäß Tabelle 29 werden in der ersten Variante die Umformparameter verändert und ihre Sensitivitäten hinsichtlich der gemittelten Normalenabweichung der Baugruppenbereiche nach dem Clinchen ausgewertet. Demgegenüber sieht die zweite Variante lediglich die Berücksichtigung der Streuung der Inputgrößen des Spann- und Fixierkonzeptes beim Clinchen vor. Als Beurteilungskriterium für die einhergehende Beitragsleisteranalyse werden bereichsweise CoP-Werte für die Inputfaktoren berechnet.

Tabelle 29: Beitragsleisteranalyse auf die Normalenabweichung nach dem Fügen für die Variation von Umformparametern oder Fügeparametern der S-Rail-Baugruppe

CoP $\geq$ 90 %	Variation Umformparameter			Variation Spann-/Fixierkonzept		
CoP $\geq$ 70 %	E-Modul Innenteil, Blechdicke	E-Modul Außenteil	Blech- dicke Außenteil	Clinch- punkte x- Richtung	Clinch- punkte y- Richtung	Spanner A und B x- Richtung
CoP $\geq$ 50 %	Innenteil					
CoP $\geq$ 10 %						
Bereich 1 	< 1,0 %	1,5 %	74,8 %	3,1 %	17,0 %	66,2 %
Bereich 2 	< 1,0 %	1,7 %	76,9 %	1,3 %	3,9 %	92,2 %
Bereich 3 	< 1,0 %	4,5 %	68,2 %	5,1 %	21,6 %	66,8 %
Alle Bereiche	< 1,0 %	1,8 %	74,5 %	5,1 %	10,7 %	83,4 %

Den beiden Modellstrategien liegen jeweils 200 LS-DYNA® Berechnungen bei einer Auswahl der Parametersets nach dem Advanced Latin-Hypercube Sampling und einer Berechnung der mathematischen Zusammenhänge nach dem Kriging-Metamodell zu Grunde. Die Parameterbereiche für die Blechdicken-, E-Modulschwankungen und weiteren Prozessgrößen

des Herstellungsprozesses des Außen- und Innenteils sind den Abschnitten 4.3 und 5.5.1 zu entnehmen. Als skalare Ergebnisgröße der ZB-Rückfederung werden auf jeder Flanschseite Knotenwerte gemäß dem Messprinzip aus Bild 38 ausgelesen und in den Bereichen gemittelt.

Im Vergleich zu Tabelle 15 ist in allen geometrischen Bereichen der Einfluss des Außenteil-E-Moduls auf das Fügeergebnis deutlich geringer als die Auswirkung auf das Umformergebnis. Die Schwankung des E-Moduls vom Außenteil wird in Wechselwirkung mit den Fügeparametern kompensiert. Die Blechdickenschwankung wird im Rahmen der getätigten Parameterauswahl als Haupteinflussfaktor auf die Rückfederung nach dem Umformprozess (Tabelle 15) und dem Fügeprozess (Tabelle 29) im Bereich der Bauteilflansche identifiziert.

Die zweite Sensitivitätsanalyse von Tabelle 29 zeigt, dass bei einer Schwankung der Fügestationseinstellungen (Konfiguration: 6 Bauteilspanner und 8 Clinchpunkte) die mittleren Bauteilspanner A und B die größten Wechselwirkungen mit der Zielgröße der Außenteil-Rückfederung haben. Die Werte für die stochastischen Daten der Eingangsgrößen sind im vorherigen Abschnitt 6.5,1 erläutert oder beruhen auf konstruktiven Schwankungen der Spannerpositionen. Der größte Stellhebel zur Kompensation der Formabweichungen ist bei den Spannelementen im mittigen Geometriebereich 2 in der Beitragsleisteranalyse zu erkennen.

Des Weiteren erlaubt die hohe Modellgüte (ca. 97 %) der Sensitivitätsanalyse bei den Fügestationparametern eine hohe Erklärbarkeit und Prognosefähigkeit optimaler Einstellungen auf Basis des Metamodells. Im Folgenden kann deswegen direkt eine gezielte Optimierung mit den identifizierten Haupteinflussfaktoren (siehe Tabelle 29) des Spann- und Fixierkonzeptes auf die Formhaltigkeit der Baugruppe S-Rail vorgenommen werden.

In Bild 110 wird zunächst das mit Hilfe eines Metamodells optimierte Spann- und Fixierkonzept in Experimenten validiert. Dazu werden zweidimensionale Ansichten der Metamodelle für die Spannerverschiebungen von A und B erörtert und Ausprägungen mit den niedrigsten Normalenabweichungen nach dem Fügen der Baugruppe gesucht.

Die Empfehlung einer betragsmäßigen Verschiebung der Spanner A und B um 20 mm in ihre konvexen Bauteilbereiche resultiert aus den 200 Iterationen der Sensitivitätsanalyse. Gemäß Metamodell ist idealisiert, je nach Bauteilseite, ein linear positiver oder negativer Zusammenhang zwischen x-Verschiebung und Formabweichungen des Zusammenbaus zu

finden. Mit diesen geänderten Einstellungen für die Bauteilspanner A und B werden Experimente durchgeführt und die Ergebnisse zu denen der Referenzeinstellungen des Spann- und Fixierkonzeptes verglichen. Ausgewertet an einer Flanschkurve im unteren Flanschbereich ist eine signifikante und globale Verbesserung der Formhaltigkeit bei der Prinzipbaugruppe S-Rail entlang der abgewickelten Blechlänge zu erkennen.

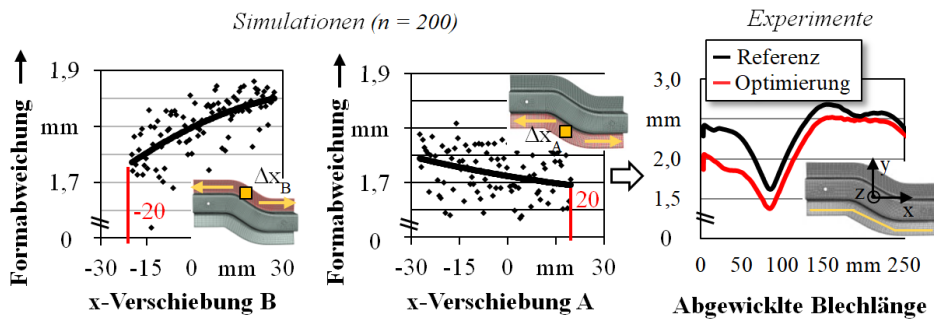


Bild 110: Verbesserung der ZB-Maßhaltigkeit durch optimierte Spannpositionen (ZB S-Rail)

Korrespondierend wird zudem die Möglichkeit einer Optimierung der Formhaltigkeit der Baugruppe durch andere Fügstellenpositionen (x-Position) überprüft. Bild 111 visualisiert die Ergebnisse von x-Verschiebungen der am wichtigsten detektierten Fügstellen 6 und 2.

Eine Verschiebung der Fügstelle 6 in x-Richtung erbringt keine durchgehende Verbesserung der Formhaltigkeit entlang der Koordinatenrichtung. Eine marginal geringere Normalenabweichung ist in der Umgebung des Fügepunktes 6 bei kleineren x-Werten zu erkennen. Bei dem Fügepunkt 2 ist eine Abnahme der Formabweichungen bei einer positiven x-Verschiebung zu beobachten. Abgeleitet aus diesen beiden Erkenntnissen werden Experimente mit den markierten Faktoreinstellungen für die Fügepunkte 2 und 6 mit einer betragsmäßigen x-Verschiebung um 30 mm getätigt.

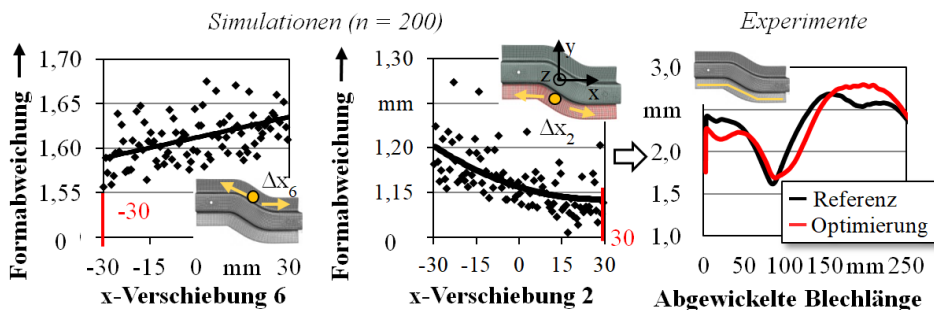
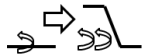
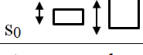
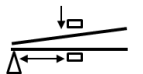
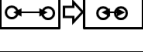
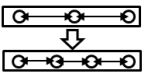
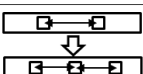
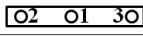
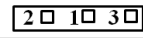


Bild 111: Verbesserung der ZB-Maßhaltigkeit durch optimierte Fügepositionen (ZB S-Rail)

Im Gegensatz zur der obigen Spannerverschiebung führt diese Anpassung des Fügekonzeptes nicht zu einer globalen Verbesserung der Formhaltigkeit. Entlang der abgewinkelten Blechlänge von Bild 111 (drittes Diagramm) ist von 0 bis 50 mm eine erhöhte und zwischen 180 und 250 mm eine geringere Formhaltigkeit im Vergleich zur Referenzbaugruppe die Folge. Das Verbesserungspotential hinsichtlich der resultierenden Formhaltigkeit des Zusammenbaus beruht auf der partiell unterschiedlich vorhandener Flanschrückfederung der umgefomten Bauteile.

Zusammenfassend stellt Tabelle 30 die Auswirkungen der Einflussfaktoren Geometrie, Werkstoffkenngrößen der Einzelbauteile und Prozessführung auf die Maßhaltigkeit von Baugruppen dar.

Tabelle 30: Zusammenfassung der Einflussgrößen auf die Maßhaltigkeit von gefügten Prinzip- und Karosserieanbaugruppen

		Auswirkungen auf Formabweichung zur Sollgeometrie	
		Prinzipielle Baugruppen	Karosserieanbaugruppen
Geometrische Merkmale			
Struktursteifigkeit des Fügepartners ↑		Widerstandsbiegemoment des Verbundes aus n Bauteilen ↑ → Formabweichung ↓	Funktionale Zusammenhänge zwischen den Steifigkeiten einzelner Geometrien und ZB
Geometrische Formen	Gerade —	Formabweichung ↓	-
	Konvex 	Formabweichung ↓	
	Konkav 	Formabweichung →	
Überbiegung		Krümmungsradius überbogener Einzelteile ↓ → Formabweichung ↓	Überbiegungen ↓ von maßbestimmenden Einzelbauteilen mit hohen Einfluss
Werkstoffkenngrößen			
Blechedicke des Fügepartners ↑		Flächenträgheitsmomente ↑ → Formabweichung ↓	Struktursteifigkeit ↑ → Formabweichung ↓
E-Modul des Fügepartners ↑		Spaltmaße zwischen den Fügepunkten ↑ → Welligkeit ↑	-
Prozessführung			
Optimierung Spannpositionen		Höherer Abstand zu Radien → Biegespannung ↑ → Formabweichung ↓	Spanner in Bereichen mit hohen Maßabweichung der Einzelteile → Formabweichung ↓
Optimierung Fügeabstände		Fügestababstände ↓ → Formabweichung nach Spannen und Fügen ↓	Abhängig von den Bauteildimensionen
Anzahl an Fügepunkten ↑		Abstand zwischen 2 Fügepunkten ↓ → Baugruppensteifigkeit ↑ → lokale Formabweichung ↓	Abhängig von dem Zeitpunkt des Setzens der Fügepunkte (z.B. Geo- oder Ausfügepunkt)
Anzahl an Spannpunkten ↑		Bauteile werden lokal verbessert in Anlage gebracht → Formabweichung ↓	Auswirkung abhängig von den lokalen Maßabweichungen der Einzelbauteile
Fügereihenfolge		Keinen Einfluss	Geringen Einfluss
Spannreihenfolge		Keinen Einfluss	Geringen Einfluss

Durch die ermittelten Zusammenhänge zwischen den schwankenden Einflussgrößen des Fügeprozesses (Ursache) und ihrer Auswirkungen auf die Formhaltigkeit der Baugruppe lassen sich für jede Kategorie Maßnahmen zur Rückfederungskompensation ableiten. Bei den geometrischen Merkmalen/Bauteilauslegung ist eine zielführende Strategie das Widerstandsbiegemoment des Bauteilverbundes zu erhöhen, um die Formhaltigkeit von Karosseriebaugruppen zu verbessern. Hierbei sind die ergründeten, funktionalen Zusammenhänge zwischen den geometrischen Formen (gerade-konvex-konkav) zu gebrauchen. Beispielsweise können hohe Kompensationsfaktoren von konvexen Geometriebereichen zur Reduzierung der Formabweichung genutzt werden. Im Besonderen ist das Überbiegungsmaß der maßbestimmenden Einzelteile ein vielversprechender, geometrischer Stellhebel zur Rückfederungskompensation. Bei der strategischen Wahl des Werkstoffmixes von Baugruppen gilt es, zu beachten, dass ein höherer E-Modul oder eine höhere Blechdicke das absolute Maß der Formabweichung reduziert, jedoch eine höhere Welligkeit zwischen den einzelnen Fügepunkte zur Folge haben kann. Signifikante Verbesserungen der Baugruppenmaßhaltigkeit werden zudem mit einem optimierten Spann- und Fügekonzept erzielt. Insbesondere eine Veränderung der streuenden Positionen der Spann- und Fügepunkte sowie eine veränderte Anzahl der Spann- und Fügeelemente bewirken eine relevante Veränderung auf die Maßhaltigkeit der Baugruppe.

Im Konkreten unterstützen die ermittelten Ergebnisse die Konstrukteure von Karosseriebaugruppen und die Planer von Fügeoperationen bei ihrem Ziel, maßhaltige Baugruppen zu produzieren. Der Konstrukteur sollte die geometrischen Wechselwirkungen verschiedener Einzelbauteilgeometrie beachten. Aufgrund der zu erwarteten Maßabweichungen sind geometrische Vorhalte in maßbestimmenden Einzelbauteilen anzudenken. Insbesondere wäre es vorteilhaft, gemeinsame Anlageflächen von zwei oder mehreren Bauteilen zu vergrößern, da in diesen Bereichen Potentiale zur Kompensation von Einzelteilabweichungen bestehen. Im Idealfall kann der Baugruppenkonstrukteur zudem die Erkenntnisse aus den Zusammenbausimulationen nutzen. Bereits aus ersten simulativen Untersuchungen wird deutlich, welche Einzelbauteile maßbestimmend für die Formhaltigkeit der Gesamtbaugruppe sind. Für die anschließende geometrische Auslegung kann der Fokus auf beispielsweise der Wahl des Überbiegungsmaßes der Einzelbauteile liegen. Parallel dazu ist das Konzept für die Werkstoff- und Blechdickenauswahl in einer gemeinsamen Diskussion des Prozessplaners und des Konstrukteurs zu überprüfen. Als weiterer, großer Stellhebel für maßhaltige Baugruppen ist die simulative

Auslegung ihrer Spann- und Fixierkonzepte zu nennen. Durch optimierte Spannstellen (Form, Position und Anzahl) lassen sich bei nicht-maßhaltigen Einzelbauteilen häufig signifikante Verbesserungen der Formhaltigkeit der Baugruppe erzielen. Als vielversprechender Ansatz sollte geprüft werden, inwieweit weitere oder geänderte Fügestellen die Biegesteifigkeit von Baugruppen erhöhen und somit die Formhaltigkeit verbessern können. Zudem empfiehlt es sich, der nachträglichen Adaption und Veränderung der Spann- und Fügereihenfolge eine geringe Priorität einzuräumen. Vor allem die geforderte, geringe Taktzeit widerspricht oft dem Prozess eines sequentiellen Spannprozesses.

7 Untersuchung der Prozessfenster von verketteten Umform- und Fügeprozessen

Der erste Schritt des zweistufigen Lösungskonzeptes von Bild 16 ist mit den Variantenrechnungen zu nominalen Simulationsprozessketten abgeschlossen. Darauf aufbauend werden in der zweiten Stufe zusätzlich stochastische Untersuchungen der Prozesskette mit denen als relevant identifizierten Einflussfaktoren durchgeführt. Die Auswirkungen wechselwirkender Parameter werden anhand vorgegebener Toleranzen eingeordnet und die Größe der Prozessfenster von verketteten Umform- und Fügeprozessen ermittelt. Ziel ist es, neben den ermittelten Handlungsempfehlungen bei den Einzelprozessen Vorschläge zur Reduzierung ausgewählter Ergebnisgrößen anhand stochastischer Analysen von Prozessketten zu geben.

Die methodische Vorgehensweise dieses Kapitels sieht gemäß Bild 112 zwei Strategien in Abhängigkeit der Komplexität des Untersuchungsgegenstandes vor. Die Konzeption der Strategien richtet sich nach der Berechnungszeit von den Einzelschritten der nominalen Simulationsprozesskette. Diese ist bei der Prinzipbaugruppe S-Rail deutlich geringer als bei einer realen Karosseriebaugruppe, wie beispielsweise einer Motorhaube. Langfristiges Bestreben ist es, bei steigenden Rechenkapazitäten und sinkenden Berechnungszeiten eine erhöhte Anzahl an stochastischen Analysen eines jeden Einzelschrittes durchzuführen.

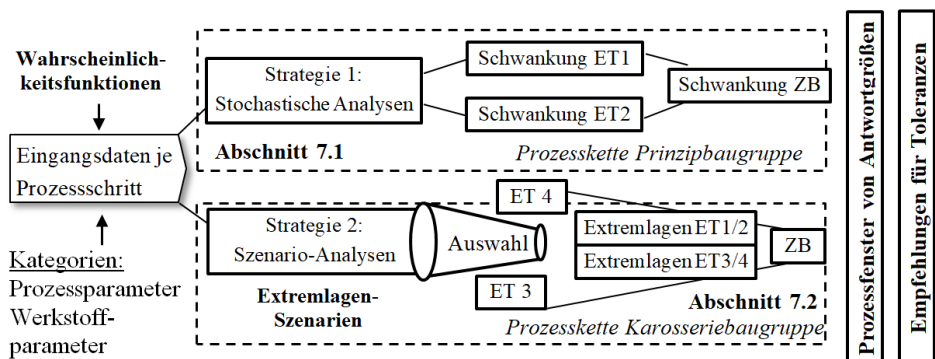


Bild 112: Strategien zur Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für ausgewählte Umform- und Fügeprozessketten von Prinzip- und Realbaugruppen

Die erste Strategie sieht einen Fall vor, bei welchem die Verteilungsfunktionen der jeweiligen Prozess- und Werkstoffparameter in jedem Prozess stochastisch mit berücksichtigt werden. In Abhängigkeit von der Anzahl

an Einzelteilen ist im Umformprozess für jedes Einzelbauteil eine Robustheitsanalyse durchzuführen. Die Schwankungsergebnisse der Ausgabe-Größen sind in dem nächsten Schritt der Prozesskette zu verwenden. Am Ende wird nach dem Durchlaufen der Stufen die resultierende Schwankung der Zielgröße analysiert. In der Forschungsarbeit wird dies anhand der Prinzipbaugruppe S-Rail in Abschnitt 7.1 aufgezeigt, da die Anzahl der Einzelteile des Zusammenbaus S-Rail eine hohe Iterationsanzahl zulässt. Strategie 2 hat alternativ mit der Nutzung von Szenario-Analysen die Absicht, die Bandbreite an Formabweichungen jedes Prozessschrittes zu quantifizieren. Es werden Extremwertlagen in positiver (Extremlage 1) und negativer (Extremlage 2) Normalenrichtung zu den Sollelementen ermittelt. Insbesondere für maßbestimmende Einzelteile gilt es, die Extremlagenanalyse durchzuführen, da bei Formabweichungen zu den Sollgeometrien die größten Einflüsse auf das ZB-Ergebnis und nachfolgender Füge- und Montageschritte zu erwarten sind. Weiterhin ist eine Verknüpfung der Strategie 1 und 2 denkbar. Realisiert wird diese Kombination an der Karosseriebaugruppe Motorhaube in den Auswertungen von Abschnitt 7.2.

7.1 Methodik zur Bestimmung einer Grenzblechdicke und Ableitungen für die einzelnen Prozesse

Validierte Simulationsprozessketten haben bei der Auswertung statistischer Analysen und Ableitung von Handlungsempfehlungen für reale Versuchsbauteile eine höhere Aussagekraft. Daher wird zur simulativen Bestimmung des Prozessfensters von Einzelteilblechdicken eine validierte Prozesskette verwendet. Die Versuche beim Zusammenbau S-Rail haben bei differierenden Außenteil-/Innenteilblechdicken sehr hohe Übereinstimmungen. Weiterhin ist es bei der Prozessfensteranalyse möglich, die Erkenntnisse aus den singulären Prozess- und Werkstoffuntersuchungen bei der Auswahl der schwankenden Inputfaktoren mit einzubeziehen.

Aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalysen wurden als wichtige Faktoren die Blechdicke und die Geometrieformen von prinzipiellen Umform- und Fügeprozessketten identifiziert. Bild 113 demonstriert einen Ansatz zur Festlegung von Prozessgrenzen für die Blechdicken von Einzelbauteilen, basierend auf dem Maßhaltigkeitsergebnis der stochastischen Analyse einer Umform- und Fügeprozesskette.

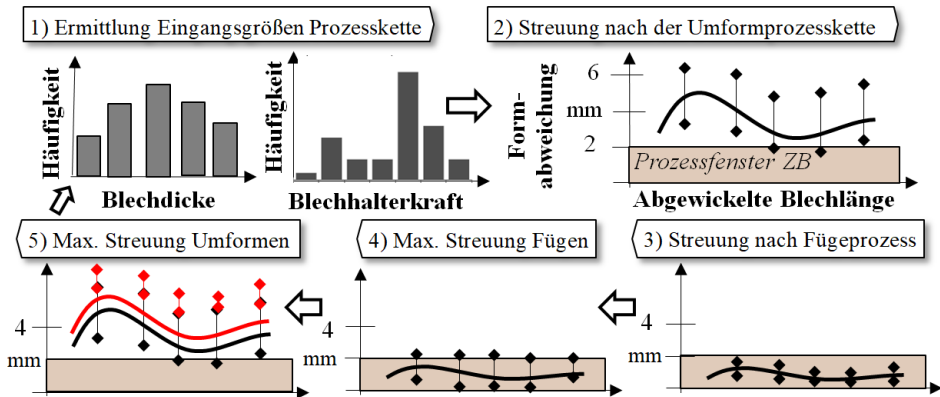


Bild 113: Methodische Schritte zur Bestimmung der maximal möglichen Bereiche der Einzelblechdicken eines Zusammenbaus in Hinblick auf vorgegebene Formtoleranzen

Zur Einordnung der Formhaltigkeit von Einzelbauteilen und Baugruppen werden – durch das originäre Toleranzkonzept vorgegebene – Form- und Lagetoleranzen als Prozessgrenzen geprüft. Nach [77] werden bei Automobilherstellern Flächen ohne Funktion, Anschluss- und Funktionsflächen und Sichtflächen (Außenhaut) mit erhöhten Qualitätsanforderungen symmetrisch zwischen $\pm 1,5$ und $\pm 0,5$ mm toleriert. Unter Berücksichtigung einer Simulationsgenauigkeit nach der Prozesskette Umformen-Laserbeschnitt-Fügen von $0,5$ mm zum Experiment wird die Eingriffsgrenze durch einen zusätzlichen Sicherheitsfaktor zu den $\pm 1,5$ mm (insgesamt: $1,0$ bis $2,0$ mm) exemplarisch für den Zusammenbau S-Rail definiert.

Der mehrstufige Prozess sieht eine Untersuchung der experimentellen/simulativen Streuungen der Formabweichung nach dem Umformen (Schritt 2) sowie nach dem Fügen (Schritt 3) vor. Mit diesen Erkenntnissen werden unter Berücksichtigung des Toleranzbandes die Bauteilbereiche ermittelt, bei welchen die Formabweichung (Basis: Blechdickenschwankung) nach dem Gesamtprozess stärker oder schwächer streuen darf (Schritt 4). Mit den ermittelten zulässigen prozentualen Werten sieht die Vorgehensweise eine Rückrechnung auf die erlaubte maximale Formabweichung zur Sollgeometrie nach dem Umformen vor (Schritt 5). Anhand der Ergebnisse der stochastischen Analyse wird die neue zulässige Formabweichung nach dem Umformen der ursächlichen Blechdickenschwankung zugeordnet. Simulationen mit der oberen und unteren Eingriffsgrenze für die Blechdicke runden die Methode ab.

Für das Beispiel der Prinzipbaugruppe S-Rail werden die ersten drei Schritte der Analysemethode realisiert und das Ergebnis in Bild 114

aufgeführt. Dargestellt sind die punktuellen Formabweichungen an den Außenteil-Bauteilflanschen mit der Sollblechdicke von 1,0 mm. Für die stochastischen Analysen ist die Blechdickenverteilung im Schritt 1 hinterlegt.

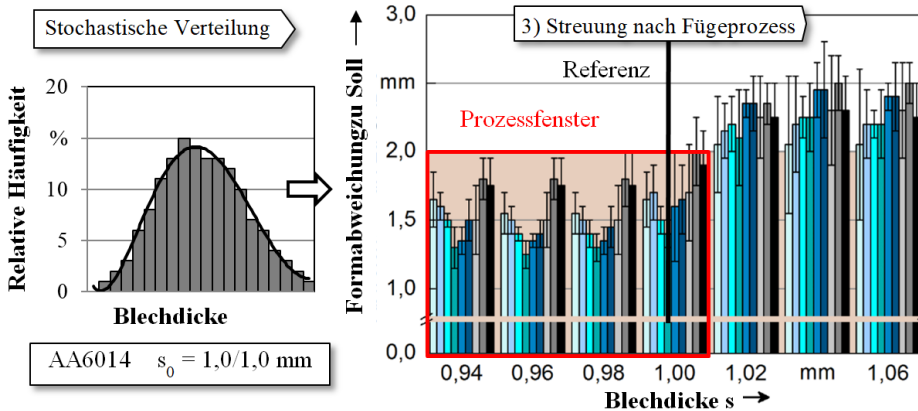


Bild 114: Prozessfensterermittlung der zulässigen Schwankung der Außenteilblechdicke eines geclinchten ZB S-Rail anhand des Werkstoffes AA6014 und der Blechdicke 1,0 mm

Die Variation der Blechdicke s führt innerhalb ihrer Spezifikationsgrenzen 0,94 und 1,06 mm an der Mehrzahl der Auswertepunkte zu einem signifikanten Anstieg der Formabweichungen ab einer Grenzblechdicke von 1,01 mm. Auf Basis dieses Resultats und der definierten Eingriffsgrenze ab einer Formabweichung von ± 2 mm zum Soll wird ein Prozessfenster für die Außenteilblechdicke abgeleitet. Gemäß Schritt 3 der Methodik wird die maximal zulässige Prozessstreuung der Blechdicke bestimmt. Als Handlungsempfehlung ist in diesem Fall eine Schwankung des Ausgangswerkstoffes zwischen 0,94 und 1,01 mm zuzulassen, um keine Formabweichungen oberhalb der Eingriffsgrenzen zu produzieren.

7.2 Methodik zur Bestimmung einer Grenzblechdicke und Ableitungen für die einzelnen Prozesse

Als Alternative zu der durchgängig stochastischen Analyse von Umform- und Fügeprozessketten sieht der zweite Ansatz vorwiegend Szenarioanalysen mit einer partiellen Verwendung von stochastischen Teilprozessanalysen vor. Bei dieser Vorgehensweise werden die Wahrscheinlichkeiten schwankender Eingangsgrößen der Prozesse nur teilweise berücksichtigt. Bei dem mehrstufigen Prozess werden die Schwankungsbreiten jedes einzelnen Fertigungsschrittes gemäß Bild 115 bestimmt. Die grundlegende Idee ist es, eine möglichst genaue Abbildung des Schwankungsverhaltens

(Kriterium: Rückfederung) der umgeformten Einzelteile die Formabweichungen nachfolgender Fügeschritte vorherzusagen. Jeder Einzelprozess ist Fertigungsschwankungen unterlegen, welche in die Simulationen zu integrieren sind.

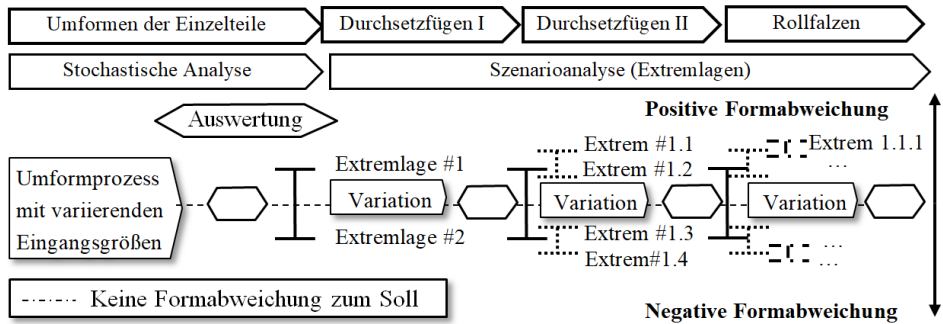


Bild 115: Durchgeführte Schritte zur Bestimmung der Schwankungsbreite der Rückfederung nach den einzelnen Fertigungsschritten einer Karosseriebaugruppe Motorhaube

Die beispielhaft analysierte Prozesskette der Karosseriebaugruppe Motorhaube besteht aus den Teilschritten: Umformen - Durchsetzfügen des Vorderzusammenbaus - Clinchprozess Zusammenbau Innen und einem Rollfalzprozess für den formschlüssigen Verbund des Innenzusammenbaus und der Beplankung. Die Komponentenbenennungen, Werkstoffe sowie die Fügefolge der Einzelteile der untersuchten Motorhaube sind in Bild 116 visualisiert.

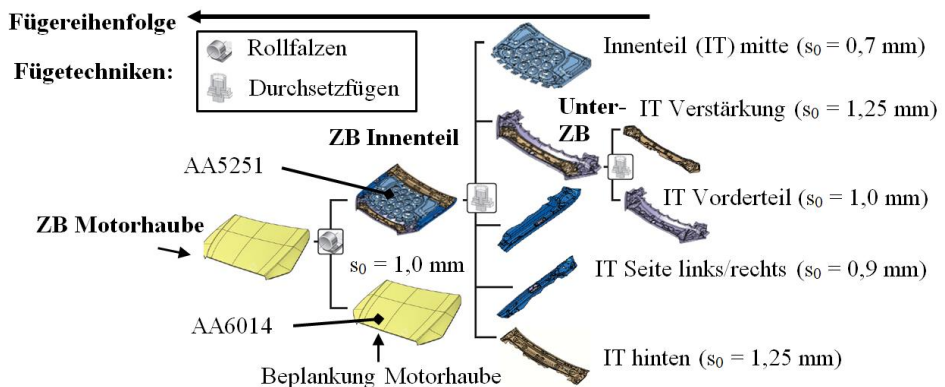


Bild 116: Vereinfachte Fügefolge der Einzelbauteile aus dem Presswerk zum ZB Motorhaube

In Analogie zu den Prinzipversuchen besteht der gefügte Zusammenbau Innen aus dem Werkstoff AA5251 und das Außen(haut)bauteil der Beplankung aus dem Werkstoff AA6014. Die Forschungsarbeit umfasst

die stochastischen Umformsimulationen der Innenteile Verstärkung, Vorderteil und der beiden als symmetrisch angenommen Innenteile links und rechts in Kapitel 5. Die Auswahl dieser Einzelteile beruht auf zwei Kriterien: Auswirkung der Einzelteilmaßhaltigkeit auf das Fügeergebnis und Angrenzung von Funktionsflächen zu benachbarten Baugruppen. Für die Innenteile Vorderteil, Verstärkung und Seite werden gemäß Abschnitt 5.5.2 stochastische Umformsimulationen mit den Schwankungen der Eingangsgrößen realisiert. Die Wertebereiche der für alle Umformsimulationen simulären Prozess- und Werkstoffparameter sind in Tabelle 31 aufgeführt und in AutoForm® Sigma realisiert.

Tabelle 31: Nominalwerte und Variationsbereiche der Einflussgrößen für die drei Innenteile

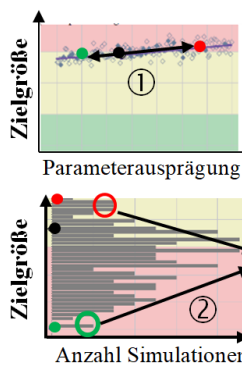
Bezeichnung Parameter	Nominal			Schwankungsbereich + Verteilung		
	Vorderteil	Verstärkung	Seite	Untergrenze	Obergrenze	
E-Modul	69500 MPa			- 4 %	+ 4 %	Normal- verteilung
Streckgrenze	73 MPa			- 18 %	+ 30 %	
Zugfestigkeit	189 MPa			- 18 %	+ 30 %	
Gem. Anisotropie	0,7			- 10 %	+ 10 %	
Platinenposition x/y	0			- 2 mm	+2 mm	
Blechhalterkraft	640 kN	800 kN	355 kN	- 10 %	+ 10 %	
Blechedicke	1,0 mm	1,25 mm	0,9 mm	- 5 %	0 %	

Im Gegensatz zu den Sensitivitätsanalysen orientieren sich die Wertebereiche und deren Verteilungsfunktionen primär an Versuchswerten aus den Voruntersuchungen, sowie sekundär an den Liefervorschriften und den damit verbundenen zulässigen Materialschwankungen. Aufgrund der großen Parametergrenzen sind die Ergebnisse dieses Ansatzes als konservativ einzuschätzen und führen tendenziell zu höheren Formabweichungen entlang der Prozesskette. Nach der Analyse jedes Prozessschrittes ist die Auswahl der Extremlagen für den nächsten Prozessschritt (Umformen-Clinchen-Rollfalzen) erforderlich (siehe Bild 115). Es werden zwei Beurteilungsformen der Simulationen genutzt. Bild 117 stellt die Auswerteschritte in der Simulationssoftware (a) oder in der optischen Messsoftware (b) zusammen.

Beide Beurteilungsmöglichkeiten weisen verschiedene Vorzüge auf und erlauben eine parallele Verfolgung mehrerer vereinbarter Ziele. Die Ergebnisauswertungen der Umformsimulationen in ihrer originären Softwareumgebung erlaubt eine Ursachen-Wirkungs-Analyse auf Basis erzeugter Spannungs- und Dehnungswerten, ohne weitere Tools zum Einsatz zu bringen. Genutzt wird es in dieser Vorgehensweise bei der Erklärung der Ursachen für die betragsmäßig größten Schwankungen der Formabweichung der Bauteilgeometrien.

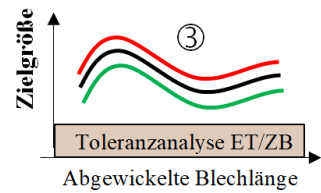
a) Simulationssoftware

1. Histogramme zur Sensitivitätsanalyse der Einflussfaktoren
2. Streuung der Abweichungen als Wertebereich (Scatterplot)



Auswahl
Extremlagen

b) Ergebnisvergleich mit gleichem Ausrichtekonzept



3. Beurteilung Szenario 1-3

Bild 117: Beurteilungsmöglichkeiten der Formabweichungen zur Auswahl der Extremlagen

Das Bindeglied zwischen den beiden Beurteilungsmöglichkeiten stellt die Auswahl der Extremlagen anhand von Balkendiagrammen an den Punkten mit den betragsmäßig größten Abweichungen dar. Die Simulationsergebnisse mit den beiden betragsmäßig größten (positiven/negativen) Abweichungen werden anhand eines konsistenten Messkonzeptes nach jedem Prozessschritt reproduzierbar ausgerichtet. Die Auswahl der Ergebnisse von zwei Simulationen (Extremlagen I und II) unterliegt der Annahme, dass der Bereich mit dem globalen Abweichungsminimum/-maximum repräsentativ für die Abweichung des in diesem Fall zur x-Achse symmetrischen Bauteilverhaltens ist. Bei den Innenteilen sind jeweils zwei Bauteilbereiche (Details A bis D in Bild 118) mit signifikanten Formschwankungen zu erkennen. Beim Seitenteil haben die Bereiche C und D ein in gleicher Normalenrichtung abweichendes Rückfederungsverhalten, während die Normalenabweichungen in den Bereichen A und B bei den stochastischen Analysen gegenläufig (positiv/negativ) verstärkt oder vermindert werden.

Darüber hinaus wird das folgende Kriterium hinsichtlich auszuwählender Toleranzmerkmale in dieser Forschungsarbeit festgelegt: Durchgängigkeit entlang der Prozesskette sowie Bedeutung für angrenzende Anbauteile (Spaltmaß und Übergang). Ausgeführt am Beispiel des Fertigungsprozesses der Motorhaube (siehe Bild 118) beinhaltet das Kriterium, dass die Fertigungsschritte Umformen- Durchsetzfügen-Rollfalzen einerseits einen gemeinsamen Auswerteschnitt haben. Andererseits ist dieser Auswerteschritt an der Motorhaubenaußenkante ein maßbestimmendes Qualitätsmerkmal für die Fuge zwischen Motorhaube und Kotflügel. Daher werden seitliche und vordere Motorhaubenaußenkanten im Offset von 5 mm ausgewertet.

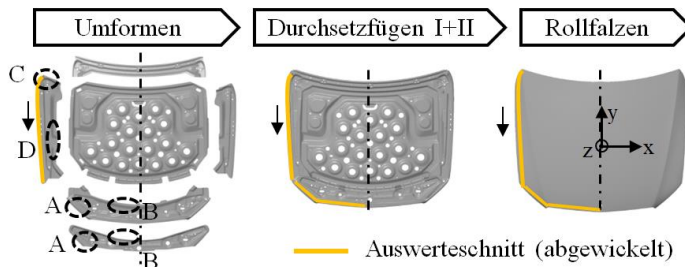


Bild 118: Festlegung des Auswertekriteriums für mehrere Stufen einer digitalen Prozesskette

Die Formabweichungen der hinteren Kante zum Windschutz werden nicht analysiert, da Untersuchungen zu den Struktursteifigkeiten der Innenteile Mitte und Hinten geringe Wechselwirkungen mit der Maßhaltigkeit des Innenzusammenbaus zeigen und dort keine Baugruppen angrenzen. Im Folgenden werden die Prozessschwankungen nach den Simulationsschritten Umformen-Clinchen-Rollfalzen analysiert, welche mit Messergebnissen validiert ist.

Ergebnisse der Schwankungsbreiten nach dem Umformprozess:

Zunächst werden die Simulationsergebnisse der Variantenrechnungen mit schwankenden Werkstoff- und Prozessgrößen aus Tabelle 31 erörtert. Anhand der dargelegten Vorgehensweise findet eine Auswahl aus den 150 Simulationen der beiden Extremlagen für die Einzelbauteile Verstärkung, Vorderteil und Seitenteil statt. Aus Symmetriegründen wird immer nur das Seitenteil rechts ausgewertet.

Die qualitativen sowie quantitativen Formabweichungen sind unter Visualisierung der Falschfarbenbilder anhand von Flächenvergleichen und Verläufen der abgewickelten Blechlänge der Formabweichung zum Soll in Bild 119 aufgeführt. Zudem werden die Ergebnisse mit ideal-maßhaltigen Einzelteilen als Bewertungsmaßstab des Gewichtskrafteinflusses zur Berechnung der Struktursteifigkeiten einbezogen.

Die qualitativen Formabweichungen der Einzelteileextremlagen zeigen in den Details C und D von Bild 119 Veränderungen auf Basis streuender Eingangswerte auf. Anhand der Analyse der quantitativen geometrischen Abweichung zur Sollgeometrie lässt sich erkennen, dass aufgrund der voroptimierten Berechnungsmethode verhältnismäßig kleine Abweichungen zur Extremlage I auftreten.

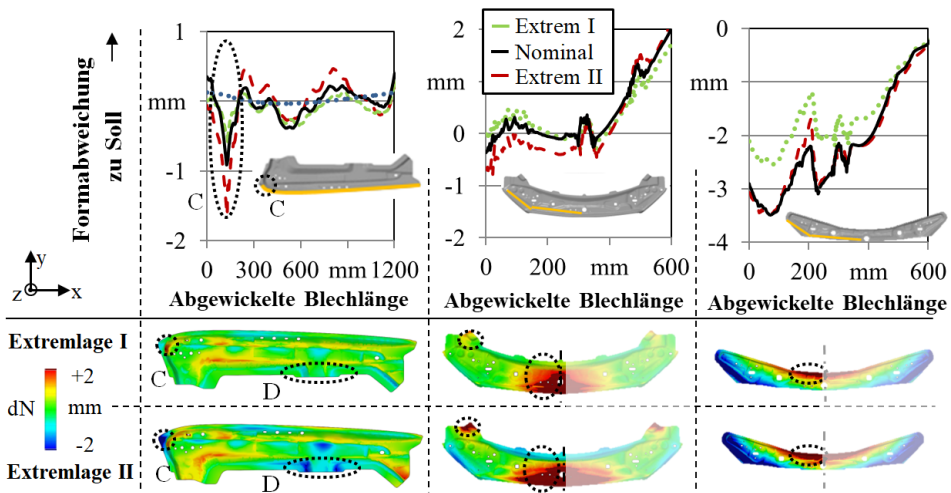


Bild 119: Formabweichungen der drei umgeformten Einzelteile Seite, Vorderteil und Verstärkung eines Motorhaubeninnenteils anhand von Extremlagenauswertungen

Die Extremlage II unterscheidet sich hingegen signifikant von dem Nominalfall und der Extremlage I durch verstärkte Effekte in den markierten Geometriebereichen. Die Gewichtskraft spielt bei dem Seitenteil mit einer maximalen Durchbiegung unter 0,1 mm keine Rolle. Die Parametersets zu den Extrema sind in Tabelle 32 aufgeführt.

Tabelle 32: Extremausprägungen I und II ausgewählter Einflussgrößen für drei Innenteile

Parameter (Extremlage I/II)	Seitenteil	Vorderteil	Verstärkung
Platinenposition x in mm	-1,3 / -1,6	0 / -2	0 / 0
Platinenposition y in mm	1,4 / 2	0 / -2	0 / 2
Blechdicke s_0 in %	0 / 0	-3 / -5	-5 / 0
Blechlagerkraft in %	0 / 5	0 / 10	10 / -10

Anhand dieser Vorgehensweise können Parameter und Einstellungen identifiziert werden, welche auf Basis der Parametergrenzen zu den Extremlagen für jedes Einzelbauteil führen. Die Kombinatorik aus vier ausgewählten Prozessgrößen unterscheidet sich für jede geometrische Form hinsichtlich ihrer Ausprägungen für die Extremfälle. Größe und Richtung der Wechselwirkungen ist für die vier Parameter nicht identisch.

In Kombination mit der qualitativen und quantitativen Abschätzung der Schwankungsbreite der stochastischen Analysen nach dem Umformprozess (siehe Bild 119) lassen sich Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Einzelbauteilqualität folgern. Demnach ist bei der Festlegung des Prozessfensters einzelner Parameter der Prozesse darauf zu achten, dass beispielsweise bei dem Vorderteil nur geringe negative Platinenver-

schiebung und geringfügig erhöhte Blechhalterkräfte vorliegen. Parallel dazu kann die Formhaltigkeit des maßbestimmenden Verstärkungsbauteils durch die Parametersets des Extremfalls I im äußeren Bereich des ausgewerteten Bauteilschnitts signifikant verbessert werden.

Ursächlich für die Geometrieabweichungen der Extremlagen des Einzelteils Verstärkung sind differierende Hauptspannungen nach dem Ziehvorgang. Diese werden durch Variationen der Fließorte oder Fließkurven erzielt, indem die Fließgrenze bei Extremfall II früher überschritten wird und der Anteil elastischer zu plastischer Verformung steigt. Verschiedene relative Blechsausdünnungen nach dem Ziehvorgang sind je nach Extremlage die Folge.

Ergebnisse der Schwankungsbreiten nach Durchsetzfügeprozessen:

Als zweiter Schritt wird der Effekt der Schwankungsbreite des Umformprozesses auf die Ergebnisse der Extremlagen nach den Durchsetzfügeprozessen erörtert. Aufgrund der Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten bei einem mehrteiligen Innenteil werden die im Rahmen dieser Forschungsarbeit genutzten Fügekombinationen eingeführt. Grundsätzlich stehen für die Kombinationen maßhaltige Einzelteile (CADO/Sollkonstruktion) und verschiedene nicht-maßhaltige (Nominal oder Extremlagen I/II) Einzelbauteile zur Verfügung.

Insgesamt werden für den ersten Fügeschritt des ZB Vorne der Motorhaube drei und für den zweiten Clinchprozess ZB Innenteil gesamt fünf Kombinationen realisiert (siehe Bild 120).

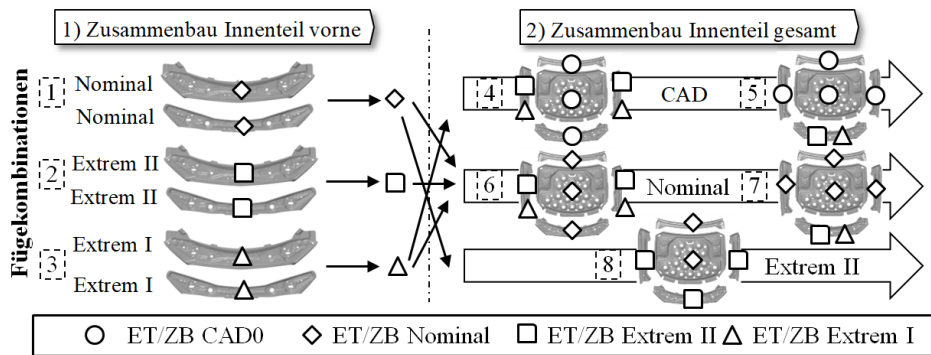


Bild 120: Einführung von Fügekombinationen (Extremlagen) für den Zusammenbau Innenteil

Beim Fügen mehrerer nicht-maßhaltiger Einzelteile zu einem Innenteil überlagern sich wechselwirkende geometrische Effekte. Daher werden je nach Fügeschritt und Fügekombination (siehe Bild 120) differierende

Zusammenstellungen mit unterschiedlichen Zielstellungen innerhalb des zweistufigen Clinchprozesses untersucht:

Clinchprozess 1 - Unter-Zusammenbau Innenteil vorne:

- Kombination 1: Fügésimulation (Referenz) mit nominalen Fügepartnern
- Kombination 2: Fügésimulation mit minimalen Schwankungsbreiten der Fügepartner
- Kombination 3: Fügésimulation mit maximalen Schwankungsbreiten der Fügepartner

Clinchprozess 2 - Zusammenbau Innenteil gesamt:

- Kombinationen 4 und 5: Identifikation der Wechselwirkungen nicht-maßhaltiger maßbestimmender Komponenten (Seite/ZB vorne) mit ideal maßhaltigen Fügepartnern
- Kombinationen 6 und 7: Identifikation der Wechselwirkungen nicht-maßhaltiger maßbestimmender Komponenten mit den nominellen Formabweichungen der Einzelteile
- Kombination 8: Identifikation der Schwankungsbreiten (Extremlagen I und II) nach dem Fügen auf Basis der Extremlagen von allen nicht-maßhaltigen Komponenten

Mit dieser gestuften Analysemöglichkeit ist es möglich, ein besseres Prozessverständnis zu ermitteln und die maßbestimmenden Innenteilkomponenten zu detektieren. In Abhängigkeit von der verfügbaren Rechenkapazität kann zudem der Aufwand für nachfolgende Berechnungsoperationen (Rollfalzen, Induktion, Montage, Crash) reduziert werden.

Die folgende Ausarbeitung beginnt bei den Kombinationen 1 bis 3 anhand des ersten Fügeprozesses zum Unter-Zusammenbau des Innenteils vorne.

Durchsetzfügeprozess I - Unter-ZB Innenteil vorne:

Für die Bestimmung der Schwankungsbreite nach dem Clinchen werden die Kombinationen 2 und 3 mit den Innenteilen Vorderteil und Verstärkung berechnet. Aus den Werkstoff- und Prozessuntersuchungen ist bekannt, dass der Spann- und Fügeprozess eine Kompensation des Rückfederungsverhaltens nach dem Umformen bewirkt. In Anlehnung an die Studie zu den Prozessschritten beim Clinchen ist aus Bild 121 der Effekt jedes Schrittes (Spannen - Fügen - Spanner öffnen) auf die Schwankung der Formabweichungen zu entnehmen.

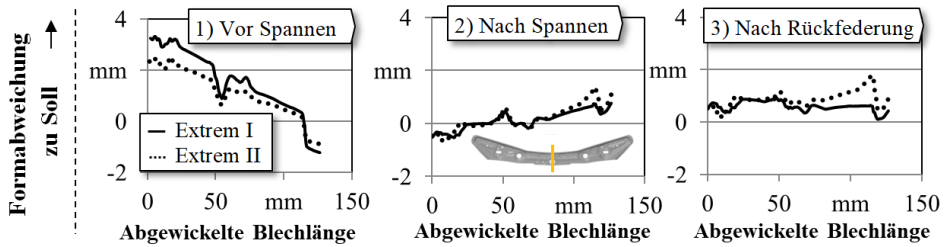


Bild 121: Geometrieschwankungen nach den Teilschritten des Clinchprozesses anhand des maßbestimmenden Verstärkungsbauteils eines Unter-ZBs (Querschnitt)

Das Spann- und Fixierkonzept sowie die Werkstoffwahl für den Zusammenbau vorne der Motorhaube sind Tabelle 23 und Bild 116 zu entnehmen. Die Auswertungen erfolgen in Bild 121 anhand des Bauteilquerschnittes der Innenteilverstärkung. Die Schwankungsbreite der beiden Extremlagen nach dem Umformen wird durch den Spannvorgang im arithmetischen Mittel erheblich reduziert und ähnlich in Anlage gebracht. Nach dem anschließenden Öffnen der Bauteilspanner vergrößert sich die Schwankungsbreite wieder. Das arithmetische Mittel der Schwankungen sinkt entlang der abgewickelten Blechlänge während des Fügens etwa um die Hälfte. Parallel dazu wird in Bild 122 der dazugehörige Längsschnitt bewertet.

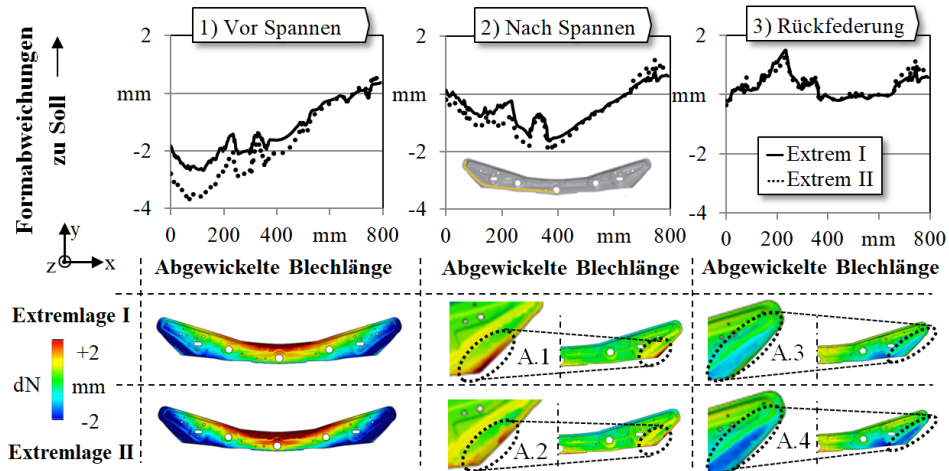


Bild 122: Geometrieschwankungen nach den Teilschritten des Clinchprozesses anhand des Verstärkungsbauteils eines Unter-ZBs (Längsschnitt und Falschfarbenbilder)

Gemäß den quantitativen Verläufen der geometrischen Formschwankungen entlang des symmetrischen Längsschnittes von Bild 122 ist anzumerken, dass die Schwankungsbreite in jedem Schritt der Fügeprozesskette verringert wird. Nach dem Rückfederungsschritt der gefügten Zusam-

menbauten sind beim Verstärkungsbauteil nur vergleichsweise geringe Formabweichungsunterschiede zwischen den Extremlagen I und II zu erkennen.

Zusammenfassend können in Abhängigkeit des geometrischen Bereiches die Schwankungsbereiche durch die Spann- und Fügeprozesse reduziert werden. Großflächige Bauteilbereiche, in welchen keine Spanner positioniert sind, differieren stärker in ihren Rückfederungsergebnissen (siehe Details A.1 bis A.4 in Bild 122). Die Resultate der Extremlagen für weitere Berechnungsschritte sind in Bild 123 dargestellt.

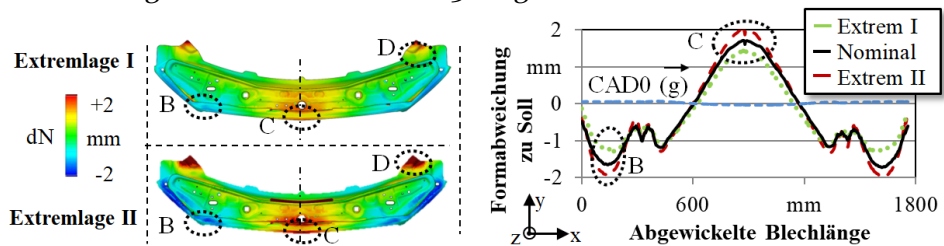


Bild 123: Extremlagen geclinchter Unterzusammenbauten einer Motorhaube (Längsschnitt)

Weitere Erkenntnisse aus den Varianten mit ideal-maßhaltigen Einzelteilen verdeutlichen, dass der Einfluss der Gewichtskraft auf Basis der Struktursteifigkeiten des ZB Vorne gering ist. Bei den Auswertungen der Flächenvergleiche zu den Sollgeometrien ist zu erkennen, dass vorwiegend in den zur x-Achse symmetrischen Bauteilbereichen B, C, D Streuungen der Formgestalt innerhalb der Schwankungsbreite zwischen den Extremlagen auftreten. Entlang eines definierten Längsschnittes an der Vorderkante sind die betragsmäßig größten geometrischen Abweichungen in den Bereichen B und C zu finden.

Durchsetzfügeprozess II - Zusammenbau Innenteil gesamt:

Für das aufbauende Vorgehen werden die Ergebnisse aus der Analyse der Schwankungsbreiten der Einzelbauteile Seite und des Innenteils vorne zunächst mit den ideal-maßhaltigen Einzelteilen von Bild 116 geclincht. Ziel ist es, die Wechselwirkung von nicht-maßhaltigen mit maßhaltigen Einzelteilen abzuschätzen, um diese nachfolgend sequentiell durch nominelle Umformsimulationen der Einzelteile zu ersetzen. Den Abschluss bildet Kombination 8 mit Innenteilen, welche die betragsmäßig größten Abweichungen zur Sollgeometrie hervorruft.

Bild 124 beinhaltet die Flächenvergleiche der geclinchten Baugruppen (Kombination 4) und die Veränderung der Normalenabweichung nach dem Fügen zu den Umformschwankungen der Seitenbauteile. Die absolu-

ten Änderungswerte von Bild 124 geben Aufschluss über die Schwankungsbreite der Formabweichungen nach der Umform- und Fügeprozesskette.

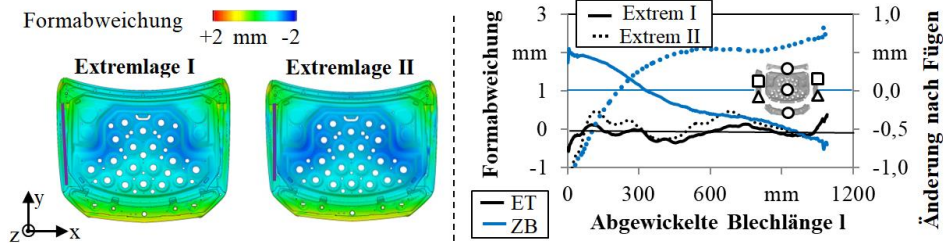


Bild 124: Einfluss der Extremlagen umgeformter Seitenbauteile beim ZB Innenteil (Kombination 4)

Die Ergebnisse der geclinchten Innenzusammenbauten berücksichtigen die Schwankung der Extremlagen für variierende Seitenbauteile. Die Änderungen der Normalenabweichungen zeigen in Bild 124 verschiedene Verläufe entlang der abgewinkelten Blechlänge l. In Bezugnahme auf das Höhenniveau des Extrems II ist im Bereich $l \leq 300$ mm eine positive und für höhere l-Werte eine negative Normalenabweichung zu sehen. Bei Extrem I ist es umgekehrt.

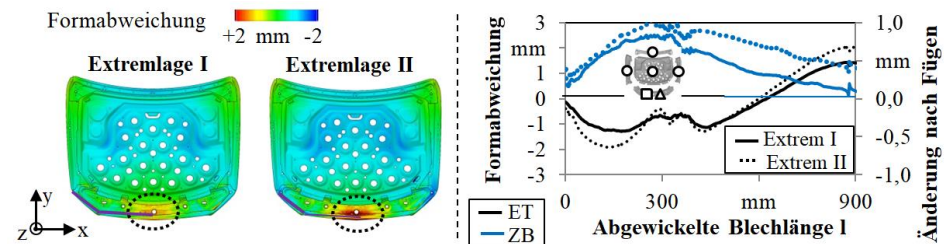


Bild 125: Einfluss der Extremlagen gefügter ZB vorne beim ZB Innenteil (Kombination 5)

Ergänzend dazu sind in Bild 125 die Verläufe der Normalenabweichungen für die Extremlagen des gefügten Vorderzusammenbaus und den mit ideal maßhaltigen Einzelbauteilen gefügten Zusammenbauten Innen abgebildet. Im Gegensatz zu den Extremlagen bei den Seitenbauteilen (Bild 124) haben die Vorderzusammenbauten höhere Formabweichungen zum Soll bis zu 2 mm. Für die beiden Extremlagen der Unterzusammenbauten verhalten sich die Änderungen der Normalenabweichungen kongruent. Positive Abweichungsänderungen im abgewinkelten Blechlängenbereich $l \leq 600$ mm führen zu Kompensationen der Formabweichungen bis zu 1 mm. Bei den Werten $l > 600$ mm induzieren positive Formänderungen bei den Einzelbauteilen höhere Maßabweichungen beim Zusam-

menbau. Des Weiteren ist erkennbar, dass nach dem Fügen die Schwankungsbreite entlang der Blechlänge tendenziell steigt.

Für die Abschätzung der Wechselwirkungen von Bauteilen werden nicht-maßhaltige IT an der Stelle von CAD-Daten in den Kombinationen 6 und 7 mit den Extremlagen umgeformter Seitenbauteile oder Unter-ZBs gefügt. Ein Vergleich zu den obigen Auswertungen mit ideal-maßhaltigen Innenteilen folgt. In Bild 126 werden die geometrischen Schwankungen als Falschfarbenbilder und Längsschnitte auf den Seitenteilen vor/nach dem Fügen ausgewertet.

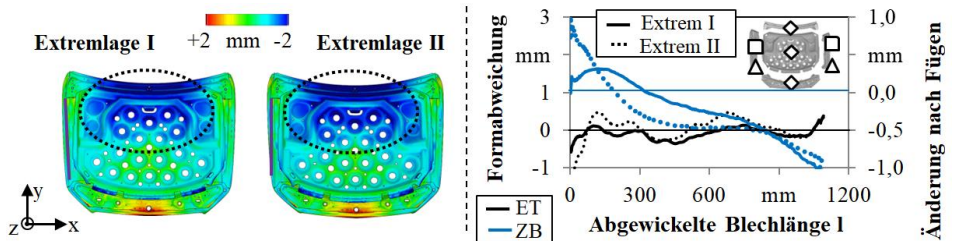


Bild 126: Einfluss der Extremlagen umgeformter Seitenbauteile mit Nominalsimulationen der Innenteile einer Motorhaube (Kombination 6)

Bei dem Vergleich der Ergebnisse nicht-maßhaltiger mit den maßhaltigen Innenteilen Mitte, hinten und Vorder-ZB sind keine nennenswerten Unterschiede bei der Beurteilung der abgewinkelten Blechlänge des Seitenteils zu sehen. Es kann somit schlussgefolgert werden, dass kaum Wechselwirkungen zwischen den geringfügig von der Sollgeometrie abweichenden Seitenbauteilen und den komplementären Innenteilen bestehen. Bei der Analyse ist ein globaler und signifikanter Einfluss der Nicht-Maßhaltigkeit in den Falschfarbenbildern anhand der markierten Bereiche zu sehen. Die Bauteildurchbiegung in negativer z-Richtung steigt.

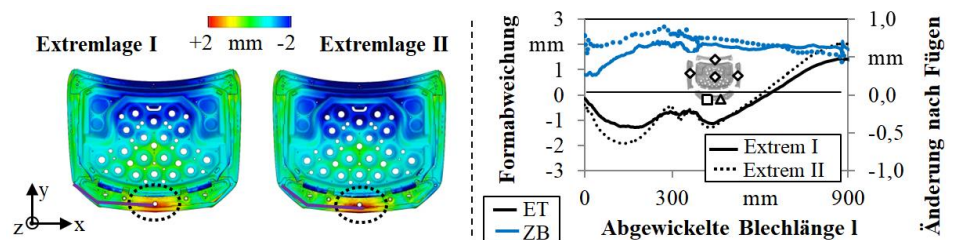


Bild 127: Einfluss der Extremlagen eines gefügten Unterzusammenbaus mit Nominalsimulationen der Innenteile einer Motorhaube (Kombination 7)

In einer weiteren Stufe wird der Einfluss von Extremlagen des Vorderzusammenbaus bei nicht-maßhaltigen Fügepartnern hinsichtlich resultierender Geometriestreuungen bei Simulationen abgeschätzt. Gemäß Bild 127 induzieren die Extremlagen des Vorderzusammenbaus höhere Formabweichungen als beim Durchsetzfügen mit einem maßhaltigen Innenteil. Die Normalenabweichung führt je nach Vorzeichen der Einzelbauteile zur Kompensation oder Verstärkung der Nicht-Maßhaltigkeit nach dem Fügen. Ein Erklärungsansatz ist die höhere Formabweichung des Unter-Zusammenbaus gegenüber den umgeformten Seitenteilen. Somit bleiben in vielen Fällen die prinzipiellen Kurvenverläufe der Formabweichungen der Einzelteile nach dem Fügen erhalten.

Neben den Kombinationen mit maßhaltigen (Strategie 1) und nicht-maßhaltigen Innenteilen (Strategie 2) werden in der dritten Strategie die maximalen/minimalen Schwankungsbreiten nach dem Fügen auf Basis der Extremlagen aller nicht-maßhaltigen Komponenten identifiziert. Die Studienergebnisse mit den Extrema II der Einzelteile sind in Bild 128 aufgeführt.

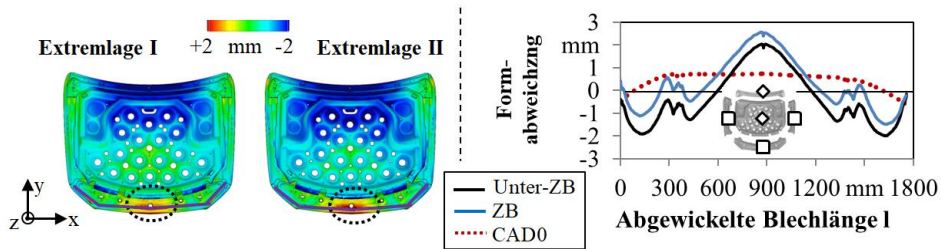


Bild 128: Ermittlung der maximalen Schwankungsbreiten gefügter Extremlagen II der maßbestimmenden ET (Kombination 8) im Vergleich zur CAD-Fügesimulation

Bei der Ausführung der Fügesimulation mit ideal-maßhaltigen Geometrien ist vergleichend zu erkennen, dass sich die Extremlage (Extrem II) des Unterzusammenbaus und die des ZB Innenteils dem Verlauf der CAD-Fügesimulationen ähneln. Mit dem Maximum im Bereich der Bauteilmitte (Mitte der abgewickelten Blechlänge l) ist die Normalenabweichung an den Bauteilrändern geringer. Das elastoplastische Werkstoffverhalten bewirkt eine Verstärkung der aus dem Umformprozess vorgegebenen Materialanhäufungen, basierend auf den geometrischen Merkmalen entlang der abgewickelten Blechlänge. Zudem führt der zweite Clinchprozess des Zusammenbaus Innenteil zu einer nahezu parallelen positiven Verschiebung der Normalenabweichung. Begründet wird dies durch die Form der Anschlussgeometrie des Innenteils und der Seitenteile links und rechts sowie durch ihre hohe Struktursteifigkeit.

Mit diesen letzten Ergebnissen wird im Folgenden anhand der Extremszenarien überprüft, wie groß der Einfluss schwankender Umform- und Clinchprozesse auf das Rollfalzergebnis ist.

Ergebnisse der Schwankungsbreiten nach dem Rollfalzprozess:

Beim Rollfalzprozess wird das in mehreren Produktionsstufen hergestellte ZB Innenteil mit einer Beplankung gefalzt. Anhand dieser Untersuchung soll ausgearbeitet werden, inwiefern sich verschiedene Extremlagen des ZB Innenteils auf die Formhaltigkeit des Innenteils nach dem Rollfalzen auswirken. Neben den qualitativen Falschfarbenbildern werden außerdem ausgewählte Bauteilschnitte der abgewickelten Blechlänge l in Bild 129 ausgewertet. Der für den Übergang und Spalt zu weiteren Anbaugruppen relevante Bauteilschnitt der Blechlänge l wird dazu vor und nach dem Rollfalzvorgang verglichen.

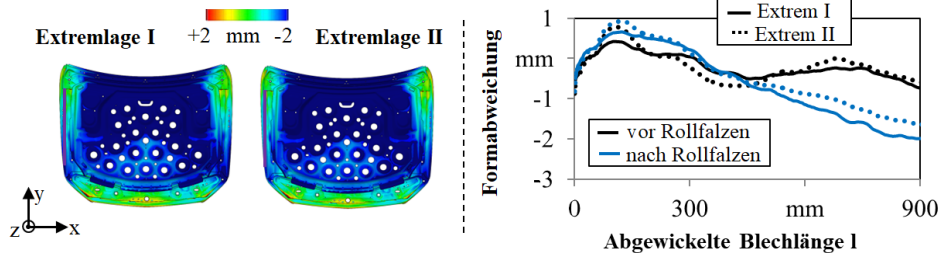


Bild 129: Schwankungsbreiten nach dem Rollfalzen mit ideal-maßhaltigen Bauteilen und den Extremlagen des ZB Innenteils

Bei der qualitativen Auswertung sind nur geringfügige globale Unterschiede zwischen den Extremlagen nach dem Rollfalzen auffällig. Gegenüber den Simulationen nach den Durchsetzfügeprozessen sind größere negative Normalenabweichungen speziell im hinteren und im mittigen Bauteilbereich des Innenteils zu erkennen.

Der quantitative Vergleich lässt noch weitere Schlüsse zu. So nimmt die prozentuale Schwankung zwischen Extrem I und II nach dem Rollfalzen ab $l \geq 500$ mm zu. Des Weiteren ist eine geringe Rotation des Kurvenverlaufes nach dem Rollfalzen zu interpretieren. Die positiven Normalenabweichungen sind für $l \leq 300$ mm nach dem Rollfalzen höher und die negativen Abweichungen zum Soll steigen signifikant ab $l \geq 500$ mm bis zum Wert -2 mm an.

Für eine finale Beurteilung der Rollfalzsimulationen der Motorhaubengruppe hinsichtlich ihrer Effekte an der Rohbaukarosserie werden die Wechselwirkungen mit benachbarten Baugruppen eingeordnet. Neben dem Spaltmaß wird weiterhin der Übergang von Fugen in einem

virtuellen Zusammenbau analysiert. Als Beispiel wird die Fuge zwischen dem Kotflügel und der Motorhaube inspiziert. Bild 130 zeigt auf der linken Seite den Übergang zwischen den Anbaugruppen Kotflügel und Motorhaube sowie in der rechten Abbildung das resultierende Spaltmaß zwischen den beiden Anbaugruppen.

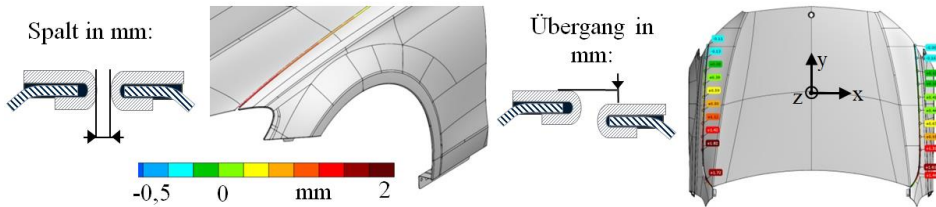


Bild 130: Auswirkungen der Extremlagen auf das Fugenmaß zwischen Motorhaube und Kotflügel anhand eines ausgewählten Toleranzmerkmals und des Extremszenarios I

Auf Basis des Prozessverhaltens der Rollfalzsimulation verdeutlicht sich deren Auswirkung auf das Spaltmaß, ohne dass eine in der Realität folgende robotergeführte Best-Fit-Ausrichtung durchgeführt wird. Mit den Schwankungsbreiten jedes Fertigungsschrittes wird nun ein verallgemeinertes Vorgehen zur Analyse vorgegebener Einzelteil-/ZB-Toleranzen oder alternativ zur Erarbeitung von Toleranzvorschlägen auf Basis von FE-Simulationen erarbeitet.

7.3 Toleranzanalyse zur Analyse der Wechselwirkung mehrerer nicht-maßhaltiger Einzelteile

Die Idee des folgenden Konzeptes ist es, vorhandene Prozesskettensimulationen zu nutzen, um mit ihren Extremlagen vorgegebene Toleranzen zu beurteilen. Die Extremlagen bilden die Grenzen zulässiger Schwankungen des Gesamtprozesses. Mit einer Toleranzanalyse auf Basis von FE-Simulationen können so die realen Prozessschwankungen vorhergesagt werden.

Für die Anbaugruppe einer Motorhaube ist nach der Ermittlung der Schwankungsbreiten jedes Fertigungsschrittes die Basis für eine Toleranzanalyse geschaffen. In einer angeknüpften Auswertemethode zur Toleranzbeurteilung werden die Ergebnisse der Zusammenbauten mit den Einzelbauteilen Seite und des Unter-ZBs vorne verglichen. Die Vorgehensweise zur Beurteilung der Zusammenbau- und Einzelteiltoleranzen sieht folgende drei Schritte vor:

1. Festlegung der **Anzahl an Bauteilbereichen** mit Vorzeichenwechsel durch Segmentierung anhand Schnittstellen mit der x-Achse
2. Ermittlung der **betragsmäßig größten Abweichung** des Toleranzmerkmals in den einzelnen Bauteilbereichen für die Extremlagen des letzten Prozessschrittes
3. **Gegenüberstellung der Formabweichungen** jedes analysierten Schrittes einer durchgängigen Fertigungsprozesskette

Aufgezeigt wird die Methode zur Toleranzanalyse anhand der Profiltoleranzen des ZB Innenteils einer Motorhaube im Vergleich zu ihren vorherigen Prozessschritten (Einzelteile/Unter-ZB). Links im Bild 131 sind die ausgewerteten Bauteilbereiche mit den Extremlagen (Extrem I/Extrem II) und den maximalen Profilabweichungen dargestellt. Ergänzend finden sich rechts im Bild 131 die Profiländerung der zwei sequentiellen Clinchprozessschritte.

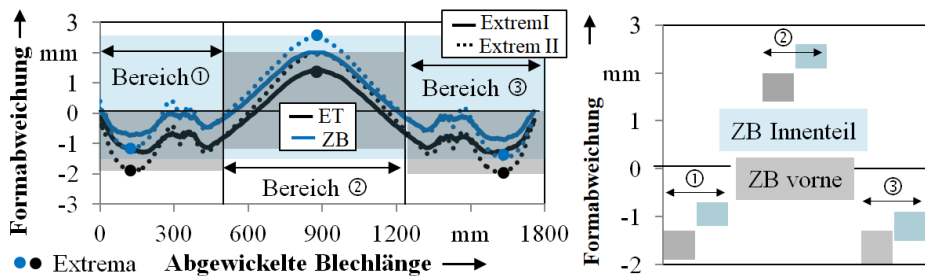


Bild 131: Ermittlung der arithmetisch gemittelten Profilabweichungen zwischen den Fertigungsstufen eines gefügten Innenteils und Unter-ZBs vorne einer Motorhaube

Auf Basis der zwei Schnittstellen mit der x-Achse ergeben sich drei Bauteilbereiche für eine segmentbasierte Toleranzanalyse. Nach der Ermittlung der Extrema in den drei Bauteilbereichen ist einerseits festzustellen, dass tendenziell die Schwankungsbreiten der Extrema nach dem Fügeprozess gegenüber dem Umformprozess abnehmen. Andererseits gibt es Bauteilbereiche, bei welchen der Fügeprozess zur Reduzierung (① und ③) oder zur Erhöhung (②) der betragsmäßigen Formabweichung zur Sollgeometrie führt. Damit einhergehend können größere oder kleinere Toleranzen der Unterzusammenbauten gewählt werden.

Beim rückwärtigen Vergleich des Unterzusammenbaus zu dem umgeformten maßbestimmenden Einzelbauteil wird die Auswirkung der Prozessschwankungen in Bild 132 analysiert. Dazu wird der in Bild 132 visualisierte Messquerschnitt der abgewinkelten Blechlänge l genutzt.

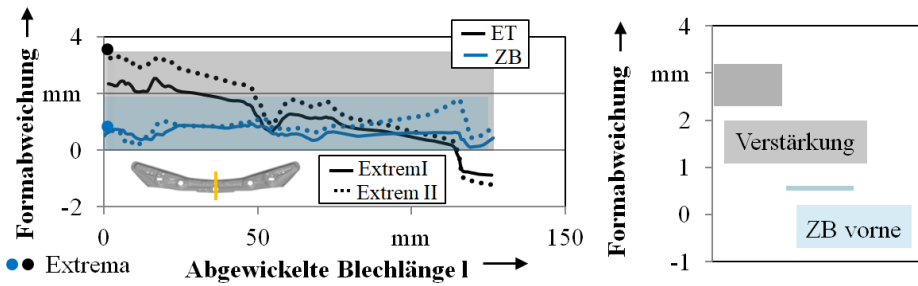


Bild 132: Ermittlung der Änderung von Profilabweichungen zwischen den Fertigungsstufen eines Unter-ZB vorne und dem Einzelteil Verstärkung einer Motorhaube

Es zeigt sich, dass die Rückfederung des umgeformten Einzelbauteils durch den Fügevorgang um etwa das Vierfache in den vorherigen Extremstellen kompensiert wird. Dementsprechend können die Einzeltoleranzen im Bereich 1 um den Faktor 1,8 größer als die Zusammenbautoleranzen gewählt werden. Ähnlich wie bei dem nachgelagerten Fügeschritt zum Zusammenbau Vorne, werden die Prozessschwankungen durch den Clinchprozess reduziert. Für einen höheren Detaillierungsgrad können analog der Umform- und Fügeprozesskette des S-Rails die Schwankungen des Fügeprozesses mit in die stochastischen Analysen integriert werden. Neben dem Unter-Zusammenbau der Motorhaube wird in Bild 133 das Zusammenspiel zwischen dem ZB Innenteil und dem maßbestimmenden Einzelteil Seite erörtert.

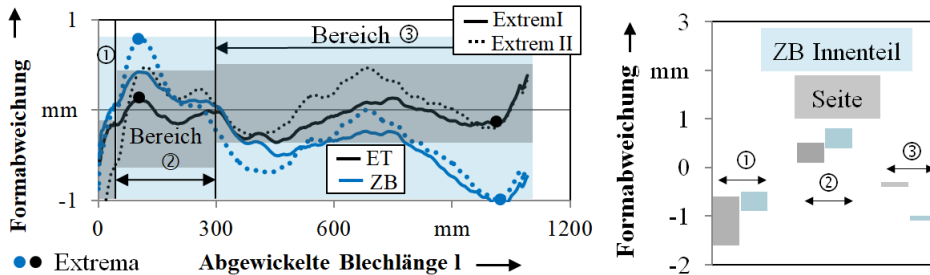


Bild 133: Ermittlung der arithmetisch gemittelten Profilabweichungen zwischen den Fertigungsstufen des gefügten ZB Innenteils und dem Seitenteil einer Motorhaube

Gemäß den Formabweichungen entlang der abgewickelten Blechlänge sind für die Einhaltung der vorgegebenen Zusammenbautoleranzen die Formabweichungen des Einzelteils in den drei verschiedenen Bereichen unterschiedlich zu limitieren. Während in den Bereichen ② und ③ die Einzeltoleranzen enger zu fassen sind als nach dem Zusammenbau, erlaubt das Ergebnis der Szenarioanalyse eine größere Einzeltoleranz im Bauteilbereich ①.

Der Toleranzvergabe sind sechs Schritte vorgelagert, um die zulässigen Schwankungsbreiten nach jedem Schritt des Herstellungsprozesses einer beliebigen Karosseriebaugruppe zu bestimmen. Ziel ist es, vorherzusagen, ob die Baugruppe innerhalb den Toleranzgrenzen herstellbar ist und welche Einzelteiltoleranzen auf Basis von Zusammenbautoleranzen zulässig sind. Generell lassen sich bei der Durchführung von Toleranzanalysen auf Basis von FE-Simulationen gemäß Bild 134 zwei Fälle in Abhängigkeit definierter Toleranzbänder unterscheiden.

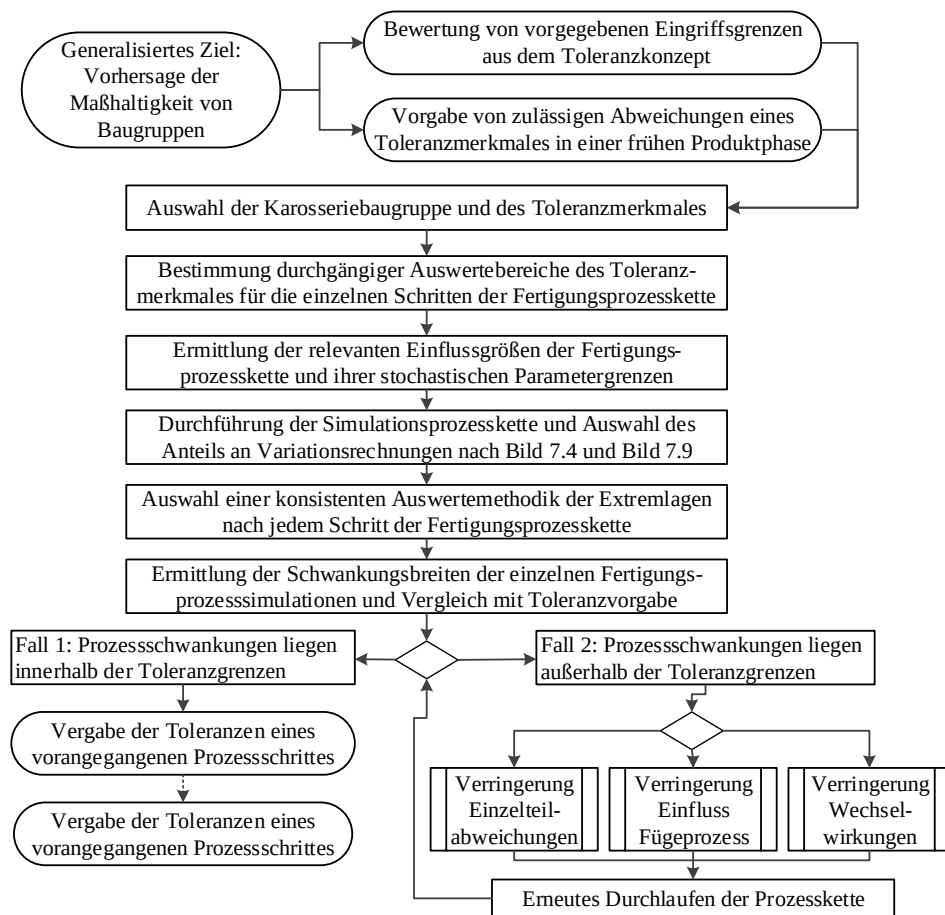


Bild 134: Methodik zur Toleranzanalyse der Fertigungsprozesskette einer Karosseriebaugruppe

Je nach Reifegrad der Karosseriebaugruppe können vorgegebene Toleranzen bewertet oder auf Basis der FE-Simulationen zulässige ZB- und Einzelteiltoleranzen definiert werden. Für beide Varianten ist ein mehrstufiger Auswahlprozess zu durchlaufen. In einem **ersten Schritt** wird

die Karosseriebaugruppe, in diesem Fall die Motorhaube, selektiert und die Analysegrenze des Herstellungsprozesses entlang der Gewerke festgelegt. Des Weiteren gilt es, ein in Abhängigkeit des final resultierenden Spaltmaßes (hier: Spalt und Übergang zwischen Motorhaube/Kotflügel) valides Toleranzmerkmal auszuwählen.

Neben der Art des Toleranzmerkmals, exemplarisch der Profiltoleranz, wird in einem **zweiten Schritt** der Ort mit beispielsweise einem offsetierten Bauteilteilschnitt der seitlichen Außenkante der Motorhaube beschränkt. Wichtig ist, dass dieser Ort der Außenkante in jedem Prozessschritt (Umformen-Fügen-Rollfalzen) identisch lokalisiert und bestimmbar ist.

Mit dem Ziel, die Prozessschwankungen prognostizieren zu können, erhält die Güte an Informationen von schwankenden Einflussgrößen eine hohe Bedeutung. In dem **dritten Schritt** gilt es daher, verfügbare Kenntnisse zu schwankenden Einflussgrößen in Abhängigkeit von den geometrischen und werkstofftechnischen Gegebenheiten zu implementieren. Fehlende Informationen mit Relevanz auf die zu untersuchende Ergebnisgröße, z.B. der Rückfederung, sind experimentell zu bestimmen.

Die Festlegung der anschließenden Variantenvielfalt in Abhängigkeit der Komplexität der Baugruppe bildet den **vierten Schritt**. Bei Baugruppen mit wenigen Einzelteilen und Fertigungsstufen kann auf eine durchgängige stochastische Prozesskette idealerweise in einem einheitlichen FE-Code zurückgegriffen werden. Bei komplexeren Baugruppen erscheint ein Mix aus stochastischen Umformanalysen und Szenarioanalysen in den Fügeprozessen zielführender.

In den Schritten **fünf und sechs** werden die Schwankungsbreiten entlang der Fertigungsprozesskette mit einer konsistenten Methode ermittelt und mittels definierter Toleranzen bewertet. Nach diesen Schritten ist zu entscheiden, ob die Schwankungen nach der Fertigung der kompletten Baugruppe bereits innerhalb der Toleranzgrenzen (Fall 1) sind oder noch Optimierungsbedarf (Fall 2) besteht. In Fall 2 können drei Maßnahmen mit Hilfe der Erkenntnisse dieser Forschungsarbeit eingeleitet werden:

- Verringerung der Einzelteilabweichungen durch Optimierung des Umformprozesses
- Reduzierung der Formabweichungen nach dem Fügen durch ein verbessertes Spann- und Fixierkonzept oder durch eine Änderung des Werkstoffkonzeptes
- Kompensationsmaßnahmen unter Berücksichtigung der Prozesswechselwirkungen

Nach einem erneuten Durchlaufen der notwendigen Prozessschritte und dem Einhalten der ZB-Toleranzen nach der digitalen Fertigungsprozesse (Fall 1) können Einzelbauteiltoleranzen für vorherige Prozessschritte definiert werden. Wiederholt werden kann dieses letzte Prozedere bis hin zum ersten Fertigungsschritt der Prozesskette, was in diesem Fall das Einzelbauteil ist.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Zielsetzung der vorliegenden Forschungsarbeit war einerseits die Ausarbeitung, welche Einstellungen von punktförmigen Fügeprozessschritten relevant für die Maßhaltigkeit gefügter Baugruppen sind und wie diese idealerweise auszulegen sind. Andererseits zielte die Arbeit auf die Erarbeitung einer Methodik zur Analyse der schwankenden Einflussgrößen auf die Formhaltigkeit umgeformter und gefügter Zusammenbauten ab. Die Bearbeitung dieser Zielsetzung sah in einer ersten Stufe den Aufbau einer durchgängigen Simulationsprozesskette und eine anschließende Zerlegung des Umform- und Fügeprozesses in ihre jeweiligen Einzelprozessketten vor.

Bei der Untersuchung des Umformprozesses wurden für Einzelbauteile aus dem Presswerk die Auswirkungen unterschiedlicher Werkstoff-, Prozess- und Geometrieparameter geprüft. Die Ermittlung der grundlegenden Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge wurde an prinzipiellen Baugruppen verschiedenster Struktursteifigkeiten realisiert. Bei den singulären Untersuchungen zeigten sich Rückfederungsunterschiede in Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls und der Blechdicke. Anhand von Experimenten und Simulationen konnten für charakteristische Geometrieformen (Krümmungen und Wölbungen) die Wechselwirkungen mit den Werkstoffeigenschaften hinsichtlich der Maßhaltigkeit der Einzelteile aufgezeigt werden. Die geschaffene Datenbasis dient zur Vorhersage der erzeugten Struktursteifigkeit für reale Karosseriebaugruppen in Abhängigkeit der Flächenträgheitsmomente (Geometrie, Werkstoffeigenschaften). Zur Quantifizierung der Effekte einzelner Studienergebnisse auf die Bauteilrückfederung wurden zwei oder drei Ausprägungen in einem Netzdiagramm gegenübergestellt.

Im zweiten Teil der analysierten Fertigungsprozesskette – dem Fügeprozess – wurden bei identischen Einzelbauteilen relevante Einflussfaktoren der punktförmigen Fügeeinzelprozessschritte diskutiert. Der Fokus lag auf dem mechanischen, punktförmigen Durchsetzfügeverfahren mit ausgewählten Studien im Bereich der Fügeverfahren Widerstandspunktschweißen und Remotelaserschweißen. Zur Durchführung der simulativen und experimentellen Studien wurde eine flexible Fügestation für die Prinzipbaugruppen S-Rail (-segmente) und H-Probe konzipiert und gefertigt. Als Ergebnisse konnten funktionale Zusammenhänge zwischen den geometrischen Formen des Einzelbauteils und der Bauteilkrümmung sowie der Ausprägung des Krümmungsradius aufgezeigt werden. In

Abhängigkeit vorliegender geometrischer Gegebenheiten wurden die dazugehörigen Kompensationsverhältnisse der Formhaltigkeit von Zusammenbauten im Verhältnis zu den Einzelteilen bestimmt.

Im Rahmen des Lösungskonzeptes zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde für die Übertragbarkeit allgemeiner Erkenntnisse eine Steigerung der Komplexität des Zusammenbauprozesses vollzogen. Beginnend mit einem nicht-maßhaltigen Einzelteil des ZB S-Rail ist der Zusammenbau H-Probe mit zwei nicht-maßhaltigen Einzelteilen die Vorstufe einer mehrteiligen Karosseriebaugruppe. Des Weiteren bot die Verwendung mehrerer Prinzipgeometrien die Möglichkeit, den Einfluss der Struktursteifigkeiten in Abhängigkeit der Fügestationseinstellungen auszulegen. Relevante Parameter einer Fügestation wurden in einem zweiteiligen Prozess erörtert. Zunächst wurden nur die Fügestationseinstellungen variiert. Die Erkenntnisse der anschließenden zweiten Stufe mit singulären Werkstoff- und Geometriestudien wurden qualitativ und quantitativ bewertet. So konnten die Vorzüge eines hinsichtlich der Spann- und Fügepositionen sequentiell optimierten Fixierkonzeptes und die Änderung des Werkstoffkonzeptes bei nicht-maßhaltigen Einzelbauteilen im Vergleich zum Referenzversuch demonstriert werden.

Geometrische Einzelteiländerungen mit veränderten Überbiegungsmaßen (Krümmungsradius) belegten ihren signifikanten Einfluss auf die Maßhaltigkeit gefügter Baugruppen und generierten Potentiale zur gezielten Modifikation maßbestimmender Einzelbauteile. Zudem war es anhand der weiterentwickelten Fügeersatzmodelle für die Fügeverfahren Widerstandspunktschweißen und Robscan möglich, die Auswirkung variierender Fügeverfahren bei dem gleichen Spann- und Fixierkonzept auf die Formhaltigkeit gefügter Baugruppen zu erörtern. Verfahrensspezifische Spezifika, wie die Schweißnahtform, sind als Folge des erweiterten Fügeersatzmodells darüber hinaus darstellbar.

Bei der Komplexitätssteigerung einer Baugruppe mit zwei oder mehreren nicht-maßhaltigen Einzelkomponenten wurden geometrische Wechselwirkungen erkannt. Der modulare Austausch von Einzelteilen ermöglicht eine Vorhersage, ob die Abweichung des Einzelbauteils maßbestimmend für den Zusammenbau ist. Anhand der Forschungsergebnisse mit H-Proben wird deutlich, dass sich mit optisch vermessenen oder idealisierten Einzelteilgeometrien Strategien zur Kompensation der ZB-Rückfederung ermittelt lassen. Mit idealisierten Vereinfachungen von Einzelteilen wurden Prozessfenster für den geometrischen Zargenwinkel in Abhängigkeit der Prozess- und Werkstoffparameter (je zwei Faktorkombinationen)

erarbeitet. Im Vergleich zum ermittelten Kompensationsmaß war der Genauigkeitsverlust in einem vertretbar geringen Umfang.

Auf Basis dieser für die Methodik maßgeblichen Voruntersuchungen wurde eine standardisierte Vorgehensweise zur Analyse des Einflusses der Einzelbauteile auf die Maßhaltigkeit gefügter Baugruppen entwickelt. Für diesen Zweck wurde die Simulationsprozesskette, beginnend mit den Rohplatten und genutzten Umformwerkzeugen bis hin zur Rückfederung des Zusammenbaus in LS-DYNA® implementiert. Sensitivitätsanalysen stellten im Gegensatz zu den singulären Werkstoffuntersuchungen eine Option dar, um die Wechselwirkungen von Einflussgrößen innerhalb und außerhalb der durchgängigen Simulationsprozesskettenschritte beurteilen zu können. Beitragsleistanalysen von Eingangsgrößen einzelner Prozessschritte visualisierten die dominierenden Faktoren auf den Einzelschritt. Darauf aufbauend wurden die Wechselwirkungen einer Umform- und Fügeprozesskette erörtert. Optimierungen der Spann- und Fixierkonzepte konnten für prinzipiellen und realen Karosseriebaugruppen auf Basis statistisch verteilter Eingangsgrößen des Prozesses realisiert werden.

In einem abschließenden Kapitel wurden die entwickelten Methoden angewandt, um mit Hilfe der Kombination aus stochastischen Analysen und Szenarioanalysen vorgegebene Prozessfenster in Form von Toleranzkriterien zu beurteilen. Alternativ wurde eine Abwandlung der Methode zur Bestimmung der Grenzblechstärken von Einzelbauteilen gefügter Zusammenbauten erfolgreich realisiert. Das zuletzt entwickelte Kochrezept zur Toleranzanalyse der Fertigungsprozesskette einer Karosseriebaugruppe ist unabhängig von der Art der Karosseriebaugruppe und der Anzahl an Einflussfaktoren. Durch die Berücksichtigung der Schwankungsbreiten von Ergebnisgrößen nach jedem Fertigungsschritt wurden Verhältnisse zwischen den Abweichungen zweier nachfolgender Prozessschritte quantifiziert. Ausgehend von Zusammenbautoleranzen lassen sich Fertigungstoleranzen oder -vorgaben für die maximal zulässigen Abweichungen bezüglich vorangegangener Schritte der Einzelteilerfertigungen ableiten und Toleranzketten bilden.

Veränderungen des Spann- und Fixierkonzeptes sind im Vergleich zu Werkzeugänderungen kostengünstiger. Aufgrund des Einsparpotentials wird das Thema in Zukunft ihre hohe Bedeutung behalten. Daher gilt es, den methodischen Ansatz auf die Faktoren weiterer Fügestationen auszuweiten. An dieser Stelle kann mit weiteren Forschungsarbeiten eruiert werden, inwiefern durch gezielte Einstellungen an flexiblen Falzstationen die Nicht-Maßhaltigkeit von Außenhautbauteilen hinsichtlich maßhalti-

ger Zusammenbauten beeinflusst wird. Gezielte Überbiegungsvorschriften der Falzunterlagen stellen einen Ansatzpunkt dar.

Des Weiteren zeigen innovative Ansätze auf Basis geometrischer CAD-Datensätze Potentiale zur Vorhersage der Maßabweichungen ohne Simulationen. Dazu wäre eine Ausweitung der Datenbasis für zusätzliche geometrische Formen erforderlich, um anhand einer Segmentierung und Zerlegung der Einzelbauteile in ihre Bestandteile die Nicht-Maßhaltigkeiten ihrer Zusammenbauten in einer frühen Produktphase abschätzen zu können. Mit den Ergebnissen aus dieser Forschungsarbeit können den geometrischen Segmenten Schwankungsbreiten aus einer Werkstoff- und Geometriedatenbank hinterlegt werden. Hinsichtlich der Toleranzgrenzen sind kritische Einzelteilbereiche zu identifizieren.

Für die weitere simulative Auslegung von Spannprozessen ist das bisher vorwiegend weggesteuerte Spannen durch ein kraftgesteuertes Spannen zu ersetzen und anhand von Experimenten zu kalibrieren. Forschungspotential besteht hinsichtlich der Vorhersagemöglichkeit notwendiger Spannkkräfte für konventionelle oder neuartige Spanntechniken unter Berücksichtigung tolerierter Einzelbauteile.

9 Summary and outlook

On the one hand, this current research work wanted to discuss which settings of punctiform joining steps are relevant for the dimensional accuracy of joined assemblies and how they should be set. On the other hand, the objective of this scientific work was the development of methods for analysis of fluctuating influence factors on the forming and joining process of individual parts. In a first step, to approach these objectives, a consistent simulation process chain with a subsequent separation of the forming and joining process chain to its individual process chains was built.

During the examination process, the effects of different material -, process - and geometrical parameters on the shapes of single parts from the press shop were examined. To identify fundamental cause-effects, principal assemblies with different structural stiffness were used. Singular part examinations showed differences in terms of the springback behavior in dependence of elastic modulus and sheet thickness. By means of performed simulations and experiments, interactions of typical geometrical shapes (bends and curvatures) with materials properties were demonstrated. The created database serves to predict produced structural strength and its resulting shape deformation depending on its geometrical moments of inertia (geometries, material properties) of real add-on parts. In order to quantify the effects of the single study results on the springback of components, two or three characteristics of each single parameter study are compared in a network diagram.

In the second part of the analyzed production process chain – the joining process –, relevant influencing factors of punctiform mechanical joining technologies were discussed using single parts with the same shape deviation. The focus was set on the clinching process with selected investigations on thermic joining technologies like spot welding or remote laser welding. In order to perform simulative and experimental studies, a flexible framing station for principal S-Rail- (segments) and H-Probe assemblies was designed and produced. As a result, functional and causal relations between the geometrical shapes of the pressed parts, the curvature as well as its radius were demonstrated. Based on geometrical conditions, the corresponding compensation ratios of the shape deviation of assembled parts in relation to the pressed parts were determined.

In the context of the solution concept to answer the research questions and to improve the transferability of general statements on real add-on parts, the complexity of the assembling process increased. Beginning with one non-dimensional accurate single part of an S-Rail assembly, an H-Proben assembly with two non-accurate parts is the preliminary stage of a complex multi-piece body part. Furthermore, by using various principal geometries of assemblies it is possible to dimension the parameters of framing stations depending on the identified influence on its structural stiffness. Significant parameters of a framing station were discussed in a two-part process. First, a pure variation of framing stations parameters is used. The findings and evaluations of the second stage with singular material and geometrical studies were evaluated from a qualitative and quantitative point of view. The benefits of a sequentially optimized clamp and fixture concept or a change in the material concept of non-dimensional accurate pressed parts were demonstrated and evaluated during the reference test.

Geometrical modifications of individual parts with changed overend measures (radius of curvature) proved their significant impact on the dimensional accuracy of joined assemblies and generated an additional potential for targeted modifications of important single parts. Moreover, the impact of various joining technologies (resistance spot and remote laser welding) on the dimensional accuracy was discussed while using the same clamping and fastening concept. This was discussed on the basis of enhanced substitute models for the joining technologies. As a consequence of the advanced substitute joining model, process-characteristic specifics – for instance the shape of welding seams – can be implemented.

By increasing the process complexity with two or more non-dimensional accurate pressed parts, geometrical interactions were recognized. The modular exchange of individual pressed parts allows to predict, to what extent the shape deviations of the pressed parts is decisive for the dimensional accuracy of the assembly. The research findings show with the help of a H-Probe assembly that compensation strategies can be developed if optical measured or idealized single part geometries are used. Simplifications of pressed parts were used to develop process windows for the geometrical frame angle depending on the process and material parameter (each two factor combinations). In proportion to the calculated compensation ratio the loss of accuracy was in an acceptable low range.

Based on relevant preliminary studies for this methodology, a standardized approach for stochastic analysis on the impact of pressed parts relat-

ed to the dimensional accuracy of assembled parts was developed. For this purpose, a simulation process chain was implemented, starting with a blank and forming tools up to calculating the springback behavior after the joining process in LS-DYNA®. Sensitivity analyses, in contrast to the singular parameter investigations, represent an option to evaluate the interactions between parameters which effects the results of one or more process simulations. Contributor analysis of the input factors of each process chain point out dominant factors of each individual step. In addition, the interdependencies of a linked forming and joining process chain were discussed. Optimization procedures of the clamping and fastening concept were realized for principal and real add-on parts on the basis of statistically distributed input process variables.

In a final chapter, the developed methods were applied by using combinations of stochastic and scenario analysis in order to evaluate given process windows in tolerance criteria. Another option is the modification of the method to determine the upper and lower limits of the sheet thickness of the pressed components. The final concept for a tolerance analysis of the manufacturing process chain does not depend on the body assembly type and the number of input variables. Due to the implementation of the variation range of the result values after each process step, ratios between two subsequent process steps were quantified. Based on tolerances of assemblies, tolerance or process requirements for the maximum admissible deviation of previous process steps and tolerance chains can be derived.

This research topic will keep his high importance in the future as adapting the clamping and fixture concept produces less costs than tool changes. As a result, the methodical approach should be extended to input factors of other framing stations. At this point with the help of further research works it can be found if non-dimensional accurate outer parts can be influenced by settings of flexible hemming stations. One approach constitutes of adjusted positions of the lower surfaces of hemming stations.

Additionally, innovative approaches based on original CAD data formats point out possibilities to predict the dimensional accuracy of assemblies without simulations. Therefore, an extension of the FE forming and joining investigations to additional characteristic geometrical shapes would be needed. This includes the separation of the single and assembled parts into their individual components at an early product phase. The results of this research could be stored in a geometrical and material database: the

variation range of shapes and critical areas of single parts with respect to detected tolerance limits.

In order to design clamping processes more precisely, the previously path-controlled clamping should be replaced by a force-controlled clamping. The force-controlled clamping has to be validated by experiments. The possibility to predict clamping forces for conventional or new clamping technologies while taking the part tolerances into account has more research potential.

Literaturverzeichnis

- [1] Zitz, W.: Der Mobilitätswandel aus der Sicht von Magna Steyr, Industriekongress, 2016, Internetquelle:
http://industriekongress.com/wp-content/uploads/2016/06/9_2016_o6_Industriekongress_final.pdf;
30.09.2017
- [2] United Nations: Adoption of the Paris Agreement, Conference of the Parties - Twenty-first Session, Paris, 2013
- [3] Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD: Deutschlands Zukunft gestalten - 18. Legislaturperiode, Berlin, 2013
- [4] Daimler: Kraftstoffverbrauch und CO₂ Emissionen – Nachhaltigkeitsbericht 2014. Internetquelle:
<http://nachhaltigkeit.daimler.com/produktverantwortung/-kraftstoffverbrauch-und-co2-emissionen>; 10.03.2016
- [5] Vogt, U.: Seriennahe Auslegung von Aluminum Tailored Heat Treated Blanks. Dissertation, Bd. 208, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2009
- [6] European Aluminium Association: Activity Report 2013 - Contributing to a competitive Europe, Brüssel, 2013
- [7] Wiedemann, J.: Leichtbau: Elemente und Konstruktion, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2007
- [8] Eckert, A.: Prognose der Maßhaltigkeit punktförmig mechanisch gefügter Karosserieanbauteile. Dissertation, Fraunhofer-Institut IWU, 2012
- [9] Schmitt, R.; Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement - Strategien, Methoden, Techniken, Carl Hanser Fachbuchverlag, München, 2010, 4. Auflage
- [10] Kühne, T.: Komplexer Einsatz im Mischbau. Adhäsion Kleben & Dichten 51 (2007) 10, 32-36
- [11] Kühne, T.: Clinchen und Kleben - ein Duo für den komplexen Mischbau, Carl-Verlag, München, 2007

- [12] Grasse, J.: Beitrag zur Gestaltung eines Qualitätsmethodenverbundes in der Karosserieentwicklung und -planung. Dissertation, 2002
- [13] Herfeld, U.: Matrixbasierte Verknüpfung von Komponenten und Funktionen zur Integration von Konstruktion und numerischer Simulation. Dissertation, München Verlag, München, 2007
- [14] Birkert, A.; Haage, S.; Straub, M.: Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013
- [15] Braess, H.-H.; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, Deutschland, 2007
- [16] N.N.: Ingenieurkurse. Internetquelle: https://www.ingenieurkurse.de/assets/courses/img/technische-mechanik-elastostatik/Spannungs-Dehnungs-Diagramm_neu2.png; 30.11.2015
- [17] Masing, G.: Zur Heynschen Theorie der Verfestigung der Metalle durch verborgene elastische Spannungen. Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern 3 (1923) 1, 231-239
- [18] EFB-Merkblatt: Verbesserung des Qualifizierungsprozesses von Bauschinger-Parametern durch Wechselbiegeversuche, 2015
- [19] Lüdke, B.: Funktionaler Rohkarosserie-Leichtbau. VDI Berichte (2000) Nr. 1543
- [20] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014
- [21] Drossel, G.: Umformung von Aluminium-Werkstoffen, Gießen von Aluminium-Teilen, Oberflächenbehandlung von Aluminium, Recycling und Ökologie, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 2009, 16. Auflage
- [22] Banabic, D.; Kuwabara, T.; Balan, T.; Comsa, D. S.: An anisotropic yield criterion for sheet metals. Journal of Materials Processing Technology 157-158 (2004), 462-465
- [23] Altenpohl, D.: Aluminium von innen - Das Profil eines modernen Metalles, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 1994, 5. Auflage

- [24] Schindler, V.: Forschung für das Auto von Morgen, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008
- [25] Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, ATZ / MTZ-Fachbuch, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013
- [26] Braess, H.-H.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- [27] Lange, K.: Umformtechnik - Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002
- [28] Lange, K.: Umformtechnik - Band 3: Blechbearbeitung, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1990
- [29] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik – Grundlagen, Technologien, Maschinen, VDI-Buch, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- [30] Simon, H.: Rechnergestützte Ziehtheilenauslegung mit elementaren Berechnungsmethoden. Dissertation, 1989
- [31] Feldmann, K.; Schöppner, V.; Spur, G.: Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren, Hanser Verlag, München, 2014
- [32] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014
- [33] Reissner, J.: Umformtechnik multimedial, Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [34] Amedick, J., Borowetz, H., Heyn, H.: Fügetechnologien im Wettbewerb – Anforderungen der Automobilindustrie. In: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V (Hrsg.): EFB Tagungsband: Gemeinsame Forschung in der mechanischen Fügetechnik. Garbsen, 2011, 11-23
- [35] Jank, N.; Staufer, H.; Bruckner, J.: Schweißverbindungen von Stahl mit Aluminium – eine Perspektive für die Zukunft. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 153 (2008) 4, 189-192
- [36] Hahn, O.; Klemens, U.: Fügen durch Umformen – Nieten und Durchsetzfügen – Innovative Verbindungsverfahren für die Praxis. Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., Dokumentation 707, Düsseldorf, 1996, 1. Auflage

- [37] Fan, X., Masters, I.: Dimensional Variation in Self-Piercing Riveting. SAE Technical Paper Series (2006), 1-13
- [38] Matthes, K.-J.; Schneider, W.: Schweißtechnik - Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen, Carl Hanser Fachbuchverlag, München, 2012, 1. Auflage
- [39] Rick, F.: Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen. Dissertation, Herbert Utz Verlag, München, 2001
- [40] Lenz, B.: Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung. Dissertation, Herbert Utz Verlag, München, 2001
- [41] Poss, M.; Ransom, L.: Remote laser welding. Patentanmeldung, US 20140175068 A1, GM Global Technology Operations LLC, USA, 2014
- [42] Xu, S.; Deng, X.: An evaluation of simplified finite element models for spot-welded joints. Finite Elements in Analysis and Design 40 (2004) 9-10, 1175-1194
- [43] Eisele, U.; Roll, K.: Simulation des Rollfalzens mit LS-DYNA, LS-DYNA Updateforum 2009, Filderstadt, 2009
- [44] Danzberg, J.: Einsatz hierarchischer parametrisierter Konstruktionsmethodik zur Planung und Optimierung von Karosserieblechteilen. Dissertation, Bd. 14369, Zürich, 2001
- [45] Steinle, P.: Toleranzmanagement für Bauteile aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff - Ursachen der geometrischen Streuung, präventive Vorhersagen der Maßhaltigkeit und der Einsatz des Werkstoffes im Rohbau. Dissertation, 2015
- [46] Hein, P., Mercuzot, G., Devin, J.-M., Fouques, D.: Methodology for Springback control in stamping of AHSS. In: Fuchsbauer, W. (Hrsg.): SCT 2008: Future trends in steel development, processing technologies and applications, 2008, 539-536
- [47] Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren, Praxisreihe Qualitätswissen, Hanser Verlag, München, 2011, 7. Auflage

- [48] Doege, E.; Hütte, H.; Kröff, A.: Genauigkeit im Preßwerk - eine Voraussetzung für den Präzisionsbau. In: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V (Hrsg.), 1998, 1-38
- [49] Groover, M. P.: Fundamentals of modern manufacturing - Materials, processes, and systems, J. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2010, 4. Auflage
- [50] Elend, L. E.: Einsatz elastischer Niederhaltersysteme zur Erweiterung der Prozessgrenzen beim Tiefziehen. Dissertation, 2001
- [51] Westkämper, E.; Warnecke, H.-J.: Einführung in die Fertigungstechnik, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010
- [52] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik – Grundlagen, Technologien, Maschinen, VDI-Buch, Springer Verlag, Berlin, 2010
- [53] Hu, M.; Lin, Z.; Lai, X.; Ni, J.: Simulation and analysis of assembly processes considering compliant, non-ideal parts and tooling variations. International Journal of Machine Tools and Manufacture 41 (2001) 15, 2233-2243
- [54] Voß, R.: Bewertung des Einflusses von Randbedingungen für eine Toleranzsimulation nachgiebiger Baugruppen im Karosserie-rohbau. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): 19. Symposium "Design for X", 2008, 197-207
- [55] Leuschel, R.: Toleranzmanagement in der Produktentwicklung am Beispiel der Karosserie im Automobilbau. Dissertation, 2010
- [56] Masters, I., Fan, X., Roy, R.; Williams, D.: Modeling distortion induced in an assembly by the self-piercing rivet process. Journal of Engineering Manufacture 226 (2012) 2, 300-312
- [57] Cai, W.; Wang, P. C.; Yang, W.: Assembly dimensional prediction for self-piercing riveted aluminum panels. International Journal of Machine Tools and Manufacture 45 (2005) 6, 695-704

- [58] Roll, K., Lemke, T.; Wiegand, K.: Possibilities and Strategies for Simulations and Compensation for Springback. In: Smith, L.; Pourboghrat, F.; Yoon, J. W.; Stoughton, T. (Hrsg.): NUMISHEET 2005: Proceedings of the 6th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Process. AIP Conference Proceedings, 2005, 295-302
- [59] Milch, M.: Springback I: Simulation und Kompensation – Schulungsunterlagen Autoform, 2011
- [60] Hütte, H.: Untersuchungen zum Rückfederungsverhalten hochfester Stahlblechwerkstoffe beim Tiefziehen. Dissertation, Universität Hannover, 2001
- [61] Burchitz, I.: Springback: improvement of its predictability: Literature study report, Netherland Institute for Metals Research, 2005
- [62] Kalpakjian, S.; Schmid, S. R.; Werner, E.: Werkstofftechnik - Herstellung Verarbeitung Fertigung, Pearson Studium, München, Deutschland, 2011, 5. Auflage
- [63] Rosenschon, M.; Merklein, M.: Analysis of the Young's modulus reduction and cyclic hardening of HCT780X. In: Gese, H. (Hrsg.): Procedia MATFEM Conference 2017, 2017, 1-16
- [64] Klinger, J. F.; Bohn, M.: Predicting Dimensional Deviations of Structural Vehicle Body Parts Deep Drawn from Aluminum Blanks. Procedia CIRP 7 (2013), 353-358
- [65] Gössling, M.; Kracker, H.; Brosius, A.; Kuhnt, S.; Tekkaya, A. E.: Strategies for springback compensation regarding process robustness. Production Engineering 5 (2011) 1, 49-57
- [66] Eisele, U.: Ein Beitrag zur verbesserten Auslegung von Rollfalzprozessen. Dissertation, Beiträge zur Umformtechnik, Bd. 65, MAT-INFO, Frankfurt, M., 2012
- [67] Mori, N.: 3DS - Digital Die Design System - Final Report, 2005
- [68] Rohleder, M.: Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen im Produktentstehungsprozess von Blechformteilen. Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, 2001

- [69] Emrich, A.: Systematik zur Robustheitsanalyse von Umformprozessen für Karosseriekomponenten aus Blech. Dissertation, Beiträge zur Umformtechnik, Bd. 68, 2013
- [70] Kadkhodayan, M.; Zafarparandeh, I.: An investigation into the influence of blankholder force on springback in u-bending. Archives of metallurgy and materials 54 (2009) 4, 1183-1190
- [71] Demirci, H.; Esner, C.; Yasar, M.: Effect of the blank holder force on drawing of alu-minum alloy square cup. Journal of Materials Processing Technology 206 (2008) 1-3, 152-160
- [72] Roll, K.; Wiegand, K.; Hora, P.: Benchmark 2 – Influence of Drawbeads on the springback behavior (<<S-Rail-08>>). In: Hora, P. (Hrsg.): Numisheet 2008 - Proceedings of the 7th International Conference on Numerical Simulations of 3D Sheet Metal Forming Processes, 2008, 43-57
- [73] Jiang, C.; Han, X.; Liu, G. R.; Li, G. Y.: The optimization of the variable binder force in U-shaped forming with uncertain friction coefficient. Journal of Materials Processing Technology 182 (2007) 1-3, 262-267
- [74] Merklein, M.; Lechner, M.; Kuppert, A.: Enhancement of formability of aluminum alloys in multi-stage forming operations by a local intermediate heat treatment. Prod. Eng. Res. Devel. 6 (2012) 6, 541-549
- [75] Anggono, A. D.; Siswanto, W. A.; Omar, B.: Combined method of spring-forward and spring-back for die compensation acceleration. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 4th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization, 2011, 1-6
- [76] Merklein, M.; Böhm, W.; Lechner, M.: Tailoring Material Properties of Aluminum by Local Laser Heat Treatment. Physics Procedia 39 (2012), 232-239
- [77] Bohn, M.: Toleranzmanagement im Entwicklungsprozeß - Reduzierung der Auswirkungen von Toleranzen auf Zusammenbauten der Automobilkarosserien. Dissertation, Universitätsbibliothek Karlsruhe, 1998
- [78] Szyminski, S.: Toleranzen und Passungen, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1993

- [79] Jorden, W.; Schütte, W.: Form- und Lagetoleranzen - Handbuch für Studium und Praxis, Hanser Verlag, München, 2014, 8. Auflage
- [80] Bohn, M.; Hetsch, K.: Toleranzmanagement im Automobilbau, Carl Hanser Fachbuchverlag, München, 2013
- [81] Beckmann, A.; Bohn, M.; Gust, P.: Tolerance Simulation in the Assembling Process Based on Experimental Data from Series Production. *Procedia CIRP* 27 (2015), 35-40
- [82] Beckmann, A.; Litwa, F.; Bohn, M.: Meta Modelling of body-in-white processes as a sustainable knowledge base during series production. In: NAFEMS (Hrsg.): NAFEMS World Congress, 2015, 191-200
- [83] Litwa, F.; Gottwald, M.; Bohn, M.; Klinger, J. F.; Walter, M.; Wartzack, S.; Vielhaber, M.: Automated Point-based Tolerance Analysis Model Creation for Sheet Metal Parts. *Procedia CIRP* 27 (2015), 65-70
- [84] Klinger, J. F.; Bohn, M.; Litwa, F.: Adaptive Modeling of Non-rigid Assembly Orientation Processes in a Statistical CAT Simulation. *Procedia CIRP* 27 (2015), 71-76
- [85] 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.; Bolick, S.; Katzenberger, J.; Schulz, M.; Runde, C.; Czaykowska, A.: Gemeinsamer FuE-Abschlussbericht des Verbundprojektes „Durchgängige Virtualisierung der Entwicklung und Produktion von Fahrzeugen (VIPROF)“, 2012, 20-144
- [86] Konrad, T.; Wiegand, K.; Mittmann, P., Merklein, M.: Improvement of Assemblies Dimensional Accuracies by the Optimization of Clamps' and Joints' Positions. In: IDDRG (Hrsg.): IDDRG 2016 - Challenges in Forming High-Strength Steels, 2016, 279-286
- [87] Menges, R.: Maßstab für die Fertigung im 21. Jahrhundert, VDMA Verlag, 2005
- [88] Pinner, S.: Untersuchung von Methoden zur durchgängigen Prozesskettensimulation im Karosseriebau. Dissertation, Berichte aus der virtuellen Fertigungstechnik, Bd. 10, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, 2014

- [89] Hatzenbichler, T.; Harrer, O.; Buchmayr, B.: Entwicklungsstand und Nutzen der FEM-Simulation von Massivumformprozessen. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 151 (2006) 11, 469-474
- [90] Kästle, C.: Simulationsmethode zur Beurteilung der Maßhaltigkeit von rollgefalzten Karosseriebaugruppen im Zusammenbau. Dissertation, Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart, 2016
- [91] Quetting, F.; Hora, P. und Roll, K.: Increasing the robustness of sheet metal forming processes using an intelligent planning and control system. In: Hora, P. (Hrsg.): International Deep Drawing Research Group, 2013, 81-86
- [92] Buchmayr, B.: Aktuelle Entwicklungstrends und zukünftige Herausforderungen im Bereich der Umformtechnik. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 160 (2015) 10 11, 501-506
- [93] Marretta, L.; Di Lorenzo, R.: Influence of material properties variability on springback and thinning in sheet stamping processes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 51 (2010) 1-4, 117-134
- [94] Pollmann, W.; Radaj, D.: Simulation der Fügeverfahren - Potentiale und Grenzen, DVS-Verlag, Düsseldorf, 2001
- [95] Eshtayeh, M. M.; Hrairi, M.: Recent and future development of the application of finite element analysis in clinching process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 84 (2016) 9-12, 2589-2608
- [96] Govik, A.; Nilsson, L.; Moshfegh, R.: Finite element simulation of the manufacturing process chain of a sheet metal assembly. Journal of Materials Processing Technology 212 (2012) 7, 1453-1462
- [97] Schützle, W.: Beitrag zur Prozesskettensimulation geschweißter Aluminium-Karosserieanbauteile. Dissertation, Berichte aus dem IWU, Bd. 87, Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2015
- [98] Eckert, A.; Rössinger, M.; Schulz, F.; Mauermann, R.: Numerische und experimentelle Toleranzprognose im automobilen Prozess. In: Meine, D. (Hrsg.): Fügen im Karosseriebau 12, 2012, 1-22

- [99] Eckert, A.; Altermann, T.; Rössinger, M.; Wahl, M.; Schulz, F.: Beitrag zur Prozesskettensimulation im Karosseriebau. In: ESI-Group (Hrsg.): PamStamp-Forum, 2011, 1-22
- [100] Wahl, M.; Schulz, F.; Altermann T.; Eckert, A.: Die Prozesskettensimulation - Ein Beitrag zum virtuellen Karosseriebau. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Karosserien fertigen – nachhaltig und effizient - Berichte aus dem IWU 59, 2011, 259-269
- [101] Awiszus, B.: Durchgängige Simulationsprozessketten in der Fahrzeugentwicklung. In: Liewald, M. (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Blechumformung, 2010, 65-84
- [102] Kästle, C.; Liewald, M.; Roll, K.: Springback Simulation of the Process chain Press Line Forming and Roller Hemming Processes. 9. Key Engineering Materials 549 (2013), 231-238
- [103] Kästle, C.; Liewald, M.; Roll, K.: Rückfederungsberechnung von Karosserieunterbaugruppen im Zusammenbau. In: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V (Hrsg.): 33. EFB-Kolloquium, 2013, 335-346
- [104] Kästle, C.; Liewald, M.; Roll, K.: Prozesssimulation von Karosseriebaugruppen unter Einbeziehung der Fertigungsschritte Umformen im Presswerk und Rollfalzen im Rohbau. In: Neugebauer, R.; Drossel, G. (Hrsg.): 19. Sächsische Fachtagung Umformtechnik. Wissenschaftliche Scripten Verlage, 2012, 247-266
- [105] Grossenbacher, K.: Virtuelle Planung der Prozessrobustheit in der Blechumformung. Dissertation, Zürich, 2008
- [106] Kleppmann, W.: Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren, Praxisreihe Qualitätswissen, Hanser Verlag, München, 2013, 8. Auflage
- [107] Siebertz, K.; van Bebbber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010
- [108] Czichos, H.: Springer Handbook of Materials Measurement Methods, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [109] Roll, K.: Simulation of sheet metal forming - necessary developments in the future. In: Hora, P. (Hrsg.): Numisheet 2008 - Proceedings of the 7th International Conference on Numerical Simulations of 3D Sheet Metal Forming Processes, 2008, 3-11

- [110] Banabic, D., et al.: Formability of Metallic Materials, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000
- [111] Barlat, F.; Brem, J. C.; Yoon, J. W.; Chung, K.; Dick, R. E.; Lege, D. J.; Pourboghrat, F.; Choi, S.-H.; Chu, E.: Plane stress yield function for aluminum alloy sheets. *International Journal of Plasticity* 19 (2003) 9, 1297-1319
- [112] Banabic, D.: An improved analytical description of orthotropy in metallic sheets. *International Journal of Plasticity* 21 (2005) 3, 493-512
- [113] Comsa, D.-S.; Banabic, D.: Plane-stress yield criterion for highly-anisotropic sheet metals. In: Hora, P. (Hrsg.): *Numisheet 2008 - Proceedings of the 7th International Conference on Numerical Simulations of 3D Sheet Metal Forming Processes*, 2008, 43-48
- [114] Drossel, W.-G., Israel, M., Falk, T.: Robustheitsbewertung und Werkzeugoptimierung beim Umformfügen. In: Dynardo GmbH (Hrsg.): *9. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag*, 2012, 1-18
- [115] Most, T.; Will, J.: Sensitivity analysis using the Metamodel of Optimal Prognosis. In: Dynardo GmbH (Hrsg.): *Weimarer Optimization und Stochastic Days 2011*, 2011, 1-16
- [116] Konrad, T.; Wolff, S.; Wiegand, K.; Merklein, M.: Robustness and sensitivity analysis of a virtual process chain using the S-rail specimen applying random fields. *Journal of Physics: Conference Series* 734 (2016), 1-4
- [117] Padmanabhan, R.; Oliveira, M. C.; Alves, J. L.; Menezes, L. F.: Stochastic analysis of a deep drawing process using finite element simulations. *International Journal of Material Forming* 2 (2009) S1, 347-350
- [118] Kitayama, S.; Natsume, S.; Yamazaki, K.; Han, J.; Uchida, H.: Numerical optimization of blank shape considering flatness and variable blank holder force for cylindrical cup deep drawing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 85 (2016) 9-12, 2389-2400

- [119] Kitayama, S.; Saikyo, M.; Kawamoto, K.; Yamamichi, K.: Multi-objective optimization of blank shape for deep drawing with variable blank holder force via sequential approximate optimization. *Struct Multidisc Optim* 52 (2015) 5, 1001-1012
- [120] Stander, N.; Burger, M.; Zhu, X.; Maker, B.: An Optimization Procedure For Spring-back Compensation Using LS-OPT. In: DYNAmore GmbH (Hrsg.): 7th International LS-DYNA User Conference, 2002, 4-6
- [121] Alghtani, A.; Brooks, P. C.; Barton, D. C.; Toropov, V.V.: Springback Analysis and Optimization in Sheet Metal Forming. In: DYNAmore GmbH (Hrsg.), 9. European LS-DYNA Conference, 2013, Internetquelle: <http://www.dynalook.com/9th-european-ls-dyna-conference/springback-analysis-and-optimization-in-sheet-metal-forming>, 22.11.2017
- [122] Steffes-Iai, D.; Clees, T.: Statistical Analysis of Forming Processes as a First Step in a Process-Chain Analysis: Novel PRO-CHAIN Components. *Key Engineering Materials* 504-506 (2012), 631-636
- [123] Sun, D.-Z.; Andrieux, F.; Feucht, M.: Simulation of the Process Chain from Forming to Crash taking into account stochastic Aspects. In: DYNAmore GmbH (Hrsg.): 9. LS-DYNA Forum, 2010, H11-H110
- [124] Israel, M.: Bewertung von Parameterstreuung beim Umformfügen. *NAFEMS Magazin* (2013) 26, 78-88
- [125] Roux, E.; Bouchard, P.-O.: Kriging metamodel global optimization of clinching joining processes accounting for ductile damage. *Journal of Materials Processing Technology* 213 (2013) 7, 1038-1047
- [126] Oudjene, M.; Ben-Ayed, L.: On the parametrical study of clinch joining of metallic sheets using the Taguchi method. *Engineering Structures* 30 (2008) 6, 1782-1788
- [127] Kaiser, C.; Zubeil, M.; Roll, K.; Volk, W.: New Approaches for hemming simulation to verify the manufacturing process of hang-on parts. In: Kawalla, R. (Hrsg.): *Auto-MetForm / SFU - New Materials for Vehicle Components*, 2014, 72-79
- [128] Schmidt, L.: *Technologiewatch Report Nr. 39*, 2013

- [129] Nitsche, M.: Verfahren zum Übertragen eines Spannungszustandes (Spannungssensors) eines FE-Simulationsergebnisses auf eine neue FE-Netz-Geometrie eines modellierten Konstruktionssystems in einer Simulationskette von Produktionsvorgängen, Offenlegungsschrift WO2017/157363 A1, Veröffentlichungsdatum: 21.09.2017
- [130] Klein, B.: FEM; Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2015
- [131] Winkelhofer, J.; Trattnig, G.; Schluder, H.; Fellner, B.: Effiziente Ermittlung von Dehnraten- und Versagensparametern für die Fahrzeugcrashsimulation mit LS-DYNA. In: DYNAMore GmbH (Hrsg.): Proceedings 7. LS-DYNA Forum, 2008, BII35-BII46
- [132] Oehler, G.; Kaiser, F.: Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge, Klassiker der Technik, Springer Verlag, 2001, 8. Auflage
- [133] Most T.; Will J.: Effiziente Sensitivitätsanalyse in der industriellen Produktentwicklung. In: Dynardo GmbH (Hrsg.): 9. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 2012, 2012, Internetquelle: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=6A1594500F22482AB088AC388C81ED8F?doi=10.1.1.367.5451&rep=rep1&type=pdf>, 07.01.2018
- [134] Wolff, S.: Robustness Evaluation in Sheet Metal Forming Using Statistics on Structures (SoS) and optiSLang. In: CADFEM (Hrsg.): Proceedings of 32nd German AN-SYS and CADFEM Users' Meeting, 2014, Internetquelle: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=E2B37621ED69B724624720FF902FCCD1?doi=10.1.1.434.8548&rep=rep1&type=pdf>, 08.01.2018
- [135] Rocquigny, E. d.; Devictor, N.; Tarantola, S.: Uncertainty in industrial practice - A guide to quantitative uncertainty management, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2008

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Wiegand, K.; Konrad, T.; Merklein, M.: Influence of Variations in a Mechanical Framing Station on the Shape Accuracy of S-rail Assemblies. In: DYNAmore GmbH (Hrsg.): Proceedings of 10th European LS-DYNA Conference 2015, Würzburg, Germany, 2015, 1-10, Internetquelle:
<https://www.dynamore.de/de/download/papers/2015-ls-dyna-europ/documents/sessions-c-1-4/influence-of-variations-in-a-mechanical-framing-station-on-the-shape-accuracy-of-s-rail-assemblies/view>, 15.01.2018
- [P2] Konrad, T.; Wiegand, K.; Gasco, V.: Sensitivity analysis of selected forming process parameters regarding the shape accuracy of single and assembled parts. In: Dynardo (Hrsg.): 12. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage, Weimar, Germany, 2015, Internetquelle:
https://www.dynardo.de/fileadmin/Material_Dynardo/bibliothek/WOST12/13_WOST2015_Session4_Konrad.pdf, 15.01.2018
- [P3] Konrad, T.; Schöllhammer, S.; Roll, K.; Merklein, M.: Influence of Geometrical Shapes and Sheet Thicknesses on the Dimensional Accuracy of Single and Assembled Parts. Key Engineering Materials 716 (2016), 923-930
- [P4] Konrad, T.; Wiegand, K.; Mittmann, P., Merklein, M.: Improvement of Assemblies Dimensional Accuracies by the Optimization of Clamps' and Joints' Positions. In: IDDRG (Hrsg.): IDDRG 2016 - Challenges in Forming High-Strength Steels, 2016, 279-286
- [P5] Konrad, T.; Wolff, S.; Wiegand, K.; Merklein, M.: Robustness and sensitivity analysis of a virtual process chain using the S-rail specimen applying random fields. Journal of Physics: Conference Series 734 (2016), 1-4

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten¹

- [S1] Gasco I Claramunt, V.; Konrad, T.; Klocke, F.: Robustheitsanalyse der relevanten Einflussfaktoren auf die Maßhaltigkeit gefertigter Pressteile. Masterarbeit. Sindelfingen, 2015
- [S2] Mittmann, P.; Konrad, T.; Boehlke, T.: Variation und Optimierung relevanter Einflussfaktoren einer virtuellen Fügestation. Bachelorarbeit. Sindelfingen, 2015
- [S3] Schöllhammer, S.; Konrad, T.; Rosenschon, M.; Merklein, M.: Einfluss der Geometrieform und der Blechdicke auf die Maßhaltigkeit gefügter Baugruppen. Masterarbeit. Sindelfingen, 2015
- [S4] Fiegl, B.; Konrad, T.; Graser, M.; Merklein, M.: Robustheitsanalyse der relevanten Einflussfaktoren auf die Maßhaltigkeit gefertigter Pressteile. Masterarbeit. Sindelfingen, 2016
- [S5] Piatke, A.; Konrad, T.; Kopp, G.; Wiedemann, J.; Friedrich, E.: Simulative und experimentelle Untersuchung von Fügeprozessen zur Bewertung von deren Einfluss auf die Zusammenbaumaßhaltigkeit von Baugruppen. Masterarbeit. Sindelfingen, 2016
- [S6] Schneider, T.; Konrad, T.; Boehlke, T.: Auswirkung von Fügeparametern und Eigenschaften umgeformter Bauteile auf die Maßhaltigkeit einer Baugruppe. Bachelorarbeit. Sindelfingen, 2016
- [S7] Forster, C.; Konrad, T.; Boehlke, T.: Entwicklung einer Methode zur Toleranzanalyse von gefügten Karosseriebaugruppen mit Hilfe von FE-Simulationen. Bachelorarbeit. Sindelfingen, 2016

¹ Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den bzw. die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in.

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 12/2018):

Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308

FAU Studien aus dem Maschinenbau

ISSN 2625-9974

FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der
rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität
automatisierter Montagesysteme
durch Sensorintegration und erweiterte
Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von
Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung
von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhal-
tens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von
Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte
Montageplanung am Beispiel der
Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur
Flexibilitätssteigerung der
rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-
feinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines
übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und
Prozeßdiagnostik für das Schneiden
mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab.
1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen
Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten
Diagnosesystems für automatisierte
Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte
Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von
Softwaresystemen für rechnergeführte
Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumforme mit
elastischer Matrizie
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für
kooperierende Industrieroboter in
Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer
Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen
Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge
Laserstrahlschneiden und -schweißen
in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung
von Materialflußstrukturen in der
Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von
kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung
bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer
CAD/CAM-Prozesskette für die
Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen: Prozeßführung und
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-
beitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit
objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung
in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simula-
tionsverfahrens für operative und
strategische Probleme der
Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann
Operatives Fertigungscontrolling durch
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-
tungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten
Werkstattprogrammiersystems für das
Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von
Montageanlagen in einem integrierten
Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-
der Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung
keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und
Schulung an Steuerungssoftware von
SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der
Angebotsbearbeitung in der
Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim
Schneiden mit einem gepulsten
Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel
Optische 3D-Konturerfassung und
on-line Biegewinkelmessung mit
dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur
Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der
Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten
Handhabungsplanung komplexer
Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten
Materialversorgung in flexiblen
Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und
Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer
Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle
Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und
Multimedia-Unterstützung in
Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.
ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und
Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung
mit Excimerlasern - Systemkomponenten
und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit
Zweistrahlschweißtechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration
für flexible Fertigungszellen mit
kooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit
Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim
3D-Laserstrahlschweißen von
Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer
CA-Anwendungen über einem
STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen
(3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und
der Fokusparameter einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt- und
Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept
für den flexiblen Materialfluß in der
Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim
Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung
an offenen CNC-Steuerungen zur
Prozeß- und Programmoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und
Prozeßplanung zur Leistungs- und
Qualitätssteigerung beim
Spulenwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung
für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für
CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler
Schraubstationen in der
automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen
in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke
Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller
Automatisierte Demontagesysteme
und recyclinggerechte Produktgestaltung
elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner
Kaltmassivumformung metallischer
Kleinstteile - Werkstoffverhalten,
Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind
Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer
Eigenschaften von Feinblechen mit
dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard
Qualitätssteigerung in der
Elektronikproduktion durch
Optimierung der Prozeßführung
beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh
Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und
Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn
Meßeinrichtung zur Untersuchung
der Wirkflächenreibung bei umformtech-
nischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert
Regelung der Fokusslage beim Schweißen
mit CO₂-Hochleistungslasern unter
Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo
Development and Implementation of
Hierarchical Control Structures of
Flexible Production Systems Using High
Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt
Effizienzsteigerung bei Demontage
und Recycling durch flexible
Demontagetechnologien und optimierte
Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der
Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächen Ausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger
Herstellungs- und Prüfverfahren für
thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach
Beitrag zur rechnerunterstützten
verursachungsgerechten
Angebotskalkulation von Blechteilen
mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung
der Anschlußgeometrie elektronischer
SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk
Simulationsbasierte
Lebensdauervorhersage für Werkzeuge
der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl
Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und
Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel
Ermüdungsbruchversagen
hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle
in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert
Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen
von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum
Produktionsmanagement in der
Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.
Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet
zum effizienten Service von
Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-147-4.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen
durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte Methoden für die
rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer
Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration
der Prozeßebene in Produktionssysteme
durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von
Werkzeugmaschinen durch Einsatz
mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in
einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -
Prozeßparameter und Modelle zur
Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet
zum effizienten Service von
Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integra-
tion neuer Bauelementetechnologien in
die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten
alternativer Elektroniklote in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem
Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montage-
systemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von
Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung
der Mikrostruktur und
der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches
Architekturkonzept zur Akquisition
simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische
Optimierung im Innenausbau durch
den Einsatz moderner
Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-
Punktschweißen in der Elektronikpro-
duktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum
Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten
Programmierung für
die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim
Laserstrahlschweißen mit den Methoden
der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung
metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die
MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter
Mikroverbindungen elektronischer
Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum
Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium
für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontak-
ten elektronischer Bauelemente mit
Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann
Erweiterung der Formgebungsgrenzen
beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Ein-
satz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch
3 - D MID Technologie in der
Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl
Fertigungsqualität und Umformbarkeit
laserstrahlgeschweißter Formplatinen
aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk
Entwicklung eines konfigurierbaren
Steuerungssystems für die flexible
Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck
Neue Sensorik und Aktorik für
Bearbeitungsköpfe zum
Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, Trennen und Laserstrahlschweißen
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und
multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner
Technische Umsetzung produktbezoge-
ner Instrumente der Umweltpolitik bei
Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier
Strategien für einen produktorientierten
Einsatz räumlicher spritzgegossener
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich
Kostensimulation - Simulationsbasierte
Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer
Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny
Innenhochdruck-Umformen von Blechen
aus Aluminium- und Magnesiumlegie-
rungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha
Flexible Montageautomatisierung zur
Komplettmontage flächenhafter Produkt-
strukturen durch kooperierende
Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und
Verbindungstechnik für mechatronische
Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph
Durchgängige simulationsgestützte
Planung von Fertigungseinrichtungen der
Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah
Simulationsbasierte Bestimmung der
zu erwartenden Maßhaltigkeit für das
Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein
Scherschneiden und Biegen metallischer
Kleinstteile - Materialeinfluss und
Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff
Excimerlaserstrahlbiegen dünner
metallischer Folien mit homogener
Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach
Rechnergestützte Anpassung von
Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl
System- und Prozesstechnik für das
simultane Löten mit Diodenlaserstrah-
lung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker
Tribologische Eigenschaften keramischer
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer
Oberflächenendbearbeitung mittels
Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik
durch innovative maschinenbauliche und
regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama
Effizienzsteigerung in der Montage durch
marktorientierte Montagestrukturen und
erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Ent-
wicklung von Konzepten und Methoden
für die rechnerunterstützte Modellierung
und Optimierung von komplexen
Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung:
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss
von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und
Regelsysteme für die adaptive
Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender
Regelkreise für flexible
Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinst-
teile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung
von Qualität und Zuverlässigkeit in
der Fertigung hochintegrierter
Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit
Elastomerwerkzeugen Modellierung,
Prozessauslegung und Abgrenzung des
Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum
Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of
Assembly Systems in Three-Dimensional
Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung
elektronischer Baugruppen auf der Basis
flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester
Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des
Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-
Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung
einer varianz- und kostenoptimierten
Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessana-
lyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung von Leichtbauverbundstruk-
turen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimie-
rung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser
Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management
in der integrierten virtuellen Entwicklung
der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht
Werkstoffcharakterisierung und
Prozessauslegung für die wirkmedienba-
sierte Doppelblech-Umformung von
Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeug-
lebensdaueroptimierung und Präzisions-
fertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter
Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen
beim Presshärten des höchstfesten
Vergütungsstahls 22MnB5
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez
Simulationsgestützte Methoden zur
effizienten Gestaltung von Lötprozessen
in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makrome-
chatronischen Modulen zur flexiblen
Integration in hybride
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur
experimentellen Ermittlung und zur
Modellierung von Fließortkurven bei
erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren
und erweiterte Qualitätssicherung
von einsatzgerechten elektronischen
Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum
Excimerlaserstrahl-Abtragen unter
Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen
zum Rührreibschweißen metallischer
Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung
des Werkstoffverhaltens von
presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten
Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten
Produktionskonzeptes für mobile
Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktslagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
beim Laserstrahltiefschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten
Steuerungssystems zur
Materialflussorganisation im
wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahlungsschweißen
transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen von walzplattiertem
Halbzeug und Aluminiumblech zur
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-
Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium
Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung
der Crashtauglichkeit von höchstfesten
Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen-
Entwicklung einer Methodik zur
Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das
Umformen lokal wärmebehandelter und
geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahl-
schweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel
Grundlegende Untersuchungen zum
Kontaktzustand zwischen Werkstück
und Werkzeug bei umformtechnischen
Prozessen unter tribologischen
Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer
Entwicklung eines mesoskopischen
Modells zur Abbildung von Größeneffek-
ten in der Kaltmassivumformung mit
Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner
Konzeption produktspezifischer Lösun-
gen zur Robustheitssteigerung elektroni-
scher Systeme gegen die Einwirkung von
Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler
Verbindungs- und Systemtechnik für
thermisch hochbeanspruchte und
miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozess-
grenzen bei der Innhochdruck-Umform-
ung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke
Mehrkriterielle Optimierung komplexer
Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für
die Fertigung wickeltechnischer Produkte
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for
Sensor-Controlled Tissue-Specific
Laser Surgery
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimie-
rung des Schablonendruckprozesses in
der Elektronikproduktion
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahlintern von
Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine
Betrachtung werkstoff-prozessspezifi-
scher Aspekte am Beispiel PEEK
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die
SMT-Montage optischer Bauelemente auf
Substrate mit integrierten Lichtwellenlei-
tern
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste
Kaltmassivumformwerkzeuge durch
lokal optimierte Werkzeugoberflächen
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Ver-
sagens von Punktschweißverbindungen
bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von
pressgehärteten Karosseriekomponenten
mit maßgeschneiderten mechanischen
Eigenschaften: Temperierte Umform-
werkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimu-
lation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging
Tools Exemplified by Powder
Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des
Laserstrahlumformens von
Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des
Laserstrahlhartlötens mittels optischer
Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-
stoffen - Umformverhalten und Grenzen
der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für
die Kaltmassivumformung unter
Brücksichtigung der Werkzeug- und
Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwick-
lung und Zuverlässigkeit räumlicher
Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung
mechatronischer Systeme in der Medizin
am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahllöten
und -reparaturlöten elektronischer
Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des
mechanischen Werkstoffverhaltens
von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim
Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette
zur wärmeunterstützten Umformung
von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster
Halbzeuge mit variabler Blechdicke
durch die Anwendung von Verfahren
der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium
Vessel and Capillary Density for the
Application of Detection of Clinical
Shock and Early Signs of Cancer Develop-
ment
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines
Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz
und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen
technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen
auf die Verarbeitungsgrenzen von
Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften
widerstandspunktgeschweißter
Aluminium-Stahl-Verbindungen für
den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der
Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit
optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren
auf die Wirbelstromverluste von
Stator-Einzelzahnblechpaketen für den
Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von
Blechhalbzeugen unter Anwendung
magnetorheologischer Flüssigkeiten als
kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie
indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl
Flexible Automatisierung der
Statorenmontage mit Hilfe einer
universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien
für Rotoren getriebeintegrierter
PM-Synchronmotoren von
Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for
Contactless Power Transfer Systems for
Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke
Transiente physikalische Mechanismen
bei der Laserablation von dünnen
Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des
Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen
Qualifizierung des Potentials von
Verfestigungseffekten zur Erweiterung
des Umformvermögens aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus
Erstellung eines Werkstofforientierten
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung
des Formgebungsvermögens von Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischen geschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec
Untersuchungen zur Herstellung von
funktionsoptimierten Bauteilen im
partiellen Presshärtprozess mittels lokal
unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader
Grundlegende Untersuchungen zur
Verschleißcharakterisierung beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung und Fehlerdetektion
an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland
Entwicklung einer Methode zur Prognose
adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen
für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm
Strukturierte additive Metallisierung
durch kaltaktives
Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner
Herstellung beanspruchungsangepasster
Aluminiumblechhalbzeuge durch
eine maßgeschneiderte Variation der
Abkühlgeschwindigkeit nach
Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit
auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim
Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles
for the Generation of Thin Conductive
Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider
Umformtechnische Herstellung
dünnwandiger Funktionsbauteile
aus Feinblech durch Verfahren der
Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof
Sematische Modellierung automatisierter
Produktionssysteme zur Verbesserung
der IT-Integration zwischen Anlagen-
Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller
Erarbeitung von Grundlagen zur
Abbildung des tribologischen Systems
in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler
Einsatz technologischer Versuche zur
Erweiterung der Versagensvorhersage
bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten
Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig
Integration des Systemverhaltens von
Automobil-Hochvoltleitungen in die
virtuelle Absicherung durch
strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl
Automatisierte Datenerfassung für disk-
ret ereignisorientierte Simulationen in
der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold
Mikroschockwellenumformung mittels
ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger
Laserstrahlschweißen thermoplastischer
Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit
spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl
Methods-Energy Measurement - Eine
Methode zur Energieplanung für
Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrol-
lings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung zyklisch-symmetrischer
Bauteile mit Nebenformelementen durch
Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der
tribologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereitstellung
von tribologischen Modellversuchen und
Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung
der formgebenden Operation des
Nasspressprozesses von
Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische
Mindestenergiebedarf als Referenzwert
zur Bewertung der Energieeffizienz in
der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von
Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent
Magnet Assembly and Magnetic Rotor
Measurement / Flexible Systeme zur
Montage von Permanentmagneten und
zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten
hochfester Leichtbauwerkstoffe unter
Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozessverhalten von Silizium als
Werkzeugwerkstoff für das
Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der
Lasermikromaterialbearbeitung –
Grundlegende Untersuchungen und
Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for
the Process Planning of Energy-Efficient
Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik
für verteilte Wicklungen im
Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung
montageführender Werkerinformations-
systeme simultan zum
Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und
Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen
Werkstoffverbunden mittels simultanem,
intensitätsselektivem
Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unter-
stützten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der höherfes-
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellan
Design of Manufacturing Processes for
the Cold Bulk Forming of Small Metal
Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling,
Simulation and Optimization of Molded
Interconnect Devices (MID) Based on
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-
mentelle Untersuchung, Modellierung,
Simulation und Optimierung von Molded
Interconnect Devices (MID) basierend
auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren
für flachleiterbasierte
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung
des spannungszustandsabhängigen
Werkstoffverhaltens der Magnesium-
legierung AZ31B für die numerische
Prozessauslegung
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce
thermo-mechanical flow behaviour of
hot stamping steels
LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformpro-
zessen durch maßgeschneiderte
tribologische Systeme
LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn-
und Umformprozesses beim Fügen art-
ungleicher Werkstoffe mittels
Schneidclinchverfahren
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationsmethode für das
3-Rollen-Schubbiegen
LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome
Bahnplanung für ein sicheres und
flexibles Roboter-Assistenzsystem
in der Fertigung
FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die
Zuverlässigkeit der Lötverbindungen
von Hochleistungs-Leuchtdioden
FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab.
2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung

LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Diese Forschungsarbeit untersuchte, welche Werkstoff- und Prozessfaktoren einen signifikanten Einfluss auf die Maßhaltigkeit von Baugruppen haben. Hauptziel dieser Arbeit war die Erarbeitung von Ursachen-Wirkungs-Zusammenhängen zur simulativen Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte von Baugruppen. Das Resultat ist eine baugruppenunabhängige Methodik, mit welcher sich der Einfluss von schwankenden Fügestationsparametern abschätzen lässt. Handlungsempfehlungen in Form von Prozessfenstern zur zukünftigen Gestaltung von Baugruppen mit geringeren Formabweichungen wurden generiert.

Eine Verbesserung der Maßhaltigkeit von prinzipiellen und realen Karosseriebaugruppen konnte durch die Optimierung von statistisch verteilter Eingangsgrößen der Spann- und Fixierprozesse erreicht werden. Veränderungen des Spann- und Fixierkonzeptes sind im Vergleich zu Werkzeugänderungen kostengünstiger. Aufgrund dieses Einsparpotentials wird das Thema in Zukunft ihre hohe Bedeutung behalten.

