



FAU Studien aus dem Maschinenbau 394

Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für
Verfahren der Blechmassivumformung

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 394

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Robert Schulte

**Auslegung und Anwendung
prozessangepasster Halbzeuge für
Verfahren der Blechmassivumformung**

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

Erlangen
FAU University Press
2022

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

Schulte, Robert. 2022. *Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 394. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-526-1.

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: 978-3-96147-525-4 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-526-1 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-526-1

**Auslegung und Anwendung prozessangepasster
Halbzeuge für Verfahren der Blechmassiv-
umformung**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Robert Schulte, M.Sc.

aus Herdecke

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

Tag der mündlichen Prüfung: 27.07.2021

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil Marion Merklein
Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier,
Leibniz Universität Hannover

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Gewonnene Erkenntnisse beruhen im Wesentlichen auf Untersuchungen, welche im Projekt A₁ „Verfahrenskombination zur umformtechnischen Herstellung von verzahnten, dünnwandigen Funktionselementen aus prozessoptimierten Blechhalbzeugen“ des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereiches Transregio 73 (SFB/TR73) „Blechmassivumformung“ durchgeführt wurden.

Mein besonderer Dank gilt Fr. Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein, Ordinaria des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie und Sprecherin des SFB/TR73 sowie Leiterin des Projekts A₁, für die intensive wissenschaftliche Betreuung meiner Forschungsarbeit. Die enge Zusammenarbeit in der zweiten und dritten Förderphase des Projekts sowie insbesondere während der Beantragung der finalen Förderphase, gaben mir Möglichkeit und Raum zur fachlichen und persönlichen Weiterentwicklung.

Des Weiteren gilt mein Dank Dr.-Ing. Michael Lechner, Dr.-Ing. Julia Degner, Matthias Graser und für die fachliche Diskussion der Arbeit. Darüber hinaus möchte ich meinen Projektkollegen Thomas Schneider, Philipp Hildenbrand und Manfred Vogel sowie Sabine Wittmann, Jürgen Kaiser und Reiner Stadter für die herausragende Zusammenarbeit und ihren Beitrag zum Gelingen des Projektes danken. In diesem Zusammenhang möchte ich mich auch herzlich bei Johannes Loos, Andreas Hetzel, Maximilian Kress und Simon Wituschek bedanken, welche die Untersuchungen durch studentische Arbeiten oder ihre Tätigkeiten als Studentische Hilfskräfte tatkräftig unterstützt haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt abschließend meiner Familie und meinen Freunden, welche stets ein verlässlicher Rückhalt waren und auf diese Weise auch ihren Teil zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben.

Erlangen, im Oktober 2021

Robert Schulte

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Inhaltsverzeichnis	5
Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	9
Abkürzungen	10
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik und Forschung	3
2.1 Leichtbau	3
Stoffleichtbau.....	4
Fertigungsleichtbau.....	4
2.2 Blechmassivumformung.....	5
2.2.1 Verfahrenseinteilung und Potential	6
2.2.2 Aktuelle Trends und Entwicklungen	10
2.3 Einstufige Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen zur Herstellung von Funktionsbauteilen	11
2.3.1 Verfahren und Bauteilgeometrien	11
2.3.2 Identifikation von Prozessgrenzen	13
2.3.3 Erweiterung identifizierter Prozessgrenzen.....	15
2.4 Zusammenfassende Bewertung	20
3 Wissenschaftliche Zielsetzung und Vorgehen zur Zielerreichung	23
4 Anlagen, Werkzeuge, Werkstoffe und Auswertemethoden	25
4.1 Hydraulische Tiefziehpresse Lasco TZP 400/3.....	25
4.2 Umformwerkzeuge und Bauteilgeometrien.....	26
4.3 Eingesetzte Stahlwerkstoffe und Schmierstoff.....	29
4.4 Numerische Umformsimulation zur Analyse des Materialflusses im Umformprozess	32
4.5 Prüf- und Auswertemethoden	34
4.5.1 Prüfung und Auswertung geometrischer Eigenschaften	34
4.5.2 Prüfung und Auswertung der Mikrohärtigkeit und Analyse der Gefügestruktur	37
4.5.3 Prüfung und Auswertung der Oberflächeneigenschaften	38

5	Anforderungsbasierte Anpassung der Werkzeuggeometrie zur Vermeidung identifizierter Prozessfehler bei der Weiterverarbeitung prozessangepasster Halbzeuge	41
5.1	Definition von Anforderungen an prozessangepasste Halbzeuge und Ableitung von Bewertungskriterien für Funktionsbauteile.....	41
5.2	Numerische Auslegung einer Werkzeuggeometrie zur Herstellung prozessangepasster Halbzeuge durch einen Taumelprozess.....	45
5.3	Umformtechnische Herstellung und Verarbeitung prozessangepasster Halbzeuge zur Herstellung außenverzahnter Funktionsbauteile	55
5.3.1	Umformtechnische Herstellung prozessangepasster Halbzeuge im Taumelprozess.....	55
5.3.2	Kompensation der Materialausdünnung im Tiefziehprozess durch den Einsatz prozessangepasster Halbzeuge	57
5.3.3	Vermeidung identifizierter Prozessfehler und Erhöhung der Formfüllung durch prozessangepasste Halbzeuge im Stauchprozess	59
5.4	Validierung der numerischen Ergebnisse durch die Durchführung und Auswertung experimenteller Untersuchungen.....	62
5.4.1	Validierung der numerischen Ergebnisse für das Taumelpressen prozessangepasster Halbzeuge	63
5.4.2	Validierung der numerischen Ergebnisse für das Tiefziehen prozessangepasster Halbzeuge zur Napfgrundform.....	64
5.4.3	Validierung der numerischen Ergebnisse für das Stauchen der Napfgrundform zu außenverzahnten Funktionsbauteilen.....	66
5.5	Zusammenfassende Bewertung der anforderungsbasierten Auslegung eines Werkzeugeinsatzes zur Herstellung prozessangepasster Halbzeuge und deren Weiterverarbeitung.....	68

6	Einflussanalyse der Eigenschaften von Halbzeugen auf das Prozessergebnis zur Verbesserung des Prozessverständnisses und zur Ableitung eines Prozessfensters.....	71
6.1	Herstellung und Charakterisierung prozessangepasster Halbzeuge aus dem Tiefziehstahl DCo4 als Basis der Erweiterung des Prozessverständnisses	73
6.2	Erweiterung des Prozessverständnisses um den Einfluss der Materialvorverteilung auf resultierende Bauteileigenschaften	78
6.2.1	Bauteileigenschaften nach dem Tiefziehen.....	78
6.2.2	Bauteileigenschaften nach dem Stauchen.....	84
6.3	Einfluss der Eigenschaften prozessangepasster Halbzeuge auf die Umformprozesse bei deren Weiterverarbeitung	90
6.4	Zusammenfassende Bewertung der Erkenntnisse zur Ableitung eines Prozessfensters für die Herstellung und den Einsatz prozessangepasster Halbzeuge	93
7	Nachweis der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf skalierte Bauteilgeometrien und Stahlwerkstoffe höherer Festigkeit	99
7.1	Skalierung von Bauteil- und Halbzeuggeometrien basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen	99
7.1.1	Herstellung prozessangepasster Halbzeuge für skalierte Bauteilgeometrien	100
7.1.2	Bauteile	103
7.1.2.1	Tiefziehen	103
7.1.2.2	Stauchen	106
7.2	Herstellung und Weiterverarbeitung prozessangepasster Halbzeuge unter Einsatz von Stahlgüten höherer Festigkeit..	108
7.2.1	Herstellung prozessangepasster Halbzeuge aus Stahlgüten höherer Festigkeit.....	109
7.2.2	Weiterverarbeitung prozessangepasster Halbzeuge aus Stahlgüten höherer Festigkeit zu Funktionsbauteilen....	112
7.2.2.1	Tiefziehen	113
7.2.2.2	Stauchen	116
7.3	Zusammenfassende Bewertung	121

8	Erweiterung des Werkstoffspektrums um eine ausscheidungshärtbare Aluminiumlegierung und Erweiterung der Prozessgrenzen durch den Einsatz lokaler Wärmebehandlung	125
8.1	Identifikation von Prozessgrenzen für die ausscheidungshärtbare Aluminiumlegierung AA6016 in der Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen	125
8.2	Anwendung lokaler Kurzzeitwärmebehandlung zur Erweiterung der identifizierten Prozessgrenzen	127
8.3	Transfer der Erkenntnisse auf prozessangepasste Halbzeuge aus der Aluminiumlegierung AA6016.....	131
8.4	Zusammenfassende Bewertung	134
9	Zusammenfassung und Ausblick	137
10	Summary and outlook	141
	Literaturverzeichnis	143

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
d	mm	Durchmesser
d_a	mm	Außendurchmesser Napf
d_B	mm	Durchmesser Bohrung
d_F	mm	Fußkreisdurchmesser
d_i	mm	Innendurchmesser Napf
d_K	mm	Durchmesser Kopfkreis
f^2	mm ²	Freifläche zwischen Werkzeug und Werkstück
h_N	mm	Napfhöhe
h_Z	mm	Zahnhöhe
h_{Ziel}	mm	Zielhöhe der umgeformten Bauteile
$l_{\ddot{u}}$	mm	Übergangslänge zwischen den Bereichen unterschiedlicher Blechdicke bei prozessangepassten Halbzeugen
r	mm	Radius
r		Korr
r_O	mm	Ausgangsradius
r_A	mm	Radialer Aufdickungsbeginn bei prozessangepassten Halbzeugen
r_{St}	mm	Radius Ziehstempel
s	mm	Blechdicke
s_o	mm	Ausgangsblechdicke
s_1	mm	Blechdicke im ausgedünnten Bereich prozessangepasster Halbzeuge
s_2	mm	Blechdicke im aufgedickten Bereich prozessangepasster Halbzeuge
s_{Soll}	mm	Soll-Blechdicke im aufgedickten Randbereich
C_{krit}		Kritischer Schädigungswert
F_{max}	kN	Maximalkraft
F_S	kN	Stauchkraft
F_T	kN	Taumelkraft
F_Z	kN	Ziehkraft
HV		Härte nach Vickers

R_z	mm	Mittlere Rautiefe
R_{zi}	mm	Einzelrautiefe
T	°C	Temperatur
T_{HT}	°C	Soll-Temperatur der lokalen Kurzzeit-Laserwärmebehandlung
U_h		Taumelrunden in der Hochfahrphase
U_k		Taumelrunden in der Hauptphase
U_r		Taumelrunden in der Runterfahrphase
V	mm ³	Volumen
V_{ges}	mm ³	Gesamtvolumen
v_L	mm/s	Verfahrgeschwindigkeit des Lasers
α	°	Winkel des Taumelstempels
Δs	mm	Blechdickendifferenz
Θ	°	Taumelwinkel

Abkürzungen

<i>Abkürzung</i>	<i>Beschreibung</i>
BMU	Blechmassivumformung
CAD	Computer Aided Design
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
TZP	Tiefziehpresse
WR	Walzrichtung

1 Einleitung

Das Streben nach Wachstum und Wohlstand erfordert stetig neue Produkte sowie die Weiterentwicklung und Verbesserung bestehender Anwendungen. Der Produktentwicklungszyklus neuer Fahrzeuge ist in den vergangenen Jahren auf lediglich drei bis vier Jahre verkürzt worden und wird sich, beschleunigt durch digitale Technologien, weiter verringern [1]. Neben unserer wirtschaftlichen Grundordnung spielen ökologische Rahmenbedingungen eine immer wichtigere Rolle. Diese manifestieren sich nicht zuletzt in der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rats. Die Verordnung schreibt 95 g CO₂/km als verbindlichen Grenzwert für die durchschnittlichen Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen eines Herstellers vor [2], da die Verbrennung fossiler Brennstoffe nach wie vor die größten CO₂-Emissionen verursacht [3]. In Deutschland entfällt der größte Anteil auf die Energiewirtschaft, gefolgt von Verkehr und Verarbeitendem Gewerbe [4]. Im Jahr 2018 betrug der durch den Verkehrssektor verursachte Ausstoß 164 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent. Hinzu kommt, dass der CO₂-Ausstoß in diesem Bereich im Gegensatz zu den meisten anderen Bereichen seit 1990 nicht gesenkt werden konnte und zuletzt sogar über diesen Referenzwert stieg [5]. Das Flottenziel von 95 g CO₂ pro gefahrenen Kilometer entspricht einem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch von etwa 4 Litern Benzin und etwa 3,6 Litern Diesel auf 100 Kilometern [6]. Im Jahr 2018 lag der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch eines PKW in Deutschland bei über 7 Litern auf 100 Kilometern [7] und erzeugte somit über 130 g CO₂ [8]. Die Strafe von 95 Euro für jedes Gramm, welches über dem Grenzwert liegt, stellt für einige Automobilhersteller ein Milliardenrisiko dar.

Zur Erreichung der gesetzlich vorgeschriebenen Emissionsziele werden großvolumige Saugmotoren immer häufiger durch turboaufgeladene Triebwerke mit kleineren Hubräumen ersetzt und vermehrt Fahrzeuge mit hybriden Antriebskonzepten entwickelt und angeboten. Sowohl beim sogenannten Downsizing als auch bei hybriden Antrieben müssen Komponenten des Antriebsstrangs zugleich leichter und leistungsstärker werden. Zum einen werden mit kleineren Hubräumen höhere Leistungen erzielt, was eine gesteigerte Beanspruchbarkeit einzelner Bauteile und -gruppen erfordert und zum anderen muss bei hybriden Antriebskonzepten das Zusatzgewicht des elektrischen Antriebs möglichst kompensiert werden. Des Weiteren stellen Elektromotoren konventionelle Getriebelösungen vor enorme Herausforderungen, da diese ihr volles Drehmoment unabhängig

von der Drehzahl abrufen können und in verschiedenen Ausbaustufen integriert werden sollen. Skalierbare Lösungen im Bereich der Hybridisierung von Personenkraftwagen gelten als Schlüssel zur Erreichung der Grenzwerte für den durchschnittlichen Flottenverbrauch ab 2021. [9]

Ebenjene Lösungen machen Fortschritte erforderlich, welche sich mit konventionellen Ansätzen und Prozessen häufig nicht mehr realisieren lassen. Verfahren der Umformtechnik weisen in diesem Zusammenhang hohes Potential bezüglich der erreichbaren Materialeffizienz und der Materialeigenschaften auf. Allerdings verhinderte die starre Einteilung der Verfahren in Blech- und Massivumformung lange eine Kombination beider Klassen, um die Limitationen der einzelnen Klasse zu erweitern. Derartige Anwendungen werden heute unter dem Begriff „Blechmassivumformung“ zusammengefasst. Nachdem bereits früher Untersuchungen zur Anwendung von Massivumformverfahren auf Blechhalbzeuge durchgeführt worden waren, führten Merklein et al. [10] die Definition dieser Verfahrensklasse ein und begannen diese im Rahmen des DFG Sonderforschungsbereiches Transregio 73 grundlagenwissenschaftlich zu erforschen. Dabei besteht die zentrale Herausforderung der Blechmassivumformung in der Steuerung des Stoffflusses während der Umformung. In diesem Zusammenhang hat sich der Einsatz prozessangepasster Halbzeuge, sogenannter Tailored Blanks, als grundsätzlich zielführend erwiesen und ist daher Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten sowie der vorliegenden Arbeit.

Vorrangiges Ziel dieser Arbeit ist die Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Herstellung von Funktionsbauteilen in einer Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen durch Auslegung und Einsatz prozessangepasster Halbzeuge. Um dieses Ziel zu erreichen, wird zu Beginn der Arbeit eine zielführende Halbzeuggeometrie definiert und hergestellt. Zur umformtechnischen Herstellung dieser wird ein Taumelprozess angewandt, welcher ebenfalls den Verfahren der Blechmassivumformung zuzuordnen ist. Über numerische und experimentelle Untersuchungen der Einflüsse der Halbzeugeigenschaften auf den Umformprozess und die resultierenden Bauteileigenschaften wird ein Prozessfenster für die Auslegung und Fertigung fehlerfreier Funktionsbauteile aufgespannt. Des Weiteren erlaubt der Einsatz kaltumgeformter und prozessangepasster Halbzeuge eine signifikante Verringerung des Bauteilgewichts bei gleichzeitig erhöhter Beanspruchbarkeit der hergestellten Funktionsbauteile und bietet somit das Potential die Emissionen kommender Fahrzeugbaureihen durch effizientere Getriebeleistungen zu verringern.

2 Stand der Technik und Forschung

Dieses Kapitel beschreibt den Stand der Technik der für die Untersuchungen relevanten Verfahren und dient als Grundlage der vorliegenden Forschungsarbeit. Zunächst werden die Grundzüge des Leichtbaus dargestellt, um im Anschluss die charakteristischen Merkmale der Blechmassivumformung (BMU) einzuführen und das Potential dieser Verfahrensklasse hinsichtlich der Herstellung leichter und funktionsintegrierter Bauteile aufzuzeigen. Nachfolgend wird die untersuchte Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen erläutert. In diesem Zusammenhang werden das Potential prozessangepasster Halbzeuge zur Erweiterung von Prozessgrenzen sowie Verfahren zu deren Herstellung vorgestellt. Mit einer abschließenden Zusammenfassung des Stands der Technik soll der Forschungsbedarf als Motivation für diese Arbeit abgeleitet werden.

2.1 Leichtbau

Ökologische und ökonomische Rahmenbedingungen stellen die Produktionstechnik vor immense Herausforderungen. Insbesondere die Automobilindustrie, welche bedingt durch manipulierte Abgasuntersuchungen massiv unter Druck geraten ist, verlangt nach zunehmend effizienteren Lösungen, um die Vorgaben der Europäischen Union hinsichtlich der CO₂-Emissionen erfüllen zu können [2]. Unabhängig vom Antriebskonzept stellt die Reduzierung von Gewicht bei mindestens gleichbleibender Belastbarkeit eine zentrale Entwicklungsaufgabe für Komponenten des Gesamtfahrzeugs dar. Diese Entwicklung lässt sich in unterschiedlich starker Ausprägung für andere Anwendungsbereiche, wie die Luft- und Raumfahrt, den Schienenverkehr oder das Bauwesen, übertragen. In sämtlichen Anwendungsbereichen definieren die Anforderungen und deren Gewichtung den Rahmen der Entwicklung, der Konstruktion und der Fertigung. Die zentralen Anforderungen in der Automobilindustrie stellen neben Ressourcenschonung und Kosten sowohl Sicherheit als auch Kundenakzeptanz und Recyclingfähigkeit dar [11]. Um möglichst geeignete Leichtbaustrukturen zu entwerfen, lassen sich verschiedene Bauweisen in unterschiedlichen Leichtbaustrategien anwenden. Nach aktuellem Stand wird bei den Bauweisen zwischen Differential-, Integral-, Modul- und Verbundbauweise [12], bei den Leichtbaustrategien zwischen Bedingungs-, Konzept-, Stoff-, Form- und Fertigungsleichtbau [13] unterschieden. Eine eindeutige Abgrenzung der Begriffe gegeneinander ist oftmals nicht möglich.

Nachfolgend werden der Stoff- und der Fertigungsleichtbau sowie aktuelle Entwicklungen in diesen Bereichen beschrieben, da diese von Bedeutung für den Gesamtzusammenhang der vorliegenden Arbeit sind.

Stoffleichtbau

Das Ziel des Stoffleichtbaus ist es, eine gegebene Struktur aus einem möglichst leichten Werkstoff herzustellen. Der naheliegende Ansatz in diesem Zusammenhang ist die Substitution eingesetzter Werkstoffe durch Werkstoffe mit geringerer Dichte, bei annähernd gleichbleibenden geometrischen Bauteileigenschaften. [11] Insbesondere im Bereich der Leichtmetalle und der Faserverbundwerkstoffe sowie im Bereich der Prozesse zu deren Herstellung und Weiterverarbeitung wurden in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht. Die Formgebungsgrenzen moderner Aluminiumlegierungen für Außenhautteile konnten bei verbesserten Oberflächeneigenschaften erweitert werden [14] und mit dem BMW i3 ist seit 2013 das erste Großserienfahrzeug mit einer Fahrgastzelle aus faserverstärktem Kunststoff auf dem Markt [15]. Der Vollständigkeit halber soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass in vielen Fällen konventionelle Tiefziehstähle durch hoch- und höchstfeste Stähle ersetzt werden und diese wiederum in einzelnen Fällen auch zur Substitution von Leichtmetallen oder Faserverbundwerkstoffen eingesetzt werden, welche dann wiederum geringere Materialstärken zulassen [16].

Fertigungsleichtbau

Gewichtseinsparpotentiale, welche sich durch Fertigungs- oder Montageprozesse realisieren lassen, werden dem Fertigungsleichtbau zugeordnet. Verfahren der Umformtechnik eignen sich in diesem Zusammenhang besonders, da sich Wandstärken bei Verbesserung der Werkstoffeigenschaften reduzieren lassen. [11] Die Grundlage für diesen Effekt bildet die Verfestigung, welche während der Kaltumformung auftritt und mit zunehmender Formänderung ansteigt. Durch umformtechnische Verfahren lassen sich Materialstärke und Festigkeit prozessangepasster Blechhalbzeuge, sogenannter Tailored Blanks, gezielt einstellen [17]. Eine maßgeschneiderte Einstellung der lokalen Halbzeugeigenschaften ist insbesondere für Strukturbauteile sinnvoll und ermöglicht den Verzicht auf Anbauelemente und Verstärkungen sowie auf die entsprechenden Fügeoperationen [18]. Bedingt durch die Materialeigenschaften und das Materialvolumen des Ausgangsblechs sowie die verfahrensspezifischen Prozessgrenzen ist die geometrische Gestaltungsfreiheit allerdings eingeschränkt.

Diese Einschränkungen lassen sich durch den Einsatz additiver Fertigungsverfahren überwinden [19]. Neben den Kosten ist in diesem Zusammenhang insbesondere die resultierende Wärmeeinflusszone als Nachteil zu nennen. Eine weitere Möglichkeit, Prozessgrenzen zu erweitern und die Materialeffizienz zu steigern, ist die Kombination etablierter Verfahren.

2.2 Blechmassivumformung

Verfahren der Blechmassivumformung liegt die Anwendung von Massivumformverfahren auf Blechhalbzeuge zugrunde. Ziel dieser Verfahrensklasse ist es, Vorteile von Massivumformverfahren und Blechhalbzeugen in einer Prozessklasse nutzbar zu machen und dadurch die Grenzen konventioneller Anwendungen zu erweitern. [10] Im internationalen Forschungsumfeld wird neben der englischen Übersetzung „Sheet-bulk metal forming“, insbesondere im asiatischen Raum, der Begriff „Plate forging“ genutzt, um die Anwendung von Massivumformverfahren auf Blechhalbzeuge zu beschreiben [20]. Grundlagen und aktuelle Entwicklungen in diesem Forschungsbereich werden in diesem Abschnitt diskutiert und zusammenfassend bewertet.

Typischerweise werden in Verfahren der Blechmassivumformung nach [10] Blechhalbzeuge mit einer Ausgangsdicke von einem bis zu fünf Millimetern verarbeitet. Die Anwendung etablierter Massivumformverfahren auf diese Blechhalbzeuge erzeugt die charakteristischen zwei- und dreidimensionalen Spannungs- und Formänderungszustände. Diese können zeitlich und örtlich versetzt auftreten und ermöglichen sowohl ein Ausdünnen als auch ein Aufdicken des Ausgangsmaterials. [10]

Bei der Herstellung von Funktionsbauteilen werden Massivumformoperationen häufig mit Verfahren der Blechumformung kombiniert, um dem flächigen Halbzeug die gewünschte Grundform zu geben [10]. Als Funktionselemente können beispielsweise Verzahnungs- [21] oder Mitnehmergeometrien [22] ausgeformt werden. Im Fokus dieser Arbeit stehen dickwandige Nebenformelemente, insbesondere Verzahnungen, welche die Ausgangsblechdicke signifikant überschreiten. In diesem Zusammenhang werden vorrangig Stauch- [23] und Fließpressprozesse [24] eingesetzt, welche hohe plastische Dehnungen hervorrufen, um die Nebenformelemente vollständig ausformen zu können. Die zentrale Herausforderung der Blechmassivumformung besteht dabei in der Kontrolle des Materialflusses [25]. Dies gilt für kontinuierliche Verfahren [26] ebenso wie für inkrementelle Prozesse [27]. Die unterschiedlichen Verfahren sowie deren Anwendungsbereiche werden im nachfolgenden Abschnitt vorgestellt.

2.2.1 Verfahrenseinteilung und Potential

Die sechs Hauptgruppen konventioneller Fertigungsverfahren sind in der DIN 8580 zusammengefasst und untergliedert [28]. Als Hauptgruppen definiert sind: Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und das Ändern der Stoffeigenschaften. Nach [29] werden Umformverfahren basierend auf den vorherrschenden Spannungszuständen untergliedert. Bedingt durch die Spannungszustände sind Massivumformverfahren zumeist der Druck- oder der Zugdruckumformung zugeordnet, wohingegen bei der Blechumformung zumeist Zugspannungsanteile dominieren. Diese Randbedingungen erfordern den Aufbau eines ganzheitlichen Prozessverständnisses, welches auch Schädigungsmechanismen [30] und geeignete Methoden zur Werkstoffcharakterisierung [31] umfasst.

Für Verfahren der Blechmassivumformung lässt sich diese Einteilung nur bedingt sinnvoll anwenden, da die vorherrschenden Spannungszustände lokal stark variieren können. In [32] wird ein Klassifizierungsschema für BMU-Verfahren eingeführt, welches relevante Verfahren nach Werkzeugkinematik und beabsichtigter Blechdickenänderung einteilt. Bei der Werkzeugbewegung wird zwischen translatorisch und rotatorisch unterschieden, bei der Dickenänderung zwischen Verfahren zur Ausdünnung, Aufdickung und zur Kombination der beiden. Besonders relevante Prozesse für die Materialausdünnung mit linearer Werkzeugbewegung sind das Stauchen sowie das Abstreck-Gleitziehen. Als Verfahren mit rotierender Werkzeugkinematik lässt sich alternativ das Drückwalzen anwenden. Erfordert die Zielgeometrie lokal aufgedickte Bereiche, können beispielsweise das Prägen oder das Drückwalzen eingesetzt werden. Sowohl die Ausdünnung als auch die Aufdickung des Ausgangsmaterials lässt sich unter linearer Werkzeugbewegung durch Schmiedeprozesse und bei rotierender Werkzeugbewegung durch einen Taumelprozess realisieren. [32]

Bedingt durch die Kombination der Vorzüge der Verfahrensklassen Blech- und Massivumformung, hinsichtlich Funktionsintegration und Leichtbau, lässt sich die Blechmassivumformung in unterschiedlichen Anwendungsbereichen sinnvoll einsetzen. Besondere Vorzüge bietet die hohe Materialeffizienz, welche sich über eine anforderungsgerechte Materialverteilung in Verbindung mit gesteigerten mechanischen Eigenschaften realisieren lässt. Hervorgerufen wird die Festigkeitssteigerung durch die Kaltumformung. In [33] wird die Herstellung eines Leichtbau-Zahnrad für den Kettentrieb eines Verbrennungsmotors vorgestellt, welches signifikante Gewichtseinsparungen bei erhöhter Ermüdungsfestigkeit aufweist. Abe et al.

nutzen in [34] einen mehrstufigen Blechmassivumformprozess zur Herstellung einer Radscheibe mit anforderungsangepasster Materialaufdickung. Die umformtechnische Verarbeitung bei Raumtemperatur ermöglicht durch die induzierte Kaltverfestigung die Steigerung der Beanspruchbarkeit des Bauteils [34]. Basierend auf dem Potential dieser Verfahrensklasse und ihrer Relevanz für den industriellen Einsatz wurden wissenschaftliche Erkenntnisse bereits erfolgreich in die Anwendung transferiert und das hohe Potential dieser Verfahren bestätigt. Dieser Aspekt hebt sowohl den fortschreitenden Reifegrad als auch die realisierbare Kosteneffizienz dieser Technologie hervor. Beispielhaft sei an erster Stelle die blechmassivumformtechnische Herstellung von Anlasserrädern bei der Schuler Cartec GmbH & Co. KG in Göppingen genannt [35]. Darüber hinaus stellen die Messtechnik [36] sowie die numerische Simulation von Umformprozessen [37] weitere bedeutende Forschungsfelder im Zusammenhang mit der Blechmassivumformung dar. Diese Verfahrensklasse stellt hohe und sehr unterschiedliche Anforderungen an die eingesetzte Messtechnik, da sowohl die Qualität der Bauteile als auch der Zustand der Werkzeuge erfasst und bewertet werden muss [36]. Im Sonderforschungsbereich Transregio 73 (SFB/TR 73) wurden in diesem Zusammenhang Systeme zur Analyse von Werkstücken [38] und Werkzeugen [39] aufgebaut und qualifiziert. Die hohen Anforderungen an die numerische Abbildung von BMU-Prozessen sowie deren Erfüllung sind Gegenstand der Untersuchungen in [37]. Nach Beese et al. liegt das Hauptaugenmerk in diesem Zusammenhang auf der Modellierung duktiler Schädigung, einer Anpassung des Reibgesetzes sowie dem Aufbau eines adaptiven Modells [37]. Zur Prozessauslegung können Simulationsergebnisse im Postprocessing über ein neuronales Netz herangezogen werden. [40].

Weiteres Potential offenbart die Blechmassivumformung für Anwendungen im Bereich der Fügetechnik. Pragana et al. entwickelten ein Verfahren, welches ein umformtechnisches Fügen zweier Aluminiumbleche mit Überlapp ermöglicht, ohne dass ein Schweiß- oder Klebverfahren angewandt werden muss. Die hohe Belastbarkeit der formschlüssigen Verbindung wurde in Scherversuchen nachgewiesen. [41] Am selben Institut wurde zudem eine Methodik zum Fügen senkrecht zueinander angeordneter Bleche erarbeitet, in welcher ebenfalls die plastische Deformation zur Erzeugung formschlüssiger Verbindungen genutzt wird [42].

Zusätzlich zu Potentialen bezüglich der Verbesserung von Bauteileigenschaften und Materialeffizienz bietet die BMU prozessseitig signifikante Vorteile. Moderne Anlagen in Verbindung mit innovativen Werkzeugkonstruktionen ermöglichen komplizierte Umformprozesse innerhalb

eines einzigen Pressenhubs [43]. Zudem erhöhen inkrementelle Umformverfahren die Flexibilität von Anlagen und Prozessen [44].

Bedingt durch die hohen Kontaktnormalspannungen sowie die zeitlich und örtlich variierenden Spannungs- und Dehnungszustände stellt diese Verfahrensklasse auf der Kehrseite enorme Herausforderungen für die Auslegung von Umformprozessen und -werkzeugen dar. Grenzen für die breite Anwendung werden dieser Verfahrensklasse insbesondere durch die anspruchsvolle Kontrolle des Materialflusses [45] sowie durch die hohen Werkzeugbelastungen [46] bei der Kaltumformung gesetzt.

Um Grenzen von Umformverfahren zu erweitern, erweisen sich maßgeschneiderte Lösungsansätze auf Halbzeugebene oftmals als zielführend [47]. Ein relevanter Ansatz zur Steigerung der Stoffflusskontrolle ist die prozessangepasste Einstellung der Oberflächenbeschaffenheit von Werkzeugen und/oder Werkstücken, diese werden als „Tailored Surfaces“ bezeichnet [48]. Über diese maßgeschneiderten Oberflächen lässt sich der Materialfluss im Umformprozess lokal hemmen oder begünstigen [49]. Ebenso wie Tailored Blanks erfordern auch Tailored Surfaces ein umfassendes Prozessverständnis, um diese Technologie zielführend einzusetzen. Merklein et al. [50] sowie Sieczkarek et al. [51] haben in diesem Zusammenhang grundlegende Untersuchungen durchgeführt und das Potential dieser Technologie für unterschiedliche Bauteilgeometrien nachgewiesen.

Ein nochmals gesteigertes Potential zur Erweiterung bereits identifizierter Grenzen bieten die Herstellung und Weiterverarbeitung von Tailored Blanks mit Blechdickengradienten. Erstmals wurden Halbzeuge mit maßgeschneidertem Blechdickenprofil Mitte der Achtzigerjahre von Thyssen Krupp entwickelt und bei der Fertigung des Audi 100 eingesetzt [52]. Diese „Tailor Welded Blanks“ bestanden aus Einzelblechen mit unterschiedlichen Güten, Dicken und Beschichtungen und wurden durch einen Laserschweißprozess gefügt, um die Bleche bedarfsgerecht zu kombinieren und Gewichtseinsparpotentiale zu realisieren [53]. Bezugnehmend auf diese Technologie wurden in [54] maßgeschneiderte Umformwerkzeuge präsentiert, welche in der Lage sind, das Umformergebnis signifikant zu verbessern. Durch die Untersuchungen in [55] wurde der Grundstein für die Herstellung und den Einsatz umformtechnisch hergestellter Tailored Blanks gelegt. Diese weisen keine Wärmeeinflusszonen auf und verfügen über kontinuierliche Übergänge zwischen den Bereichen unterschiedlicher Dicke. Tailored Blanks finden heute insbesondere in der Automobilindustrie vielfältige Anwendung [56]. So lassen sich durch Flexibles Walzen beispielsweise, je nach Bauteil, Blechdickenunterschiede von bis zu 50% und

Gewichtseinsparungen von bis zu 45% realisieren [57]. Neben Bandmaterial lässt sich eine gezielte Materialvorverteilung bei Blechzuschnitten und -ronden realisieren. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus [17] und [58] entwickelten Wang et al. [59] eine Methode zur walztechnischen Herstellung von Blechzuschnitten mit variabler Blechdicke. Nach [60] lassen sich durch einen Walzprozess auch gestapelte Blechzuschnitte zu Tailored Blanks verarbeiten. In [61] wird ebenfalls die walztechnische Herstellung von Rondens größerer Durchmesser vorgestellt. Ebenso wie bei der fuge-technischen Herstellung von Tailored Blanks bietet auch die Umformtechnik Möglichkeiten, die mechanischen Eigenschaften bei konstanter Blechdicke gezielt einzustellen. Zu diesem Zweck wurde ein Aluminiumwerkstoff lokal hochgradig plastisch verformt (engl. Severe Plastic Deformation), ohne die Blechdicke final zu ändern [62]. Nach [62] lassen sich durch das vorgestellte Verfahren über eine entsprechende Anpassung des Umformwerkzeugs auch Tailored Blanks mit Bereichen unterschiedlicher Blechdicke herstellen. Die umformtechnische Herstellung eines prozessangepassten Halbzeugs durch einen Stauchprozess wird von Tajul et al. in [63] erläutert. Diese übertragen die Prinzipien und Wirkmechanismen der kontinuierlichen Prozesse auf vereinzelte Blechstreifen. Darüber hinaus lassen sich lokale Materialanhäufungen auf Blechen für Schraubverbindungen nutzen [64] oder dienen der Erweiterung der Formgebungsgrenzen in Single-Point-Incremental-Forming-Verfahren (SPIF) [65]. Additive Verfahren erlauben zudem die prozessangepasste Bereitstellung von zusätzlichem Materialvolumen auf den entsprechenden Halbzeugen [19].

Über die Auslegung und Entwicklung neuer Prozesse hinaus ist die Erweiterung identifizierter Grenzen hinsichtlich der Formgebung und des einsetzbaren Werkstoffspektrums wesentlicher Bestandteil aktueller Forschungsarbeiten. Eine bewährte Methode zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen in der Umformtechnik stellt der Einsatz lokaler oder globaler Wärmebehandlungen dar [66]. In [67] wird eine lokale Wärmebehandlung eingesetzt, um die Fließspannung des eingesetzten Vergütungsstahls zu verringern und die gewünschte Randaufdickung der Ronde realisieren zu können. Während bei Stahlwerkstoffen zumeist eine Reduzierung der Fließspannung und eine dadurch verringerte Prozesskraft angestrebt werden, wird bei Aluminiumlegierungen häufig versucht, das eingeschränkte Formgebungsvermögen, welches insbesondere unter Zugspannungen kritisch ist, zu erhöhen [68]. Für den Einsatz ausscheidungs-härtbarer Aluminiumlegierungen der 6000-er Serie wurde in [69] eine Methodik zur Herstellung von Bauteilen mit gradierten Eigenschaften aus Blechronden vorgestellt. Jin et al. [69] untersuchten die umformtechnische

Herstellung eines Napfes mit unterschiedlichen Materialstärken, angelehnt an Bauteile eines Satelliten.

2.2.2 Aktuelle Trends und Entwicklungen

Bedingt durch die Vielschichtigkeit des Forschungsgebiets und die zunehmende Verknüpfung von Technologien und Disziplinen, sind auch die aktuellen Forschungsarbeiten breit gefächert. Diese Tatsache unterscheidet die Blechmassivumformung als Verfahrensklasse und Forschungsfeld von den etablierten Bereichen der Blech- und Massivumformung.

Die Reduzierung des Bauteilgewichts sowie die Funktionsintegration stehen im Fokus der meisten aktuellen Untersuchungen. Laue et al. präsentieren in [70] eine Kombination inkrementeller Umformprozesse zur Herstellung profilierter Hohlbauteile. Durch die Kombination von Rotationschwenkbiegen und Profilieren gelang es in diesem Fall über eine Aufdickung des Werkstoffs, im Vergleich zu den Referenzprozessen, verbesserte geometrische Bauteileigenschaften zu erreichen [70]. Eine Verbesserung der Bauteileigenschaften bei zeitgleicher Verkürzung der Prozesskette wird auch in den Untersuchungen in [71] angestrebt und realisiert. Über das zweistufige Anstauchen eines Napfes wurde dieser mit einer Nabe versehen. Somit ließen sich die konventionellen Herstellverfahren Schmieden und Fräsen substituieren und die Vorteile der Kaltumformung hinsichtlich Materialeffizienz und mechanischer Eigenschaften nutzen. Zhu et al. konnten über die Kontrolle der Umformzone einen Napf mit aufgedickter Zarge herstellen [72].

Neben den Verfahren zur Herstellung von Tailor Rolled Blanks (TRB) [73] und Tailor Rolled Strips (TRS) [17] werden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 666 kontinuierliche BMU-Prozesse zur Herstellung von verzweigten Strukturen erforscht [74]. Auch in diesem Prozess macht der dreidimensionale Materialfluss beim Spaltprofilieren und -biegen aufwendige Fügeverfahren mit hohem Wärmeeintrag überflüssig und ermöglicht eine Verbesserung der Bauteileigenschaften [75].

Die unter Abschnitt 2.2.1 beschriebene Füge-technologie, welche auf Mechanismen der BMU beruht, wurde in [76] auf unterschiedliche Werkstoffe übertragen, um die Flexibilität des Prozesses durch ein gesteigertes Prozessverständnis zu erhöhen. Neben Legierungen der 5000er- und 6000er-Serie wurden in [77] zudem Bleche der 7000er-Serie verarbeitet und analy-

siert, um ein Prozessfenster zur Herstellung von Tailored Blanks abzuleiten. In den Untersuchungen konnten bei günstiger Wahl der Werkzeuggeometrie Materialausdünnungen zwischen 35% und 45% erzielt werden [77].

In [46] werden maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen für eine Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit in Blechmassivumformprozessen qualifiziert. Zudem untersuchten Gerstein et al. die durch Blechmassivumformverfahren hervorgerufene Schädigung an verzahnten Bauteilen sowie deren Entwicklung über den Umformprozess [78]. Hierbei sind insbesondere die zeitlich und örtlich variierenden Spannungszustände zu berücksichtigen, welche unterschiedliche Schädigungsmechanismen bedingen. Hierbei dominiert unter überlagerten Druckspannungen die Porenbildung [78]. Das aufgebaute Prozessverständnis kann zur Erstellung von Gestaltungsrichtlinien zur Prozessauslegung sowie zur Erweiterung identifizierter Grenzen genutzt werden.

2.3 Einstufige Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen zur Herstellung von Funktionsbauteilen

Die im Rahmen des SFB/TR 73 entwickelte Verfahrenskombination verbindet eine Tiefzieh- und eine Stauchoperation und dient der einstufigen Herstellung von Funktionsbauteilen aus Stahlblech. Dabei ist den geometrischen Bauteilvarianten die Napf-Grundform gemein. Umlaufend können durch den Prozess dick- [21] und dünnwandige [22] Nebenformelemente, sowie deren Kombination [79] realisiert werden. Als dickwandige Funktionselemente werden in diesem Zusammenhang Verzahnungsgeometrien verstanden, welche in ihrer maximalen Materialstärke über die Ausgangsblechdicke hinausgehen. Als dünnwandige Funktionselemente werden offene Mitnehmergeometrien bezeichnet, welche die Ausgangsblechdicke in ihrer finalen Form nicht wesentlich übersteigen.

2.3.1 Verfahren und Bauteilgeometrien

Der Werkzeugaufbau zur einstufigen Kombination von Tiefziehen und Stauchen sowie dazugehörige Prozessführungsstrategien wurden in [23] ausgelegt und analysiert. Das erarbeitete Konzept mit modularem Aufbau erlaubt eine effiziente und zugleich flexible Nutzung des Umformwerkzeugs. Die Grundform der hergestellten Bauteile wird durch einen Tiefziehprozess realisiert. Von Schneider [23] wurden die Auswirkungen von werk-

stück- und werkzeugseitigen Einflüssen auf das Prozessergebnis grundlegend untersucht. Dabei erzeugt der angewandte Tiefziehprozess mit dem gezogenen Napf die Eingangsgröße für den nachfolgenden Stauchprozess und hat somit erheblichen Einfluss auf die finalen Bauteileigenschaften. Der Aufbau eines Prozessverständnisses und die darauf basierende Sicherstellung einer ausreichenden Materialflusskontrolle sind Grundvoraussetzungen für die Vermeidung von Prozessfehlern im Stauchprozess. Durch diese Randbedingung unterscheidet sich der angewandte Tiefziehprozess in einigen Punkten vom konventionellen Napfzug. Da während des Tiefziehens keine Falten erster Ordnung auftreten, wurde auf einen Niederhalter verzichtet [23]. Die Aufwölbung des Bauteilbodens wird über ein Klemmen der Ronde durch einen Gegenhalter vermieden. Zusätzlich unterlag die Auslegung des Ziehstempels und des Ziehspalts besonderen Anforderungen. In [23] wurde nachgewiesen, dass der Ziehstempelradius möglichst groß zu wählen ist, um die Materialausdünnung in diesem Bereich gering zu halten. Jedoch bedingt ein größerer Ziehstempelradius trotz verringerter Materialausdünnung eine Vergrößerung des Volumens zwischen Werkstück und Werkzeug [47]. Der gezogene Napf wird im selben Pressenhub gestaucht. Die Besonderheiten des Stauchprozesses in der BMU sind weniger prozessseitig als vielmehr halbzeugseitig bedingt und führen zu den zentralen Prozessfehlern. Nach [32] dient das Stauchen in der Blechmassivumformung der gezielten Materialausdünnung bei linearer Werkzeugbewegung. Jedoch wird das Halbzeug im untersuchten Prozess senkrecht zur Blechdickenrichtung gestaucht. In diesem Fall ist insbesondere das Verhältnis von Napfhöhe zu Blechdicke, analog zum Stauchverhältnis nach [80], als Grenze des Ausknickens zu berücksichtigen.

Der modulare Werkzeugaufbau und die Möglichkeit des Austausches von Aktivteilen erlauben die Herstellung verschiedener Bauteilgeometrien in einem Grundaufbau. Grundsätzlich wird, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, zwischen dick- und dünnwandigen Nebenformelementen unterschieden.

Dickwandige Nebenformelemente bestehen in diesem Kontext aus Verzahnungsgeometrien oder geschlossenen Mitnehmern, wobei sich der Fokus dieser Arbeit auf die umformtechnische Herstellung von außenverzahnten Funktionsbauteilen richtet. Der Ziehring verfügt in diesem Falle über eine Innenverzahnung, welche einen umlaufend variierenden Ziehspalt bedingt. Die minimale Breite im Zahnfuß der Werkzeugkavität entspricht mit 2,4 mm der Literaturvorgabe von $s_0 \times 1,2$ [81], im Zahnkopf beträgt der maximale Ziehspalt 3,6 mm [23]. Bauteile aus dem Referenzhalbzeug mit

einem Ausgangsdurchmesser von $d_o = 100$ mm und einer Ausgangsblechdicke von $s_o = 2$ mm weisen nach der Umformung die charakteristische Rillen- und Faltenbildung auf, welche in [23] als Prozessfehler identifiziert wurden. Eine Vergrößerung des Rondendurchmessers erlaubt zwar eine Erhöhung des Materialvolumens im Bereich der Verzahnungskavität, jedoch führt das doppelte Ausknicken im Bereich der Zarge zu einer Steigerung des unkontrollierten Materialflusses [23]. Dieser lässt sich durch den Einsatz höherer Ausgangsblechdicken kompensieren, welche eine Vermeidung der Rillenbildung bei reduzierter Formänderung zulassen. Bei einer Stauchkraft von $F_S = 800$ kN und einer Napfhöhe von $h_N = 15$ mm lässt sich die Formfüllung durch den Einsatz eines Bleches mit einer Ausgangsdicke von $s_o = 3$ mm um etwa 10% steigern [23]. Auf diese Weise lässt sich die als zweiter zentraler Prozessfehler identifizierte Faltenbildung allerdings nicht verhindern. Des Weiteren muss im Bodenbereich ein deutlich erhöhtes Materialvolumen in Kauf genommen werden, welches das Leichtbaupotential deutlich einschränkt.

Die Bauteilgeometrie mit dünnwandigen Nebenformelementen weist drei zyklisch-symmetrisch angeordnete offene Mitnehmer auf. Der umlaufend variierende Materialeinzug und die damit verbundenen radialen und tangentialen Stoffflussanteile sorgen für Abweichungen von der Ausgangsblechdicke von zwischen -32,5% bis +14,5% [23]. Die uneinheitliche Napfhöhe konnte durch eine iterative Anpassung des Platinenlayouts ausgeglichen werden [23]. Durch einen vergleichsweise schmalen Ziehspalt lassen sich schon bei geringerem Hub höhere Formfüllungen erreichen. Aufbauend auf den wissenschaftlichen Untersuchungen in [82] und [25] wurde in [79] eine Kombination von Verzahnung und offenem Mitnehmer analysiert, um Erkenntnisse bezüglich des auftretenden Stoffflusses sowie der wechselseitigen Beeinflussung der verschiedenartigen Funktionselemente zu gewinnen. Bedingt durch das gesteigerte Potential einer prozessangepassten Materialvorverteilung für die Herstellung von Bauteilen mit dickwandigen Nebenformelementen beschränkt sich diese Arbeit auf die Untersuchung außenverzahnter Nöpfe.

2.3.2 Identifikation von Prozessgrenzen

Die Definition und Identifikation von Prozessgrenzen ist wesentlich für die Beurteilung der Bauteilqualität und ermöglicht das Aufstellen eines Prozessfensters, in welchem sich fehlerfreie Funktionsbauteile herstellen lassen. Bei den nachfolgenden Untersuchungen gelten die Prozessgrenzen als erreicht, sobald die beschriebenen Fehlerbilder auftreten.

Die Zarge des Napfes weist bereits bei einem Rondendurchmesser von $d_0 = 100$ mm ein ungünstiges Stauchverhältnis auf, welches zu einem Ausknicken der Zarge unter der aufgebrachten Stauchkraft führt. Bei vergrößertem Rondendurchmesser knickt die Zarge mehrfach aus [23]. Durch das Ausknicken entsteht eine umlaufende Rille, welche eine vollständige und fehlerfreie Füllung der Zahnkavität verhindert. Hinzu kommt, dass das Stauchen bei entsprechend großer Kontaktfläche einen Materialfluss von der Zarge in den Bauteilboden bewirkt, welcher sich in zweierlei Hinsicht negativ auswirkt. Zum einen verschlechtert sich die Bauteilqualität durch Faltenbildung und zum anderen verringert der Materialfluss aus dem Bereich der Funktionselemente in den Bauteilboden das Leichtbaupotential. [23] Die Faltenbildung beschreibt nach [23] eine Einfaltung des Werkstoffes am Ziehstempelradius. Unter der aufgebrachten Stauchkraft hebt der Werkstoff vom Ziehstempel ab und bildet so einen Freiraum. Bedingt durch unzureichende Materialflusskontrolle wird das Material bei fortschreitendem Stauchprozess in diesem Bereich zusammengeschoben und radial nach innen verdrängt [82]. Das tiefgezogene Blechhalbzeug erfordert durch sein ungünstiges Höhen- zu Dickenverhältnis im Bereich der Zarge eine verbesserte Materialflusskontrolle und innovative Halbzeugstrategien zur Vermeidung identifizierter Prozessfehler im Stauchprozess [83].

Werkstoffseitige Limitierungen wurden anhand des Einsatzes unterschiedlicher Aluminiumlegierungen analysiert. Die gewonnenen Erkenntnisse für die blechmassivumformtechnische Herstellung von Funktionsbauteilen aus Stahlwerkstoffen wurden in [84] auf eine Aluminiumlegierung der 5000er-Serie übertragen. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse wurde durch eine Gegenüberstellung mit den Referenzbauteilen aus DCo4 nachgewiesen. Bedingt durch die niedrigere Festigkeit der Aluminiumlegierung AA5182 sind geringere Prozesskräfte erforderlich. Zudem ergaben die Mikrohärtmessungen, bei identischer Zielgeometrie geringere Werte. [84] Die Grenze für ein fehlerfreies Prozessergebnis wurde mit Einsatz einer ausscheidungshärtbaren Legierung der 6000er-Serie überschritten. Das verringerte Formänderungsvermögen dieser Legierung und die unzureichende Stoffflusskontrolle führten zu Bodenreißen im Tiefziehprozess. [85]

2.3.3 Erweiterung identifizierter Prozessgrenzen

Ein innovativer und vielversprechender Ansatz zur Erweiterung der Prozessgrenzen stellt, wie unter Abschnitt 2.1.2 eingeführt, der Einsatz von prozessangepassten Halbzeugen dar. Durch die Verarbeitung prozessangepasster Halbzeuge lassen sich im Sinne des Fertigungsleichtbaus sowohl Materialvolumen als auch Materialeigenschaften anforderungsgerecht bereitstellen [12]. Zudem kann die Effizienz gesteigert werden, indem klassische Ansätze wie das Verhindern des Ausknickens während des Stauchens durch eine mehrstufige Prozessführung [80] überwunden werden.

Die Anpassung der tribologischen Bedingungen durch Tailored Surfaces bietet das Potential einer erhöhten Stoffflusskontrolle bei ansonsten weitgehend gleichbleibenden geometrischen und mechanischen Halbzeugeigenschaften. Tailored Surfaces können werkstück- und werkzeugseitig aufgebracht werden und den Materialfluss wahlweise sowohl begünstigen als auch hemmen [86]. Eine werkstückseitige Erhöhung der Rauheit in definierten Bereichen ist mit erhöhtem Aufwand verbunden, da jede Ronde einzeln behandelt werden muss. Jedoch erlaubt die werkstückseitige Anpassung eine schnelle Aussage zur grundsätzlichen Wirksamkeit sowie eine gesteigerte Flexibilität hinsichtlich der gewünschten tribologischen Bedingungen. In [87] und [88] wurde die Eignung gestrahlter Ronden für den Einsatz in BMU-Prozessen nachgewiesen. Darüber hinaus qualifizierten Löffler et al. mikrostrukturierte Werkstückoberflächen für die Blechmassivumformung [89]. Bei werkzeugseitigen Tailored Surfaces stellt die Verschleißbeständigkeit eine der zentralen Herausforderungen dar. Kann diese sichergestellt werden, birgt dieser Ansatz wirtschaftliches und technologisches Potential. Die Erhöhung der Oberflächenrauheit zur Hemmung des Materialflusses in definierten Bereichen kann dabei durch spezielle Beschichtungen zur Begünstigung des Materialfluss erweitert werden [90]. Auf diese Weise ließ sich die Formfüllung der Funktionselemente steigern, ohne dass hier zusätzliches Materialvolumen bereitgestellt wurde [91]. Darüber hinaus wurden in [92] Strukturen entwickelt und spanend gefertigt, welche den Materialfluss richtungsabhängig beeinflussen. Es bleibt allerdings festzuhalten, dass obwohl die Materialflusskontrolle verbessert und die Formfüllung gesteigert werden können, ein gänzlich Vermeiden der identifizierten Prozessfehler durch den Einsatz von Tailored Surfaces nicht möglich ist [23].

Um größere Differenzen zwischen benötigtem und vorhandenem Materialvolumen auszugleichen, werden Tailored Blanks eingesetzt, welche eine

prozessangepasste Materialvorverteilung aufweisen [93]. Diese Materialvorverteilung kann einerseits über einen entsprechend angepassten Platinienschnitt oder aber über eine gezielte Anpassung des Blechdickenprofils erfolgen. Der Einsatz eines prozessangepassten Zuschnitts eignet sich insbesondere für die Herstellung von Bauteilen mit dünnwandigen Funktionselementen, um die Höhenunterschiede der Zarge nach dem Tiefziehprozess zu egalisieren, welche bedingt durch die größeren radialen Positionen der Mitnehmer auftreten. Die Erhöhung der benötigten Ziehkraft auf etwa 60 kN kann vernachlässigt werden, da diese nur einen Bruchteil der anschließend benötigten Stauchkraft ausmacht. Diese ist für den angepassten Zuschnitt ab einem Hub von 3,1 mm geringer, da die lokal stark unterschiedliche Formfüllung der Werkzeugkavität hohe Kontaktnormalspannungen und längere Fließwege hervorruft. [23] Basierend auf den Erkenntnissen aus [23] konnte die Materialflusskontrolle für Funktionsbauteile mit verschiedenartigen Nebenformelementen durch eine Anpassung des Platinienschnitts verbessert werden [79]. Jedoch lassen sich Rillen- und Faltenbildung im Bereich der dickwandigen Funktionselemente auch durch diesen Ansatz nicht vermeiden und werden durch eine radiale Vergrößerung des Zuschnitts gegebenenfalls noch verstärkt. Eine effektivere, wenn auch aufwendigere Methode stellt die umformtechnische Herstellung von Tailored Blanks mit prozessangepasstem Blechdickenprofil dar. Im Gegensatz zur Anpassung des Rondenzuschnitts bleibt das Volumen und somit das Gewicht des Tailored Blanks stets gleich. Die prozessangepasste Materialvorverteilung erhöht somit das Leichtbaupotential und erlaubt aussagekräftige Vergleiche der erzielten Bauteileigenschaften mit jenen von Bauteilen aus konventionellen Ronden. Die grundsätzliche Eignung von Tailored Blanks mit prozessangepasstem Blechdickenprofil wurde im Kontext der Blechmassivumformung sowohl für Stauch- [94] als auch für Fließpressprozesse [95] nachgewiesen. Randaufgedickte Ronden führen durch das zusätzliche Materialvolumen in der Zarge zu einem deutlich günstigeren Stauchverhältnis. Auf diese Weise lässt sich ein Ausknicken der Zarge im Ziehspalt verhindern. Des Weiteren stellen sowohl die geringere Blechdicke als auch die mit der Umformung einhergehende Kaltverfestigung Fließbehinderungen für den Materialfluss aus der Zarge in den Bauteilböden dar [23]. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass die radiale Position des Aufdickungsbeginns aus den Untersuchungen zur Herstellung prozessangepasster Halbzeuge in [96] stammt und nicht unter Berücksichtigung der nachfolgenden Weiterverarbeitung der Ronden ausgelegt wurde. Durch den Aufdickungsbeginn, welcher mit einer radialen Position von $r_A = 40$

mm den Außenradius des Ziehstempels übersteigt und die damit zu geringe Blechdicke am Ziehstempelradius, kann die Faltenbildung nicht unterbunden werden, wie Bild 1 verdeutlicht [97].

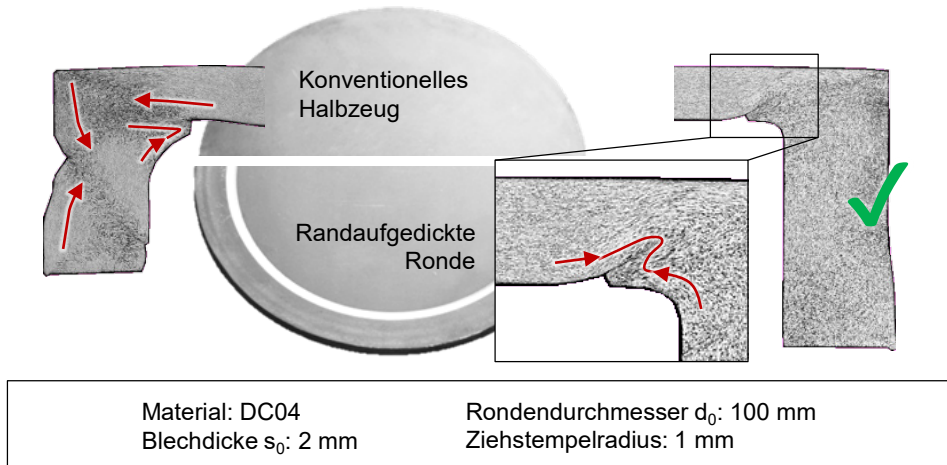


Bild 1: Ausgangssituation mit verbesserten Bauteileigenschaften durch randaufgedickte Ronden nach [23]

Eine kombinierte Nutzung verbesserter geometrischer und mechanischer Halbzeugeigenschaften wird im SFB/TR 73 angestrebt, um fehlerfreie und maßhaltige Funktionsbauteile herstellen zu können [98]. Zu diesem Zweck wurden inkrementelle Walzprozesse entwickelt, welche eine prozessangepasste Materialvorverteilung für die Herstellung randaufgedickter Ronden zur Weiterverarbeitung zu außenverzahnten Bauteilen [99] oder außenverzahnten Näpfen [100] ermöglichen. Die geringe Größe der Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück erlauben das Erzeugen hoher Blechdickengradienten und einer starken Kaltverfestigung der entsprechenden Bereiche. Diese Vorteile werden allerdings durch lange Prozessdauern und das Spannkonzentration mit Niederhalter zunichtegemacht [100]. Daher wurden zudem ein Stauch- und ein Taumelprozess eingeführt und im Hinblick auf die Prozesscharakteristika untersucht. Der Stauchprozess bietet die Möglichkeit Materialvolumen aus dem inneren in den äußeren Bereich der Ronde zu verdrängen und bei einer Ausgangsblechdicke von $s_0 = 2$ mm und einer Stauchkraft von $F_{Smax} = 6.000$ kN Dickenunterschiede von bis 0,7 mm zu erzielen [97]. Das Taumelpressen erlaubt, bedingt durch eine Verkippung einer Stauchbahn und die damit einhergehende Verringerung der Kontaktfläche, eine Reduzierung des Kraftbedarfs um bis zu 65% [101]. Grundsätzlich lassen sich durch das flexible Walzen und das Taumeln nahezu identische Tailored Blank-Geometrien herstellen [102]. Bedingt

durch die höhere Materialeffizienz und die geringere Prozesszeit findet in der vorliegenden Arbeit jedoch ausschließlich das Taumelverfahren Anwendung.

Im nachfolgenden Abschnitt sollen die für das grundlegende Prozessverständnis des Taumelpressens wesentlichen Punkte erläutert werden. Das Taumelpressen ist ein Massivumformverfahren, welches durch die auftretenden Spannungszustände der Druckumformung zugeordnet wird. In der industriellen Anwendung wird dieses Verfahren zum Beispiel zur Herstellung von Kegelrädern [103] oder Zahnstangen [104] eingesetzt. In wissenschaftlichen Untersuchungen konnte das Potential des Verfahrens für die Substitution von konventionellen Stauchprozessen [105] und für die Herstellung von Tailored Blanks [98] erfolgreich nachgewiesen werden. Grundlegend für das Taumelpressen ist die Verkippung des Ober- oder Unterwerkzeugs um einen definierten Taumelwinkel und die rotierende Bewegung des verkippten Werkzeugs über das Werkstück. Die Taumelkinematik wird in der Regel über das Oberwerkzeug bei einer maximalen Auslenkung zwischen 2° [106] und 10° [107] ausgeführt. Die resultierende Spannungsverteilung weist eine deutlich verringerte Maximalspannung auf, zudem begünstigt die Rollreibung den radialen Materialfluss [108]. Je nach Prozessführung kann beim Taumeln eine verstärkte Materialausdünnung in der Werkstückmitte auftreten [109]. In Abhängigkeit des Formänderungsvermögens des Werkstoffs können zudem Risse an der Mantelfläche des Werkstücks auftreten [110]. Je nach Anlage lassen sich neben der konventionellen, kreisförmigen Taumelbewegung auch andere Kinematiken einstellen. Diese erlauben eine Anpassung der Prozessführung an die Sollgeometrie und die gewünschten Eigenschaften. Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens werden in [111] aufgezeigt. Im Kontext der Tailored Blank-Herstellung zeigten Merklein et al., dass eine Einstellung der geometrischen und mechanischen Eigenschaften insbesondere über die Taumelkraft und die Anzahl der Taumelrunden möglich ist [112]. Hervorzuheben ist, dass durch die Anwendung dieses Verfahrens eine deutliche Steigerung der Ermüdungsfestigkeit erreicht wird [99]. Besserer et al. konnten in diesem Zusammenhang nachweisen, dass die positiven Effekte der Kaltverfestigung in der Blechmassivumformung das Auftreten duktiler Schädigung überkompensieren können [113]. Eine weitere Verbesserung der Halbzeugeigenschaften lässt sich durch die Anwendung von Verfahren zur Wärmebehandlung erzielen [114]. Das Taumeln birgt demnach nicht nur Vorteile in der Herstellung von Halbzeugen oder Bauteilen, sondern auch bei deren Einsatz.

Für die Auslegung von Tailored Blanks hingegen werden zumeist aufwendige Untersuchungen in Form von Variantensimulationen herangezogen. Nach [47] wurden die wesentlichen geometrischen Parameter des Halbzeuglayouts variiert, um sich einer idealisierten Geometrie anzunähern. Die Berücksichtigung der Umformhistorie der Ronde sowie die Verwendung von dreidimensionalen Modellen verbessern die Ergebnisqualität, führen jedoch auch zu entsprechend langen Rechenzeiten. In [115] konnte in einer Gegenüberstellung der unterschiedlichen Halbzeugstrategien gezeigt werden, dass zuvor identifizierte Prozessfehler durch den Einsatz von Tailored Blanks vermieden werden können.

Wie zuvor beschrieben, gibt es aktuell nur vereinzelt Ansätze zur Auslegung prozessangepasster Halbzeuge für die Blechmassivumformung. In [116] wird eine Auslegung von werkzeugseitigen Tailored Surfaces vorgestellt, welche bei Vorhandensein eines grundlegenden Prozessverständnisses auf andere Prozesse übertragbar ist. An dieser Stelle ermöglicht die numerische Umformsimulation eine Definition der Bereiche, in welchen der Materialfluss gehemmt oder begünstigt werden soll [92]. Für die Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen, welche Gegenstand dieser Arbeit ist, wurde der Materialfluss in den Bauteilboden gehemmt und im Bereich der Verzahnung begünstigt. Auf diese Weise konnte die Formfüllung im Bereich der Außenverzahnung signifikant gesteigert werden [86].

Einen vielversprechenden Ansatz zur effizienten Auslegung von Tailored Blanks stellt die inverse Formfindung dar. Bei diesem Ansatz werden Abweichungen zwischen der berechneten und der Zielkonfiguration unter Verwendung eines Quasi-Newton Ansatzes iterativ minimiert [117]. Das grundsätzliche Potential dieses Optimierungsansatzes für die Auslegung von Tailored Blanks wurde von Landkammer [118] nachgewiesen. Der knotenbasierte Ansatz arbeitet nicht-invasiv, es erfolgen demnach während der Optimierung weder Eingriffe in die Umformsimulation noch in die mechanische Formulierung, wie noch in [119]. Es bleibt allerdings festzuhalten, dass dieser Ansatz Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten ist und noch einige Herausforderungen zu bewältigen sind [120]. Diese sind insbesondere die Berücksichtigung der Herstellbarkeit in Umformprozessen sowie die Nutzung dreidimensionaler Modelle [121].

Um die Prozessgrenzen für den Einsatz von Aluminiumlegierungen zu erweitern und den versagensfreien Einsatz der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6016 im Zustand T4 zu ermöglichen, wurde in [85] eine Strategie zur lokalen Kurzzeitlaserwärmebehandlung zur Verbesserung der Stoff-

flussteuerung ausgelegt und angewandt. Diesem Ansatz liegt die temporäre Auflösung der im Zustand T₄ vorliegenden Ausscheidungen von MgSi-Cluster, welche bei der Kaltauslagerung entstehen, zugrunde [122]. Durch diese werden die Bewegungen von Versetzungen als Träger des plastischen Werkstoffverhaltens behindert [6]. Um die Festigkeit von Legierungen der 6000er-Serie zu senken und zeitgleich deren Duktilität zu steigern, ist die erreichte Maximaltemperatur von zentraler Bedeutung. Abhängig von der Legierung wird die maximale Entfestigung bei Temperaturen zwischen 320°C und 400°C erreicht [123]. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass eine deutliche Erhöhung der Stoffflusskontrolle und eine damit einhergehende Steigerung des Formänderungsvermögens eine zielführende Kombination von festen und entfestigten Bereichen voraussetzt. Der Einsatz von Aluminiumlegierungen eröffnet, je nach Anforderungen und Anwendungsbe- reich, neue Potentiale zur Gewichtsreduktion und zur Steigerung der Effizienz verschiedener Antriebskonzepte [85].

2.4 Zusammenfassende Bewertung

Verfahren der Blechmassivumformung bieten ein hohes Potential, die aktuellen Herausforderungen hinsichtlich Leichtbau und Funktionsintegration zu meistern. Die Anwendung von Massivumformverfahren auf Blechhalbzeuge, insbesondere in Kombination mit konventionellen Blechumformverfahren, ermöglicht die effiziente Herstellung von gewichtsreduzierten Bauteilen mit hoher Funktionsintegration. Durch die charakteristischen dreiachsigen Spannungs- und Dehnungszustände können Nebenformelemente unter Voraussetzung des entsprechenden Prozessverständnisses die Ausgangsblechdicke überschreiten. Unter Berücksichtigung der Volumenkonstanz führt das zu lokaler Verringerung der Blechdicke, welche sich gezielt für die Reduzierung des Bauteilgewichts nutzen lässt. Werden diese Verfahren bei Raumtemperatur angewandt, so erhöht die induzierte Kaltverfestigung die Ermüdungsfestigkeit und macht sowohl aufgedickte als auch ausgedünnte Bereiche widerstandsfähiger gegen mögliches Versagen. Ein grundlegendes Prozessverständnis wurde bereits in vorherigen Arbeiten aufgebaut, welches auch das Verständnis der Ursachen für auftretende Prozessfehler umfasst. Die zentrale Herausforderung dieser Verfahrensklasse stellt die Materialflusskontrolle dar. Diese lässt sich mit konventionellen Ansätzen nicht sicherstellen und erfordert maßgeschneiderte Lösungen.

Als zielführender Ansatz hat sich in dieser Hinsicht der Einsatz von prozessangepassten Halbzeugen erwiesen, wobei Tailored Blanks mit Blechdickengradienten die effektivste Methode zur Erhöhung der Stoffflusskontrolle darstellen. Die Eignung randaufgedickter Ronden zur Reduzierung von Prozessfehlern in der Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen konnte bereits nachgewiesen werden. Als Herstellverfahren für diese Ronden kommen ein Walz- und ein Taumelverfahren zur Anwendung, wobei das Taumelverfahren Vorteile hinsichtlich der Effizienz und der resultierenden Halbzeugeigenschaften aufweist. In der Literatur finden sich zum aktuellen Zeitpunkt einige Untersuchungen zur Herstellung von Halbzeugen mit gradierten Eigenschaften, jedoch kaum geeignete Ansätze zur prozessangepassten Auslegung zu deren Weiterverarbeitung sowie zum Einfluss auf die resultierenden Bauteileigenschaften.

An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an, um das Prozessverständnis insbesondere hinsichtlich der Auslegung und des Einsatzes von Tailored Blanks in Verfahren der Blechmassivumformung zu erweitern. Durch ein methodisches Vorgehen und den Nachweis der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse sollen die erarbeiteten Inhalte für nachfolgende Arbeiten nutzbar gemacht werden.

3 Wissenschaftliche Zielsetzung und Vorgehen zur Zielerreichung

Das zentrale Ziel der durchgeführten Untersuchungen ist die umformtechnische Herstellung eines fehlerfreien Funktionsbauteils basierend auf einer Erweiterung des Prozessverständnisses bezüglich der Auslegung, Herstellung und Weiterverarbeitung von prozessangepassten Halbzeugen in einer Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen. In diesem Zusammenhang gilt es insbesondere die in vorherigen Arbeiten identifizierten Prozessfehler durch eine gezielte Materialvorverteilung zu vermeiden und eine Übertragbarkeit dieses Vorgehens auf skalierte Bauteilgeometrien und unterschiedliche Werkstückwerkstoffe sicherzustellen. Insbesondere hinsichtlich der Auslegung und der Weiterverarbeitung von Tailored Blanks durch Verfahren der Blechmassivumformung weist die vorliegende Literatur erheblichen Forschungsbedarf auf. Die angewandte Methodik greift diesen Forschungsbedarf auf und ist in Bild 2 dargestellt.

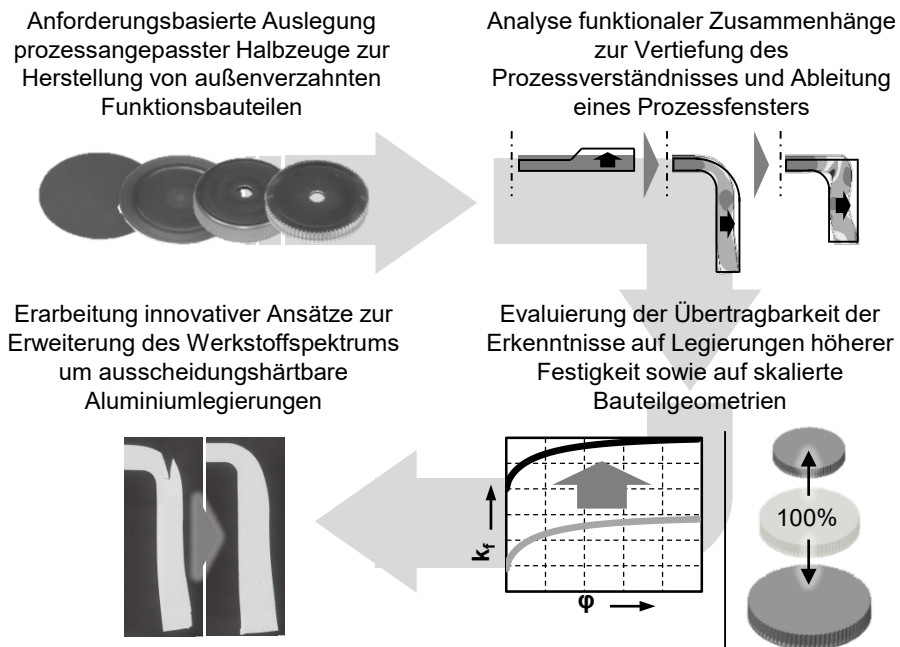


Bild 2: Methodisches Vorgehen und Arbeitsschwerpunkte

Zur Herstellung der prozessangepassten Halbzeuge wird mit dem Taumelprozess ein weiteres Verfahren der Blechmassivumformung angewandt. Die Identifikation einer zielführenden Halbzeuggeometrie sowie die Analyse des Einflusses geometrischer, mechanischer und tribologischer Halbzeugeigenschaften auf die Bauteileigenschaften stehen im Mittelpunkt der Forschungsarbeit und ermöglichen die Definition eines Prozessfensters.

Aufbauend auf dem aktuellen Stand der Technik hat das erste Ergebniskapitel die anforderungsbasierte Auslegung einer Halbzeuggeometrie für die fehlerfreie Herstellung der außenverzahnten Demonstratorgeometrie zum Ziel. Es werden die Anforderungen an prozessangepasste Halbzeuge basierend auf vorliegenden Erkenntnissen abgeleitet, um anschließend einen geeigneten Werkzeugeinsatz zu deren Herstellung zu definieren. Im Rahmen der Auslegung wird der Einfluss der geometrischen Werkzeugparameter auf das Umformergebnis in einer numerischen Stoffflussanalyse untersucht, um die definierte Sollgeometrie zu erreichen. Das numerische Modell, welches nachfolgend für weitere Untersuchungen genutzt werden soll, wird abschließend durch experimentelle Versuche validiert. Im zweiten Arbeitsschwerpunkt werden die Einflüsse unterschiedlich starker Materialvorverteilung auf die geometrischen und mechanischen Bauteileigenschaften untersucht, um das Prozessverständnis zu steigern und ein Prozessfenster abzuleiten. Nachfolgend wird überprüft, ob die gewonnenen Erkenntnisse sich auf skalierte Bauteilgeometrien sowie auf den Einsatz von Stahlwerkstoffen höherer Festigkeit übertragen lassen. Für die Skalierung der Geometrien wird das numerische Modell aus Kapitel fünf genutzt. Dieser dritte Arbeitsschwerpunkt ist von zentraler Bedeutung, da der Nachweis der Übertragbarkeit hinsichtlich des Potentials prozessangepasster Halbzeuge eine grundlegende Voraussetzung sowohl für nachfolgende Forschungsarbeiten darstellt. Aufbauend auf den ersten drei Arbeitsschwerpunkten werden die gewonnenen Erkenntnisse abschließend unter Zuhilfenahme einer lokalen Kurzzeit-Laserwärmebehandlung auf den Einsatz einer ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierung der 6000er-Serie übertragen, da moderne Legierungssysteme in bestimmten Anwendungsbereichen eine technologisch vielversprechende Alternative zu Stahlwerkstoffen darstellen können.

Die vorliegende Arbeit trägt im Rahmen der laufenden Forschungsaktivitäten zu einer Verbesserung des Prozessverständnisses bezüglich der Auslegung und des Einsatzes prozessangepasster Halbzeuge in Verfahren der Blechmassivumformung bei. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen sowohl weitere Fortschritte im Forschungsumfeld ermöglichen als auch den Einsatz dieser Technologie in der industriellen Anwendung stärken.

4 Anlagen, Werkzeuge, Werkstoffe und Auswertemethoden

In diesem Kapitel werden die Anlagen zur Halbzeug- und Bauteilherstellung, zur Prüfung, die verwendeten Umformwerkzeuge, die eingesetzten Werkstoffe und der Schmierstoff vorgestellt. Des Weiteren werden die angewandten Methoden zur Versuchsauswertung erläutert.

4.1 Hydraulische Tiefziehpresse Lasco TZP 400/3

Die dreifach-wirkende Tiefziehpresse TZP 400/3 des Herstellers Lasco Umformtechnik GmbH ermöglicht durch ihre Ausstattung sowohl die umformtechnische Herstellung der Funktionsbauteile durch einen Stauch-, als auch die vorgelagerte Fertigung prozessangepasster Halbzeuge durch einen Taumelprozess, wie in Bild 3 dargestellt.

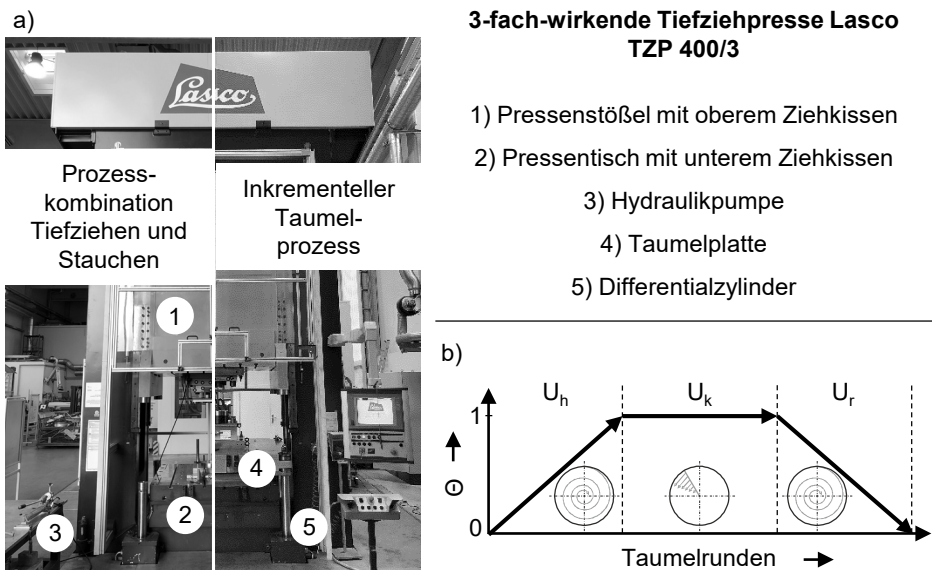


Bild 3: a) Dreifach-wirkende Hydraulikpresse Lasco TZP 400/3 für die Bauteilfertigung (links) und die Herstellung prozessangepasster Halbzeuge (rechts) sowie b) Prozessphasen und -kinematiken des Taumelprozesses

Die Anlage ist bis zu einer Maximalkraft von $F_{\max} = 4.000 \text{ kN}$ stufenlos regelbar. Zudem kann der Stößel auch weggebunden verfahren. Neben dem Pressenstößel verfügt die Anlage über jeweils ein Ziehkissen im Stößel und

im Pressentisch, welche über eine Maximalkraft von je $F_{\max} = 1.600 \text{ kN}$ verfügen und beim Erreichen der eingestellten Kraft während des Prozesses verdrängt werden. Diese Ausstattung ermöglicht die Prozessfolge aus Tiefziehen und Stauchen innerhalb eines einzelnen Pressenhubs.

Die Taumelfunktion, welche bei der Herstellung prozessangepasster Halbzeuge Anwendung findet, wird über vier hydraulische Differentialzylinder realisiert. Diese nehmen die Taumelplatte an deren Anschlägen auf und ermöglichen verschiedene Taumelkinematiken bei einer maximalen Auslenkung von $\Theta = \pm 1^\circ$. Die Taumelplatte ist dabei über eine Kugelkalotte mittig auf dem Pressentisch gelagert. Die phasenverschobene Ansteuerung der Differentialzylinder und deren wegereguliertes Verfahren ermöglicht die Umsetzung unterschiedlicher Taumelkinematiken. Diese Arbeit beschränkt sich auf eine umlaufende Taumelbewegung. Diese schreitet in der Hochfahrphase U_h spiralförmig fort bis der maximale Taumelwinkel erreicht ist, verläuft in der Umformphase U_k bei maximalem Winkel kreisförmig, um dann schließlich in der Runterfahrphase U_r spiralförmig in die Nullstellung zurückzukehren. Diese drei Prozessphasen sind charakteristisch für den untersuchten Prozess. Die Anzahl der Taumelrunden in den drei Phasen kann beliebig gewählt werden. Die einstellbare Taumeldrehzahl liegt zwischen $v = 0,125 \text{ U/s}$ und $v = 0,5 \text{ U/s}$.

4.2 Umformwerkzeuge und Bauteilgeometrien

Die eingesetzten Umformwerkzeuge sind weitestgehend modular aufgebaut, um unterschiedliche Halbzeug- und Bauteilgeometrien realisieren zu können. Das Werkzeugkonzept für die Realisierung einer Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen wurde in [23] erarbeitet und umgesetzt. Das Werkzeug zur einstufigen Herstellung von Funktionsbauteilen besteht aus vier Aktivteilen, welche aus dem pulvermetallurgischer Werkzeugstahl ASP2023 (1.3344) gefertigt, gehärtet und beschichtet wurden. Die Härte liegt bei 60 HRC, um eine möglichst günstige Kombination aus hoher Härte und hoher Zähigkeit zu erlangen. Der Ziehring und der Stauchstempel sind Bestandteile des Ober-, Ziehstempel und Anschlagring Bestandteile des Unterwerkzeugs. Der Ziehring weist die Verzahnungskavität für den Stauchprozess auf und ist während des Prozesses hohen Kontaktnormalspannungen ausgesetzt. Diese Werkzeugkomponente verfügt daher über eine Armierung.

Zu Prozessbeginn wird die Ronde auf dem Ziehstempel positioniert. Die Bohrung in der Rondenmitte ist mit $d_B = 13,2 \text{ mm}$ so gewählt, dass diese

eine ausreichend genaue Positionierung über die Verschraubung des Ziehstempels zulässt. Bei Prozessbeginn wird die Ronde über einen externen Hydraulikzylinder geklemmt. Im Anschluss verfährt der Ziehtring in negative Z-Richtung und verleiht dem Bauteil seine Grundform. Nachfolgend verdrängt der Stauchstempel den Ziehstempel und staucht die Napfzarge, sobald der Napf auf dem Anschlagring aufsetzt. Die Verringerung der Napfhöhe im Stauchprozess induziert einen radialen Materialfluss in die Verzahnungskavität und führt somit zur Ausformung der Nebenformelemente. Die Prozessfolge ist Bild 4 a) zu entnehmen. Die Höhe der Bauteile ist im Wesentlichen von der gewählten maximalen Stauchkraft abhängig und lässt sich demnach entsprechend einstellen. Nach Prozessende und dem Auffahren der Presse wird der externe Hydraulikzylinder zum Auswerfen der umgeformten Bauteile aus dem Ziehtring genutzt.

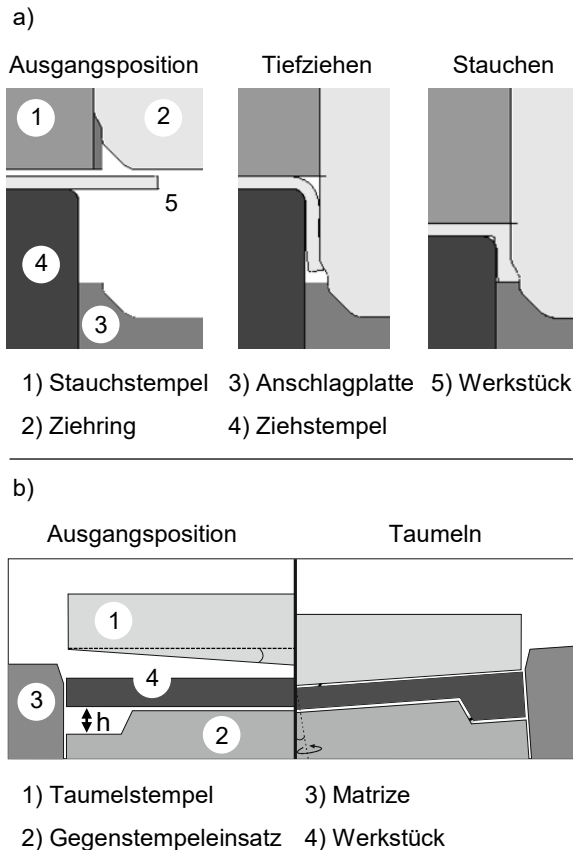


Bild 4: a) Werkzeugaufbau und Prozessfolge für die Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen sowie für b) den Taumelprozess

Das Taumelwerkzeug besteht aus einem Unterwerkzeug mit Matrize und Werkzeugeinsatz und einem Taumelstempel als Oberwerkzeug. Der Werkzeugeinsatz weist die Kavität auf, welche das Negativ des prozessangepassten Halbzeugs abbildet und kann ausgetauscht werden, um verschiedene Halbzeuggeometrien anzufertigen zu können. Der Durchmesser der verwendeten Einsätze beträgt $d = 100 \text{ mm}$. Der Taumelstempel, welcher die Umformkraft des Pressenstößels auf die Blechronde überträgt, weist eine Schräge von $\alpha = 1^\circ$, ausgehend vom Zentrum, auf. [112] Bild 4 b) zeigt den Werkzeugaufbau des Taumelprozesses. Die Aktivteile des Taumelwerkzeugs sind ebenfalls aus dem pulvermetallurischen ASP2023 gefertigt. Als Referenzgeometrie dient ein Rondenlayout, welches in [98] zur Qualifizierung des Taumelprozesses für die Herstellung randaufgedickter Halbzeuge entworfen wurde. Als Zielgeometrie für die untersuchten Funktionsbauteile wird auf die in [23] vorgestellte Bauteilgeometrie zurückgegriffen. Die geometrischen Bauteileigenschaften sind Bild 5 zu entnehmen. Der außenverzahnte Napf weist einen Innendurchmesser von $d_i = 75,50 \text{ mm}$ und einen Außendurchmesser von $d_a = 82,72 \text{ mm}$ auf. Umlaufend sind 80 Zähne mit einem Flankenwinkel von 90° angeordnet. Für den Kopfkreis ergibt sich ein Durchmesser von $d_K = 83,00 \text{ mm}$, für den Fußkreis beträgt der Durchmesser $d_F = 80,00 \text{ mm}$. Daraus resultiert eine Zahnhöhe von $h_Z = 1,50 \text{ mm}$. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Abmessungen, werden die Napfhöhe und damit auch die Zahnbreite nicht direkt von den Werkzeugabmessungen abhängig, sondern resultieren aus den gewählten Kraft- bzw. Wegeinstellungen des Pressenstößels.

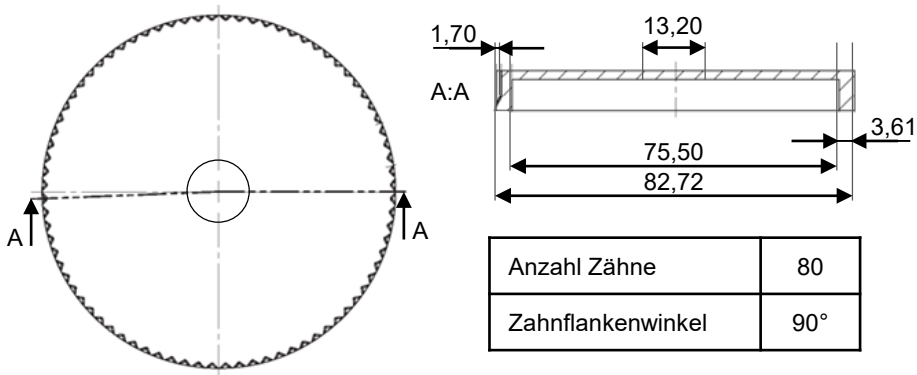


Bild 5: Demonstratorgeometrie des außenverzahnten Funktionsbauteils mit den durch die Werkzeuggeometrie vorgegebenen Abmessungen

4.3 **Eingesetzte Stahlwerkstoffe und Schmierstoff**

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Stahlwerkstoffe DCo4, HC260LA und DP600 eingesetzt. Der niedriglegierte und kaltgewalzte Tiefziehstahl DCo4 wurde als Referenzwerkstoff in den Materialstärke $s_0 = 2$ mm eingesetzt. Bedingt durch die sehr guten Umformeigenschaften findet dieser Werkstoff breite Anwendung bei der Herstellung anspruchsvoller Geometrien [124]. Um die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse gewährleisten zu können, wurde das Spektrum der Stahlwerkstoffe um einen mikrolegierten HC260 LA und einen hochfesten DP600, ebenfalls mit einer Ausgangsblechdicke von $s_0 = 2$ mm, erweitert. Diese Werkstoffe eignen sich, bedingt durch die höhere Festigkeit bei guten Umformeigenschaften, für Leichtbauanwendungen und werden zur Herstellung von Struktur- und Verstärkungskomponenten eingesetzt [125].

Um die experimentellen Umformversuche um numerische Stoffflussanalysen und Berechnungen der Werkzeugbeanspruchung erweitern zu können, wurde eine Charakterisierung und anschließende Modellierung der Versuchswerkstoffe vorgenommen. Die Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften erfolgte sowohl im einachsigen Zug- als auch im Schichtstauchversuch (SSV) bei $T = 20^\circ\text{C}$.

Die einachsigen Zugversuche wurden an einer Universalprüfmaschine des Typs Z100 der Firma ZwickRoell entsprechend der gültigen Norm zur Zugprüfung von Metall bei Raumtemperatur [126] durchgeführt. Die Dehnungsberechnung erfolgte unter Einsatz des optischen Messsystems Aramis der Firma GOM mit zwei CCD-Kameras. Zu diesem Zweck wurde vor Versuchsdurchführung ein stochastisches Punktmuster aufgesprüht, welches die Berechnung der Dehnungen auf der Probenoberfläche zulässt. Um die Richtungsabhängigkeit des Fließverhaltens des Blechwerkstoffs berücksichtigen zu können, wurden die Zugproben in 0, 45 und 90 Grad zur Walzrichtung lasergeschnitten, spanend nachbearbeitet und geprüft. Zur Charakterisierung des Fließverhaltens unter mehrachsigen Spannungen, wurden Schichtstauchversuche an einer Universalprüfmaschine des Typs Walter & Bai FS-300 durchgeführt. In Anlehnung an [127] wurden mehrere Blechlagen mit gleichem Ausgangsdurchmesser und identischer Ausrichtung zur Walzrichtung gestapelt und anschließend gestaucht. Die Reibung zwischen Probe und Werkzeug wurde durch Teflonfolie minimiert. Die Aufnahme sowie die Auswertung erfolgte ebenfalls über das Messsystem Aramis und eine photogrammetrische Punktverfolgung eines stochasti-

schen Musters, welches vor Versuchsbeginn aufgebracht wurde. Die Fließkurven wurden mit Verfestigungsmodellen nach Hockett-Sherby und Swift extrapoliert und sind Bild 6 zu entnehmen.

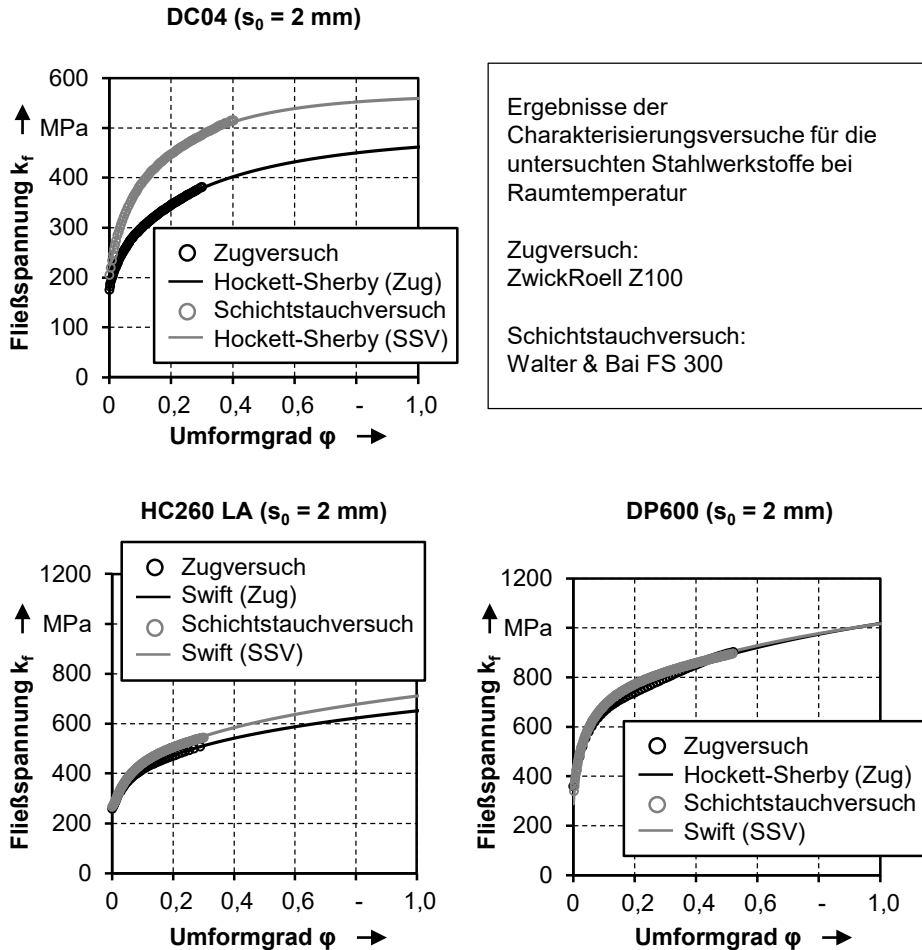


Bild 6: Fließkurven der eingesetzten Blechwerkstoffe unter Angabe der genutzten Approximationsmodelle für die durchgeführten Zug- und Schichtstauchversuche

Für die drei untersuchten Stahlwerkstoffe DCo₄, HC260 LA und DP600 wurden aus den durchgeführten Versuchen zur Materialcharakterisierung weitere Kenngrößen berechnet. Diese dienen der Analyse der Eigenschaften sowie der Modellierung der Werkstoffe für die numerische Umformsimulation. Die Streckgrenze ($R_{p0,2}$), die Zugfestigkeit (R_m), die Gleichmaß-

dehnung (Ag), die senkrechte Anisotropie (R) und den Verfestigungsexponenten (n) für die drei Stahlwerkstoffe in 0, 45 und 90 Grad zur Walzrichtung sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Werkstoffkennwerte der untersuchten Stahlwerkstoffe DCo4, HC260 LA und DP600 für eine Ausgangsblechdicke von $s_0 = 2 \text{ mm}$ bei Raumtemperatur [112]

Werkstoff	Versuch	Kennwert	WR 0°	WR 45°	WR 90°
DCo4	Zug	R _{p0,2} in MPa	181 ±0,0	175 ±0,0	168 ±0,0
		R _m in MPa	320 ±0,0	304 ±0,2	306 ±0,5
		Ag in %	23,7 ±0,1	24,1 ±0,2	25,8 ±0,2
		R	2,17 ±0,02	1,51 ±0,02	2,53 ±0,15
		n	0,249 ±0,000	0,238 ±0,000	0,240 ±0,000
	SSV	R _{p0,2} in MPa	205 ±4,3		
HC260 LA	Zug	R _{p0,2} in MPa	262 ±2,9	269 ±1,8	284 ±2,9
		R _m in MPa	376 ±0,7	370 ±1,1	387 ±1,3
		Ag in %	10,8 ±0,1	10,8 ±0,1	10,1 ±0,2
		R	1,02 ±0,02	1,59 ±0,12	1,49 ±0,09
		n	0,154 ±0,000	0,148 ±0,001	0,152 ±0,001
	SSV	R _{p0,2} in MPa	266 ±3,2		
DP600	Zug	R _{p0,2} in MPa	353 ±1,4	369 ±0,0	372 ±0,0
		R _m in MPa	594 ±2,2	602 ±0,1	602 ±0,0
		Ag in %	17,5 ±0,1	17,1 ±0,1	16,4 ±0,0
		R	0,95 ±0,02	0,90 ±0,06	1,18 ±0,05
		n	0,186 ±0,001	0,177 ±0,000	0,174 ±0,000
	SSV	R _{p0,2} in MPa	340 ±6,9		

Für die Umformversuche wurde der hochviskose Schmierstoff Beruforge BF 150DL der Firma Carl Bechem GmbH verwendet. Dieser wurde für die Kaltmassivumformung entwickelt und eignet sich sowohl für die Herstellung prozessangepasster Halbzeuge durch das Taumelpressen [112] als auch für deren Weiterverarbeitung in der Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen [23].

4.4 Numerische Umformsimulation zur Analyse des Materialflusses im Umformprozess

Für die numerische Analyse der Umformprozesse sowie der resultierenden Bauteileigenschaften wurde die kommerzielle Umformsimulation Simufact Forming der Simufact Engineering GmbH in den Versionen 12.0.1, 14 und 16 genutzt. Die Software bietet die Möglichkeit, die gesamte Prozesskette vom Taumeln der Ausgangsronde bis zum Stauchen des finalen Bauteils abzubilden und relevante Ergebnisgrößen, wie insbesondere Spannungs- und Dehnungszustände sowie Kontaktzustände zu berechnen. Insbesondere die Analyse von Ergebnisgrößen, welche sich in experimentellen Versuchen nicht oder nur bedingt auswerten lassen, sowie von Versuchsaufbauten, welche im Realversuch nicht zur Verfügung stehen, erlauben eine maßgebliche Vertiefung des Prozessverständnisses.

Die symmetrische Bauteilgeometrie erlaubt eine deutliche Verkürzung der Rechenzeit, indem lediglich ein Ausschnitt des Bauteils analysiert wird. Durch das Einfügen sogenannter Symmetrieebenen lassen sich repräsentative Untersuchungen an einem der insgesamt 80 Zähne durchführen. Der Grundaufbau des Modells entspricht dem in [23] verwendeten Modell, welches in der vorherigen Version Simufact Forming 11 aufgebaut wurde. Das Werkstoffverhalten wurde über das isotrope Materialmodell nach von Mises abgebildet. Um die tribologischen Bedingungen realitätsnah modellieren zu können, werden diese entsprechend der vorherrschenden Kontaktnormalspannungen unterteilt. Bei der Tiefziehoperation wird die Coulomb'sche Reibung gewählt, welche bei niedrigeren Kontaktnormalspannungen gültig ist. Für den Stauchprozess, welcher hohe Kontaktnormalspannungen aufweist, verliert dieses Modell seine Gültigkeit und macht die Anwendung des Reibfaktormodells erforderlich.

Bedingt durch die Kinematik und die durch diese hervorgerufenen radialen und tangentialen Stoffflussanteile ist zur Analyse des Taumelprozesses ein 360°-Modell erforderlich. Hierbei wird auf das in [112] vorgestellte Modell zurückgegriffen, welches sich durch den Austausch des Gegenstempelersatzes bedarfsgerecht adaptieren lässt. Die Einstellungen zur Vernetzung,

zum Materialverhalten und zu den tribologischen Bedingungen wurden analog zu [112] gewählt. Schematische Darstellungen der Modelle sowie die wesentlichen Einstellungen zeigt *Bild 7*.

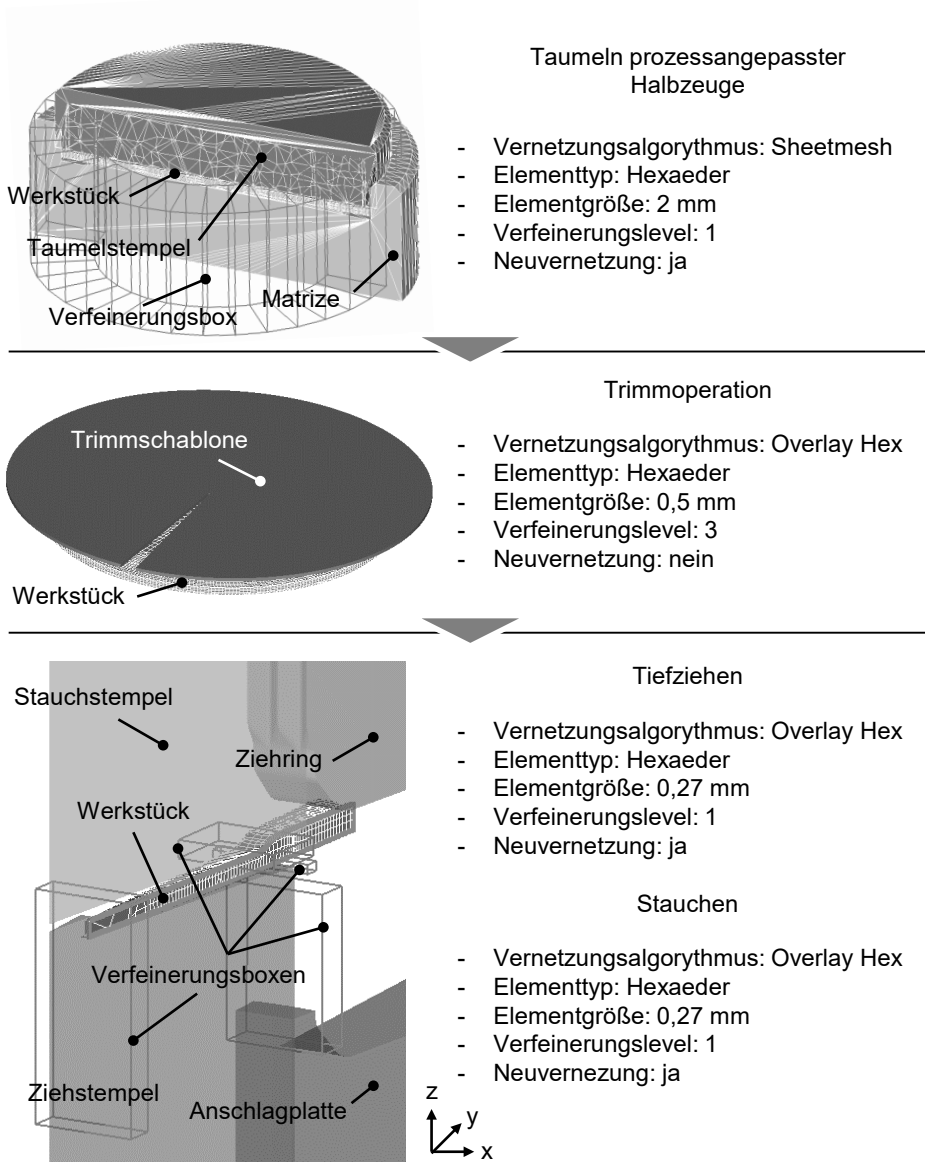


Bild 7: Darstellung der numerischen Modelle der untersuchten Prozesskette mit den jeweiligen Vernetzungsparametern

4.5 Prüf- und Auswertemethoden

Nachfolgend werden die eingesetzten Prüf- und Auswertemethoden vorgestellt und erläutert. Untersucht werden im Wesentlichen geometrische, mechanische und tribologische Eigenschaften der jeweiligen Halbzeuge und Bauteile, um die verschiedenen Einflussgrößen und die hervorgerufenen Effekte quantifizieren und bewerten zu können.

4.5.1 Prüfung und Auswertung geometrischer Eigenschaften

Die geometrischen Eigenschaften stellen die zentrale Ergebnisgröße dar und werden vorrangig über den optischen 3D-Scanner ATOS Core 300 der Firma Gesellschaft für optische Messtechnik (GOM) mbH erfasst. Dieser liefert 3D-Koordinatenmessdaten basierend auf den Aufnahmen einer kalibrierten Stereokamera und erlaubt unter Verwendung des optischen Photogrammetriesystems TRITOP, ebenfalls aus dem Hause GOM, zudem eine Analyse der Materialstärke. Vor der Aufnahme werden Ronden und Bauteile matt weiß lackiert, um störende Reflexionen zu vermeiden. Die Schichtdicke beträgt etwa zwei hundertstel Millimeter und kann im Zuge der Auswertung abgezogen werden. Zudem werden Referenzpunkte auf beiden Seiten der Ronde beziehungsweise des Bauteils geklebt, welche über weitere externe Referenzpunkte eine Transformation der aufgenommenen Punktwolken und somit ein räumliches Zusammenführen von Ober- und Unterseite erlaubt. Der zentrale Vorteil des optischen Messsystems liegt in der Möglichkeit, das gesamte Bauteil erfassen zu können und somit auch Volumina ausgewählter Bereiche berechnen und analysieren zu können. Zur Auswertung werden sowohl die kommerzielle Auswertesoftware GOM Inspect der Firma GOM als auch die Open-Source Anwendung CloudCompare V2 genutzt. Die Software GOM Inspect bietet verschiedene Auswertemöglichkeiten der aufgenommenen Geometrie. Diese beinhalten neben dem Vergleich des Ist-Bauteils mit einer CAD-Sollgeometrie auch unterschiedliche Analysen des Ist-Bauteils über Messung verschiedener Bauteildimensionen oder die Erstellung von Querschnitten. Über den Export der Partikelkoordinaten auf den Kanten eines Bauteils, lassen sich diese Querschnitte auch basierend auf numerischen Untersuchungen erstellen und dem Experiment gegenüberstellen. *Bild 8* zeigt die Querschnittskonturen aus Experiment und Simulation. Die Kontur des tiefgezogenen Napfes lässt erkennen, dass die gezeigte Halbzeuggeometrie, wie unter Abschnitt 2.3.3 beschrieben, nicht geeignet ist, um die Materialausdünnung am Ziehstempelradius zu kompensieren und nachfolgend Faltenbildung hervorruft.

Diese lässt sich am Konturplot des gestauchten Bauteils oder anhand von Schliffbildern nachweisen, wie ebenfalls in Bild 8 dargestellt.

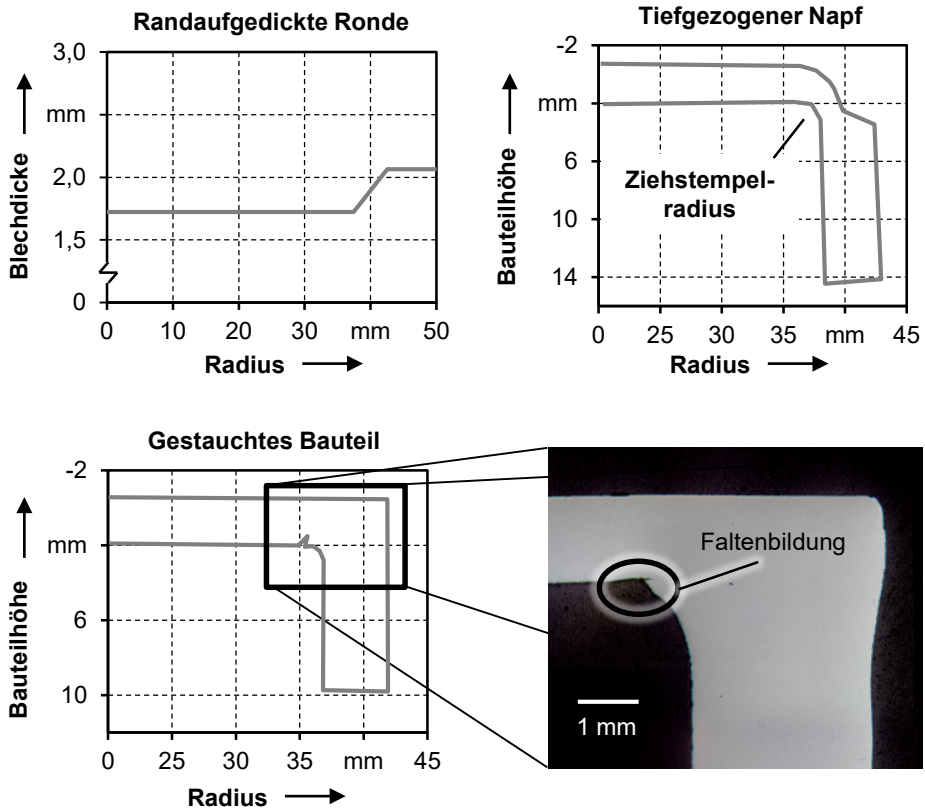


Bild 8: Qualitative Analyse der geometrischen Halbzeug- und Bauteileigenschaften über Konturplots und Schliffbilder

Darüber hinaus erlaubt CloudCompare eine quantitative Bestimmung des Materialvolumens in verschiedenen Bauteilbereichen. Zu diesem Zweck werden Bauteilgeometrien exportiert und im Stereo Lithographie-Format (.stl) gespeichert und in CloudCompare importiert. Den Nachteilen der durch die polyhedralen Strukturen bedingten Ungenauigkeiten stehen die Vorteile des einfachen Aufbaus und der Unabhängigkeit von spezifischen CAD-Programmen gegenüber. [128] Über die Konstruktion entsprechender Abzugskörper lassen sich die Volumina einzelner Bauteilbereiche ableiten, wie in *Bild 9* gezeigt. Ein Vergleich der Volumina für verschiedene Halbzeugstrategien erlaubt eine Aussage über den Grad der Stoffflusskontrolle und schließlich eine Bewertung der jeweiligen Strategie. Verifiziert werden die Bewertungen, insbesondere im Hinblick auf die Vermeidung

der identifizierten Prozessgrenzen, durch Mikroskopaufnahmen metallographischer Schliffbilder.

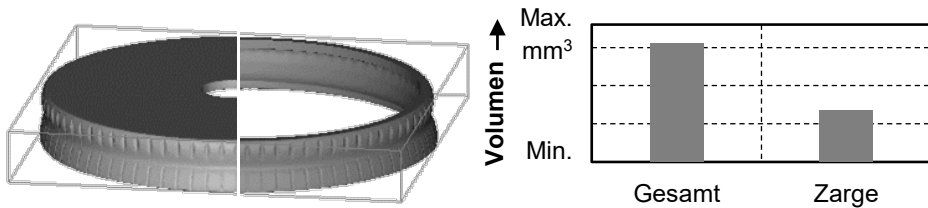


Bild 9: Quantitative Auswertung der Volumina anhand von dreidimensionalen stl.-Modellen

Zur Ermittlung des Blechdickenprofils der prozessangepassten Halbzeuge wird zudem eine Koordinatenmessmaschine des Typs PMM 654 der Firma Zeiss eingesetzt. Über eine taktile Messung der Konturen von Rondonober- und -unterseite lässt sich das Blechdickenprofil erstellen. Analog zum Vorgehen in [112] werden auch in dieser Arbeit die äußersten Messpunkte einen Millimeter innerhalb des Rondendurchmessers gesetzt, um eine Beeinflussung der Messung durch mögliche Gratbildung im Randbereich ausschließen zu können. Die initiale Messung wird in 90 Grad zur ursprünglichen Verfahrrichtung wiederholt, so dass zum Ende der Messung Mittelwerte über vier radiale Profile gebildet werden können. Über die gemessene Außenkontur wird die Blechdicke des Halbzeugs berechnet. Für die Blechdicke im aufgedickten Bereich werden die gemessenen Werte zwischen $r = 37,5 \text{ mm}$ und $r = 49 \text{ mm}$ gemittelt. Die Volumina wurden im Randbereich, also für $r > 37,75 \text{ mm}$ ermittelt, da diese Position den Übergang zur Bauteilzarge markiert. *Bild 10* zeigt die Einteilung der Bereiche für Halbzeuge und Funktionsbauteile.

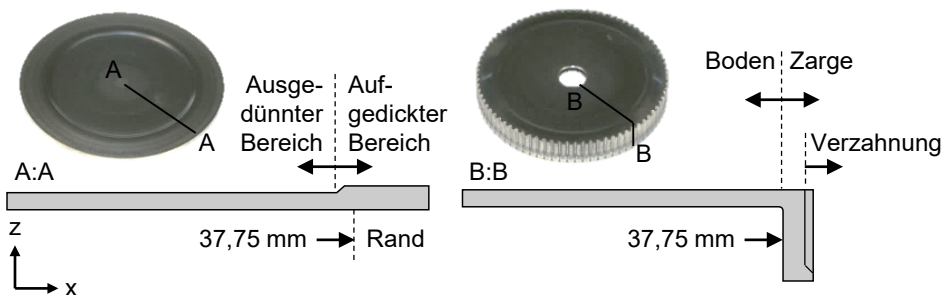


Bild 10: Einteilung der Auswertebereiche für prozessangepasste Halbzeuge und Funktionsbauteile

Des Weiteren werden auch die prozessangepassten Ronden mit dem optischen Messsystem ATOS digitalisiert und ausgewertet, um eine Auswertung der Volumenverteilung in den jeweiligen Halbzeuggbereichen vornehmen zu können. Zudem werden auch von getaumelten Ronden Schliffbilder angefertigt und evaluiert.

4.5.2 Prüfung und Auswertung der Mikrohärté und Analyse der Gefügestruktur

Die resultierenden mechanischen Halbzeug- und Bauteileigenschaften werden anhand der gemessenen Mikrohärté quantifiziert und evaluiert. Um diese Messungen vornehmen zu können, ist eine Präparation der Proben erforderlich. Zunächst wird der zu untersuchende Bereich mit einer Trennmaschine des Typs Discotom der Firma Struers aus dem Bauteil oder dem prozessangepassten Halbzeug herausgetrennt und anschließend in Epoxidharz eingebettet. Beim folgenden Schleifen der eingebetteten Probenkörper mit SiC-Schleifscheiben wird die Körnung in 4 Schritten von 120 auf 1200 verfeinert. Vor dem Nassschleifen der Probe bis zur feinsten Körnung von 4.000 wurde die Planparallelität der Probe über die Bearbeitung auf einer Flächenschleifmaschine in der lehrstuhleigenen Werkstatt sichergestellt. Nach Beendigung des Nassschleifprozesses wird der Probenkörper mit Polierscheiben und Diamantsuspensionen mit Partikelgrößen von 6 μm , 3 μm und 1 μm poliert. Nachfolgend werden die Mikrohärtémessungen an einem Fischerscope HM2000 der Firma Helmut Fischer vorgenommen. Diese bietet die Möglichkeit, neben punkt- und linienförmigen Messungen auch flächige Mikrohärtémessungen durchzuführen. Die Prüfkraft lässt sich, bei einer Genauigkeit von 40 μN und einer Auflösung der Eindringtiefe von $\pm 0,1$ nm, zwischen 0,4 mN und 2.000 mN einstellen [129]. Der pyramidenförmige Eindringkörper besitzt einen Öffnungswinkel von 136 Grad und bringt eine definierte Prüfkraft auf, welche über die Eindringtiefe und einer für den Indentor spezifischen Konstante, die Bestimmung der Härte ermöglicht. Gemäß [130] wird die Vickershärté HV_{0,05} mit einer Prüfkraft von 500 mN bestimmt. Die Eindringzeit und die Haltezeit betragen fünf beziehungsweise 10 Sekunden. Für die Punktabstände wurden 0,3 mm in Blechdicken- und 0,6 mm senkrecht zur Blechdickenrichtung definiert. Die durchgeführten Messungen wurden im Anschluss sowohl qualitativ als auch quantitativ ausgewertet. Über die Koordinaten der Messpunkte lassen sich die Messwerte den entsprechenden Halbzeug- oder Bauteilbereichen zuordnen und entsprechend der gewählten Skalierung darstellen. Die quantitative Auswertung wurde insbesondere für die Analyse der Mittelwerte und der zugehörigen Standardabweichung genutzt,

welche Aussagen über die Kaltverfestigung und deren Homogenität im untersuchten Bereich ermöglichen. Eine beispielhafte Darstellung der beiden Auswertemethoden ist *Bild 11* zu entnehmen. Zudem werden ausgewählte Proben mit einer dreiprozentigen Nitallösung geätzt, um Gefügaufnahmen zu machen. Das eingesetzte Mikroskop VHX-100 der Firma Keyence ermöglicht die Aufnahme einzelner Bauteilbereiche sowie das Zusammenfügen der einzelnen Detailaufnahmen zu einem Gesamtbild.

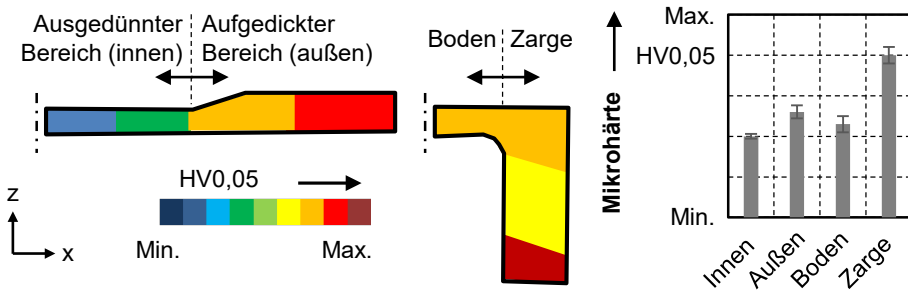


Bild 11: Qualitative sowie quantitative Auswertung der Mikrohärtemessungen für Halbzeuge und Bauteile

Als Grundlage der Analyse der mechanischen Eigenschaften von getaumelten Halbzeugen, Näpfen und Bauteilen wurden zuvor die Werte der Ausgangshärte für die drei untersuchten Stahlwerkstoffe ermittelt. Die Mittelwerte der gemessenen Mikrohärtigkeit mit den jeweiligen Standardabweichungen für den DCo4, den HC260 LA und den DP600 sind in Tabelle 2 aufgetragen.

Tabelle 2: Ausgangswerte der Mikrohärtigkeit für die Versuchswerkstoffe DCo4, HC260 LA und DP600

Werkstoff	DCo4	HC260 LA	DP600
Grundhärte in HV _{0,05}	115,05 ±6,60	136,44 ±7,96	212,67 ±15,96

4.5.3 Prüfung und Auswertung der Oberflächeneigenschaften

Gemeinsam mit den geometrischen und mechanischen Eigenschaften lässt die Charakterisierung der Oberflächeneigenschaften eine ganzheitliche Bewertung der Halbzeuge und Funktionsbauteile sowie der gewählten Prozessführungsstrategie zu. Die Oberflächeneigenschaften werden anhand von taktilen Rauheitsmessungen untersucht und analysiert. Zu diesem

Zweck wird das Messgerät Perthometer MarSurf PCV der Firma Mahr eingesetzt. Um die Oberflächen von Halbzeugen und Bauteilen zu charakterisieren, wird die gemittelte Rautiefe R_z bestimmt. Die Summe aus den Werten der höchsten Profilspitze und des tiefsten Profiltals beschreibt die Einzelrautiefe R_{zi} . Aus fünf aneinandergrenzenden Messstrecken wird die Rautiefe R_z als arithmetisches Mittel der Einzelrautiefen R_{zi} berechnet. Um die Oberfläche ergänzend auch qualitativ analysieren zu können, werden optische Messungen der Topographie mit dem Laserscanningmikroskop VK-X200K der Firma Keyence durchgeführt.

5 Anforderungsbasierte Anpassung der Werkzeuggeometrie zur Vermeidung identifizierter Prozessfehler bei der Weiterverarbeitung prozessangepasster Halbzeuge

Die zielführende Anwendung von Massivumformverfahren auf Blechwerkstoffe erfordert, wie im zweiten Kapitel verdeutlicht, sowohl ein umfassendes Prozessverständnis als auch darauf basierende Halbzeugstrategien zur Erhöhung der Stoffflusskontrolle. Während der Umformung lässt sich diese durch den Einsatz randaufgedickter Platinen erhöhen [23]. Eine gänzliche Vermeidung von Prozessfehlern durch den Einsatz dieser Halbzeuggeometrie ist bislang nicht möglich, wie ebenfalls in [23] gezeigt wird. Ziel der nachfolgenden Untersuchungen ist es, unter der Berücksichtigung erarbeiteter Erkenntnisse, eine effiziente und übertragbare Auslegung des Werkzeugeinsatzes zu ermöglichen. Zu diesem Zweck werden zunächst der Einsatz randaufgedickter Ronden analysiert und Anforderungen an eine prozessangepasste Auslegung definiert, um anschließend basierend auf diesen einen zielführenden Ansatz zur effizienten Auslegung prozessangepasster Halbzeuge zu erarbeiten.

5.1 Definition von Anforderungen an prozessangepasste Halbzeuge und Ableitung von Bewertungskriterien für Funktionsbauteile

Beim Einsatz von konventionellen Blechronden ergeben sich bei der Umformung in der Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen nach [23] das Ausknicken der Bauteilzarge sowie die Faltenbildung im Bereich des Ziehstempelradius als Fehlerbilder. Das Ausknicken der Zarge und die Faltenbildung, eine Materialüberlappung im Bereich des Ziehstempelradius, verhindern die Herstellung fehlerfreier Bauteile unter Anwendung dieser Halbzeugstrategie. Aus der Zielsetzung die Bauteileigenschaften zu verbessern und eine möglichst hohe Formfüllung zu erreichen, ergeben sich zwei zentrale Anforderungen an prozessangepasste Halbzeuge. Zu einem soll das Ausknicken der Zarge unter der aufgebrachtten Stauchkraft verhindert und zum anderen soll eine Materialüberlappung im Bereich des

Ziehstempelradius vermieden werden. Die in [23] präsentierte Halbzeuggeometrie verhindert durch die Materialvorverteilung ein Ausknicken der Zarge und erfüllt somit die erste Anforderung. Die randaufgedickte Ronde wurde mit den in [98] definierten Standardeinstellungen von fünf Taumelrunden pro Prozessphase und einer Stößelkraft von $F = 3.000 \text{ kN}$ umgeformt. Die radiale Position des Einlaufes in die Kavität des Taumeleinsatzes liegt nach [98] bei $r = 40 \text{ mm}$, als Länge des Übergangs zur maximalen Kavitätstiefe von $0,9 \text{ mm}$ wurden 2 mm gewählt. Unter diesen Randbedingungen wird, im äußeren Bereich der Ronde, eine mittlere Blechdicke von $s = 2,31 \text{ mm}$ erreicht. Die geometrischen Halbzeugeigenschaften sowie die Prozessparameter zu dessen Herstellung sind in Bild 12 dargestellt.

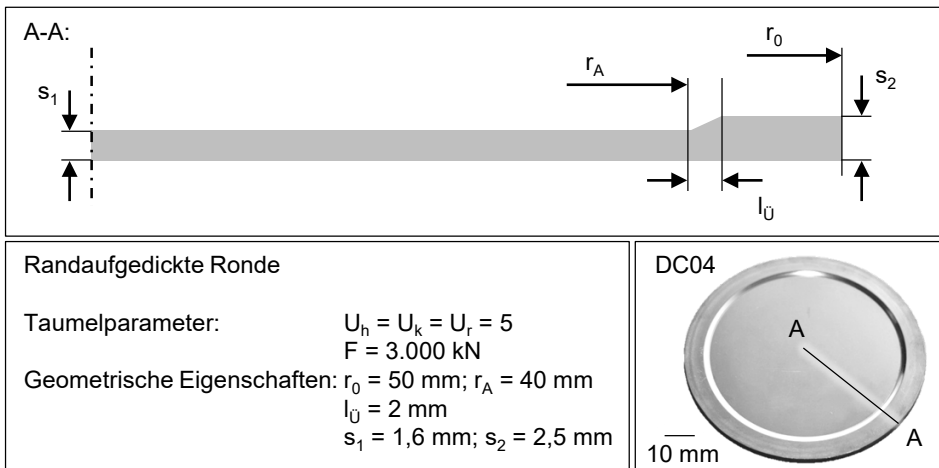


Bild 12: Geometrische Eigenschaften sowie ausgewählte Prozessparameter und Werkzeugeinsatz zur Herstellung randaufgedickter Rondens im Taumelprozess

Das Materialvolumen, welches im Randbereich der Ronde potenziell für ein Füllen der Zarge zur Verfügung steht, steigt im Vergleich zum Einsatz eines konventionellen Halbzeugs um $V = 1.162 \text{ mm}^3$ auf $V = 8.016 \text{ mm}^3$. Durch eine Steigerung der Stößelkraft auf die Maximalkraft von $F = 4.000 \text{ kN}$ lässt sich das Volumen während des Taumelpressens nochmals geringfügig erhöhen. Das maximal erreichbare Volumen im aufgedickten Randbereich der Ronde beträgt dann $V = 8.098 \text{ mm}^3$. Allerdings werden die Ausdünnung des Materials am Ziehstempelradius und die dadurch hervorgerufene Faltenbildung durch das Halbzeuglayout nicht behoben, wie in Abschnitt 2.3.3 gezeigt. Der Einsatz der randaufgedickten Ronde eignet sich somit nicht zur Herstellung fehlerfreier Bauteile durch die Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen. Ursächlich dafür ist die zu geringe Blechdicke im Bereich des Ziehstempelradius nach dem Tiefziehen. Diese beträgt für eine konventionelles Halbzeug $1,75 \text{ mm}$ und

für die randaufgedickte Ronde lediglich noch 1,43 mm. Hervorgerufen wird diese ungewollte Dickenänderung durch einen radialen Zugspannungszustand und den dadurch bedingten ebenen Dehnungszustand, wie unter Abschnitt 2.2.1 beschrieben. Die Dehnungsverteilung nach dem ersten Prozessschritt für den Einsatz einer Stahlronde mit einer Ausgangsblechdicke von $s_0 = 2$ mm, welche über das optische Dehnungsmesssystem ARGUS der Firma GOM nachgewiesen wurde, ist Bild 13 zu entnehmen. Die Abbildung verdeutlicht die vorherrschenden Dehnungszustände zum Ende der Tiefziehoperation. Während die Hauptdehnung im Bereich des Ziehstempelradius über 60% beträgt, werden im Rondensboden keine Dehnungen detektiert.

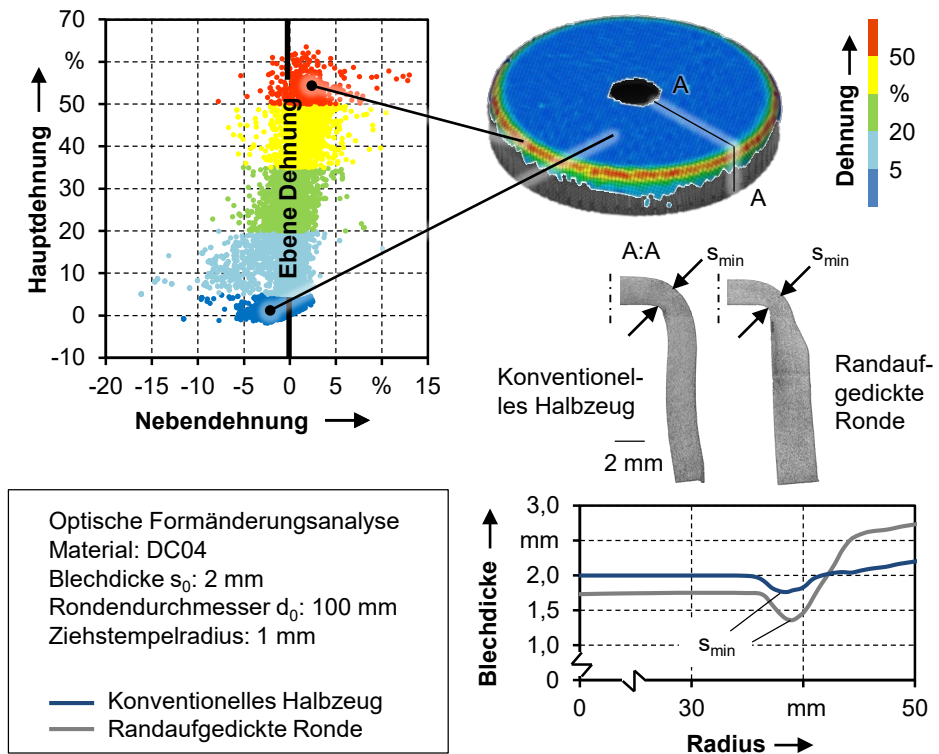


Bild 13: Dehnungsverteilung für den tiefgezogenen Napf aus der ebenen Ronde und Blechdickenverläufe für diesen und die randaufgedickte Ronde

Die starke Ausdünnung des Werkstoffs kann bei konventionellen Tiefziehteilen akzeptiert werden, wenn das Bauteil die definierte Mindestblechdicke nicht unterschreitet. In der Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen begünstigt die Materialausdünnung jedoch das Abheben des Werkstücks im Bereich des Ziehstempelradius und führt zu einer unerwünschten Materialüberlappung in diesem Bereich. Ursächlich dafür ist,

dass nach Aufsetzen des Napfes auf der Anschlagplatte in allen anderen Bereichen Fließbehinderungen existieren. Lediglich im Bereich der Ziehstempelradius kann der Werkstoff frei fließen und hebt unter zunehmender Stauchkraft F_s vom Ziehstempelradius ab, wie Bild 14 verdeutlicht.

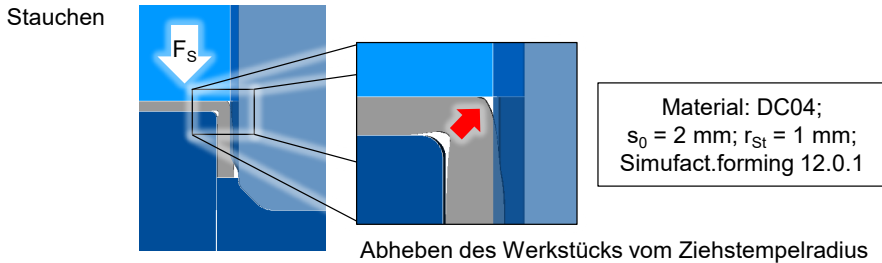


Bild 14: Abheben der randaufgedickten Ronde im Stauchprozess als Ursache der Faltenbildung bei fortschreitendem Hub

Um die zweite Anforderung, das Vermeiden einer Materialüberlappung im Bereich des Ziehstempelradius, erfüllen zu können, soll das Blechdickenprofil bereits nach dem Tiefziehen möglichst nah an der vollständigen Formfüllung der Zielgeometrie liegen, welche Bild 15 zu entnehmen ist. Das idealisierte Blechdickenprofil entspricht dem idealisierten Verlauf und soll die freie, unkontrollierte Umformung während des Stauchens verhindern.

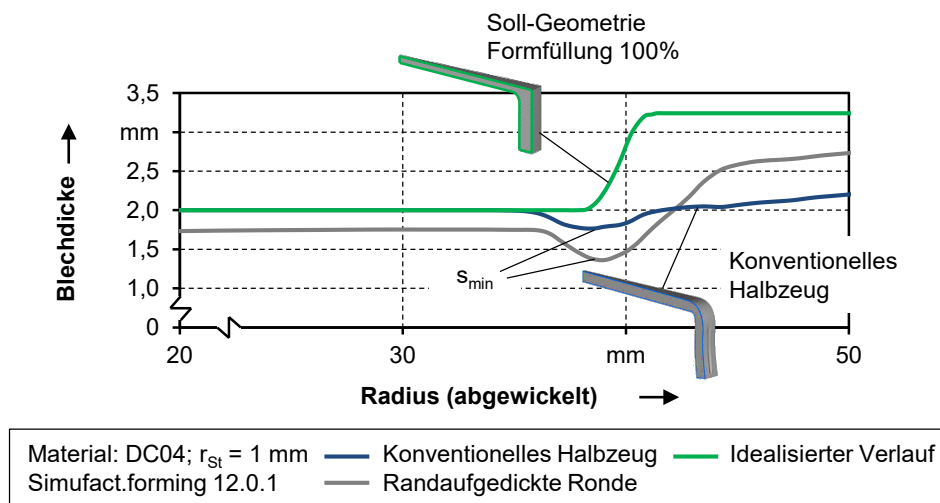


Bild 15: Verläufe der abgewickelten Blechdicke für die Soll-Geometrie sowie für das konventionelle Halbzeug und die randaufgedickte Ronde nach dem Tiefziehen

Da das Tiefziehergebnis die Eingangsgröße für den Stauchprozess darstellt, sollen identifizierte Fehlerbilder über eine prozessangepasste Materialvor-

verteilung vermieden werden. Diese ermöglicht des Weiteren eine Verringerung der Inhomogenität lokaler Belastungsspitzen im Umformwerkzeug, welche durch eine ungleichmäßige Verteilung des Materials in der Werkzeugkavität und eine dadurch bedingte Verlängerung der Fließwege hervorgerufen wird.

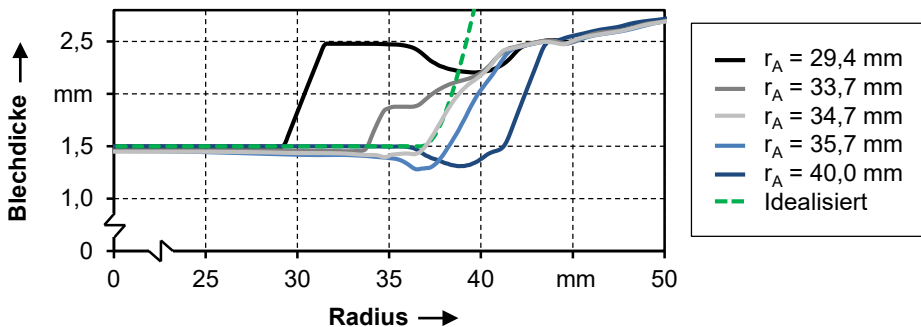
Als zentrale Anforderung an die auszulegende Halbzeuggeometrie wird demnach, basierend auf den vorliegenden Erkenntnissen, sowohl eine erhöhte Blechdicke im Bereich der Zarge als auch die prozessangepasste radiale Position dieser Aufdickung definiert. Das umformtechnisch hergestellte Tailored Blank wird anhand seines Potentials zur Vermeidung der identifizierten Fehlerbilder sowie anhand der resultierenden Bauteileigenschaften bewertet.

5.2 Numerische Auslegung einer Werkzeuggeometrie zur Herstellung prozessangepasster Halbzeuge durch einen Taumelprozess

Basierend auf den beschriebenen Anforderungen liegt der Fokus auf der radialen Position des Aufdickungsbeginns r_A und der Übergangslänge l_U , da diese ausschließlich durch die Werkzeuggeometrie und nicht durch die Einstellung einzelner Prozessparameter beim Taumeln bestimmt werden. Darüber hinaus wurden die Blechdicken im inneren Rondenbereich s_i , ausgehend von der Ausgangsblechdicke $s_o = 2$ mm, verringert und im äußeren Bereich der Ronde s_2 erhöht, um deren Einfluss auf den Blechdickenverlauf nach dem Tiefziehen zu untersuchen. Zu Beginn wurden zweidimensionale Modelle genutzt, um grundlegende Zusammenhänge zu analysieren und sich einer zielführenden Werkzeuggeometrie anzunähern. Diese vereinfachten Modelle erlauben eine effiziente Analyse der grundsätzlichen Einflüsse von Übergangsposition und -länge auf die Bauteileigenschaften bei deutlich verkürzten Rechenzeiten. Für den Ziehspalt wird nach [81] ein Wert von $z_u = 1,2 \times s_o$ angenommen. In den nachfolgenden Untersuchungen wurden dreidimensionale Prozessmodelle verwendet, um eine höhere Abbildungsgenauigkeit zu erreichen. Die Modelle für die Analyse der konventionellen Halbzeuge sowie für den Einsatz randaufgedickter Ronden wurden in vorherigen Arbeiten aufgebaut und validiert [23]. Die Ergebnisse dieses Kapitels zur prozessangepassten Auslegung der Halbzeuggeometrie werden nachfolgend ebenfalls validiert.

Analyse des Einflusses von radialem Aufdickungsbeginn und Übergangslänge auf das Prozessergebnis im zweidimensionalen Prozessmodell

Als Startpunkt für die Identifizierung eines prozessangepassten Halbzeuglayouts wurde eine Ronde mit einer Ausgangsblechdicke von $s_0 = 1,5$ mm tiefgezogen, um die radiale Position der Materialausdünnung zu bestimmen. Diese Blechdicke entspricht näherungsweise jener der randaufgedickten Ronde im Bereich des Ziehstempelradius. In diesem Bereich soll nach Definition der Anforderungen an ein prozessangepasstes Halbzeug, nach Abschnitt 5.1, die Ausdünnung des Materials während des Tiefziehprozesses kompensiert werden. Die Analyse des Blechdickenverlaufs ergibt für einen Ziehstempelradius von $r = 1$ mm eine radiale Position von $r_A = 34,7$ mm für den Beginn der Materialausdünnung. Diese Position wird als Ausgangsposition für die nachfolgenden Untersuchungen gewählt. Wie Bild 16 zeigt, ermöglicht die Startkonfiguration bereits eine gute Näherung an den idealisierten Blechdickenverlauf. Der idealisierte Verlauf entspricht, wie in Bild 15 gezeigt, einer vollständigen Füllung der Werkzeugkavität. Allerdings beträgt die Blechdicke im Boden der Sollgeometrie nun $s = 1,5$ mm, um die Verläufe gegenüberstellen zu können.



DC04; $s_1 = 1,5$ mm; $s_2 = 2,5$ mm; $l_0 = 2,0$ mm; $r_{St} = 1$ mm; Simufact.forming 12.0.1

Bild 16: Resultierende Blechdickenverläufe für eine Variation des Aufdickungsbeginns im numerischen Modell

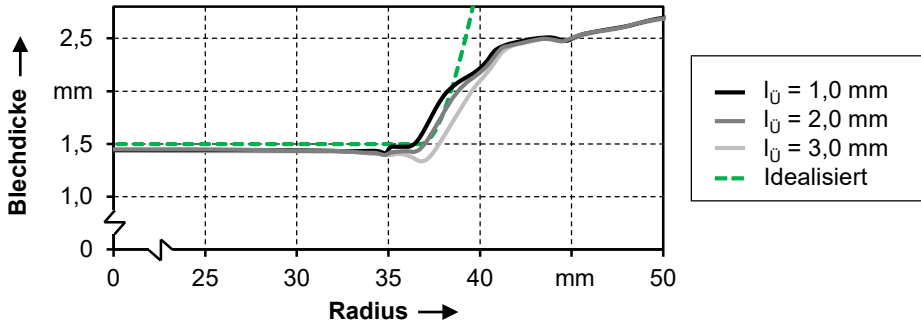
Ausgehend von dieser Startkonfiguration wird die radiale Position des Aufdickungsbeginns radial nach innen und nach außen verschoben, um den Einfluss der Position auf den resultierenden Blechdickenverlauf nach dem Tiefziehen zu analysieren. Die radiale Position von $r_A = 34,7$ mm wird im numerischen Modell bis hin zum Aufdickungsbeginn der randaufgedickten Ronde, also $r_A = 40$ mm, verschoben. Der Aufdickungsbeginn wird zudem

in entgegengesetzte Richtung um ebenfalls 5,3 mm auf $r_A = 29,4$ mm verschoben. In Anlehnung an die geometrischen Eigenschaften der randaufgedickten Ronden und der in [112] definierten Prozessgrenzen, wird im ausgedünnten Bereich eine Blechdicke von $s_1 = 1,5$ mm und dem aufgedickten Bereich eine Blechdicke von $s_2 = 2,5$ mm zugewiesen.

Wie bereits in Abschnitt 5.1 gezeigt, kann die Ausdünnung durch eine Verschiebung des Aufdickungsbeginns in radialer Richtung nach außen nicht kompensiert werden. Dahingegen führt eine Verschiebung radial nach innen zu einer Überkompensation und ebenfalls zu einer zunehmenden Abweichung der resultierenden Blechdicke zum idealisierten Dickenprofil nach dem Tiefziehen. Bereits eine Verschiebung des Aufdickungsbeginns um einen Millimeter hin zur Rondenmitte führt zu einer unerwünschten Steigerung der Blechdicke im Bauteilboden um über 25% bezogen auf die idealisierte Geometrie. Dieser Effekt wird durch eine fortschreitende Verschiebung des Aufdickungsbeginns weiter verstärkt. Neben der rein geometrischen Abweichung von der Sollgeometrie wird für diese Variationen der Halbzeuggeometrie nicht länger der gesamte Bodenbereich zwischen Stauch- und Ziehstempel geklemmt, sondern nur noch der Bereich der Aufdickung im Bauteilboden. Fließt nachfolgend Material im Stauchprozess aus der Bauteilzarge in den Bauteilboden, wie für hohe Stauchkräfte in [23] gezeigt, kann es im Bodenbereich zu unkontrolliertem Materialfluss und weiteren geometrischen Abweichungen kommen. Die als Startkonfiguration gewählte Halbzeuggeometrie erscheint basierend auf den beschriebenen Ergebnissen grundsätzlich als zielführend und wird als Grundlage für weiterführende geometrische Modifikationen genutzt.

In einem nächsten Schritt wird der Einfluss der Länge des Übergangs vom ausgedünnten in den aufgedickten Halbzeuggbereich untersucht. Unter Beibehaltung der Blechdicken s_1 und s_2 aus den vorangegangenen Untersuchungen und dem radialen Aufdickungsbeginn von $r_A = 34,7$ mm führt eine Änderung der Länge auch zu einer Änderung der Steigung im Bereich des Übergangs. Der Ausgangswert von $l_U = 2$ mm wurde sowohl auf drei und vier Millimeter erweitert als auch auf einen Millimeter verringert. Eine weitere Verringerung scheint, bedingt durch die Kerbwirkung am Beginn des Übergangs während des Tiefziehens nicht sinnvoll. In diesem Bereich treten während des Tiefziehens Biegespannungen und somit in der äußeren Faser versagenskritische Zugspannungen auf [81]. Des Weiteren lassen sich in der experimentellen Herstellung prozessangepasster Halbzeuge durch das Taumelverfahren keine beliebig kurzen Übergänge realisieren. Die Orientierung der Materialanhäufung hin zur späteren Napfinnenseite erlaubt

die Verlagerung des Übergangs in den druckspannungsdominierten Bereich, ist nach [23] jedoch nicht zielführend. Eine Analyse der resultierenden Blechdickenverläufe, welche in Bild 17 dargestellt sind, verdeutlicht, dass weder eine Verlängerung noch eine Verkürzung der Übergangslänge um einen Millimeter zu einem verbesserten Resultat führen.



DC04; $s_1 = 1,5 \text{ mm}$; $s_2 = 2,5 \text{ mm}$; $r_A = 34,7 \text{ mm}$; $r_{St} = 1 \text{ mm}$; Simufact.forming 12.0.1

Bild 17: Resultierende Blechdickenverläufe zur Bestimmung einer zielführenden Übergangslänge $l_{\text{Ü}}$

Die Abweichungen zur idealisierten Geometrie steigen, da sich die Änderung der Übergangslänge bei gleichem radialem Beginn ähnlich der vorher untersuchten Änderung des radialen Beginns bei gleicher Übergangslänge auswirkt. Ein verkürzter Übergangsbereich bedingt demnach eine Überkompensation der Ausdünnung, wohingegen eine Verlängerung weiterhin zu einer Ausdünnung des Materials am Ziehstempelradius führt. Nach der grundlegenden Analyse des Einflusses der untersuchten Parameter im vereinfachten zweidimensionalen Prozessmodell wird nachfolgend der Einfluss der umformtechnischen Herstellung prozessangepasster Halbzeuge und deren Weiterverarbeitung im dreidimensionalen Prozessmodell untersucht.

Analyse des Einflusses der Halbzeugherstellung durch ein Taumelverfahren auf das Prozessergebnis im dreidimensionalen Prozessmodell

Nachfolgend wird ein dreidimensionales Prozessmodell genutzt, da nach [23] zu erwarten ist, dass der innenverzahnte Ziehring bei einer Variation der Blechdicke s_2 erheblichen Einfluss auf die Abstreck-Gleitziehanteile im Tiefziehprozess hat. Die Variation der Blechdicken s_1 und s_2 erfolgt unter Annahme eines konstanten Halbzeugvolumens. Das Gesamtvolumen der

Ronde mit einem Außendurchmesser von $d_o = 100$ mm und einer Ausgangsblechdicke von $s_o = 2$ mm beträgt $V_{ges} = 15.708$ mm³. Durch Anwenden der Guldinschen Regel lässt sich das Volumen V_{ges} für die einzelnen geometrischen Varianten über die Flächenelemente des Querschnitts A_j sowie die dazugehörigen Flächenschwerpunkte r_j bestimmen. Als maximale Abweichung des Volumens der konstruierten Runde zum Ausgangsvolumen wird ein Wertebereich von ± 3 mm³ definiert. Basierend auf den im vorherigen Abschnitt gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich zunächst die in Tabelle 3 dargestellten Halbzeugparameter.

Tabelle 3: Geometrische Parameter des prozessangepassten Halbzeugs für nachfolgende Untersuchungen

Blechdicke s_1	Blechdicke s_2	Lage r_1	Übergangslänge l_U	Höhendifferenz Δs
1,51 mm	2,51 mm	34,70 mm	2,00 mm	1,00 mm

Des Weiteren wird das numerische Modell um das Taumelverfahren erweitert, welches zur umformtechnischen Herstellung der prozessangepassten Halbzeuge genutzt werden soll, um auch die Einflüsse der Halbzeugherstellung bei der Auslegung des Werkzeugeinsatzes berücksichtigen zu können. Dieses aufwendigere Modell erfordert ein Vielfaches der ursprünglich benötigten Rechenzeit, lässt jedoch eine Berücksichtigung der veränderten geometrischen und mechanischen Halbzeugeigenschaften auf die resultierenden Bauteileigenschaften zu. Die gesteigerte Abbildungsgenauigkeit macht gegebenenfalls eine Verschiebung des radialen Aufdickungsbeginns erforderlich. Der Werkzeugeinsatz wird entsprechend der in Tabelle 3 aufgeführten Halbzeugparameter konstruiert. Die Halbzeugherstellung wird entsprechend der in Abschnitt 4.4 beschriebenen Einstellungen in einem 360 Grad-Modell abgebildet, da die auftretenden radialen sowie tangentialen Stoffflussanteile keine Ausnutzung der Rondsymmetrie zulassen. Als Prozessparameter werden ebenfalls die in [112] definierten Standardparameter für die Tiefziehlegierung DCo4 gewählt. Diese umfassen je fünf Taumelrunden in den drei Prozessphase bei einer Stoßkraft von $F = 3.000$ kN und einer maximalen Auslenkung der Taumelplatte um $\Theta = 1^\circ$. Basierend auf dem bereits vorhandenen Prozesswissen zum Einsatz des Taumelverfahrens zur Herstellung von Halbzeugen mit variablem Blechdickenprofil war zu erwarten, dass das umformtechnisch hergestellte Halbzeug von der konstruierten Geometrie abweicht.

Diese Annahme wird, durch die in Bild 18 gezeigten Ergebnisse, bestätigt.

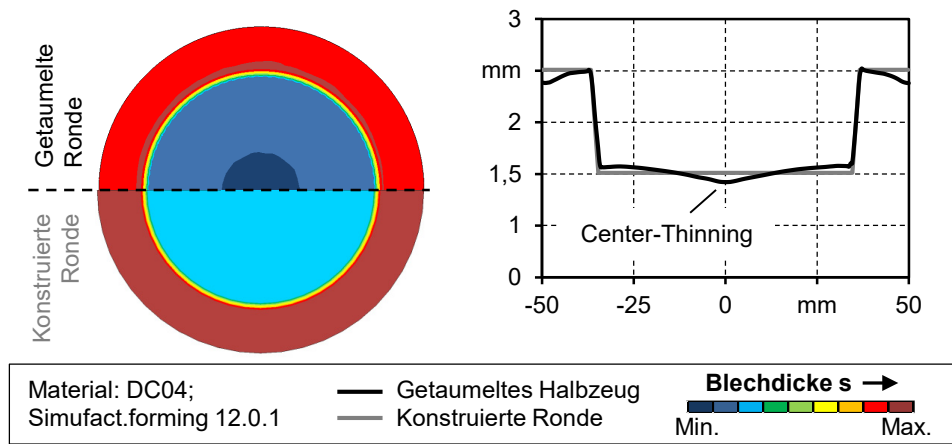


Bild 18: Vergleich der geometrischen Halbzeugeigenschaften von getaumelter und konstruierter Ronde

Das Dickenprofil der getaumelten Ronde nähert sich dem idealisierten Verlauf zwar an, weist jedoch im Gegensatz zu diesem unter den gewählten Prozessparametern die im Stand der Technik beschriebene sogenannte Center-Thinning und mit 93,36% keine vollständige Ausformung der Werkzeugkavität auf. Das verstärkte Ausdünnen der Rondenmitte ist durch die dreiphasige Prozessführung bedingt, durch welche zu Prozessbeginn und -ende in der Nullstellung der Taumelplatte die gewählte Umformkraft über den angeschrägten Taumelstempel ausschließlich auf die Rondenmitte wirkt. Radial nach außen nimmt die ermittelte Blechdicke zu und übersteigt die Dicke der konstruierten Ronde, welche im inneren Bereich konstant $s_1 = 1,5$ mm beträgt. Die verringerte Ausfüllung der Werkzeugkavität zum Rondenrand hin wird insbesondere durch die Stützwirkung an der Matrize hervorgerufen. Die radialen Stoffflussanteile drücken den Rand der Ronde zu Prozessbeginn an die Matrizenwand und erschweren auf diese Weise ein vollständiges und gleichmäßiges Ausfüllen der Werkzeugkavität.

Das numerische Prozessmodell der gesamten umformtechnischen Prozesskette erlaubt nun eine Übergabe der getaumelten Ronde in die nachfolgende Weiterverarbeitung durch die Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen. Hier wirken sich, neben den vorab beschriebenen geometrischen Unterschieden, vor allem veränderte mechanische Eigenschaften der Halbzeuge aus. Bild 19 zeigt die Umformgradverteilung, welche Rückschlüsse auf die durch die Herstellung induzierte Kaltverfestigung

zulässt, sowie die resultierenden Blechdickenprofile nach Beendigung der Tiefziehoperation.

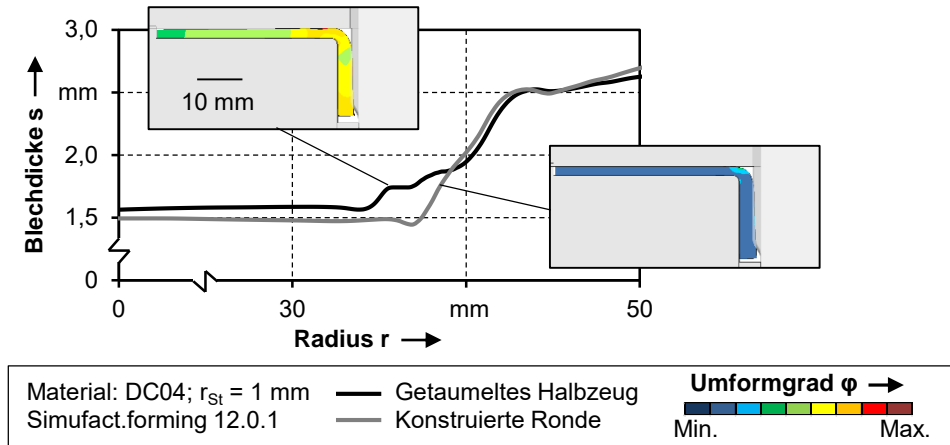


Bild 19: Gegenüberstellung der Blechdickenverläufe für den Einsatz getaumelter und konstruierter Ronden

Für das konstruierte Halbzeug wird zu Prozessbeginn angenommen, dass die mechanischen Eigenschaften jenen des Grundwerkstoffes entsprechen. Für die getaumelte Ronde sind lokal bereits erhöhte Umformgrade erkennbar, welche auf den berechneten Dehnungen während des Taumelverfahrens beruhen. Die abgewickelten Blechdickenverläufe zeigen, dass die Berücksichtigung der Einflüsse der umformtechnischen Halbzeugherstellung zu einer Veränderung des Prozessergebnisses nach dem Tiefziehen führen. Die im Vergleich zum konstruierten Halbzeug bereits vor der eigentlichen Aufdickung um 16% erhöhte Blechdicke sowie die durch das Taumeln eingebrachte Kaltverfestigung führen zu einer vergrößerten Abweichung des Blechdickenverlaufs vom Profil der konstruierten Ronde. Des Weiteren wird durch die eingebrachte Verfestigung des Werkstoffs eine Steigerung der erforderlichen Prozesskraft hervorgerufen.

Der tiefgezogene Napf, welcher die Eingangsgröße für den nachfolgenden Prozessschritt darstellt, wird, ebenfalls unter Berücksichtigung der Einflüsse der vorherigen Prozessschritte zum Funktionsbauteil umgeformt. Erwartungsgemäß werden, bedingt durch die gesteigerte Festigkeit des Napfes, auch im Stauchprozess über den gesamten Hub höhere Umformkräfte benötigt. Bei einem kraftgesteuerten Prozessablauf resultiert dies in unterschiedlichen Bauteilhöhen nach Erreichen der eingestellten Stauch-

kraft von $F_{\max} = 1.000 \text{ kN}$. Zudem ergibt sich für jeweils identische Stößelpositionen eine unterschiedlich große Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück, wie Bild 20 zu entnehmen ist.

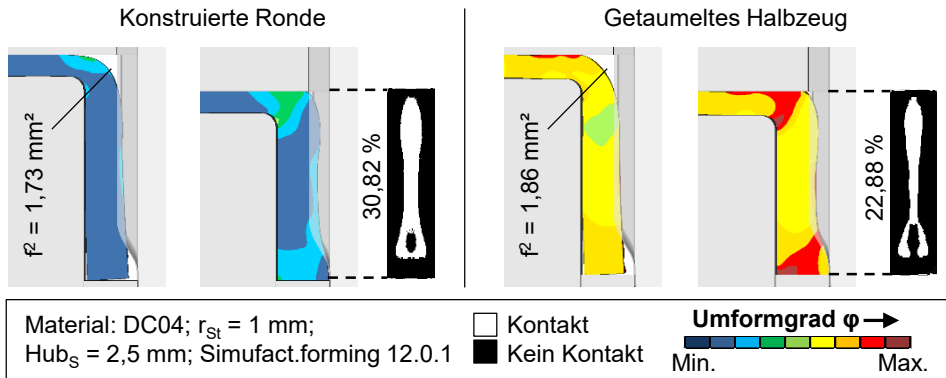


Bild 20: Einfluss der Berücksichtigung geometrischer und mechanischer Halbzeugeigenschaften auf die Kontaktfläche zwischen Werkstück und Werkzeug

Der Werkzeugkontakt nimmt bedingt durch das geringere Materialvolumen in der Bauteilzarge um etwa acht Prozent ab. Das konstruierte Halbzeug verfügt über ein idealisiertes Profil und füllt die Zahnkavität dadurch bedingt besser aus. Positive Effekte der Verfestigung, welche ein Fließen des Materials aus der Zarge in den Bauteilboden verringern, kommen erst bei weiter fortschreitendem Hub und entsprechend hoher Formfüllung zum Tragen und werden im Rahmen der Auslegung vorerst nicht berücksichtigt. Festzuhalten bleibt, basierend auf den Ergebnissen des Tiefziehprozesses, dass eine Anpassung des radialen Aufdickungsbeginns erforderlich ist, um die Abweichungen des Blechdickenprofils zum idealisierten Verlauf wieder zu verringern.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen kann dieses Ziel über eine Verschiebung des Einlaufs in die Kavität radial nach außen oder die Erhöhung der Übergangslänge bei gleichem radialen Aufdickungsbeginn erreicht werden. Da die in der Variationsimulation ermittelten Parameter bereits eine gute Näherung an den idealisierten Verlauf zulassen, wird es zunehmend schwieriger, resultierende Verläufe weiterer Varianten qualitativ zu bewerten. Aus diesem Grund wird eine quantitative Größe, die in Bild 21 dargestellte Freifläche f^2 zwischen Werkstück und Werkzeug, berechnet. Der radiale Beginn der Aufdickung wird im Taumelwerkzeug um je 0,5 mm und 1 mm nach außen verschoben, zudem wird die Übergangslänge auf 3 mm und 4 mm verlängert.

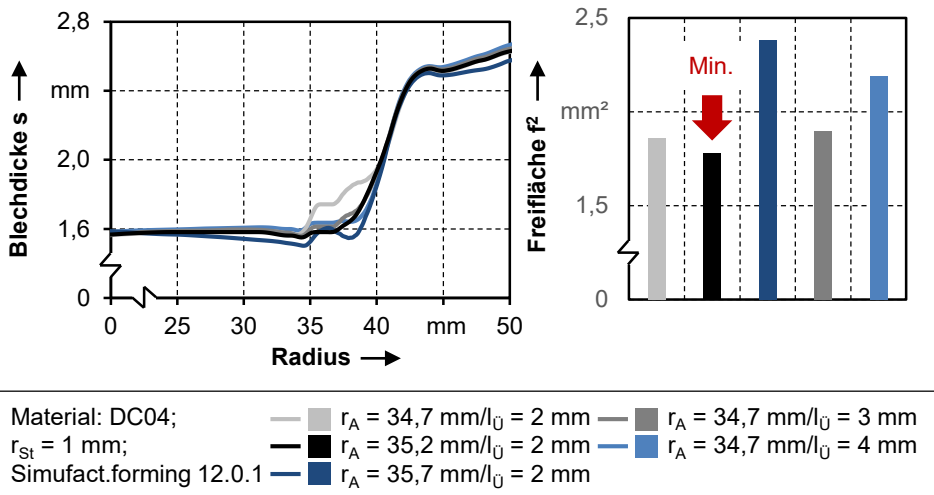


Bild 21: Anpassung der Halbzeuggeometrie zur Verringerung der entstehenden Freifläche zwischen Werkstück und Werkzeug

Die Auswertung der jeweiligen Freiflächen f^2 aus den numerischen Simulationen ergibt für die unterschiedlichen Werkzeuggeometrien bei einer Verschiebung des radialen Aufdickungsbeginns auf $r = 35,2 \text{ mm}$ den geringsten Wert. Eine weitere Verschiebung sowie eine Erhöhung der Übergangslänge führen zu einer Vergrößerung des Freiraums zwischen Werkzeug und Werkstück und sind somit nicht zielführend.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll diese Auslegung um einen effizienteren Ansatz der Auslegung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung erweitert werden. Aufbauend auf dem vorhandenen Prozessverständnis konnte ein zielführender Aufdickungsbeginn basierend auf dem Ergebnis einer einzigen Tiefziehsimulation bestimmt werden. Zu diesem Zweck wird der Blechdickenverlauf einer konventionellen Ronde mit einer Ausgangsblechdicke von $s_0 = 2 \text{ mm}$ nach Abschluss der Tiefziehoperation analysiert. Dieses Vorgehen soll eine aufwendige Variantensimulation verschiedener Positionen, wie in [47] gezeigt, überflüssig machen und die Effizienz des Anpassungsprozesses deutlich erhöhen. Der abgewinkelte Blechdickenverlauf der konventionellen Ronde nach dem Tiefziehen lässt erkennen, dass es bereits ab einer radialen Position von $r = 34,34 \text{ mm}$ zu einer Abnahme der Materialdicke kommt, welcher sich mit $1,99 \text{ mm}$ allerdings noch im Promillbereich befindet. Ab einer radialen Position von $r = 35,19 \text{ mm}$ wird die Ausgangsblechdicke dann erstmals um mehr als 1% der Ausgangsblechdicke unterschritten und beträgt mit $1,96 \text{ mm}$ 2%. Dieser Wert bietet mit einer Abweichung von nur

0,01 mm eine ausreichend gute Näherung an den durch die Variantensimulation identifizierten Aufdickungsbeginn von $r = 35,20$ mm, welcher den weiterführenden Untersuchungen zugrunde liegt. Für die numerische Stoffflussanalyse wurde ein Werkzeugeinsatz konstruiert, welcher in Bild 22 dargestellt ist. Die Stufenhöhe beträgt einen Millimeter und für die Übergangslänge wurde, basierend auf den Erkenntnissen aus [47], ein Wert von $l_0 = 2$ mm gewählt.

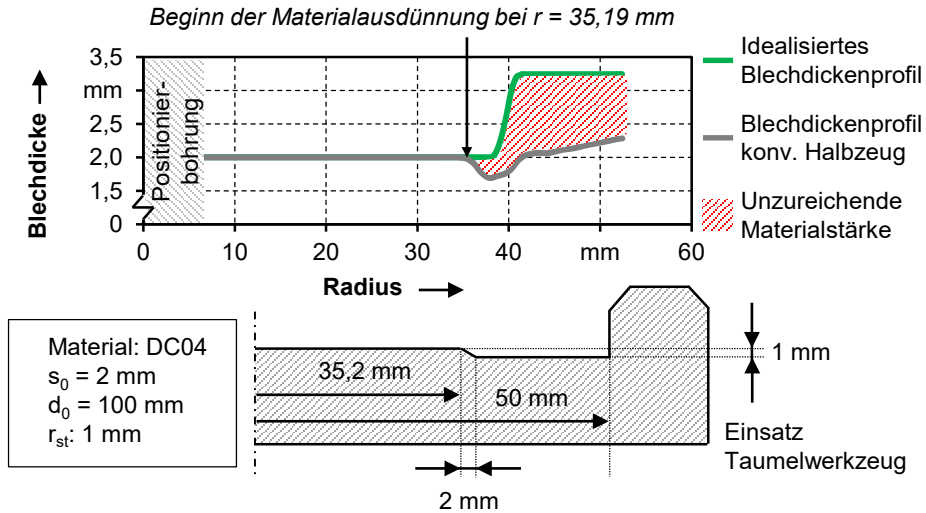


Bild 22: Auslegung eines angepassten Werkzeugeinsatzes für das Taumelpressen basierend auf dem Ergebnis einer Umformsimulation

Das Gesamtvolumen der Ronde mit einem Ausgangsdurchmesser von $d = 100$ mm und einer Ausgangsblechdicke von $s_0 = 2$ mm beträgt, wie zuvor beschrieben, $V_{ges} = 15.708$ mm³. Unter Berücksichtigung des Kavitätsumfanges im Werkzeugeinsatz von 3.736 mm³ kann theoretisch eine maximale Aufdickung der Ausgangsblechdicke um 0,52 mm auf $s = 2,52$ mm erreicht werden. Dieser Wert entspricht näherungsweise dem Zielwert für die maximale Blechdicke im Bereich der Aufdickung aus [112] und wird nicht weiter erhöht, da eine Vertiefung der Kavität nach [112] zu einem Ausknicken der Blechrunde während des Taumelprozesses führt. Durch den ausgelegten Taumeleinsatz kann bei vollständiger Formfüllung ein Materialvolumen von $V = 8.885$ mm³ für die Bauteilzarge vorverteilt werden. Gegenüber der randaufgedickten Ronde lässt sich das Materialvolumen in diesem Bereich um etwa 10 Prozent steigern. Nachfolgend wird untersucht, in wie weit sich die Werkzeugkavität unter Anwendung der Standardparameter aus [98] füllen lässt und ob sich die identifizierten Prozessfehler durch die ausgelegte Halbzeuggeometrie verhindern lassen.

5.3 Umformtechnische Herstellung und Verarbeitung prozessangepasster Halbzeuge zur Herstellung außenverzahnter Funktionsbauteile

Um das Potential des in Abschnitt 5.2 ausgelegten Werkzeugeinsatzes nachzuweisen, wird dieser im numerischen Prozessmodell eingesetzt, um prozessangepasste Halbzeuge für die nachfolgende Prozesskombination herzustellen. Für die numerische Analyse des Taumelprozesses wurden die Standardparameter aus [98] gewählt. Diese betragen jeweils fünf Taumelrunden in den drei Prozessphasen bei einer Taumelkraft von $F_T = 3.000 \text{ kN}$ und einem maximalen Taumelwinkel von $\Theta = 1^\circ$ und entsprechen den Einstellungen zur Herstellung der randaufgedickten Ronde unter Abschnitt 5.1. Um eine realitätsnahe Abbildung zu gewährleisten, wurden die errechneten Prozessergebnisse im numerischen Modell in den jeweilig nachfolgenden Prozessschritt als Eingangsgröße übergeben.

5.3.1 Umformtechnische Herstellung prozessangepasster Halbzeuge im Taumelprozess

Als Grundlage für nachfolgende Untersuchungen wird das Potential einer angepassten Halbzeuggeometrie mit einem Aufdickungsbeginn bei $r = 35,2 \text{ mm}$ im numerischen Modell analysiert und den Ergebnissen für die randaufgedickte Ronde gegenübergestellt, welche einen Aufdickungsbeginn an der Position $r = 40 \text{ mm}$ aufweist. Für den im vorherigen Abschnitt ausgelegten Werkzeugeinsatz ergeben sich, unabhängig von der Anpassung des Werkzeugs, qualitativ übertragbare geometrische Eigenschaften. Insbesondere bedingt durch die radialen Stoffflussanteile zu Prozessbeginn [112] kann die Blechdicke im Randbereich der Ronde lokal auf bis zu $s = 2,5 \text{ mm}$ gesteigert werden. Die Blechdicke am Einlauf in die Werkzeugkavität ist am höchsten, da sich das Material in diesem Bereich bereits zu Prozessbeginn in die Kavität wölbt, während es am äußeren Rand bei radialer Dehnung an der Matrize gestützt wird. Die Matrize stellt eine Fließbehinderung in radialer Richtung dar und ruft, durch die Kammerung einen verstärkten tangentialen Stofffluss hervor. In der Rondenmitte kommt es, bedingt durch das Center-Thinning [109], bei beiden Werkzeugeinsätzen zur verstärkten Ausdünnung des Materials. Das vergrößerte Kavitätsvolumen beim angepassten Werkzeugeinsatz resultiert in einer vergleichsweise stärkeren Reduzierung der Blechdicke im inneren Rondenbereich bei entsprechend gesteigerter Verschiebung des Materials in den Randbereich.

Bild 23 zeigt die Gegenüberstellung der berechneten Blechdickenverteilung nach Beendigung des Taumelprozesses für die beiden untersuchten Halbzeuglayouts.

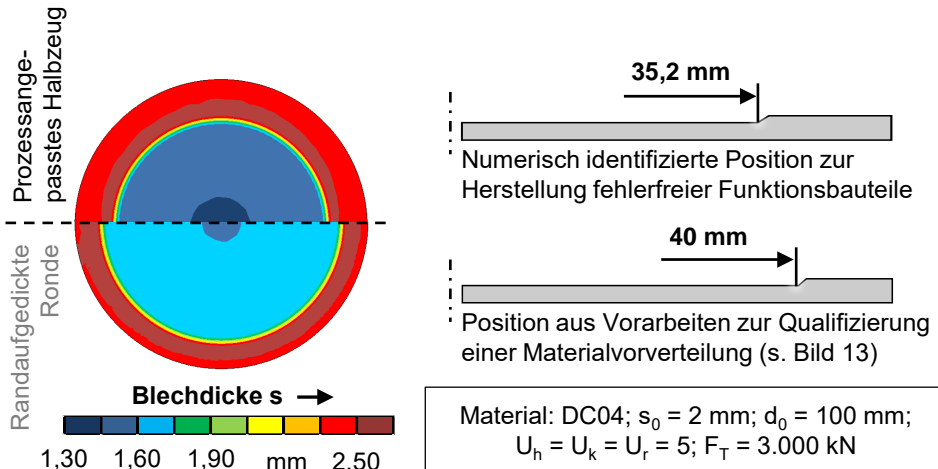


Bild 23: Gegenüberstellung der Geometrien und Volumina von randaufgedickter Ronde und prozessangepasstem Halbzeug

Unter Anwendung der Standardparameter lässt sich beim prozessangepassten Halbzeug ein höheres Materialvolumen vorverteilen. Ursächlich dafür ist die Anpassung der Aufdickungsbeginns. Die Verschiebung des Aufdickungsbeginns sowie die Vertiefung der Werkzeugkavität um 0,1 mm ermöglichen eine Erhöhung der Materialvorverteilung durch den Taumelprozess. Das Materialvolumen außerhalb des Ziehstempelradius beträgt für das prozessangepasste Halbzeug $V = 8.410 \text{ mm}^3$ und liegt somit etwa 5% über dem Wert für die randaufgedickte Ronde. Es ist zu berücksichtigen, dass dieser Wert das Volumen eines gesamten Bauteils repräsentiert und damit das 80-fache eines einzelnen Zahnsegments beträgt. Zudem fällt, bedingt durch das vergrößerte Kavitätsumfassen, auch die Höhendifferenz zwischen äußerem und inneren Rondensbereich größer aus, da mehr Materialvolumen von innen nach außen fließen kann. Wie in den vorherigen Abschnitten ausgeführt, ist das vorhandene Volumen zwar eine grundlegende Voraussetzung für eine hohe Formfüllung, welche jedoch nur bei prozessangepasster Verteilung des Materialvolumens erreicht werden kann. Die beiden unterschiedlichen Halbzeuglayouts werden nachfolgend zu Näpfen gezogen, welche bereits die Grundform der finalen Bauteilgeometrie aufweisen. Das Blechdickenprofil der Halbzeuge sowie die entsprechenden

Materialvolumina, welche zur Füllung der Zarge zur Verfügung stehen, sind Bild 24 zu entnehmen.

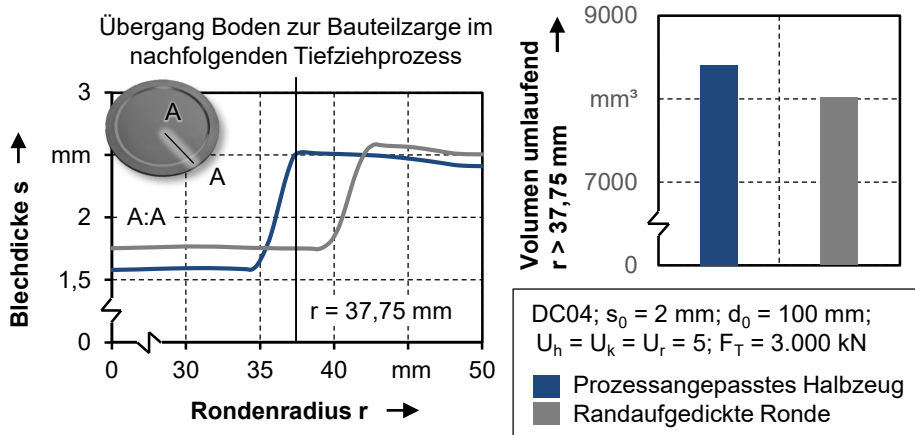


Bild 24: Blechdickenprofil und Volumina von randaufgedickter Ronde und Tailored Blank

5.3.2 Kompensation der Materialausdünnung im Tiefziehprozess durch den Einsatz prozessangepasster Halbzeuge

In diesem Abschnitt werden die Eigenschaften der tiefgezogenen Näpfe für die beiden Halbzeuge mit Blechdickengradienten untersucht, welche im vorherigen Abschnitt durch einen Taumelprozess hergestellt wurden. Bild 25 zeigt die Halbzeugpositionierung sowie die Konturen der Napfzargen.

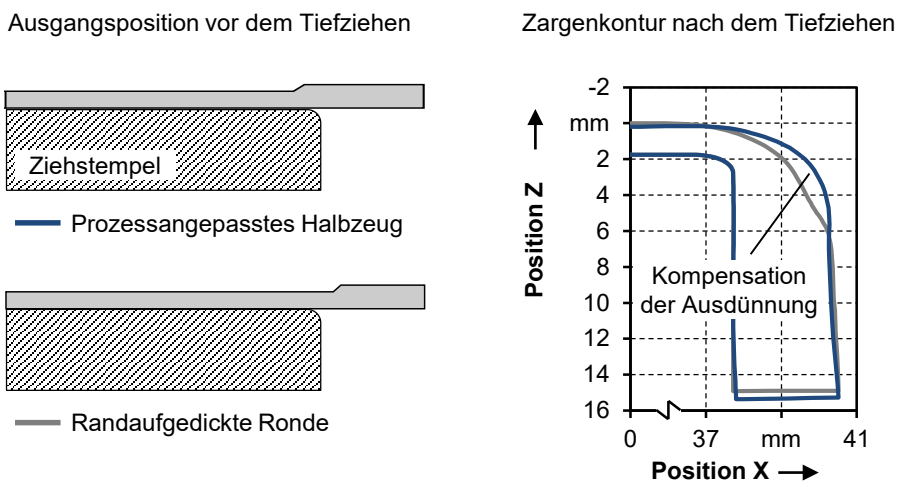


Bild 25: Kompensation der Materialausdünnung und Steigerung des Materialvolumens in der Zarge durch den Einsatz prozessangepasster Halbzeuge

Hier wirkt sich die angepasste radiale Position der Materialvorverteilung positiv auf die Napfgeometrie aus. Die Materialaufdickung, welche über das angepasste Layout weiter nach innen verschoben wurde, liegt, wie Bild 25 zu entnehmen ist, innerhalb des Ziehstempelradius und kompensiert die Materialausdünnung während des Tiefziehens.

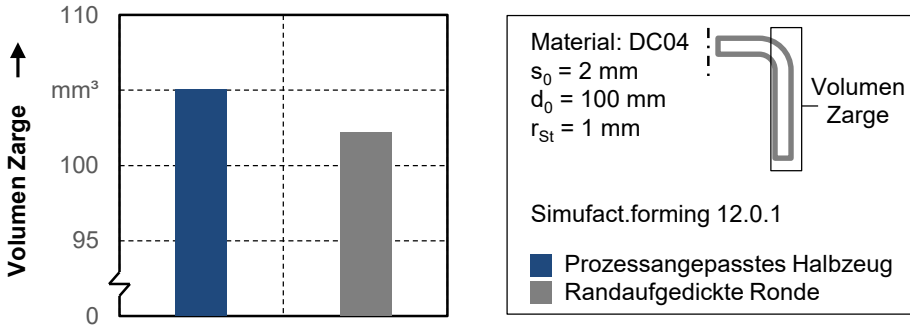


Bild 26: Volumina der Napfzargen nach dem Tiefziehen für die randaufgedickte Ronde und das prozessangepasste Halbzeug

Die resultierenden Napfhöhen sind annähernd identisch. Die minimal höhere Zarge nach der Umformung der prozessangepassten Ronde resultiert aus dem früheren Eingriff der Innenverzahnung des Ziehrings und die dadurch verstärkten Zugspannungs- und Abstreckanteile während der Tiefziehoperation [23]. Diese lassen sich über die berechneten Kraft-Weg-Verläufe für die beiden Halbzeuglayouts nachweisen. Für die prozessangepasste Ronde ergibt sich zunächst ein linearer Kraftanstieg für den Einzug des Halbzeugs über den äußeren Ziehstempelradius r_a . Mit fortschreitendem Hub wird der Napf über den inneren Ziehstempelradius r_i gezogen. Bedingt durch den verkürzten Hebelarm steigt die benötigte Ziehkraft abrupt auf ihr Maximum von $F_z = 119$ kN an. Nachfolgend fällt die erforderliche Ziehkraft wieder ab, bis die Innenverzahnung des Ziehrings in Kontakt mit dem Napf kommt. Von diesem Punkt an wird der Werkstoff nicht länger nur durch den konventionellen Tiefziehprozess umgeformt, sondern auch durch die Verzahnung plastifiziert und abgestreckt. Vor Prozessende durchläuft die Ziehkraft noch ein letztes lokales Maximum, da das Material im unteren Bereich der Zarge, bedingt durch tangentielle Druckspannungen, verfestigt und aufdickt.

Die höchsten Werte für den berechneten Umformgrad treten am Übergang vom Napfboden zur -zarge auf. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass hier bereits nach dem Taumelprozess die höchsten Dehnungen vorliegen. Die Zunahme der Werte für den Umformgrad in der Zarge lässt sich durch die

Zunahme der tangentialen Spannungen und die dadurch hervorgerufenen Dehnungen erklären [81]. Die tiefgezogenen Näpfe stellen die Eingangsgrößen für den nachfolgenden Stauchprozess dar. In diesem werden die Näpfe zu außenverzahnten Funktionsbauteilen umgeformt. Die Kraft-Weg-Verläufe für die beiden Halbzeuge sowie ausgewählte Umformgradverteilungen der prozessangepassten Ronde sind Bild 27 zu entnehmen.

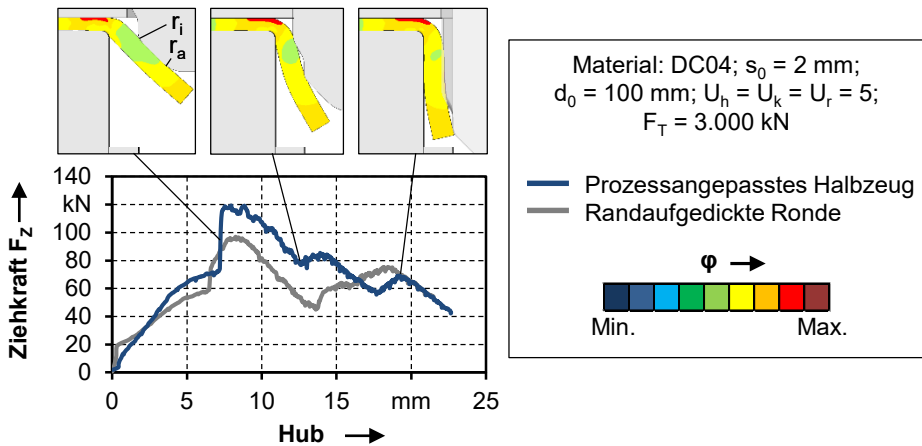


Bild 27: Vergleich der ermittelten Kraft-Weg-Verläufe aus dem Tiefziehprozess für das randaufgedickte und das prozessangepasste Halbzeug

5.3.3 Vermeidung identifizierter Prozessfehler und Erhöhung der Formfüllung durch prozessangepasste Halbzeuge im Stauchprozess

Wie unter Abschnitt 4.2 beschrieben, wird der tiefgezogene Napf noch im selben Pressenhub getaucht. Zunächst wird das obere Ziehkissen verdrängt. Im Anschluss wird der Ziehstempel mit dem tiefgezogenen Napf vom Stauchstempel verdrängt, bis der Napf auf der Anschlagplatte aufsetzt. An diesem Punkt beginnt das eigentliche Stauchen der Napfzarge unter der eingestellten Stauchkraft. Wie unter Abschnitt 5.1 beschrieben kommt es bei der randaufgedickten Ronde zum Abheben des Werkstoffs vom Ziehstempel im Bereich des Ziehstempelradius. Durch das prozessangepasste Halbzeug und die Kompensation der Materialausdünnung, welche im vorherigen Abschnitt nachgewiesen wurde, lässt sich dieser Effekt weitestgehend unterbinden, da sich das resultierende Blechdickenprofil der Sollgeometrie annähert und das zusätzliche Material in diesem Bereich als Fließbehinderung wirkt. Auf diese Weise wird eine zentrale Herausforderung, die Erhöhung der Stoffflusskontrolle im Umformprozess, gemeistert. Die

Konturen der Bauteile während des Stauchens bei fortschreitendem Pressenhub sind in Bild 28 aufgetragen.

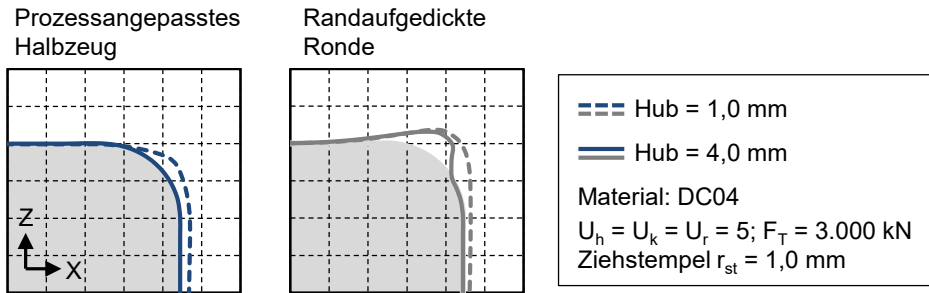


Bild 28: Bauteilkonturen am Ziehstempelradius für das konventionelle und das prozessangepasste Halbzeug bei fortschreitendem Hub

Bei der prozessangepassten Ronde ist lediglich ein leichtes Abheben radial nach außen feststellbar, während das Material bei der randaufgedickten Ronde zu Prozessbeginn stärker und in Z-Richtung abhebt. Dieser unkontrollierte Materialfluss führt bei höheren Stauchwegen zu einer Materialüberlappung im Bereich des Ziehstempelradius. Bei dem prozessangepassten Halbzeug hingegen nähert sich die Bauteilkontur nachfolgend der Ziehstempel- und damit der Sollgeometrie an, wie Bild 29 zeigt.

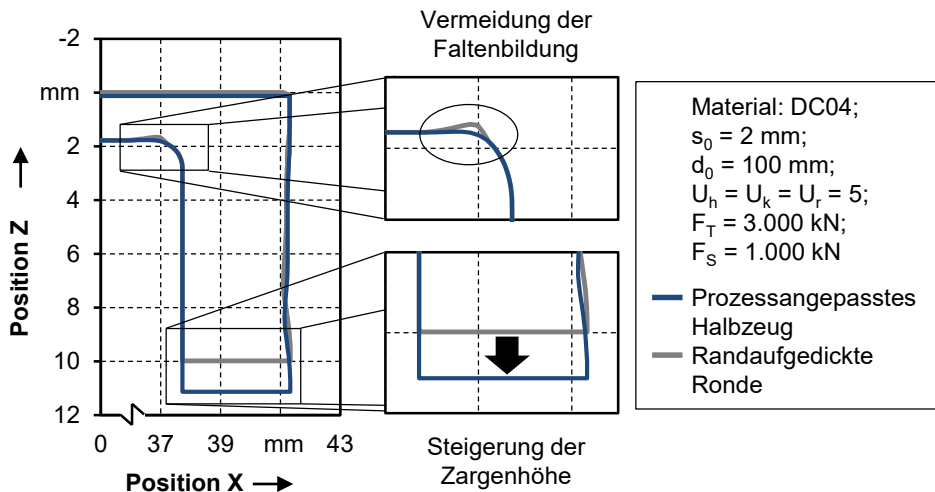


Bild 29: Vermeidung der Materialüberlappung und Steigerung der Zargenhöhe im Stauchprozess durch den Einsatz eines prozessangepassten Halbzeugs

Der Konturvergleich der Bauteilzargen nach dem Stauchen unter einer maximalen Stauchkraft von $F_S = 1.000 \text{ kN}$ verdeutlicht das Potential des prozessangepassten Halbzeugs für die Herstellung von Funktionsbauteilen durch die Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen und zu entnehmen. Bedingt durch das bereitgestellte Materialvolumen knickt die Zarge unter der Stauchkraft nicht aus und die Faltenbildung kann durch das prozessangepasste Halbzeug vermieden werden. Die Anpassung der Halbzeuggeometrie resultiert in einer größeren Zargenhöhe. Die Zargenhöhe für den Einsatz des prozessangepassten Halbzeugs liegt mit $h_Z = 11,13 \text{ mm}$ knapp 10% über dem Wert für die randaufgedickte Ronde. Dieses Ergebnis verdeutlicht das Potential prozessangepasster Halbzeuge hinsichtlich verbesserter Bauteileigenschaften sowie hinsichtlich gesteigerter Materialeffizienz. Entsprechend der Materialvorverteilung liegt das Materialvolumen für den Einsatz der prozessangepassten Ronde im Zargenbereich beim finalen Bauteil über dem Volumen, welches für den Einsatz der randaufgedickten Ronde gemessen wurde, wie Bild 30 zeigt. Das berechnete Materialvolumen für ein $4,5^\circ$ -Segment des Bauteils aus dem prozessangepassten Halbzeugs beträgt $V = 103 \text{ mm}^3$ und liegt etwa 6% über dem Wert für das Referenzbauteil. Die Abnahme des Volumens im Vergleich zu den jeweiligen Näpfen aus dem vorherigen Prozessschritt kann durch das Bodenfließen erklärt werden [23]. Der numerischen Stoffflussanalyse nach werden die unter Abschnitt 5.1 definierten Anforderungen somit erfüllt.

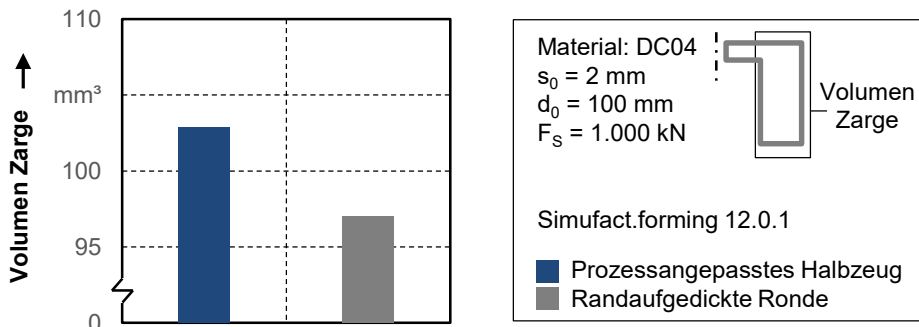


Bild 30: Erhöhung des Materialvolumens in der Bauteilzarge durch den Einsatz eines prozessangepassten Halbzeugs

Es lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die Lücke im Stand der Technik hinsichtlich der Auslegung und des Einsatzes von Tailored Blanks über die numerische Stoffflussanalyse geschlossen werden konnte. Um die Gültigkeit der gewonnenen Ergebnisse zu bestätigen, werden diese nachfolgend durch experimentelle Versuche validiert.

5.4 Validierung der numerischen Ergebnisse durch die Durchführung und Auswertung experimenteller Untersuchungen

Um die Ergebnisse der numerischen Stoffflussanalyse aus dem vorherigen Abschnitt zu validieren, werden den numerischen Ergebnissen jene aus experimentellen Umformversuchen gegenübergestellt. Das validierte Modell kann im Nachgang genutzt werden, um die durchgeführten Umformversuche um Untersuchungen zu erweitern, welche sich experimentell nicht oder nur unter hohem Aufwand abbilden lassen.

Die geometrische Validierung der Modelle für prozessangepasste Halbzeuge sowie für die daraus hergestellten Bauteile aus [47] wird nachfolgend um die Validierung der mechanischen Eigenschaften ergänzt. Des Weiteren werden die errechneten Kraft-Weg-Verläufe aus der numerischen Simulation den aufgezeichneten Verläufen aus den experimentellen Untersuchungen gegenübergestellt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Ergebnisse aus diesem Kapitel verwertbar sind und die numerischen Modelle auch weitergehend geeignet sind, um den Prozess sowie zusätzliche Modifikationen realitätsnah abzubilden. Die Validierung schließt die gesamte Prozesskette von der Stahlrunde bis hin zum außenverzahnten Funktionsbauteil mit ein. Für die umformtechnische Herstellung der prozessangepassten Halbzeuge, Näpfe und Funktionsbauteile wurden die den numerischen Berechnungen zugrundeliegenden Einstellungen gewählt. Bild 31 zeigt eine Übersicht numerischer und experimenteller Ergebnisse für prozessangepasste Halbzeuge über die gesamte Prozesskette.

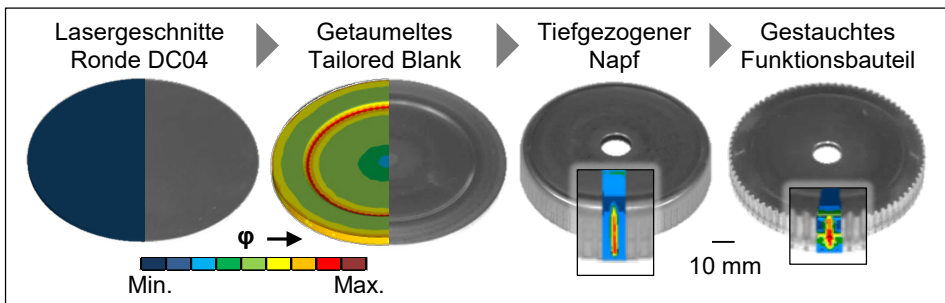


Bild 31: Darstellung der gesamten Prozesskette im numerischen Modell sowie im experimentellen Versuch

5.4.1 Validierung der numerischen Ergebnisse für das Taumelpressen prozessangepasster Halbzeuge

Der Taumelprozess wird auf der Lasco TZP 400/3 durchgeführt, auf welcher die prozessangepassten Halbzeuge, wie unter Abschnitt 4.1 beschrieben, im Anschluss auch weiterverarbeitet werden. Analog zur Umformsimulation, wurden auch für die experimentellen Versuche die in [112] definierten Standardparameter für die weiche Tiefziehlegierung DC04 gewählt. Diese setzen sich aus einer Umformkraft von $F_T = 3.000$ kN, einem maximalen Taumelwinkel von $\Theta = 1^\circ$ und je fünf Taumelrunden in jeder der drei Prozessphasen zusammen. Basierend auf der unter 5.2 ausgelegten Werkzeuggeometrie wurde ein Werkzeugeinsatz gefertigt und in den Umformversuchen eingesetzt. Dieser weist, entsprechend Bild 22, einen radialen Kavitätseinlauf bei $r = 35,2$ mm sowie eine Kavitätstiefe von $h = 1$ mm auf.

Der modulare Aufbau erlaubt einen Austausch der Werkzeugeinsätze unter Beibehaltung des Grundaufbaus. Zu Prozessbeginn wird die lasergeschnittene Blechrunde mit einer Ausgangsblechdicke von $s_0 = 2$ mm nach dem Schmierstoffauftrag in die Matrize des Taumelwerkzeugs eingelegt. Nach Beendigung der 15 Taumelrunden wird das prozessangepasste Halbzeug aus der Matrize entnommen und analysiert. Der Blechdickenverlauf der experimentell hergestellten Ronde weist eine hohe Übereinstimmung mit dem Ergebnis der Umformsimulation auf. Die mittlere Blechdicke im Aufdickungsbereich liegt im Experiment bei $s = 2,44$ mm und in der Simulation bei $s = 2,45$ mm. Anhand der geringfügigen Abweichung kann festgehalten werden, dass das Modell geeignet ist auch die Anpassung der Halbzeuggeometrie realitätsnah abzubilden. Die hohe Übereinstimmung der Blechdickenverläufe ist in Bild 32 dargestellt.

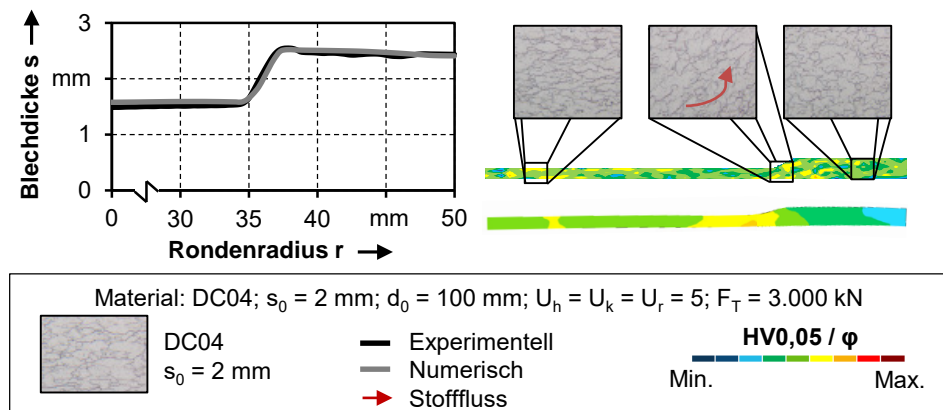


Bild 32: Gegenüberstellung der numerisch und experimentell ermittelten Ergebnisse für das Taumelpressen prozessangepasster Halbzeuge

Die qualitative Verteilung der Mikrohärtigkeit entspricht der im numerischen Modell errechneten Umformgradverteilung. Besonders im Bereich der Rondenmitte sowie am Einlauf in die Werkzeugkavität führt eine verstärkte Materialplastifizierung zu einem Anstieg der gemessenen Mikrohärtigkeit. Im Bereich der Rondenmitte zeigt das Schlibbild eine, im Vergleich zum Ausgangszustand, gestauchte Gefügestruktur. In diesem Bereich wird bereits in der ersten Prozessphase Material radial nach außen verdrängt, während die Taumelplatte aus ihrer Grundstellung über eine Spiralbewegung auf den gewählten Taumelwinkel von $\Theta = 1^\circ$ fährt. Die Auslenkung der Taumelplatte wird dabei, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, durch eine Kugelkalotte und vier Differentialzylinder realisiert. Die Rondenmitte hat über den gesamten Prozess Kontakt zum angeschrägten Taumelstempel und weist nach Prozessende die typische Materialausdünnung, das sogenannte Center-Thinning, auf. Am Übergang zur Werkzeugkavität lässt das Schlibbild den Materialfluss radial nach außen erkennen. Der durch die Verkippung unter der Taumelkinematik und der aufgebrauchten Umformkraft induzierte Materialfluss füllt die Werkzeugkavität, da sich dort zu Prozessbeginn kein Fließwiderstand befindet. In diesem Bereich weist das prozessangepasste Halbzeug zudem die höchste Verfestigung auf, da im Einlaufbereich zur Werkzeugkavität die höchsten Dehnungen auftreten. Im aufgedickten Bereich des Halbzeugs zeigt das Schlibbild, bedingt durch radiale und tangential Stoffflussanteile während des Umformprozesses, eine gestauchte Gefügestruktur. Wie bereits in Abschnitt 5.2 beschrieben, ist die realitätsnahe Abbildung des Taumelprozesses im numerischen Prozessmodell erforderlich, um die Einflüsse der resultierenden Halbzeugeigenschaften auf die nachfolgenden Prozessschritte berücksichtigen zu können.

5.4.2 Validierung der numerischen Ergebnisse für das Tiefziehen prozessangepasster Halbzeuge zur Napfgrundform

Entsprechend der Prozessfolge wird die getaumelte Ronde tiefgezogen und dem numerischen Modell aus Abschnitt 5.3.2 gegenübergestellt. Zu diesem Zweck wird die Taumelplatte ausgebaut, um das Umformwerkzeug für die Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen rüsten zu können. Wie schon bei der Herstellung der Tailored Blanks durch den Taumelprozess wird der Schmierstoff vor Prozessbeginn händisch aufgetragen. Das prozessangepasste Halbzeug wird, nachdem es auf dem Ziehstempel positioniert wurde, durch den Stauchstempel geklemmt. Anschließend wird

die Napfgrundform über ein Verfahren des Zieh Rings erzeugt. Der Konturvergleich der Napfzargen in Bild 33 verdeutlicht die hohe Abbildungsgenauigkeit der Umformsimulation. Demnach lässt sich, wie für das numerische Modell unter Abschnitt 5.3.2 gezeigt, auch im experimentellen Umformversuch eine Materialausdünnung im Bereich des Ziehstempelradius vermeiden. Auf diese Weise soll nachfolgend auch im experimentellen Stauchversuch eine Materialüberlappung verhindert werden.

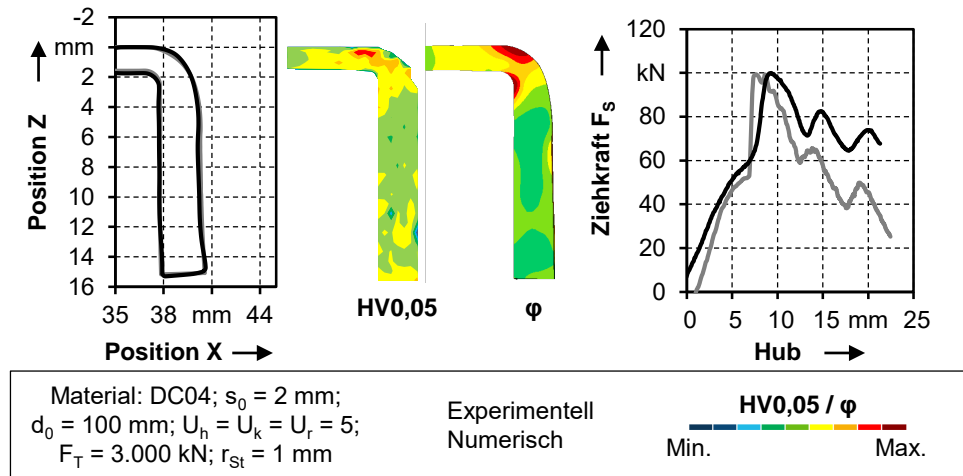


Bild 33: Gegenüberstellung der numerisch und experimentell ermittelten Ergebnisse für das Taumelpressen prozessangepasster Halbzeuge

Für die mechanischen Eigenschaften lässt sich ebenfalls eine hohe Übereinstimmung nachweisen. Diese wird insbesondere durch die Berücksichtigung der dehnungsinduzierten Verfestigung aus dem vorherigen Prozessschritt ermöglicht. Die Bereiche erhöhter Kaltverfestigung entsprechen in der qualitativen Darstellung den Bereichen mit erhöhtem Umformgrad. Im Bereich des Ziehstempelradius sind die höchsten Werte feststellbar, da durch den Abbau der auftretenden Biegespannungen besonders hohe Dehnungen auftreten. Zudem weist dieser Bereich bereits zu Prozessbeginn eine erhöhte Verfestigung auf, wie im vorherigen Abschnitt dargestellt. Des Weiteren lassen sich im unteren Zargenbereich erhöhte Mikrohärtewerte nachweisen, welche durch die, durch tangentielle Druckspannungen hervorgerufene Dickenzunahme der Zarge, erklärt werden können. Abschließend zeigen auch die Kraft-Weg-Verläufe qualitativ eine gute Übereinstimmung, allerdings weist der experimentelle Verlauf, bedingt durch die in Abschnitt 5.2 beschriebenen Abstreck-Anteile, höhere Werte auf als das numerische Modell.

5.4.3 Validierung der numerischen Ergebnisse für das Stauchen der Napfgrundform zu außenverzahnten Funktionsbauteilen

Im Gegensatz zum numerischen Modell erfolgt die Umformung der Halbzeuge in der Verfahrenskombination über die Werkzeugkinematik gekoppelt und innerhalb eines einzelnen Pressenhubs. Für die Validierung des numerischen Modells wird eine maximale Umformkraft von 1.000 kN gewählt. Der Prozess läuft demnach kraftgeregelt und wird bei Erreichen der gewählten Maximalkraft beendet. Anschließend wird das Bauteil aus dem Werkzeug entnommen und analysiert. Bedingt durch die gezielte Materialverteilung in der Halbzeugherstellung und die Kompensation der Materialausdünnung im vorgelagerten Tiefziehprozess weist das experimentell hergestellte Funktionsbauteil, ebenso wie das Bauteil aus dem numerischen Modell nach Prozessende verbesserte geometrische Eigenschaften auf. Sowohl die erhöhte Formfüllung als auch die dadurch bedingte Vermeidung des Ausknickens der Zarge entsprechen den Ergebnissen der numerischen Stoffflussanalyse. Die Konturen der Bauteilzargen nach Beendigung des Stauchprozesses sind in Bild 34 dargestellt und decken sich größtenteils, lediglich die Napfhöhen weichen geringfügig voneinander ab.

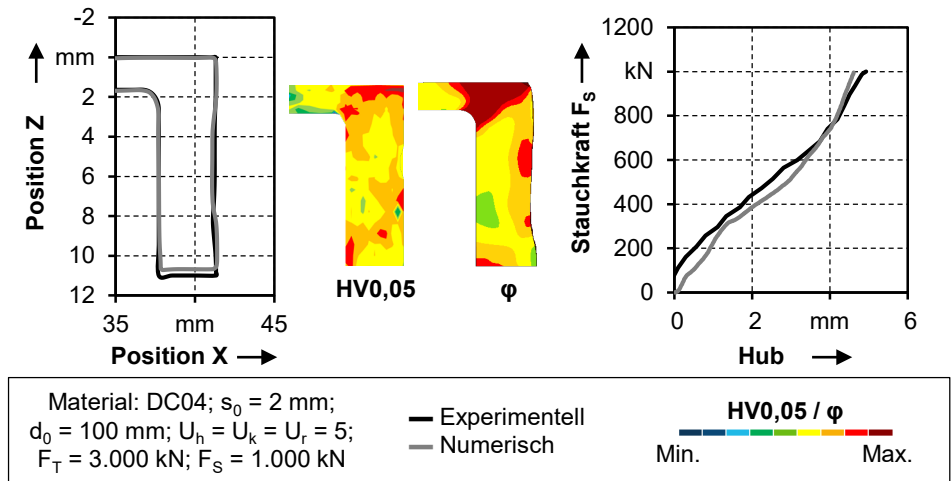


Bild 34: Gegenüberstellung der numerisch und experimentell ermittelten Ergebnisse für das Taumelpressen prozessangepasster Halbzeuge

Abweichungen in dieser Größenordnung lassen sich allerdings nicht gänzlich ausschließen, da bei experimentellen Umformversuchen halbzeug- oder prozesseitige Schwankungen nicht ausgeschlossen werden können.

Die resultierende Verteilung der Mikrohärtte entspricht ebenfalls weitestgehend der berechneten Umformgradverteilung und auch die ausgewerteten Kraft-Weg-Verläufe zeigen eine hohe Übereinstimmung. Zum grundlegenden Nachweis des Potentials des prozessangepassten Halbzeugs zur Erfüllung der unter Abschnitt 5.1 definierten Anforderungen zeigt Bild 35 ein metallographisches Schlibfbild der Bauteilzarge, da die makroskopische Analyse der Bauteile in diesem Kontext nur bedingt sinnvoll ist. Diese Aufnahme lässt keine Materialüberlappung im Bereich des Ziehstempelradius erkennen und entspricht damit ebenfalls dem Ergebnis der numerischen Stoffflussanalyse.

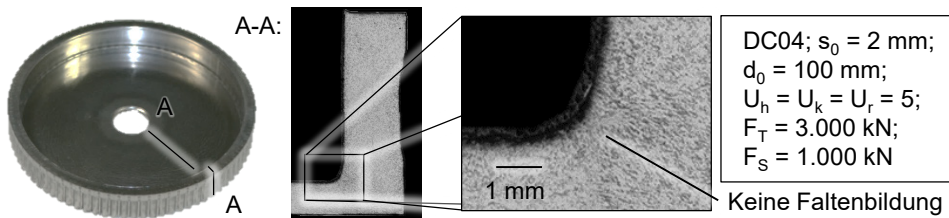


Bild 35: Vermeidung der identifizierten Prozessfehler durch den Einsatz prozessangepasster Halbzeuge

Die Ergebnisse der vorherigen Abschnitte bescheinigen dem numerischen Modell eine hohe Abbildungsgenauigkeit. Für die prozessangepassten Halbzeuge lag die berechnete Abweichung im Bereich der Materialaufdickeung bei lediglich 0,4%. Basierend auf dieser hohen Übereinstimmung sind auch in der nachfolgenden Weiterverarbeitung nur geringe Abweichungen feststellbar, wie die qualitativen Konturvergleiche für tiefgezogene Nöpfe und gestauchte Bauteile zeigt. Gleiches gilt für die qualitative Gegenüberstellung der mechanischen Eigenschaften und die Analyse der Kraft-Weg-Verläufe. Die Validierung des numerischen Prozessmodells dient der Sicherstellung der Ergebnisqualität, dieses kann nun genutzt werden, um den Versuchsraum über die experimentellen Möglichkeiten hinaus zu erweitern. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass durch ein verbessertes Prozessverständnis die realisierbaren Bauteileigenschaften maßgeblich verbessert werden konnten. Um jedoch einen tatsächlich zielführenden Wissensgewinn zu generieren, ist der Nachweis der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse unabdingbar. Insbesondere in diesem Zusammenhang stellen experimentelle Versuche die Grundlage des weiteren Vorgehens dar, die numerische Umformsimulation ist jedoch ein bedeutendes Werkzeug zu deren Ergänzung.

5.5 Zusammenfassende Bewertung der anforderungsbasierten Auslegung eines Werkzeugeinsatzes zur Herstellung prozessangepasster Halbzeuge und deren Weiterverarbeitung

Anhand der grundlegenden Untersuchungen zum Einfluss der Halbzeugeigenschaften auf das Prozessergebnis, konnte eine zielführende Werkzeuggeometrie zur Herstellung prozessangepasster Halbzeuge für eine Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen zur Fertigung von außenverzahnten Funktionsbauteilen identifiziert und gefertigt werden. Ausgangspunkt für die durchgeführten Untersuchungen war ein randaufgedicktes Halbzeug, welches zur Qualifizierung eines Taumelprozesses für die Halbzeugherstellung entworfen wurde. Durch die umformtechnische Weiterverarbeitung dieses Halbzeugs in der Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen konnte ein grundsätzliches Potential von Ronden mit Blechdickengradienten abgeleitet werden. Wie in [23] gezeigt, lässt sich das Ausknicken der Zarge verhindern und die Formfüllung der verzahnten Werkzeugkavität deutlich steigern. Um das volle Potential dieser Halbzeugstrategie nutzen zu können, wurde die Halbzeuggeometrie gemäß den Anforderungen aus den nachfolgenden Umformprozessen maßgeschneidert. Die Auslegung eines prozessangepassten Halbzeugs, eines sogenannten Tailored Blanks, umfasst insbesondere die Anpassung des radialen Aufdickungsbeginns r_A , der Übergangslänge $l_{\bar{U}}$ und des Blechdickengradienten Δs . Sowohl die Wahl von r_A als auch die von $l_{\bar{U}}$ beeinflussen das radial abgewinkelte Blechdickenprofil des tiefgezogenen Napfes. Die Startkonfiguration, welche der numerischen Variantensimulation zugrunde gelegt wurde, musste unter Berücksichtigung der Simulationsergebnisse angepasst werden und weist für einen Wert von $r_A = 35,2$ mm die geringsten Abweichungen zum idealisierten Verlauf auf. Die Übergangslänge verbleibt bei $l_{\bar{U}} = 2$ mm, da sich eine Veränderung des Wertes nachteilig auf das Prozessergebnis auswirkt. Für Δs wurde ein Sollwert von einem Millimeter gewählt, da sich dieser nach [112] durch das Taumelverfahren realisieren lässt und ein Ausknicken während des Stauchens durch diesen Blechdickengradienten vermieden werden kann. Die grundsätzliche Eignung des ausgelegten Werkzeugeinsatzes unter Anwendung der Standardeinstellungen zur Vermeidung der in Vorarbeiten identifizierten Prozessgrenzen wurde in den vorherigen Abschnitten erfolgreich nachgewiesen, indem die Ergebnisse der numerischen Umformsimulation durch experimentelle Versuche validiert wurden.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass das gesteigerte Materialvolumen im Randbereich der Ronde eine Erhöhung der Formfüllung der Bauteilzarge ermöglicht. Das Materialvolumen im Bereich der Zarge bleibt jedoch nicht über die gesamte Prozesskette konstant, da bereits durch die im Tiefziehprozess auftretenden Spannungs- und Dehnungszustände zusätzliches Material aus dem Bodenbereich in den Zargenbereich fließt. Die Materialvolumina für den Zargenbereich nach den jeweiligen Prozessschritten sind in Bild 36 dargestellt. Dieses Volumen kann entsprechend der Ergebnisse für den Einsatz konventioneller Halbzeuge [23] nicht vollständig für die Füllung der Werkzeugkavität im Zargenbereich genutzt werden. Wie Bild 36 zeigt, kommt es bei fortschreitendem Prozess zu einem unerwünschten Materialfluss aus der Zarge in den Bauteilboden.

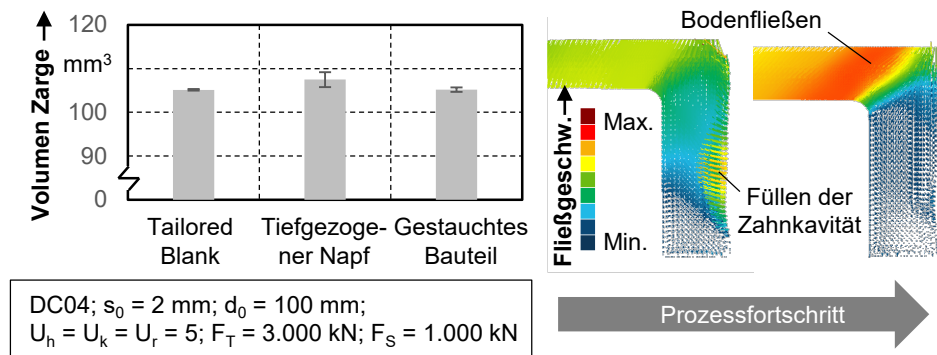


Bild 36: Materialvolumen im Rand- beziehungsweise Zargenbereich und Gegenüberstellung der Fließgeschwindigkeiten des Werkstoffs bei fortschreitendem Hub

Dieses Bodenfließen tritt auf, wenn die Fließbehinderungen im Zargenbereich größer werden als jene im Bodenbereich. Bei nahezu vollständiger Formfüllung, welche mit einer entsprechend hohen Reibung und Verfestigung des Werkstoffs einhergeht, kommt der Materialfluss zwischen Ziehtempel und Ziehring zum Erliegen und das Material fließt unter Überwindung der Gegenhalterkraft in den Bauteilboden. Dieser Effekt lässt sich durch den Einsatz gradiertter Halbzeuge deutlich verringern, da der ausgedünnte Mittenbereich sowohl geometrisch als auch mechanisch einen erhöhten Fließwiderstand darstellt [23]. Für die gewählten Prozessparameter entspricht das Volumen im Zargenbereich des Funktionsbauteils jenem des Tailored Blanks. Zu- und Abnahme des Materialvolumens in der Zarge im Tiefzieh- beziehungsweise Stauchprozess heben sich demnach auf und die erreichbare Formfüllung liegt bei etwa 95%.

Neben den geometrischen Eigenschaften sind die resultierenden mechanischen Eigenschaften von zentraler Bedeutung für die Erweiterung des Prozessverständnisses in Bezug auf den Einsatz prozessangepasster Halbzeuge in Verfahren der Blechmassivumformung. Entsprechend der Materialplastifizierung steigt auch der Mittelwert der gemessenen Mikrohärtigkeit über die einzelnen Prozessschritte an. Dabei ist die Mikrohärtigkeit in der Bauteilzarge beim Einsatz eines prozessangepassten Halbzeugs etwa genauso hoch wie bei einem konventionellen Halbzeug, welches ebenfalls unter einer maximalen Stauchkraft von $F_s = 1.000 \text{ kN}$ umgeformt wurde [115]. Ausschlaggebend ist die deutlich verbesserte Stoffflusskontrolle, welche der Einsatz prozessangepasster Halbzeuge ermöglicht. Durch die gezielte Materialverteilung wird ein unkontrolliertes Ausknicken der Zarge vermieden und eine homogenere Dehnungsverteilung erreicht.

6 Einflussanalyse der Eigenschaften von Halbzeugen auf das Prozessergebnis zur Verbesserung des Prozessverständnisses und zur Ableitung eines Prozessfensters

In diesem Kapitel wird der Einfluss durch einen Taumelprozess hergestellter Halbzeuge auf die resultierenden Bauteileigenschaften untersucht, um basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen ein Prozessfenster zur Herstellung und Weiterverarbeitung prozessangepasster Halbzeuge in der Blechmassivumformung abzuleiten. Grundlegend für die Eigenschaften der blechmassivumgeformten Funktionsbauteile sind die geometrischen und mechanischen Merkmale der Halbzeuge, da diese die zentralen Eingangsgrößen für die Bauteilfertigung darstellen. Um den Einfluss dieser Eingangsgrößen auf die Bauteileigenschaften analysieren zu können, wird die ausgelegte Werkzeugkavität, ausgehend von der Ausgangsblechdicke $s_0 = 2 \text{ mm}$, in Zehntelmillimeter-Schritten bis zu einem Wert von $s_{\text{Max}} = 2,5 \text{ mm}$ gefüllt. Die gemessenen Blechdicken repräsentieren die mittlere Blechdicke im Kavitätsbereich. Um möglichst nah an die Sollblechdicken zu kommen, werden Umformversuche mit unterschiedlichen Prozessparametern durchgeführt und ausgewertet. Die hergestellten Halbzeuge werden hinsichtlich ihrer geometrischen und mechanischen Eigenschaften charakterisiert und nachfolgend zu Funktionsbauteilen weiterverarbeitet. Auf diese Weise wird das Prozessverständnis zur Herstellung und Einsatz prozessangepasster Halbzeuge vertieft und erlaubt schlussendlich die Ableitung eines Prozessfensters, welches den Zusammenhang von Materialvorverteilung bei der Halbzeugherstellung und Formfüllung der resultierenden Bauteile aufzeigt.

Um eine gute Vergleichbarkeit zwischen den hergestellten Bauteilen zu gewährleisten, wird eine Zielhöhe für die Napfzarge nach Beendigung des Stauchprozesses definiert. Daraus folgt, dass, anders als im vorherigen Kapitel, keine gleichbleibende Stauchkraft gewählt werden kann. Die zielführenden Werte für die zu wählenden Prozessparameter wurden iterativ ermittelt. Basierend auf den Erkenntnissen des vorherigen Kapitels und unter Berücksichtigung der vorgesehenen Steigerung der Blechdicke im Bereich der Aufdickung wurde für die Funktionsbauteile eine Zielhöhe von $h_Z = 11 \text{ mm}$ gewählt. Für diese Zielhöhe ergibt sich ein Sollvolumen von $V_{\text{Soll}} = 8.647 \text{ mm}^3$, welches geringfügig über dem Maximalvolumen der prozessangepassten Halbzeuge von $V_{\text{Max}} = 8.510 \text{ mm}^3$ im Bereich der Bauteil-

zarge liegt. Auf diese Weise soll zum einen sichergestellt werden, dass die Halbzeuge nicht von vorneherein ein zu hohes Materialvolumen aufweisen und das Werkzeug im Stauchprozess zu hoch belastet wird und zum anderen, dass die Zielhöhe auch bei maximaler Materialvorverteilung erreicht werden kann, um eine gute Vergleichbarkeit der Bauteile zu gewährleisten.

Aufbauend auf dem beschriebenen Vorgehen und den vorliegenden Erkenntnissen werden in der vorliegenden Arbeit funktionale Zusammenhänge zwischen Materialvorverteilung und resultierenden Bauteileigenschaften untersucht. Dieser liegt die Annahme zugrunde, dass zwischen dem vorverteilten Materialvolumen und der resultierenden Formfüllung ein linearer Zusammenhang besteht. Dieser Annahme folgend sollten sich Halbzeuge mit Aufdickungshöhen, welche zwischen der Ausgangsblechdicke und der maximalen Blechdicke liegen, einer Geraden zwischen diesen Punkten annähern. Bild 37 zeigt diesen Zusammenhang in Form der linearen Ausgleichsgeraden für die Materialbereitstellung und die entsprechende Formfüllung von konventionellem und prozessangepasstem Halbzeug sowie der idealisierten Geometrie mit vollständiger Formfüllung.

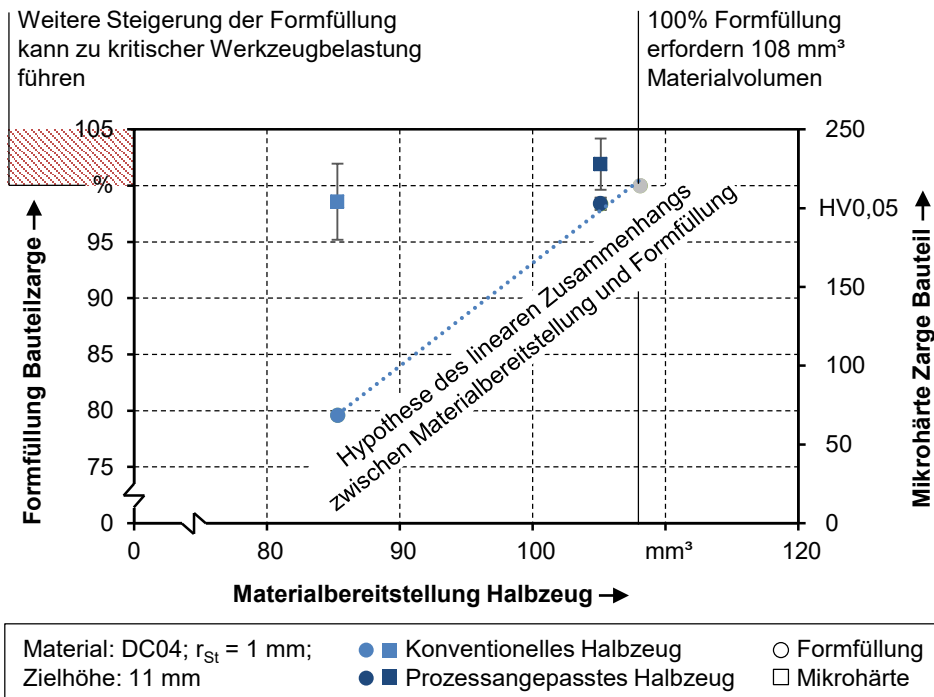


Bild 37: Ausgewählte Stützstellen als Basis zur Untersuchung von funktionalen Zusammenhängen zwischen Materialvorverteilung und resultierenden Bauteileigenschaften

Demnach steigt die Formfüllung in der Bauteilzarge, welche die Außenverzahnung aufweist, mit zunehmendem Materialvolumen im äußeren Halbzeuggbereich linear an. Des Weiteren wird angenommen, dass die Mikrohärtigkeit der Bauteile über eine zunehmende Materialverteilung nicht signifikant ansteigt, da der Kaltverfestigung im Taumelpressen eine erhöhte Stoffflusskontrolle beim Stauchen der Zarge gegenübersteht. Der untenstehenden Abbildung sind die gemittelten Mikrohärtewerte der Bauteilzargen für das konventionelle und das prozessangepasste Bauteil zu entnehmen. Der Mittelwert der Mikrohärtigkeit liegt für das prozessangepasste Halbzeug beinahe 12% über dem Wert für das konventionelle Halbzeug. Bedingt durch die Standardabweichungen kann dieser Unterschied allerdings nicht als signifikant bezeichnet werden. Für die Zielnaphöhe wird bei Einsatz eines konventionellen Halbzeugs zudem eine geringere Stauchkraft benötigt. Unter einer Stauchkraft von $F_s = 1.000$ kN beträgt der Mittelwert der gemessenen Mikrohärtigkeit für das Bauteil aus einem konventionellen Halbzeug 224,50 HV_{0,05}. Basierend auf den Ergebnissen dieses Kapitels wird bewertet, ob die beschriebenen Annahmen zutreffen und inwieweit diese zur Erweiterung des Prozessverständnisses und zur Ableitung eines Prozessfensters geeignet sind.

6.1 Herstellung und Charakterisierung prozessangepasster Halbzeuge aus dem Tiefziehstahl DCo₄ als Basis der Erweiterung des Prozessverständnisses

Der im fünften Kapitel ausgelegte Werkzeugeinsatz wird nun unter Einstellung verschiedener Prozesskräfte genutzt, um die Werkzeugkavität schrittweise zu füllen. Nachfolgend wird untersucht, wie sich die steigende Plastifizierung der Halbzeuge auf die Bauteileigenschaften und die Werkzeugbelastung auswirken. Zu diesem Zweck wird die mittlere Blechdicke im Bereich der Werkzeugkavität ausgehend von $s_o = 2,00$ mm in 0,1 mm-Schritten bis zu einer mittleren Dicke von $s_m = 2,5$ mm über eine Anpassung der Prozesskraft gesteigert. Eine mittlere Blechdicke von $s = 2,50$ mm entspricht einer näherungsweise vollständigen Ausfüllung der Werkzeugkavität. Die Ausgangsrunde weist stets eine Blechdicke von $s_o = 2,00$ mm und einen Durchmesser von $d_o = 100$ mm auf. Zur Herstellung der jeweiligen Sollgeometrie wurde die Umformkraft in einem Bereich von $F = 1.000$ kN bis $F = 4.000$ kN variiert. Bei Erreichen der maximal zur Verfügung stehenden Stoßkraft von $F_{max} = 4.000$ kN lassen sich die Prozessgrenzen für das Taumelverfahren nach [112] über eine Erhöhung der Anzahl

an Taumelrunden erweitern. Die Versuche werden zunächst an der weichen Tiefziehgüte DCo4 durchgeführt, um dann im nachfolgenden Kapitel auf Stahlwerkstoffe höherer Festigkeit übertragen zu werden. Für die experimentellen Untersuchungen wird, wie im vorherigen Kapitel, eine dreifach-wirkende Hydraulikpresse mit Taumelfunktion genutzt. Ausgehend von den Erkenntnissen aus [112] wird die Anzahl der Taumelrunden in der zweiten und dritten Prozessphase auf je eine Runde reduziert, um die Prozesszeit zu verkürzen.

Geometrische Eigenschaften

Zunächst werden die Prozessparameter „maximale Umformkraft“ sowie „Taumelrundenanzahl“ variiert, um die gewünschten Zielgeometrien zu erreichen. Unter der Maßgabe, dass die Abweichung der mittleren Blechdicke im Bereich der Aufdickung maximal um 0,03 mm von der Sollblechdicke abweicht, wurden die jeweils benötigten Taumelparameter ausgewählt. Für den Tiefziehstahl DCo4 lassen sich im Bereich der Werkzeugkavität, unter der gewählten Anzahl an Taumelrunden, Aufdickungen von bis zu $s = 2,4$ mm erzielen. Zur Erreichung des Sollwertes von $s = 2,5$ mm wurde der Umformprozess bei maximaler Stößelkraft zweimal hintereinander durchlaufen. Die gewählten Parameter zur Halbzeugherstellung sowie die Soll- und Ist-Werte für die Blechdicke im Bereich der Kavität sind Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4: Auflistung der mittleren Halbzeug-Sollblechdicken im Randbereich mit den gewählten Prozessparametern für das Taumelpressen

Sollblechdicke außen (in mm)	Ist-Blechdicke außen (in mm)	Taumelkraft (in kN)	Taumelrunden ($U_h-U_k-U_r$)
2,1	2,09 ±0,01	1.000	5-1-1
2,2	2,23 ±0,00	2.000	5-1-1
2,3	2,30 ±0,04	2.500	5-1-1
2,4	2,37 ±0,02	3.000	5-1-1
2,5	2,47 ±0,01	4.000	2X5-1-1

Die hohe Abhängigkeit der Rondengeometrie von der eingestellten Stößelkraft zeigt sich anhand des hohen Korrelationskoeffizienten nach Pearson

nachweisen, welcher über Gleichung (1) berechnet wird. Der Korrelationskoeffizient ergibt sich aus dem Quotienten der Stichprobenvarianz und dem geometrischen Mittel der Stichprobenvarianzen. [131]

$$r = \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_x \cdot s_y}} \quad (1)$$

Zugrunde gelegt werden die Versuchsergebnisse zur Erreichung einer mittleren Blechdicke in der Kavität bis zu einem Wert von $s = 2,4$ mm, da bei diesen die Taumelrundenanzahl konstant gehalten wurde. Die in Bild 38 aufgetragen Werte entsprechen jenen aus Tabelle 4 und wurden um die Werte für die entsprechenden mittleren Blechdicken in der Rondenmitte ergänzt.

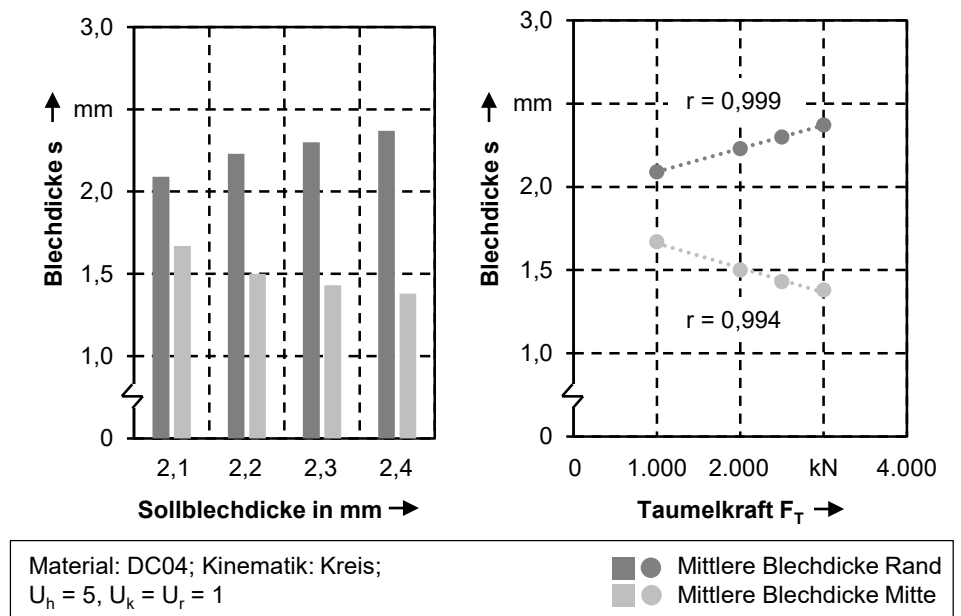


Bild 38: Mittlere Blechdickenwerte für zunehmende Materialvorverteilung und Korrelation von Taumelkraft und resultierenden Blechdicken

Auf der linken Seite von Bild 38 sind diese Werte der jeweils benötigten Taumelkraft gegenübergestellt und werden nach Gleichung 1 zur Berechnung der Korrelation herangezogen. Der errechnete Wert liegt bei $r = 0,999$ für den Randbereich und bei $r = 0,994$ für die Rondenmitte und repräsentiert eine starke Abhängigkeit.

Eine qualitative Gegenüberstellung der Konturen für die hergestellten Halbzeuge sowie die Ergebnisse der Volumenberechnung für Randbereich und Rondenmitte sind Bild 39 zu entnehmen. Durch die Erhöhung der

Umformkraft fließt mehr Material aus der Rondenmitte in den Randbereich. Ursächlich ist, dass dem Anstieg der Fließspannung eine Erhöhung der induzierten Spannung gegenübersteht, welche eine höhere Plastifizierung des Werkstoffs zulässt. Wie bereits unter Abschnitt 5.2 beschrieben, führt die Stützwirkung der Matrize zu einer verstärkten Zunahme der Blechdicke am inneren Rand der Werkzeugkavität. Dieser Effekt kann erst bei einer Sollblechdicke in der Kavität von $s = 2,5$ mm überwunden werden, da entsprechend der Berechnung aus dem vorherigen Kapitel eine vollständige Formfüllung erreicht wird. Das berechnete Materialvolumen für ein $4,5^\circ$ -Segment im Randbereich beträgt $V = 109$ mm³. Dieser Wert entspricht einer Steigerung des zur Verfügung stehenden Materialvolumens von 18% gegenüber einer Soll-Blechdicke von 2,1 mm und liegt 0,9% über dem Volumen der idealisierten Bauteilgeometrie bei einer Zargenhöhe von $h_z = 11$ mm. Das Materialvolumen im Bauteilboden verringert sich bei maximaler Aufdickung im Vergleich zur minimalen Aufdickung von $V = 105$ mm³ auf $V = 87$ mm³. Dies entspricht einer Abnahme des Volumens von etwa 17%.

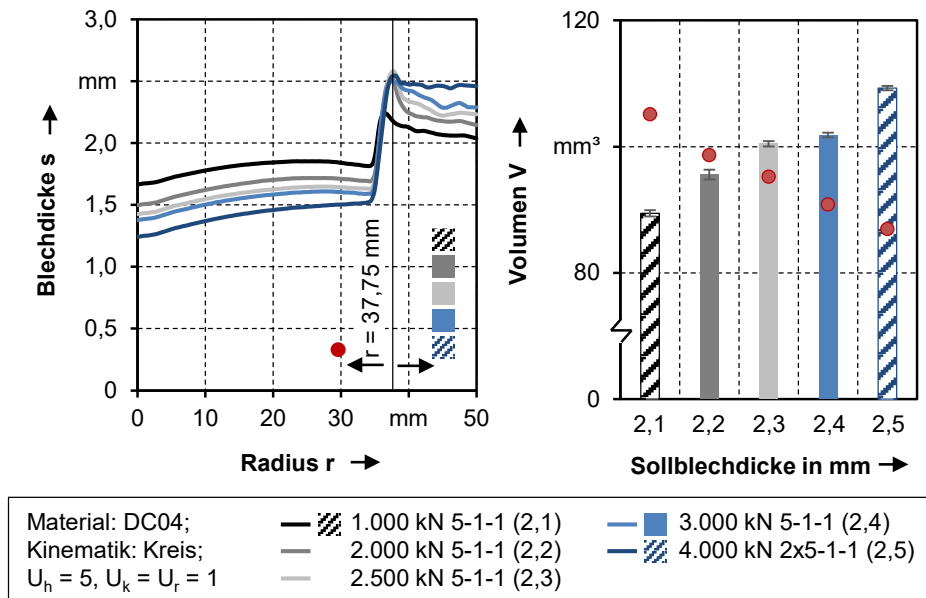
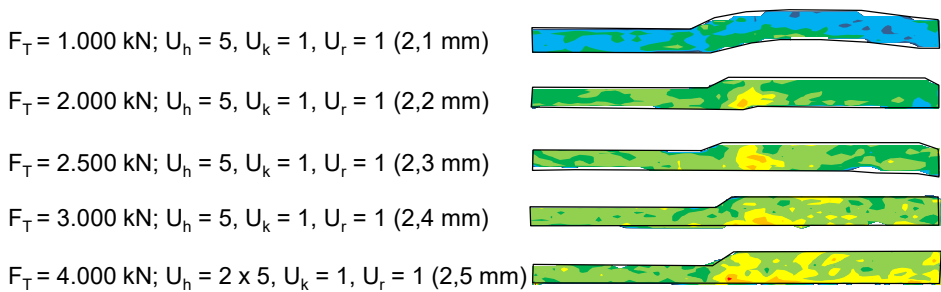


Bild 39: Gegenüberstellung von Halbzeugkonturen und gemessenen Volumina für die experimentell hergestellten Halbzeuge

Mechanische Eigenschaften

Die resultierenden mechanischen Halbzeugeigenschaften werden anhand von Mikrohärtemessungen bestimmt. Die durchgeführten Untersuchungen dienen, gemeinsam mit der Auswertung der geometrischen Eigenschaften, zur Charakterisierung der Halbzeugeigenschaften und damit zur Analyse des Einflusses dieser auf nachfolgende Umformoperationen.

Die Auswertung der Mikrohärtemessungen der Ronden lässt Rückschlüsse auf die Materialplastifizierung während des Taumelverfahrens zu. Zum einen wird die mit zunehmender Umformkraft steigende Plastifizierung des Werkstoffs in der Rondenmitte sowie im Bereich der Werkzeugkavität ersichtlich, wie die qualitativen Plots der Mikrohärte in Bild 40 zeigen. Zum anderen verstärkt sich in der Rondenmitte mit zunehmender Stößelkraft die axiale, im Randbereich die radiale Stauchung des Gefüges. Des Weiteren verdeutlichen die Werte der Mikrohärte im Übergangsbereich den zunehmenden Materialfluss aus der Rondenmitte in die Werkzeugkavität.



Material: DC04; $s_0 = 2 \text{ mm}$; $d_0 = 100 \text{ mm}$;
Taumelkinematik: Kreis; Maximaler Taumelwinkel: 1

Mikrohärte →

100 HV_{0,05} 280

Bild 40: Qualitative Auswertung der Mikrohärtemessung für die getaumelten Halbzeuge mit variierender Materialverteilung

Die Auswertung der durchgeführten Mikrohärtemessung zeigt eine Zunahme der Härte mit Ansteigen der Stößelkraft und der damit einhergehenden Plastifizierung. Für die geringste Umformkraft im Versuchsraum ergibt sich hauptsächlich eine Verwölbung der Ronde im Bereich der Kavität und lediglich ein geringer radialer Materialfluss. Dies bedingt auch die im Vergleich geringste Verfestigung während des Taumelprozesses. Die induzierte Kaltverfestigung steigt nachfolgend an und nimmt über die gesamte Länge der Kavität zu. Hervorgerufen wird dieser Effekt durch die zunehmende Formfüllung und die steigenden radialen und tangentialen Stoffflussanteile, insbesondere bei einer Erhöhung der

Taumelrundenanzahl. Die Plastifizierung führt zu einer Längung der Körner und zu einer tendenziellen Zunahme der mittleren Härte. Der höchste Mittelwert im Bereich der Materialaufdickung wird bei der höchsten Soll-Blechdicke erreicht und beträgt 198,40 HV_{0,05}. Dies entspricht einem Anstieg der Härte um beinahe 40%. Die mitunter hohen Standardabweichungen sind durch die lokal stark unterschiedlichen Verfestigungen erklärbar. Die quantitativen Ergebnisse sind in Bild 41 aufgetragen.

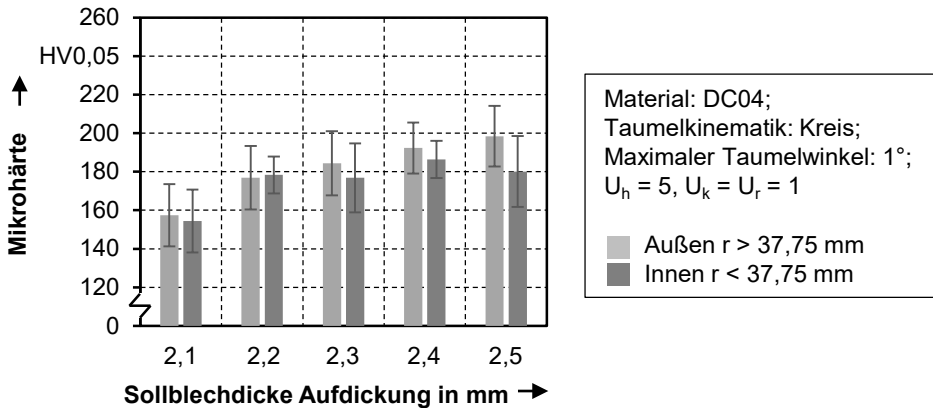


Bild 41: Quantitative Auswertung der Mikrohärtemessung für die getaumelten Halbzeuge mit variierender Materialvorverteilung

6.2 Erweiterung des Prozessverständnisses um den Einfluss der Materialvorverteilung auf resultierende Bauteileigenschaften

In den nachfolgenden Abschnitten wird der Einfluss der geometrischen und mechanischen Halbzeugeigenschaften auf die Bauteileigenschaften nach dem Tiefziehen und dem Stauchen analysiert. Es wird dabei experimentell untersucht, wie sich die Höhe der Materialvorverteilung sowie die durch den Taumelprozess induzierte Kaltverfestigung auf das Ergebnis der nachfolgenden Umformprozesse auswirkt.

6.2.1 Bauteileigenschaften nach dem Tiefziehen

Zur Analyse der Einflüsse der Halbzeugeigenschaften auf die tiefgezogenen Näpfe, wurde die Prozesskombination zunächst nach Beendigung der Tiefziehoperation abgebrochen. Nachfolgend werden die Ronden aus dem Umformwerkzeug entnommen und auf die resultierenden Bauteileigenschaften hin untersucht.

Geometrische Eigenschaften tiefgezogener Näpfe unter Einsatz von Ronden mit Blechdickengradienten

Der Einsatz getaumelter Blechronden in einem Tiefziehprozess verändert die Rahmenbedingungen und damit die Prozessergebnisse verglichen mit konventionellen Halbzeugen. In diesem Abschnitt wird untersucht, welchen Einfluss Ronden mit unterschiedlich hoher Materialvorverteilung auf die geometrischen Eigenschaften der tiefgezogenen Näpfe haben. Basierend auf den bisherigen Untersuchungen und den funktionalen Zusammenhängen folgend, wird angenommen, dass eine zunehmende Materialvorverteilung zu steigenden Volumina im Bereich der Napfzarge führen. Die Konturen der tiefgezogenen Zargen in Bild 42 verdeutlichen den Einfluss der Materialvorverteilung durch das Taumeln auf die Wandstärke nach dem Tiefziehen und bestätigen diese Annahme.

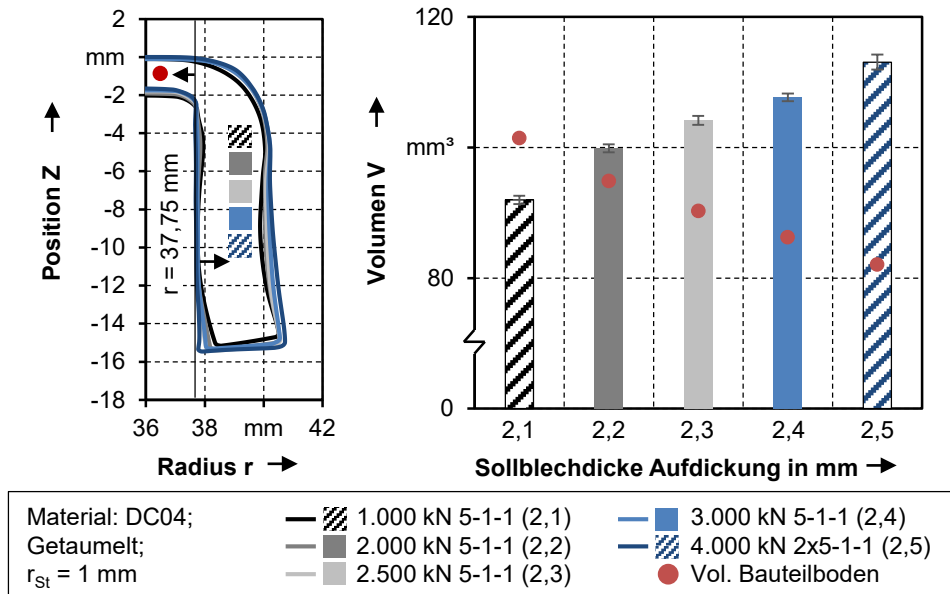


Bild 42: Gegenüberstellung von Napfkonturen und gemessene Volumina für die experimentell hergestellten Halbzeuge

Die Kontur der Bauteilzarge nähert sich mit steigender Blechdicke s_2 zunehmend der durch die Werkzeuggeometrie vorgegebenen Sollgeometrie an. Sowohl an der Innenseite als auch an der Außenseite verringern sich die Abstände zum Ziehstempel beziehungsweise zum Ziehring. Bezüglich der resultierenden Napfhöhen sind lediglich geringe Abweichungen feststellbar. Die Auswertung der Materialvolumina im Bereich der Zarge bestä-

tigt den qualitativen Vergleich der Konturen. Entsprechend der Materialvorverteilung durch das Taumelpressen weist die Napfzarge mit zunehmender Vorverteilung nach dem Tiefziehen ein höheres Materialvolumen in der Zarge auf. Für eine Sollblechdicke von $s = 2,5$ mm beträgt das Materialvolumen in der Zarge für eine $4,5^\circ$ -Segment $V = 113,1 \text{ mm}^3$ und steigt, bedingt durch die unter Abschnitt 5.1 beschriebenen Dehnungszustände, etwa 3,5% über das für diesen Bereich bereitgestellte Materialvolumen an. Verglichen mit dem Einsatz eines konventionellen Halbzeugs steigt das Materialvolumen in der Zarge um etwa 34% an. Das Volumen im Bauteilboden nimmt erwartungsgemäß kontinuierlich ab und weist für die höchste Materialvorverteilung im Randbereich noch $V = 82,1 \text{ mm}^3$ auf. Neben der volumenbasierten Analyse der gesamten Napfzarge lässt sich mit zunehmender Aufdickung der Halbzeuge im Randbereich, wie in Bild 43 gezeigt, bereits während des Tiefziehens ein signifikanter Anstieg des Materialvolumens in der Zahnkavität nachweisen. Für die geringste Materialvorverteilung mit $s = 2,1$ mm lässt sich das Volumen in der Zahnkavität gegenüber dem Einsatz eines konventionellen Halbzeugs nicht signifikant erhöhen. Bei einer Blechdicke von $s = 2,5$ mm im Randbereich kann das Materialvolumen in der Zahnkavität um den Faktor 4,5 gesteigert werden.

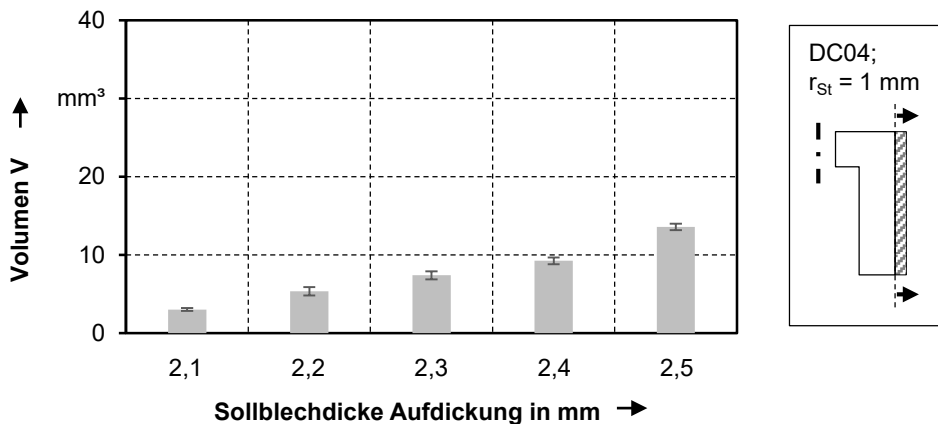


Bild 43: Zunahme des Materialvolumens in der Verzahnungskavität bei steigender Materialvorverteilung nach dem Tiefziehen

Mechanische Eigenschaften tiefgezogener Nöpfe unter Einsatz von Ronden mit Blechdickengradienten

Neben den vorab untersuchten geometrischen Eigenschaften werden die mechanischen Eigenschaften der tiefgezogenen Nöpfe durch die angewandte Halbzeugstrategie beeinflusst. Die metallographischen Schlibfbilder der Nöpfe sowie die qualitativen Ergebnisse der Härtemessungen sind

in Bild 44 dargestellt. Die Bereiche höherer Mikrohärtigkeit korrelieren mit den Bereichen höherer plastischer Dehnung. Ausschlaggebend sind hohe Spannungen, welche durch die auftretenden Dehnungen abgebaut werden. Diese treten insbesondere im Bereich des Ziehstempelradius sowie im unteren Bereich der Zarge auf. Ursächlich sind Biegespannung und ebene Dehnung, beziehungsweise Tangentialspannung und radiale Aufdickung.

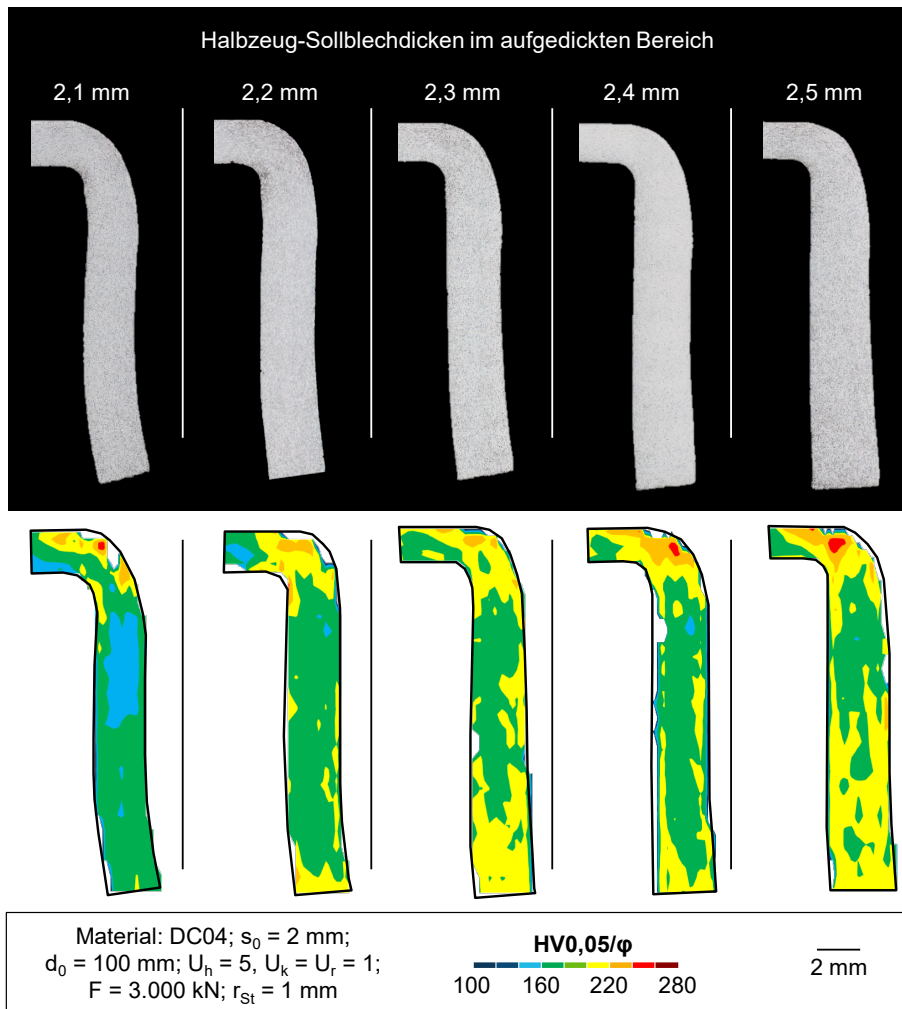


Bild 44: Schliffbilder und dazugehörige Auswertung der Mikrohärtemessung für den Einsatz zunehmend aufgedickter Halbzeuge nach dem Tiefziehen

Die quantitative Analyse der gemessenen Härtewerte lässt tendenziell einen Anstieg der Mittelwerte erkennen, welcher sich allerdings innerhalb der berechneten Standardabweichungen bewegt. Die hohen Standardab-

weichungen sind durch die lokal unterschiedliche Plastifizierung des Materials zu erklären, welche bereits in der Herstellung der Halbzeuge durch das Taumelpressen hervorgerufen wird. Die quantitativen Ergebnisse der Messungen zeigt Bild 45. Die gemittelten Werte steigen, bedingt durch den Mechanismus der Kaltverfestigung, an. Ebenso wie für die getaumelten Halbzeuge liegen die Mittelwerte der Mikrohärtigkeit im Randbereich tendenziell über den Werten für den Napfboden. Des Weiteren ist ein Anstieg der Mittelwerte mit zunehmender Materialvorverteilung erkennbar. Die Unterschiede liegen allerdings im Bereich der hohen Standardabweichung und können somit nicht als signifikant bezeichnet werden. Erwartungsgemäß weist das Halbzeug mit der geringsten Materialvorverteilung mit 183 HV_{0,05} auch die geringste mittlere Härte im Bereich des Napfbodens auf. Der höchste Wert wird dementsprechend bei einer Sollblechdicke von $s = 2,5$ mm im Randbereich erreicht, dieser beträgt 210 HV_{0,05}. Die Zunahme der Werte ist hauptsächlich durch die hohen Dehnungen im Bereich des Ziehstempelradius zu erklären, welche zu einem Anstieg der gemessenen Härte sowohl im Napfboden als auch in der Napfzarge führen.

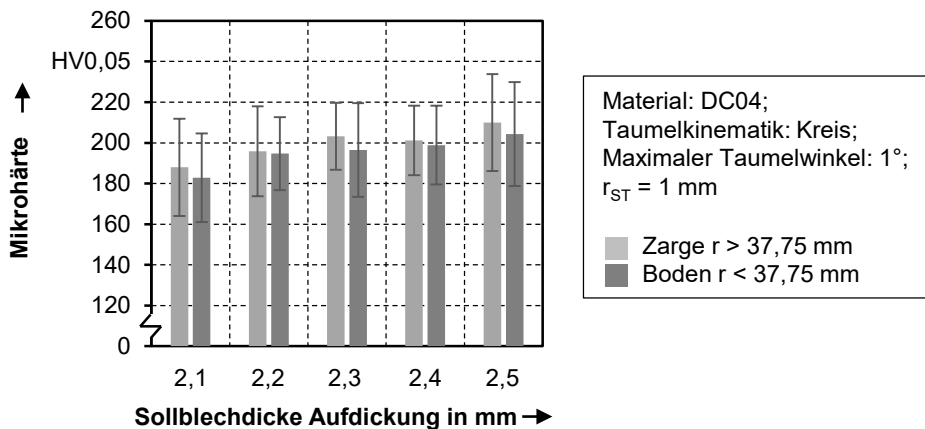


Bild 45: Quantitative Auswertung der durchgeführten Mikrohärtmessungen an tiefgezogenen Näpfen aus prozessangepassten Halbzeuge

Topographische Eigenschaften tiefgezogener Näpfe unter Einsatz von Ronden mit Blechdickengradienten

Aufbauend auf den Untersuchungen in [112], welchen zufolge eine Einglätung der Oberflächen durch den Taumelprozess nachgewiesen werden konnte, wurden sowohl an den tiefgezogenen Näpfen als auch an den gestauchten Funktionsbauteilen Oberflächenmessungen im Bereich der Verzahnung vorgenommen. Um die Oberflächeneigenschaften charakterisie-

ren zu können, wurde der Wert der gemittelten Rautiefe R_z der tiefgezogenen Näpfe bestimmt und gegenübergestellt. Die Werte wurden in den Bereichen aufgenommen, in welchen der innenverzahnte Ziehring Kontakt zur Napfzarge aufweist und in dem im nächsten Prozessschritt folglich der Zahnfuß ausgebildet wird. Es ist ersichtlich, dass die gemittelte Rautiefe im Vergleich zur Oberfläche des Ausgangswerkstoffs deutlich abnimmt. Durch den Werkzeugkontakt und die damit einhergehende Einglättung sinkt die gemittelte Rautiefe von $8,77 \mu\text{m}$ auf $5,21 \mu\text{m}$. Mit steigender Materialvorverteilung steigt die gemittelte Rautiefe zunächst wieder an und fällt bei der maximalen Aufdickung wieder leicht ab. Bei einer Sollblechdicke von $s = 2,4 \text{ mm}$ wird mit $10,60 \mu\text{m}$ der höchste Wert erreicht. Für die höchste Sollblechdicke mit $s = 2,5 \text{ mm}$ beträgt der ermittelte Wert $9,10 \mu\text{m}$, dieser liegt somit tendenziell oberhalb der gemittelten Rautiefe für den Ausgangswerkstoff. Erklärt werden kann dieses Verhalten über die zugspannungsdominierte Umformung mit zugleich verhältnismäßig kleinen Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Werkstück, welche während des Tiefziehens Abstreckanteile und Riefenbildung hervorrufen. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmendem Materialvolumen zunächst, verringert sich jedoch bei annähernd vollständiger Formfüllung und steigendem Kontaktdruck wieder. Die quantitativen Ergebnisse sind Bild 46 zu entnehmen.

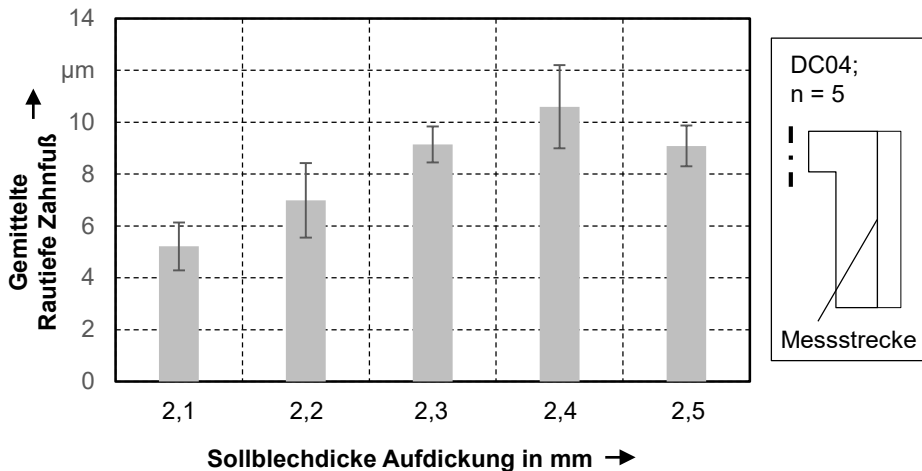


Bild 46: Auswertung der gemittelten Rautiefe R_z für zunehmende Materialvorverteilung nach dem Tiefziehen

Für die Anwendung der umformtechnisch hergestellten Bauteile ist eine geringe gemittelte Rautiefe grundsätzlich erstrebenswert, da sich diese im Verzahnungsbereich grundsätzlich positiv auf das Verschleißverhalten auswirkt. Ergänzend zu den quantitativen Messwerten und den obigen

Ausführungen zeigt Bild 47 die qualitativen Ergebnisse für die analysierten Oberflächen auf mittlerer Napfhöhe im Zahnfuß der jeweiligen Näpfe.

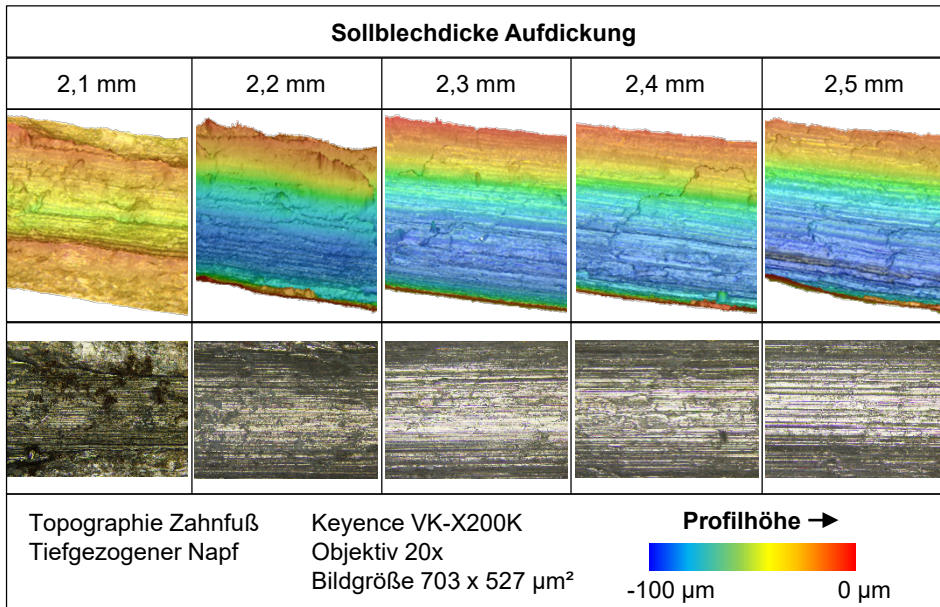


Bild 47: Topographie des Zahnfußes am tiefgezogenen Napf für die unterschiedlichen Sollblechdicken

6.2.2 Bauteileigenschaften nach dem Stauchen

Gemäß der Prozessfolge werden die tiefgezogenen Näpfe noch im selben Pressenhub durch ein Anstauchen der Napfzarge zu Funktionsbauteilen weiterverarbeitet. Das Verringern der Zargenhöhe unter der aufgebrachten Stauchkraft erzeugt einen Materialfluss radial nach außen, welcher maßgeblich für die Ausformung der Verzahnungskavität im Werkzeug ist. Ronden mit den in Abschnitt 6.1 beschriebenen Eigenschaften wurden tiefgezogen und gestaucht, um den Einfluss dieser auf die finalen Bauteileigenschaften analysieren zu können. Wie bereits im vorherigen Abschnitt werden zunächst geometrische, anschließend mechanische und abschließend topographische Bauteileigenschaften analysiert.

Geometrische Eigenschaften gestauchter Funktionsbauteile unter Einsatz von Ronden mit Blechdickengradienten

Aufbauend auf den Auswertungen zu den vorherigen Prozessstufen, werden zu Beginn bei den gestauchten Bauteilen die Konturen der Zargen gegenübergestellt. Die Konturverläufe sind in Bild 48 dargestellt. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass sich ein Ausknicken der Zarge durch die zunehmende Materialvorverteilung sukzessive verringern lässt. Eine annähernd vollständige Ausformung der Werkzeugkavität im Taumelprozess erlaubt ein ebenfalls nahezu vollständiges Füllen der Zahnkavität durch den abschließenden Stauchprozess. Die im Vergleich geringste Materialvorverteilung hingegen führt nur zu marginalen Verbesserungen der geometrischen Bauteileigenschaften gegenüber dem konventionellen Halbzeug mit einer Ausgangsblechdicke von $s_0 = 2$ mm. Für die höchste Sollblechdicke von $s = 2,5$ mm verbleiben $107,2 \text{ mm}^3$ Material in der Zarge. Dieses Volumen entspricht mit einer Formfüllung von $99,7\%$ nahezu der Sollgeometrie. Geringfügige Abweichungen zu dieser lassen sich lediglich im Zahnkopf erkennen und beeinflussen das berechnete Volumen geometriebedingt nur unwesentlich.

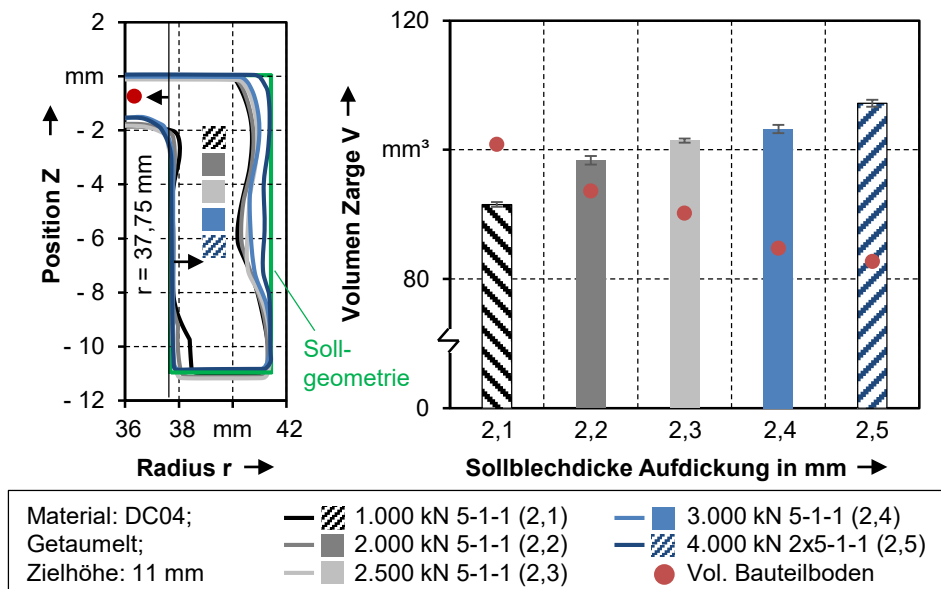


Bild 48: Gegenüberstellung von Bauteilkonturen und gemessenen Volumina für die experimentell hergestellten Halbzeuge

Das gemessene Materialvolumen in der Bauteilzarge verhält sich entsprechend der jeweiligen Eingangsgrößen der Materialvorverteilung durch das

Taumelpressen. So lässt sich mit steigender Materialvorverteilung ein zunehmend günstigeres Volumenverhältnis von Zarge zu Boden feststellen. Ein erhöhtes Volumen im Bereich der Funktionselemente bei gleichzeitig verringertem Materialvolumen in weniger stark beanspruchten Bauteilbereichen ist im Kontext der übergeordneten Leichtbauzielsetzung [10] der Blechmassivumformung erstrebenswert. Bild 49 zeigt ergänzend zu Bild 48 die gemessenen Volumina in der Verzahnungskavität für die unterschiedlich stark aufgedickten Halbzeuge. Sowohl für die gesamte Zarge als auch für die Verzahnungskavität ergibt sich für die höchste Materialvorverteilung von $s = 2,5$ mm mit einem Volumen von $V = 32,70$ mm³ rechnerisch eine vollständige Ausformung der Verzahnung.

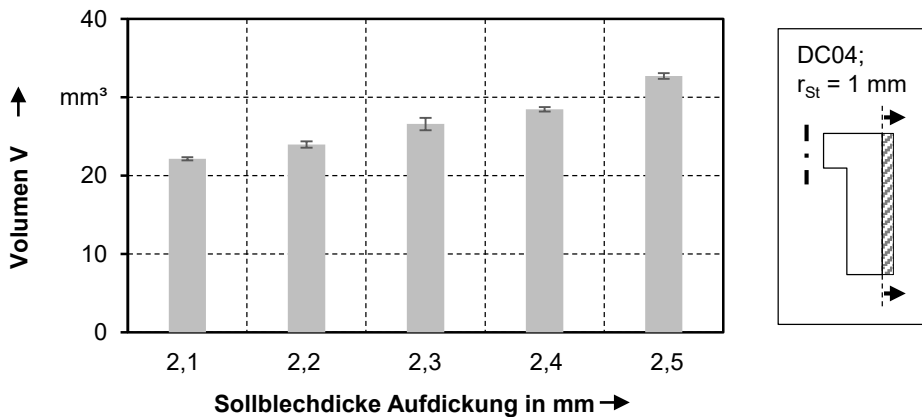


Bild 49 Zunahme des Materialvolumens in der Verzahnungskavität bei steigender Materialvorverteilung nach dem Stauchen

Mechanische Eigenschaften gestauchter Funktionsbauteile unter Einsatz von Ronden mit Blechdickengradienten

Wie bereits unter Abschnitt 6.2.1 für die tiefgezogenen Näpfe gezeigt, werden die mechanische Eigenschaften für die gestauchten Bauteile zunächst anhand von metallographischen Gefügebildern und der qualitativen Härteverteilung analysiert. Die Schliiffbilder in Bild 50 verdeutlichen, dass die Herstellung von fehlerfreien Bauteilen, entsprechend der unter Abschnitt 5.1 definierten Anforderungen, nur bei entsprechend hoher Materialvorverteilung möglich ist. Während eine im Vergleich zur Referenz aus dem vorherigen Kapitel gesteigerte Materialvorverteilung eine weitere Verbesserung der Bauteileigenschaften zulässt, führt eine Verringerung dieser zu verstärkten Abweichungen von der Sollgeometrie. Für die mit $s = 2,1$ mm geringste Aufdickung im Randbereich der Ronde lässt das Gefüge den

Rückschluss auf unkontrollierten Materialfluss zu. Analog zu den Erkenntnissen aus [23] zum Stauchen von ebenen Blechen kommt es auch bei diesem getaumelten Halbzeug zu einem starken Ausknicken und den dort beschriebenen Auflagerreaktionen. Begründen lässt sich dieser Effekt durch die Halbzeugeigenschaften, welche sowohl geometrisch als auch mechanisch am geringfügigsten von dem konventionellen Halbzeug abweichen. Das Ausknicken führt zu einer Deformation der Zarge unter der Stauchkraft und bedingt eine ungleichmäßige Verfestigung des Werkstoffs über den gemessenen Querschnitt.

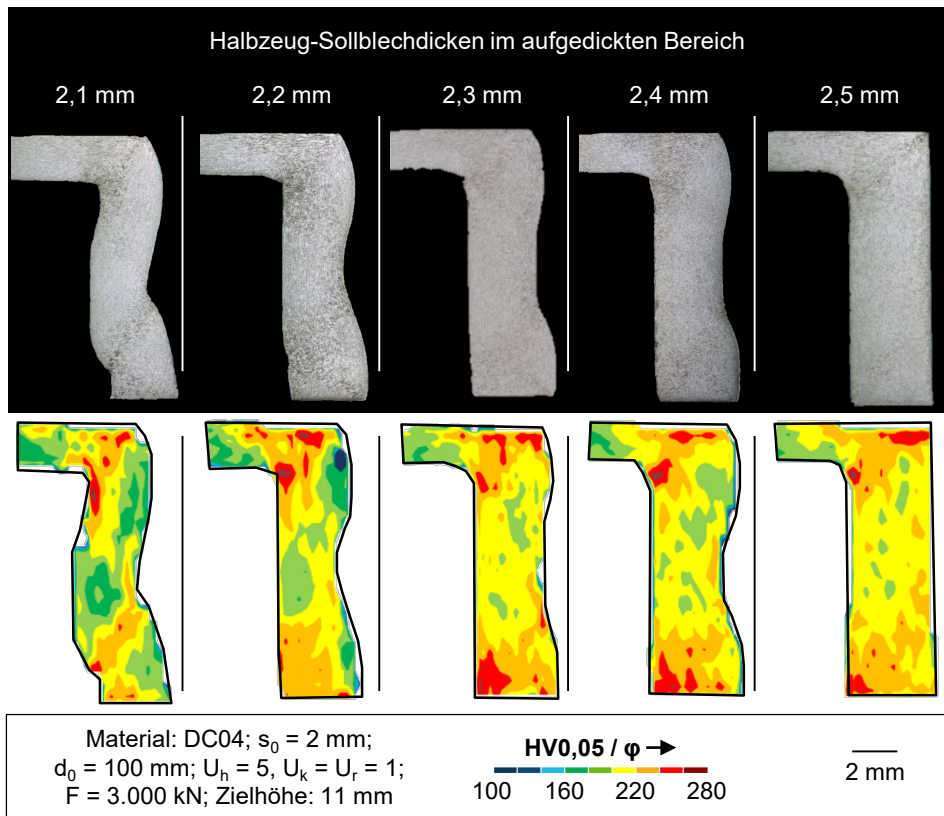


Bild 50: Schliffbilder und dazugehörige Auswertung der Mikrohärtemessung für den Einsatz zunehmend aufgedickter Halbzeuge nach dem Stauchen

Die quantitative Auswertung der Messergebnisse für die resultierende Mikrohärtigkeit nach Beendigung des Stauchprozesses ergibt, im Vergleich zu den Werten für die tiefgezogenen Näpfe, einen weiteren Anstieg der jeweiligen Mittelwerte auf bis zu 223 HV_{0,05}, jedoch keinen Trend der zunehmenden Verfestigung mit steigender Materialvorverteilung mehr. Der Grund dafür ist, dass bei Rondens mit geringerer Materialvorverteilung und einer damit

einhergehenden geringeren Vorverfestigung eine deutlich gesteigerte Deformation feststellbar ist. Dahingegen fallen die Plastifizierung und damit auch der Anstieg der gemittelten Mikrohärtigkeit in der Bauteilzarge bei entsprechend hoher Materialvorverteilung geringer aus. Die berechneten Mittelwerte und die dazugehörigen Standardabweichungen sind Bild 51 zu entnehmen.

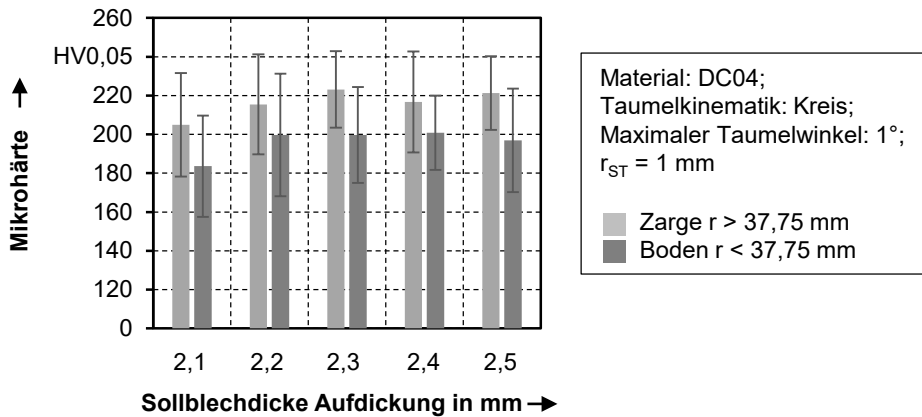


Bild 51: Quantitative Auswertung der durchgeführten Mikrohärtemessungen an tiefgezogenen Näpfen aus prozessangepassten Halbzeuge

Topographische Eigenschaften gestauchter Funktionsbauteile unter Einsatz von Ronden mit Blechdickengradienten

Die gemessenen topographischen Eigenschaften nach Beendigung des Stauchens sollen nun jenen für die tiefgezogenen Näpfe berechneten Werten gegenübergestellt werden. Es soll grundsätzlich analysiert werden, welchen Einfluss die Umformverfahren auf die Oberflächeneigenschaften der Funktionselemente haben und welche Eigenschaften durch die Prozesskette erreicht werden können.

Zunächst fällt auf, dass sich die Werte der gemittelten Rautiefe für die Sollblechdicken $s = 2,1$ mm und $s = 2,2$ mm im Vergleich zum vorherigen Prozessschritt erhöhen. Dieser Effekt kann durch den unkontrollierten Stofffluss und das dadurch bedingte Ausknicken der Bauteilzarge erklärt werden. Die freie Umformung in diesem Bereich begünstigt eine Zunahme der gemittelten Rautiefe. Bei entsprechend hoher Materialvorverteilung kann die Stoffflusskontrolle gesteigert und die freie Umformung verringert werden. Durch die steigende Kontaktfläche nähern sich die Werte dann dem R_z -Wert des Werkzeugs an, welcher bei $R_z = 4 \mu\text{m}$ liegt. Bei den untersuchten Ronden wird dieser Wert, bedingt durch die Einglättung der

Werkstückoberfläche ab einer mittleren Blechdicke von $s = 2,3$ mm erreicht, wie Bild 52 verdeutlicht.

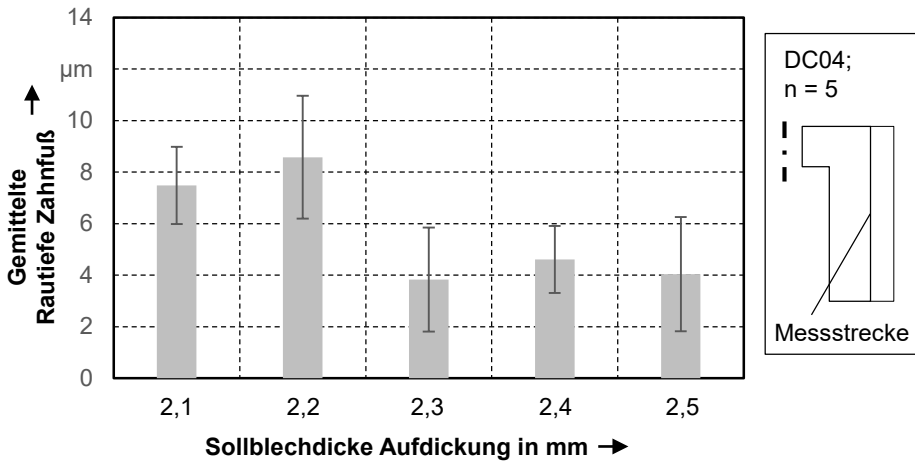


Bild 52: Auswertung der gemittelten Rautiefe R_z für zunehmende Materialvorverteilung nach dem Stauchen

Die quantitative Auswertung wird durch die qualitativen Aufnahmen der Topographie gestützt, wie Bild 53 zeigt. Auf diesen ist die deutlich höhere Einglättung der Oberflächen im Zahnfuß erkennbar.

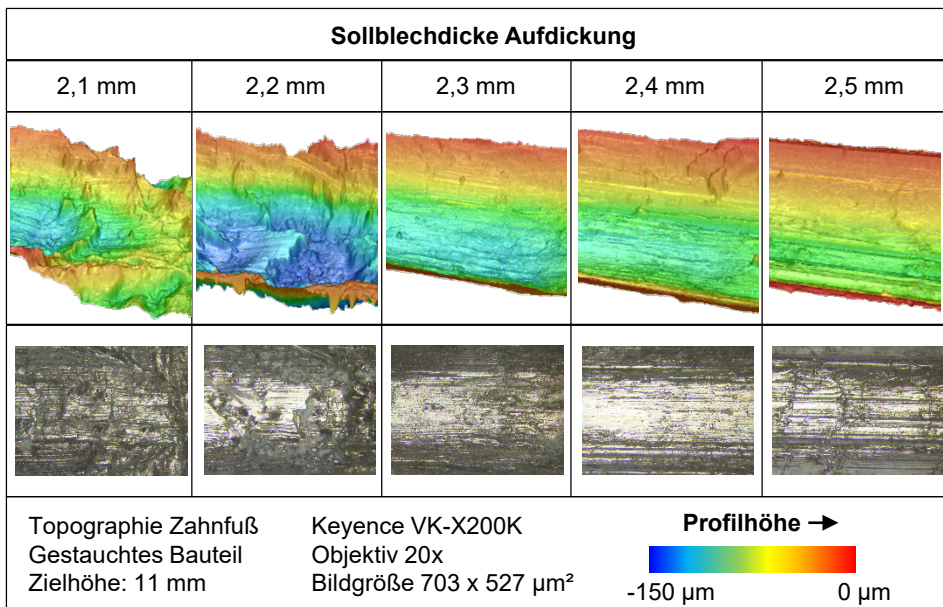


Bild 53: Topographie des Zahnfußes am gestauchten Bauteil für die unterschiedlichen Sollblechdicken

Basierend auf den Ergebnissen für die topographischen Eigenschaften kann festgehalten werden, dass sich der Einsatz prozessangepasster Halbzeuge auch in diesem Bereich positiv auswirkt. Somit lassen sich über die angewandte Halbzeugstrategie für die Anwendung vorteilhafte Oberflächeneigenschaften realisieren. Diese stellen einen wesentlichen Vorteil der Kaltumformung dar [80].

6.3 Einfluss der Eigenschaften prozessangepasster Halbzeuge auf die Umformprozesse bei deren Weiterverarbeitung

Ergänzend zu den Untersuchungen der Eigenschaften von Halbzeugen, Näpfen und Funktionsbauteilen wird in diesem Abschnitt der Einfluss dieser auf die entsprechenden Umformprozesse untersucht. Zu diesem Zweck werden sowohl die resultierenden Kraft-Weg-Verläufe aus der Verfahrenskombination als auch Berechnungen der Werkzeugbelastung und -beanspruchung herangezogen. Die Kraft-Weg-Verläufe wurden während der experimentellen Umformversuche über Analogausgänge der Presse mit einem Messrechner aufgezeichnet, wohingegen die Ergebnisse zur Werkzeugbelastung der numerischen Berechnung über das aufgebaute FE-Modell entstammen. Die Ergebnisse sollen das Prozessverständnis erweitern und eine Einordnung der Ergebnisse innerhalb der durch die anlagen- und werkzeugseitig gesetzten Prozessgrenzen ermöglichen.

Kraftbedarf im Tiefziehprozess

Der Tiefziehprozess erfordert verfahrensbedingt deutlich geringerer Prozesskräfte als die Massivumformprozesse Taumeln und Stauchen. Die auftretenden Kräfte sowie die resultierende Werkzeugbelastung werden dennoch analysiert, um grundlegende Einflüsse zu analysieren. Des Weiteren ist, je nach Anwendung, sowohl eine Beendigung der Prozesskette nach dem Tiefziehen als auch eine Kombination mit einem anderen Verfahren als finaler Prozessschritt denkbar. Für die untersuchten Halbzeuge nimmt die benötigte Ziehkraft mit zunehmenden Materialvolumen und steigender Verfestigung zu. Bei einem Einsatz des Halbzeugs mit der geringsten Sollblechdicke von $s = 2,1$ mm liegt die maximale Ziehkraft bei $F_Z = 71$ kN. Die Maximalwerte für die benötigte Ziehkraft steigen bis zur höchsten Sollblechdicke von $s = 2,5$ mm auf $F_Z = 106$ kN an, was einer Zunahme von etwa 50% entspricht. An dieser Stelle soll festgehalten werden, dass das Kraftniveau der Maximalwerte im Vergleich zu den Werten im nachfolgenden

Stauchprozess unkritisch für den eingesetzten Werkzeugaufbau ist. Die Kraft-Weg-Verläufe für den Tiefziehprozess sind in Bild 54 abgebildet.

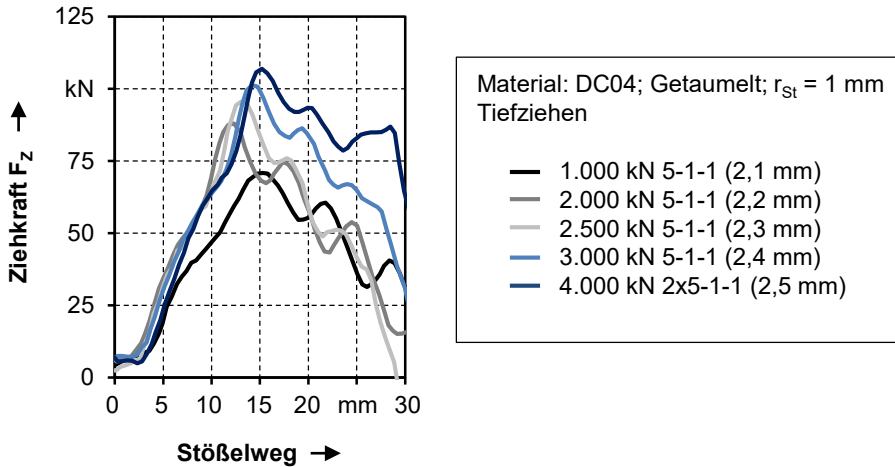


Bild 54: Aufgezeichnete Kraft-Weg-Verläufe für die unterschiedliche stark aufgedickten Halbzeuge im Tiefziehprozess

Kraftbedarf und Werkzeugbelastung im Stauchprozess

Der finale Prozessschritt zur Herstellung der außenverzahnten Funktionsbauteile führt noch mal zu einer deutlichen Erhöhung der benötigten Prozesskraft und der Werkzeugbelastung. Die Analyse der auftretenden Kräfte soll eine Einordnung der anlagenseitigen Anforderungen an diese Prozesskombination ermöglichen, wohingegen die berechnete Werkzeugbelastung als Grundlage der Auslegung für Umformwerkzeuge herangezogen werden kann. In vorausgegangenen Untersuchungen wurden zunächst unterschiedliche Halbzeuge bei gleichbleibender Stauchkraft umgeformt, um grundlegende Effekte bei prozesseitig gleichbleibenden Rahmenbedingungen zu identifizieren [23]. In der vorliegenden Analyse wurde eine Zielhöhe von $h_z = 11 \text{ mm}$ für die umgeformten Näpfe definiert, um die Bauteileigenschaften gut miteinander vergleichen zu können, da beispielsweise ein Vergleich der Formfüllung bei unterschiedlicher Napfhöhe nur bedingt aussagekräftig ist. Dieses Vorgehen erfordert allerdings eine Anpassung der Maximalkraft an die jeweiligen Halbzeugeigenschaften. Die Verläufe zeigen die Abhängigkeit der Maximalkraft von dem umzuformenden Materialvolumen bei einheitlicher Zielhöhe. Es ist ersichtlich, dass ein höheres Materialvolumen, welches zugleich eine höhere Verfestigung aufweist, eine höhere Stauchkraft erforderlich macht. Mit $F_s = 1005 \text{ kN}$ beträgt der benötigte Wert für die höchste Sollblechdicke etwa das Zweieinhalbfache der

für das Halbzeug mit $s = 2,1$ mm benötigten Kraft. Die Kraft-Weg-Verläufe aus dem Stauchprozess sind in Bild 55 aufgetragen.

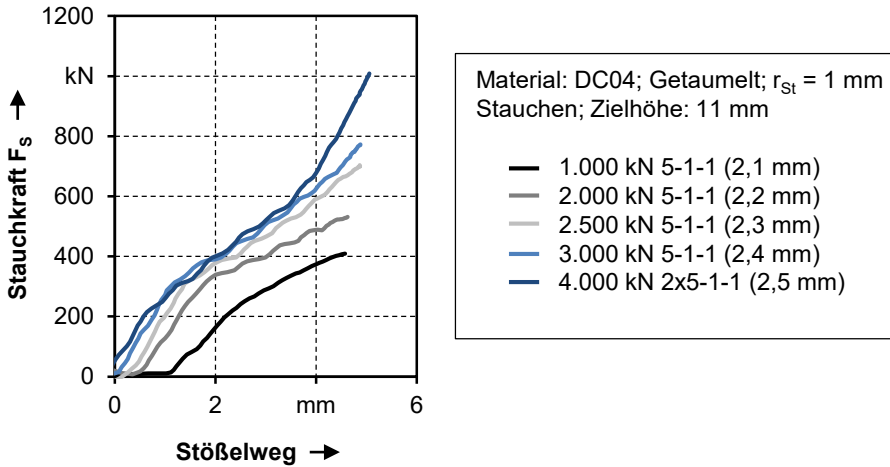


Bild 55: Aufgezeichnete Kraft-Weg-Verläufe für die unterschiedliche stark aufgedickten Halbzeuge im finalen Prozessschritt

Mit steigendem Materialvolumen und erhöhter Vorverfestigung lässt sich im Stauchprozess zudem eine erhöhte Werkzeugbelastung feststellen. Wie in Bild 56 gezeigt, steigt diese analog zum Kraftbedarf von Stufe zu Stufe an und weist bei $s = 2,5$ mm ihr Maximum auf.

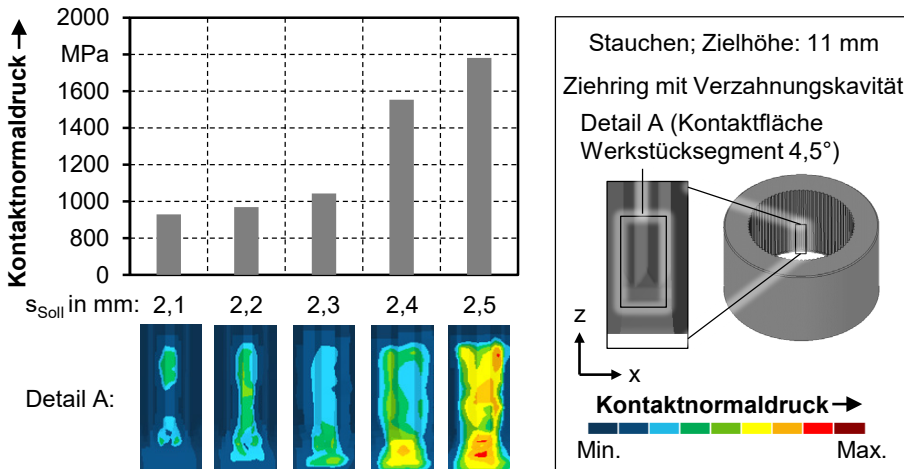


Bild 56: Numerische Analyse des Kontaktnormaldrucks für zunehmende Materialvorverteilung während des Stauchens

Der errechnete Maximalwert des Kontaktnormaldrucks liegt basierend auf der Definition der Zielhöhe unterhalb der Druckfestigkeit des Werkzeugwerkstoffs. An dieser Stelle muss berücksichtigt werden, dass die Werkzeugbelastung bei Umformung der prozessangepassten Halbzeuge auf bis zu 1781 MPa ansteigt und der vorherrschende Druck bei zusätzlichem Material oder längeren Stauchwegen zum Werkzeugversagen führen kann.

6.4 Zusammenfassende Bewertung der Erkenntnisse zur Ableitung eines Prozessfensters für die Herstellung und den Einsatz prozessangepasster Halbzeuge

In den einzelnen Abschnitten dieses Kapitels wurde der Einfluss einer zunehmenden Materialvorverteilung im Randbereich der Halbzeuge auf die resultierenden Eigenschaften der gefertigten Funktionsbauteile unter Berücksichtigung der Halbzeugherstellung, des Tiefziehens und des Stauchens untersucht. Als Grundlage der Untersuchungen wurde der ausgelegte Werkzeugeinsatz über eine Anpassung der Prozessparameter beim Taumelpressen ausgehend von der Ausgangsblechdicke von $s_0 = 2$ mm bis zur maximalen Blechdicke von $s = 2,5$ mm in Zehntelmillimeterschritten gefüllt. Dies war für den eingesetzten Tiefziehstahl DC04 bei unveränderter Anzahl an Taumelrunden bis zu einer Dicke von $s = 2,4$ mm über die Steigerung der Taumelkraft bis auf das anlagenseitige Maximum von $F_T = 4.000$ kN möglich. Das Erreichen der maximalen Blechdicke erforderte zudem eine Erhöhung der Taumelrundenzahl bei maximaler Stempelkraft. Dieses Vorgehen wurde in [112] zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Taumelpressen qualifiziert.

Im nächsten Prozessschritt wurden die getaumelten Ronden tiefgezogen und im Anschluss analysiert. Wie bereits im vorherigen Kapitel gezeigt, erhöht sich durch die vorherrschenden Spannungs- und Dehnungszustände das Materialvolumen in der Zarge, während das Materialvolumen im Napfboden abnimmt. Ursächlich ist der ebene Dehnungszustand am Ziehstempelradius. Entsprechend der zunehmenden Materialvorverteilung und -verfestigung nehmen auch das Volumen und die gemessene Mikrohärtigkeit in der Zarge der tiefgezogenen Näpfe zu.

Im finalen Prozessschritt, dem Stauchen, wurden die gezogenen Näpfe auf eine Zielhöhe von $h_{\text{Ziel}} = 11$ mm gestaucht, um die gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Für die geringste Materialvorverteilung ist, bedingt durch die geringe Kontaktfläche von Werkstück und Werkzeug,

nahezu kein Materialfluss in den Bauteilboden feststellbar. Dieser verstärkt sich mit zunehmender Materialvorverteilung und führt an einer mittleren Blechdicke von $s = 2,4$ mm zu Werten für das Volumen in der Zarge, welche unterhalb der vorverteilten Volumina liegen. Es bleibt demnach festzuhalten, dass die Materialvorverteilung für eine vollständige Formfüllung der Zarge unter den untersuchten Parametern geringfügig über dem berechneten Sollvolumen liegen muss, um den Materialfluss aus der Zarge in den Bauteilboden zu kompensieren. Für die maximale Aufdickung lässt sich mit einer Materialvorverteilung, welche 1% über dem Sollvolumen liegt, eine Formfüllung von 99,2% erreichen. Die Volumina der der einzelnen Halbzeugvarianten über die einzelnen Schritte der Prozesskette sind in Bild 57 dargestellt.

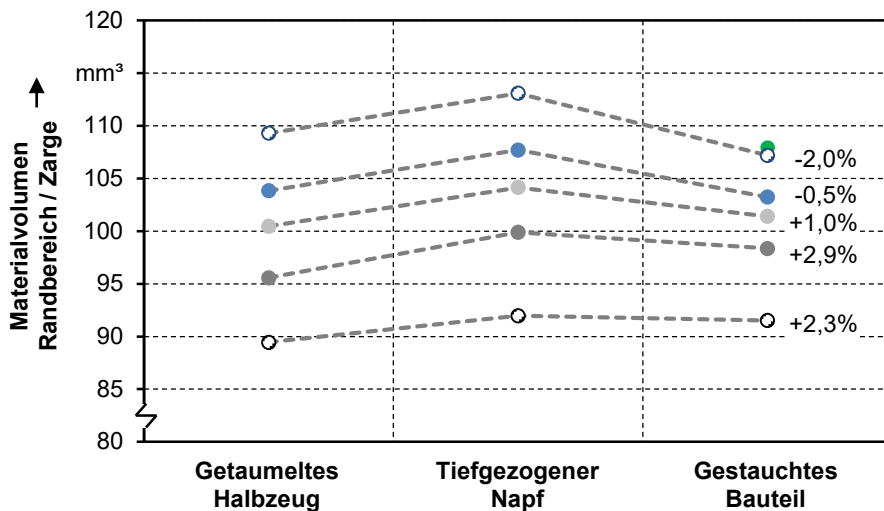


Bild 57: Gemessenes Materialvolumen für Halbzeuge, Näpfe und Funktionsbauteile mit zunehmender Materialvorverteilung

Die resultierenden Mittelwerte der Mikrohärtigkeit in der Bauteilzarge für die getaumelten Halbzeuge ist, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, vorrangig von der auftretenden plastischen Dehnung abhängig. Die Mikrohärtigkeit steigt tendenziell über die zunehmende Materialvorverteilung im Taumelpressen an. Diese Unterschiede bleiben auch nach dem Tiefziehen der Ronden weitestgehend erhalten, allerdings wirkt sich der ebene Dehnungszu-

stand im Bereich des Ziehstempelradius bei geringerer Materialvorverteilung und geringerer Vorverfestigung stärker auf die resultierende Mikrohärtigkeit aus. Die ebene Dehnung am Ziehstempelradius ist, wie unter Abschnitt 5.1 gezeigt, der dominierende Zustand und führt bei geringerer Vorverfestigung zu höherer Plastifizierung und einem höheren Anstieg der Mikrohärtigkeit, wie in Bild 58 zeigt. Der Anstieg der Mikrohärtigkeit für die geringste Sollblechdicke beträgt 12%, für die höchste Sollblechdicke beträgt dieser lediglich 3%. An den finalen Bauteilgeometrien lässt sich diese Tendenz nicht mehr durchgängig nachweisen, da die Näpfe mit erhöhter Materialvorverteilung während des Stauchprozesses vergleichsweise geringe Dehnungen bei kurzen Fließwegen erfahren. Dadurch bedingt nimmt die mittlere Mikrohärtigkeit während des Stauchens mit zunehmender Materialvorverteilung nicht konstant zu. Der Anstieg des Mittelwertes der Mikrohärtigkeit beträgt 12% für die geringste und 8% für die höchste Sollblechdicke. Die Halbzeuge mit geringerer Sollblechdicke weisen durch das Ausknicken der Zarge unkontrollierten Materialfluss und demnach eine höhere Plastifizierung auf.

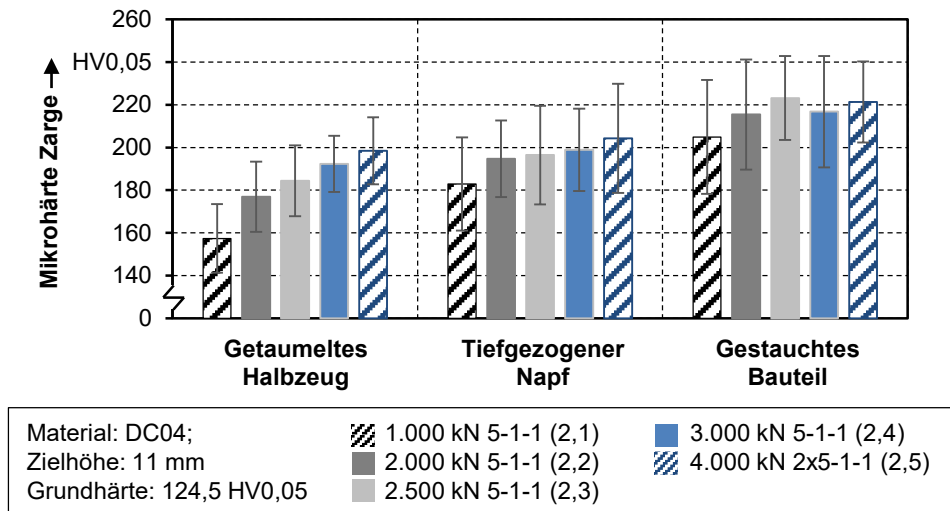


Bild 58: Gemessene Mikrohärtigkeit für Halbzeuge, Näpfe und Funktionsbauteile mit zunehmender Materialvorverteilung

Die Analyse der Topografie für die Zahnflanken ergibt nach dem Tiefziehen eine tendenziell steigende gemittelte Rautiefe bei zunehmender Materialvorverteilung. Dieser Effekt kann durch die auftretenden Dehnungen und die zunehmenden Abstreckanteile erklärt werden. Während des nachfolgenden Stauchprozesses lässt sich für eine geringfügige Aufdickung bis zu einer mittleren Dicke von $s = 2,2$ mm keine signifikante Veränderung der

gemittelten Rautiefe nachweisen. Tendenziell steigen die Werte im Vergleich zum Tiefziehprozess an, da es bei entsprechend geringer Blechdicke zu anteilig erhöhter freier Umformung ohne Werkzeugkontakt kommt. Eine Steigerung der mittleren Blechdicke im Randbereich des Halbzeugs verringert das Ausknicken der Zarge und somit die freie Umformung. Die Kontaktfläche zwischen Werkstück und Werkzeug wächst mit zunehmender Materialvorverteilung, was zur Folge hat, dass der Werkstoff während des Stauchens eine Einglättung erfährt. Die gemessenen Werte für die gemittelte Rautiefe nähern sich der Rauheit des Werkzeuges an, welche $R_z = 4 \mu\text{m}$ beträgt und liegen damit signifikant unterhalb der jeweiligen Werte nach dem Tiefziehen, wie Bild 59 zeigt.

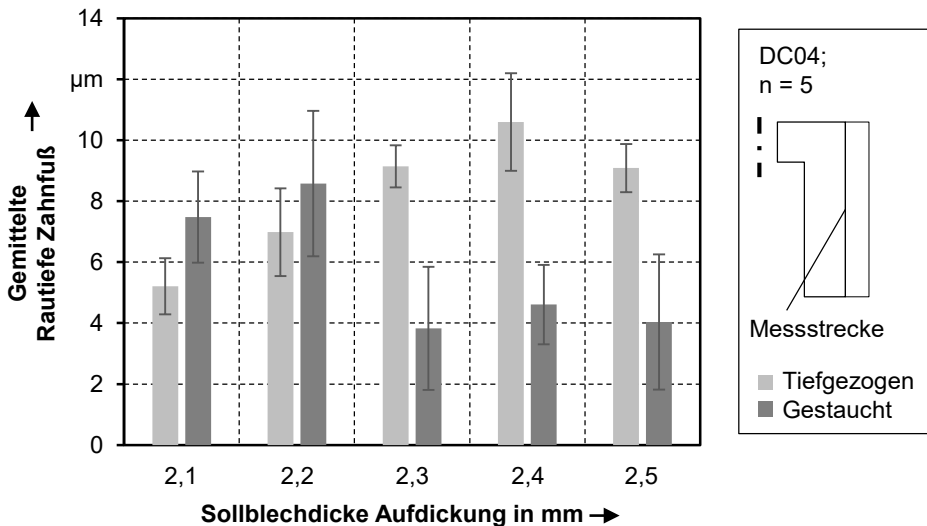


Bild 59: Gemittelte Rautiefe R_z für Halbzeuge, Näpfe und Funktionsbauteile mit zunehmender Materialvorverteilung

Abschließend wird basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen überprüft, ob die angenommenen Zusammenhänge bestätigt werden können. Diese beinhaltet zum einen die Annahme, dass sich die resultierende Formfüllung der Funktionsbauteile linear von dem vorverteilten Volumen abhängt und zu anderen, dass sich dieser Zusammenhang für die mechanischen Eigenschaften nicht nachweisen lässt.

Um den Einfluss der Abweichungen bei den Bauteilhöhen auszuschließen, wurde das vorverteilte Materialvolumen der Halbzeuge der resultierenden Formfüllung der Bauteilzarge gegenübergestellt. Die Formfüllung wurde zu diesem Zweck bezogen auf das Sollvolumen der gemessenen Ist-Bauteil-

6.4 Zusammenfassende Bewertung der Erkenntnisse zur Ableitung eines Prozessfensters für die Herstellung und den Einsatz prozessangepasster Halbzeuge

höhe berechnet. Bild 6o zeigt die zu Beginn des Kapitels vorgestellte Ausgleichsgerade sowie die berechneten Werte für die untersuchten Bauteile. Die Abbildung macht deutlich, dass die ermittelten Werte den angenommenen Zusammenhang bestätigen und lediglich geringe Abweichungen zur Geraden aufweisen. Die Werte für eine geringe Materialvorverteilung liegen dabei leicht oberhalb der Geraden, wohingegen der Punkt für die maximale Materialvorverteilung leicht unterhalb der Geraden liegt. Die Wertepaare für $s = 2,3$ mm und $s = 2,4$ mm liegen hingegen auf der Geraden und wiesen somit die höchste Übereinstimmung auf. Als Erklärung für die Abweichungen und die Ausschläge in beide Richtungen dient insbesondere der in Bild 36 visualisierte Effekt des Bodenfließens bei entsprechend hoher Formfüllung. Dieser Effekt bewirkt, wie in Bild 57 gezeigt, dass sich das Verhältnis von vorverteiltem Material und resultierender Formfüllung mit zunehmender Vorverteilung verschlechtert.

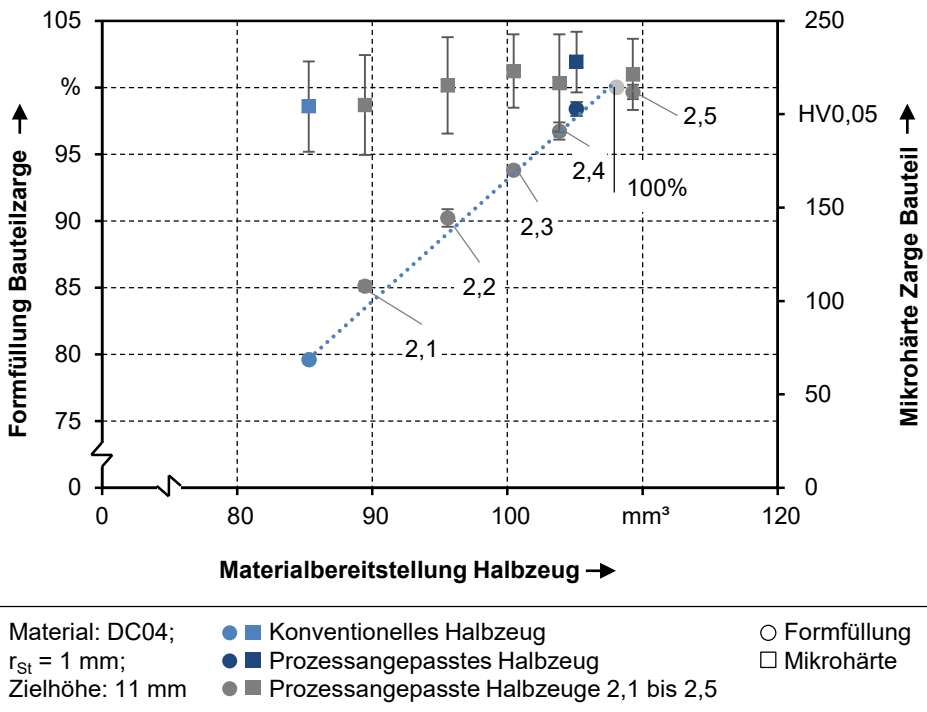


Bild 6o: Bestätigung der angenommenen funktionalen Zusammenhänge durch die ermittelten geometrischen und mechanischen Bauteileigenschaften

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird nun ein Prozessfenster für die umformtechnische Weiterverarbeitung prozessangepasster

Halbzeuge abgeleitet. Die zulässige Abweichung der resultierenden Formfüllung zum Sollvolumen lässt sich ohne konkreten Anwendungsfall allerdings nicht eindeutig festlegen. Grundsätzlich hängt auch die erforderliche Oberflächengüte vom konkreten Anwendungsfall ab. Jedoch kann angenommen werden, dass eine geringe Rautiefe auf den Funktionsflächen vorteilhaft für den Einsatz von verzahnten Bauteilen ist. Bild 61 ist zu entnehmen, dass die gemittelte Rautiefe Rz auf der Zahnflanke ab einer Aufdickung von $s = 2,3$ mm annähernd jener des Umformwerkzeugs entspricht. Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass für den untersuchten Prozess der Einsatz von prozessangepassten Halbzeugen mit Aufdickungen von mindestens $s = 2,3$ mm zielführend erscheint.

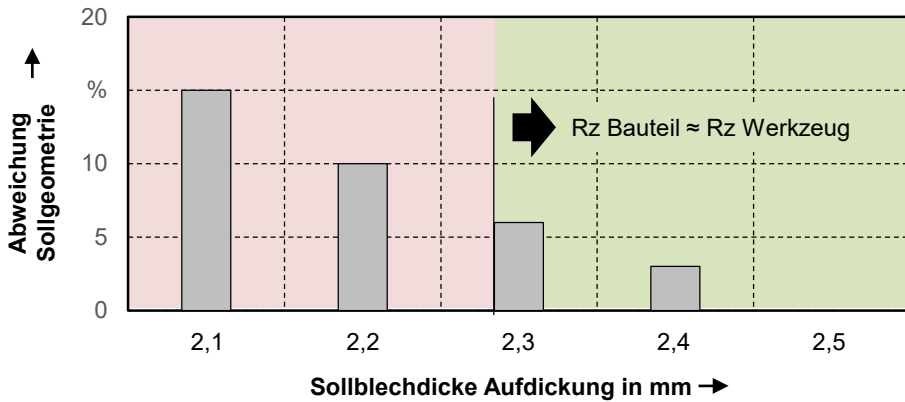


Bild 61: Prozessfenster für die umformtechnische Weiterverarbeitung von unterschiedlich stark aufgedickten Halbzeugen aus DCo4

7 Nachweis der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf skalierte Bauteilgeometrien und Stahlwerkstoffe höherer Festigkeit

Die Überprüfung der Übertragbarkeit des entwickelten Ansatzes zur Auslegung prozessangepasster Halbzeuge für eine Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen wird anhand von skalierten Zielgeometrien sowie durch den Einsatz von Stahlwerkstoffen höherer Festigkeit vorgenommen. Zu diesem Zweck werden zunächst numerische Modelle für die Analyse der Herstellung von außenverzahnten Funktionsbauteilen mit vergrößertem, beziehungsweise verkleinertem Durchmesser genutzt. Anschließend werden die Untersuchungen aus den vorherigen beiden Kapiteln um den Einsatz eines mikrolegierten Stahls sowie eines Dualphasenstahls ergänzt. Auf diese Weise werden sowohl die grundsätzliche Übertragbarkeit des Ansatzes nachgewiesen als auch Grenzen für die Übertragbarkeit definiert.

7.1 Skalierung von Bauteil- und Halbzeuggeometrien basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen

Durch die Skalierung der Zielgeometrie wird zum einen untersucht, ob sich die Auslegungsmethodik auf Halbzeuge für skalierte Bauteilgeometrien übertragen lässt und zum anderen, ob sich die entsprechenden Halbzeuge und Bauteile auch umformtechnisch herstellen lassen. Zu diesem Zweck wurde die Zielgeometrie, wie in Bild 62 schematisch gezeigt, skaliert.

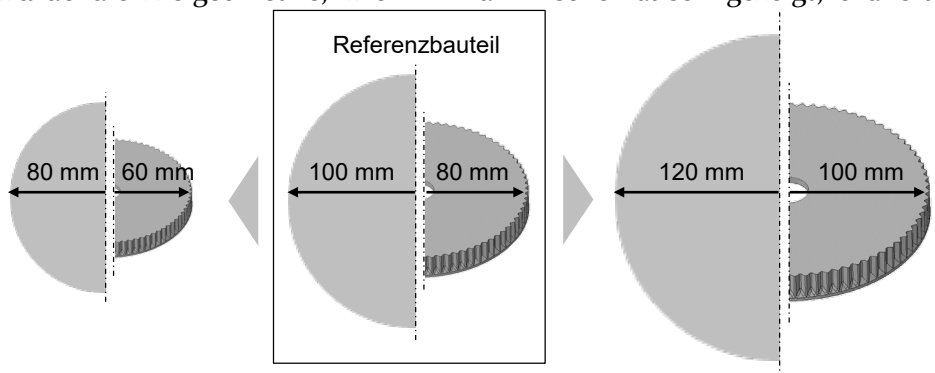


Bild 62: Skalierung der Bauteilgeometrien ausgehend von der Referenzgeometrie zum Nachweis der Übertragbarkeit der Auslegungsmethodik

Die Bauteildurchmesser wurden um je 20 Millimeter nach innen beziehungsweise nach außen verschoben. Damit liegt der Fußkreisdurchmesser des Funktionsbauteils bei $d_F = 100$ mm, beziehungsweise $d_F = 60$ mm, anstelle des ursprünglichen Wertes von $d_F = 80$ mm. Durch das parametrisierte Modell bleiben die geometrischen Verhältnisse und damit auch die Anzahl der Zähne erhalten. Allerdings ändert sich mit Verschiebung der radialen Position bei gleichbleibendem Winkel die Bogenlänge und somit das Volumen der Bauteile sowie das der einzelnen Zähne. Der Ausgangsdurchmesser der eingesetzten Blechrunde wird entsprechend von ursprünglich $d_o = 100$ mm auf $d_o = 120$ mm vergrößert und auf $d_o = 80$ mm verkleinert. Grundsätzlich entspricht das Vorgehen in diesem Abschnitt jenem aus den vorherigen Kapiteln. Die prozessangepassten Halbzeuge werden zunächst durch ein Taumelverfahren hergestellt und anschließend in einer Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen weiterverarbeitet. Prozessaufbau und -kinematik bleiben, abgesehen von geometrischen Adaptionen unverändert. Als Versuchswerkstoff wird weiter der Tiefziehstahl DCDCo4 in Form von Blechronden mit einer Ausgangsblechdicke von $s_o = 2$ mm eingesetzt.

7.1.1 Herstellung prozessangepasster Halbzeuge für skalierte Bauteilgeometrien

Zu Beginn der Untersuchungen wurde der Außendurchmesser des im fünften Kapitel ausgelegten Werkzeugeinsatzes konstruktiv für die geänderten Randbedingungen angepasst. Um den Nachweis der Übertragbarkeit auf vergrößerte oder verkleinerte Bauteildurchmesser zu erbringen, wurde die Position des radialen Aufdickungsbeginns r_A um 10 Millimeter radial nach außen sowie radial nach innen verschoben. Bild 63 zeigt die schematischen Darstellungen der Werkzeugeinsätze mit den skalierten Positionen der Kavitäten sowie der Außenradien. Diese betragen $r_A = 45,2$ mm und $r_o = 60$ mm, beziehungsweise $r_A = 25,2$ mm und $r_o = 40$ mm. Die Übergangslängen verbleiben bei $l_{Ü} = 2$ mm.

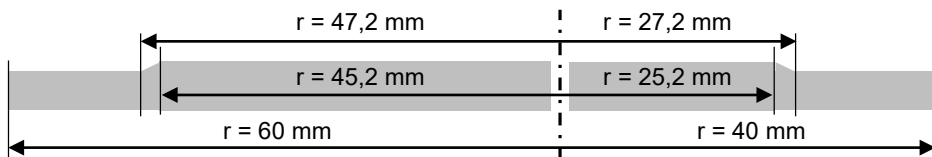
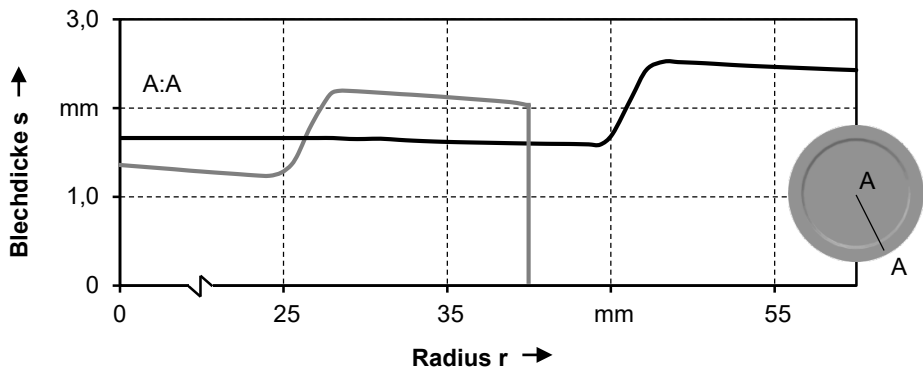


Bild 63: Skalierung der Werkzeugeinsätze zur Herstellung prozessangepasster Halbzeuge durch das Taumelpressen

Die übrigen Bestandteile des Werkzeugaufbaus wurden entsprechend der Skalierung der Werkzeugeinsätze angepasst und in das numerische Prozessmodell integriert. Das Taumeln der Blechhalbzeuge erfolgte unter den Standardeinstellungen, welche bereits bei der Auslegung Anwendung fanden.

Bedingt durch die skalierten Geometrien weichen die Prozessergebnisse trotz gleicher Werkstoffeigenschaften und Prozessparameter voneinander ab. Wie in [112] gezeigt, resultieren diese Abweichungen aus den unterschiedlichen Kontaktdrücken beim Taumelpressen. Der Kontaktdruck nimmt unter gleichbleibender Stößelkraft mit zunehmender Kontaktfläche ab, dadurch resultiert eine vergleichsweise höhere Plastifizierung der kleineren Ronde. Für den verkleinerten Rondendurchmesser ergibt sich nach der Umformoperation eine Blechdicke von $s = 1,44 \text{ mm} \pm 0,01$ im Mitten- und $s = 2,14 \text{ mm} \pm 0,04$ im Randbereich. Für den vergrößerten Halbzeugdurchmesser liegen die Werte bei $s = 1,66 \text{ mm} \pm 0,00$ beziehungsweise $s = 2,48 \text{ mm} \pm 0,03$. Die Konturen der getaumelten Ronden sind in Bild 64 dargestellt.



Material: DC04; Kinematik: Kreis;	Rondendurchmesser: — 80 mm
$U_h = U_k = U_r = 5$; $F_T = 3.000 \text{ kN}$;	— 120 mm
Simufact.forming 12.0.1	

Bild 64: Resultierende Halbzeuggeometrien nach dem Taumelpressen für skalierte Durchmesser

Neben dem unterschiedlich hohen Kontaktdruck wird die Halbzeuggeometrie maßgeblich durch die geometrischen Eingangsgrößen bestimmt. Bei gleicher Ausgangsblechdicke nimmt das Materialvolumen mit steigendem Rondendurchmesser exponentiell zu. Bedingt durch die Skalierung der Bauteilgeometrie variieren nicht nur die Volumina im inneren und äu-

ßeren Rondenbereich, sondern auch deren Verhältnis zueinander. Der verkleinerte Rondendurchmesser von $d_0 = 80 \text{ mm}$ weist ein Gesamtvolumen von $V = 10.053 \text{ mm}^3$ auf. Anteilig befindet sich mit $V = 5.215 \text{ mm}^3$ mehr Material außerhalb des Ziehstempelradius. Im inneren Bereich verbleiben $V = 4.838 \text{ mm}^3$. Beim vergrößerten Rondendurchmesser von $d_0 = 120 \text{ mm}$, welcher ein Gesamtvolumen $V = 22.619 \text{ mm}^3$ aufweist, weist der äußere Bereich mit $V = 8.293 \text{ mm}^3$ im Verhältnis zum inneren Bereich deutlich weniger Materialvolumen auf. Diese Voraussetzungen begünstigen die Herstellung der prozessangepassten Halbzeuge, da unter der Taumelkinematik Material aus dem inneren Bereich in den Randbereich verschoben wird, um die Werkzeugkavität auszufüllen. Für einen einzelnen Zahn stehen im Randbereich der ebenen Ronden $V = 65 \text{ mm}^3$ für die verkleinerte und $V = 104 \text{ mm}^3$ zur Verfügung. Nach dem Taumelpressen steigen diese Werte auf $V = 71 \text{ mm}^3$ beziehungsweise $V = 128 \text{ mm}^3$. Die Volumenverteilung für ein $4,5^\circ$ -Segment sowie die Umformgradverteilung nach dem Taumelpressen sind Bild 65 zu entnehmen. Anhand der qualitativen Darstellung der Umformgradverteilung wird deutlich, dass das Material bei kleinerem Durchmesser höhere Dehnungen erfährt. Dieser Vergleich korreliert mit den Ergebnissen der geometrischen Analyse und der vergleichsweise höheren Ausdünnung der Ausgangsrunde.

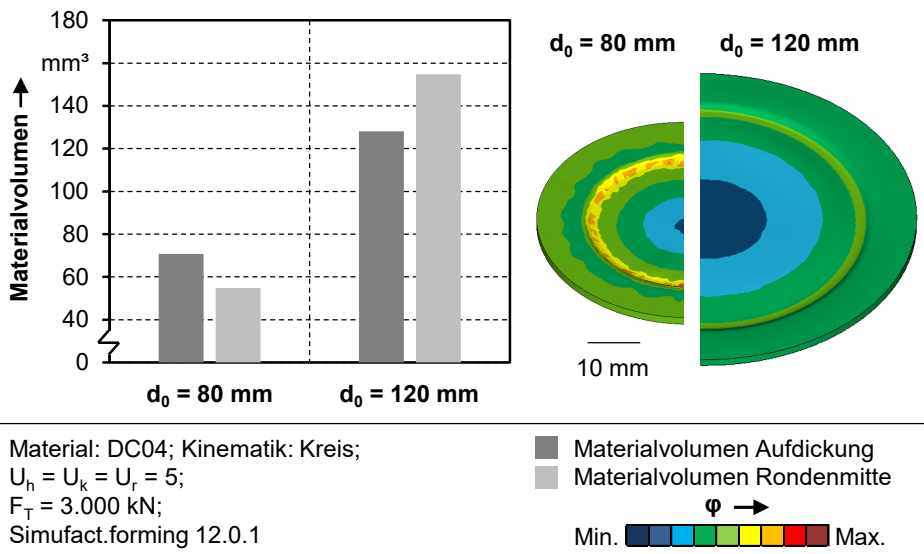


Bild 65: Gegenüberstellung der Materialvolumina für die skalierten Halbzeuge nach dem Taumelpressen

Das Sollvolumen der Bauteilzargen beträgt für den verkleinerten Rondendurchmesser $V = 6.733 \text{ mm}^3$ und für den vergrößerten Durchmesser

$V = 10.573 \text{ mm}^3$. Diese Werte repräsentieren relative Materialverteilungen von etwa 84 Prozent beziehungsweise 97 Prozent und liegen somit über den ursprünglichen Werten von knapp unter 80 Prozent.

7.1.2 Bauteile

Entsprechend der Prozessfolge werden die getaumelten Halbzeuge anschließend tiefgezogen und gestaucht. In den nachfolgenden Abschnitten werden die ermittelten Ergebnisse für die Weiterverarbeitung der skalierten Ronden dargestellt und diskutiert. Auf dieser Grundlage wird überprüft, ob und wie weit sich die gewonnenen Erkenntnisse auf die Herstellung von Funktionsbauteilen mit veränderten Bauteilabmessungen übertragen lassen.

7.1.2.1 Tiefziehen

Trotz der stark unterschiedlichen Halbzeuggeometrien weichen die berechneten Kraft-Weg-Verläufe nur geringfügig voneinander ab. Die berechneten Verläufe lassen sich durch die ähnlichen Dickengradienten der getaumelten Halbzeuge erklären. Zudem weist das stärker ausgedünnte Halbzeug eine tendenziell höhere Verfestigung auf [81], da die höhere Ausdünnung mit einer höheren Plastifizierung einhergeht. Die Kraft-Weg-Verläufe für das Tiefziehen der skalierten Geometrien sind Bild 66 zu entnehmen.

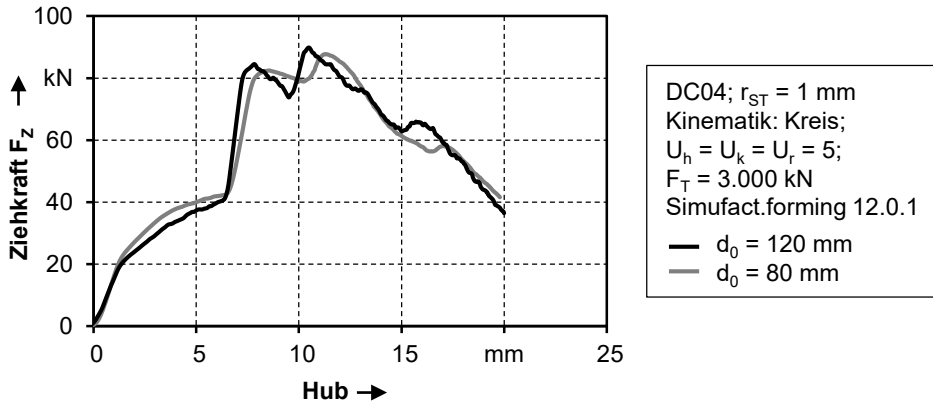


Bild 66: Berechneter Kraft-Weg-Verlauf für das Tiefziehen der skalierten Ronden aus dem numerischen Modell

Das benötigte Kraftmaximum für den kleineren Napfdurchmesser liegt bei $F_Z = 85 \text{ kN}$ und bei $F_Z = 88 \text{ kN}$ für den größeren Napfdurchmesser. Demnach heben sich die höhere Verfestigung des kleineren Rondendurchmessers und die höhere Blechdicke bei der Ronde mit vergrößertem Durchmesser hinsichtlich ihres Einflusses auf die benötigte Ziehkraft gegenseitig nahezu auf.

Die höhere Blechdicke im Napfboden sowie in der Napfzarge für den Einsatz eines größeren Halbzeugdurchmessers lässt sich auch im Vergleich der Bauteilkonturen in Bild 67 erkennen. Das Halbzeug mit dem größeren Ausgangsdurchmesser und der höheren Materialvorverteilung weist auch nach dem Tiefziehen eine deutlich höhere Blechdicke und dementsprechend auch ein deutlich höheres Materialvolumen in der Napfzarge auf. Weitergehend kann festgestellt werden, dass die Skalierung der Napfgröße keinen wesentlichen Einfluss auf die resultierenden Napfkonturen hat und sich diese entsprechend der im vorherigen Kapitel gewonnenen Erkenntnisse ausbilden.

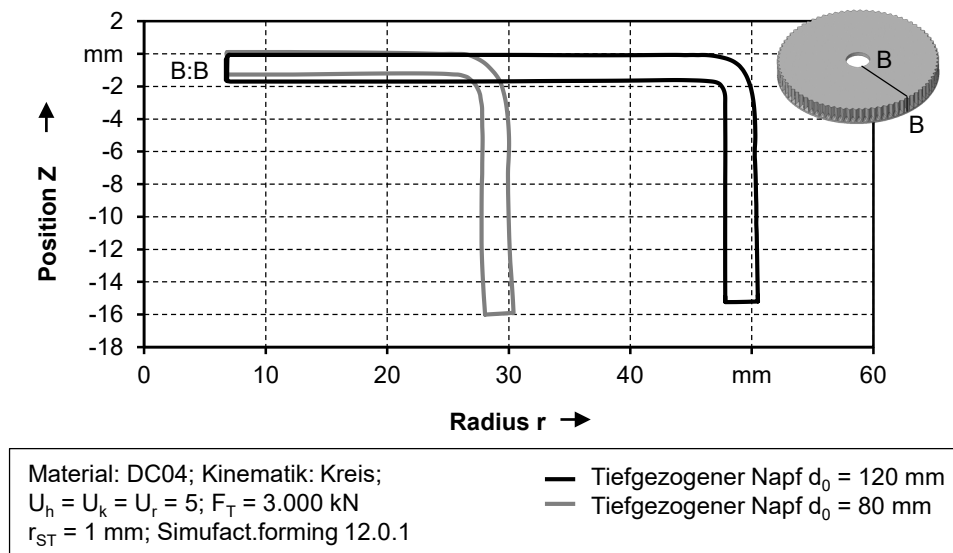


Bild 67: Konturen der tiefgezogenen Näpfe für den vergrößerten und den verkleinerten Halbzeugdurchmesser

Die Volumina in der Zarge steigen gegenüber den Werten nach dem Taulmpressen für beide Näpfe an. Dieser Anstieg entspricht ebenfalls den Ergebnissen aus den vorherigen Kapiteln und ist somit übertragbar auf die skalierten Geometrien. Im Napfboden des Napfes mit kleinerem Durch-

messer beträgt das Volumen nach dem Tiefziehen $V = 53 \text{ mm}^3$ und im Boden des Napfes mit vergrößertem Durchmesser $V = 147 \text{ mm}^3$. In der Napfzarge liegt der berechnete Werte bei $V = 73 \text{ mm}^3$ beziehungsweise bei $V = 136 \text{ mm}^3$. Die Ergebnisse für das Verhältnis der Volumina in Boden und Zarge korrelieren mit der Volumenverteilung nach dem Taumelpressen und sind somit konsistent. Die resultierenden Volumina für beide Geometrien sind in Bild 68 gegenübergestellt. Des Weiteren zeigt Bild 68 die Umformgradverteilung als Indikator für die mechanischen Eigenschaften. Auch diese werden maßgeblich durch die Halbzeugherstellung beeinflusst. Im Gegensatz zu den Untersuchungen im vorherigen Kapitel verringert sich die Blechdicke in der Rondenmitte sehr stark obwohl der Kavitätsbereich nicht vollständig ausgefüllt ist, da insgesamt weniger Material zur Verfügung steht. Da während des Tiefziehens in diesem Bereich erneut hohe Dehnungen auftreten, kommt es zu lokal deutlich erhöhten Umformgraden und zu einer unerwünschten Materialausdünnung [81]. Dieses Ergebnis stützt die zuvor gewonnenen Erkenntnisse, welche die Kompensation der Materialausdünnung beim Tiefziehen als wesentlichen Schritt zur Vermeidung der identifizierten Prozessfehler ausweisen. Demnach kann festgehalten werden, dass sich die gewonnenen Erkenntnisse grundsätzlich auf skalierte Bauteile übertragen lassen. Allerdings lässt sich das volle Potential prozessangepasster Halbzeuge für verkleinerte Geometrien, bedingt durch die geometrischen Randbedingungen, nur bedingt ausschöpfen.

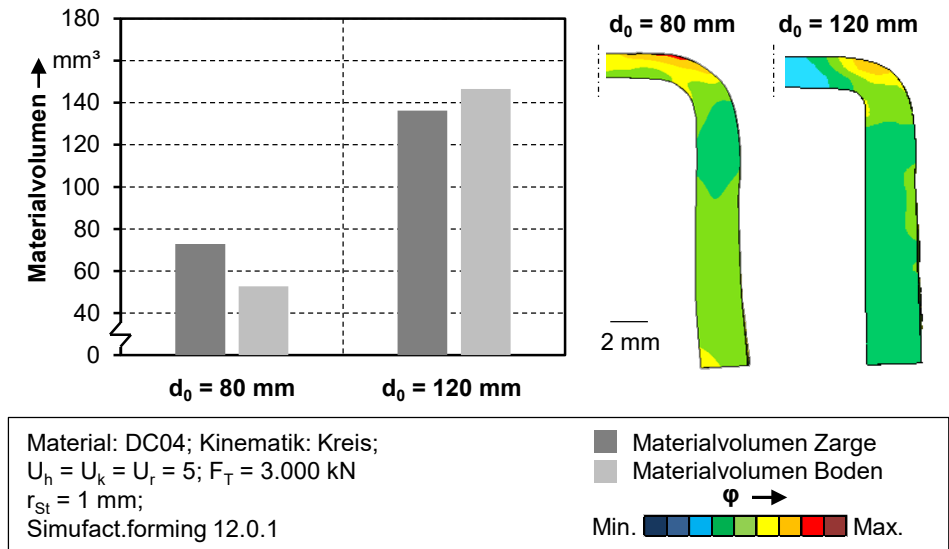


Bild 68: Gegenüberstellung der Materialvolumina für die skalierten Halbzeuge nach Beendigung des Tiefziehprozesses

7.1.2.2 Stauchen

Im letzten Schritt der Prozesskette werden die skalierten Napfgeometrien über einen Stauchprozess in ihre finale Form gebracht. Im Gegensatz zum vorherigen Tiefziehprozess weichen die berechneten Kraft-Weg-Verläufe der skalierten Geometrien für diesen Prozessschritt stark voneinander ab, wie Bild 69 zu entnehmen ist. Das um fast 87% höhere Materialvolumen in der Zarge des hochskalierten Napfes resultiert in einem erhöhten Kraftbedarf. Entscheidend ist, neben dem reinen Materialvolumen, dass dieses eine deutlich vergrößerten Werkzeugkontakt aufweist. Die großen Kontaktflächen und die damit verbundene hohe Reibung machen bei Massivumformoperationen typischerweise hohe Umformkräfte erforderlich [80]. Der steilere Kraftanstieg für das hochskalierte Funktionsbauteil erreicht sein Maximum bei einer Stauchkraft von $F_{Smax} = 1.219,15$ kN. Für das Erreichen der Zielhöhe von $h_Z = 11$ mm wird bei dem herunterskalierten Bauteil mit $F_{Smax} = 608,87$ kN lediglich die Hälfte der Stauchkraft benötigt.

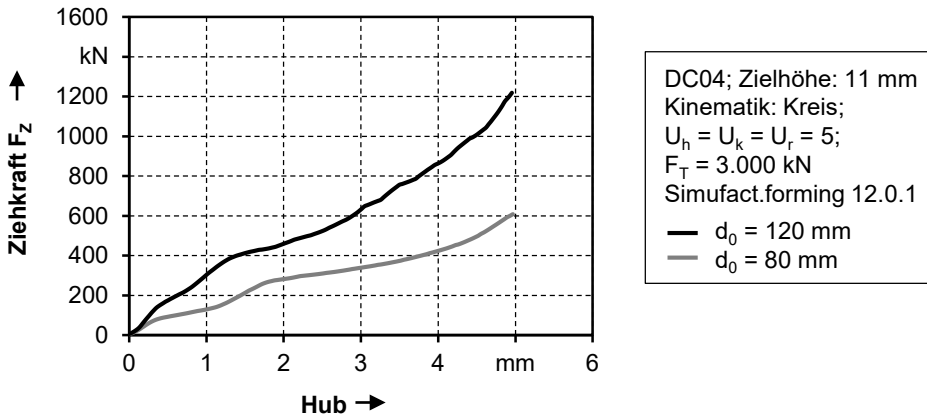


Bild 69: Berechneter Kraft-Weg-Verlauf für das Stauchen der skalierten Ronden aus dem numerischen Modell

Basierend auf dem vorherigen Kapitel wurde auch hier eine Zielhöhe von $h_Z = 11$ mm gewählt, um die Bauteile sowohl untereinander als auch zusammenfassend sinnvoll mit den Referenzteilen vergleichen zu können. Es erfolgt eine Gegenüberstellung der Bauteilgeometrien in der radialen Schnittdarstellung. Die qualitative Analyse bestätigt auch die grundsätzliche Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse für den Stauchprozess auf skalierte Geometrien. Während die Zarge des Funktionsbauteils mit verringertem Durchmesser bedingt durch die verhältnismäßig geringe Blechdicke im Randbereich leicht ausknickt, ist die Zarge des Bauteils mit

vergrößertem Durchmesser nahezu vollständig gefüllt, wie in Bild 70 zeigt und entspricht annähernd der in Kapitel 5 eingeführten Sollgeometrie.

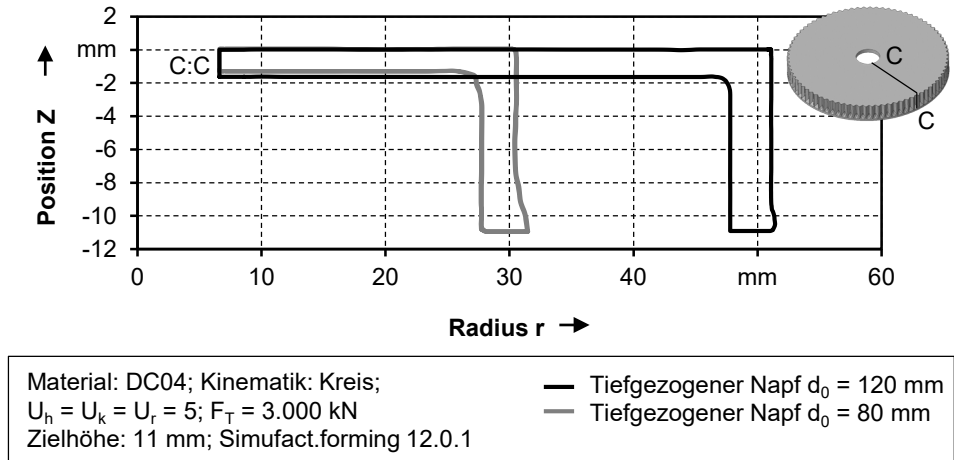


Bild 70: Konturen der gestauchten Bauteile für den vergrößerten und den verkleinerten Halbzeugdurchmesser

Dieses Ergebnis wird durch die Analyse der Volumina in den jeweiligen Bauteilbereichen bestätigt, wie Bild 71 zeigt. Bei beiden Bauteilen nimmt das Volumen in der Zarge während des Stauchens bedingt durch den Materialfluss aus der Zarge zurück in den Bauteilboden wieder leicht ab [23].

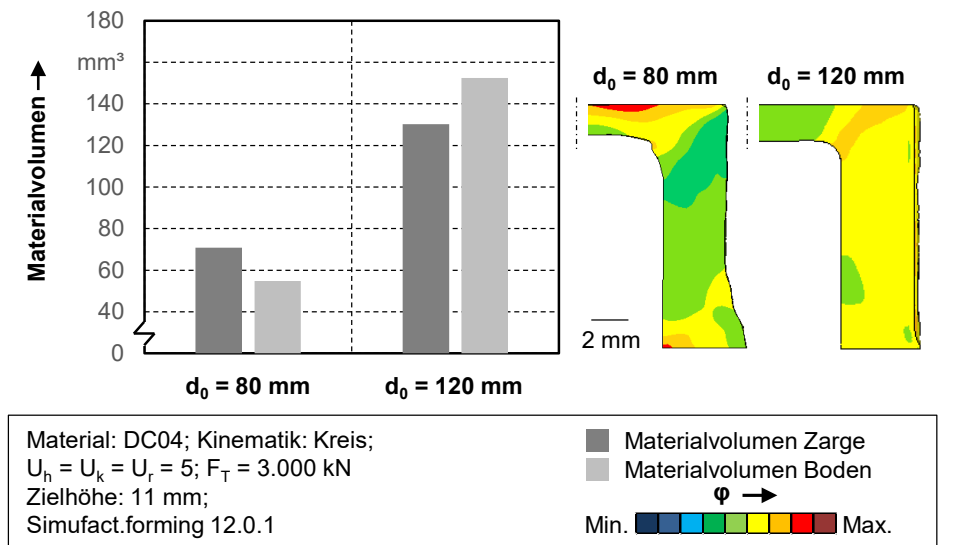


Bild 71: Gegenüberstellung der Materialvolumina für die skalierten Halbzeuge nach Beendigung des Stauchprozesses

Dieser Effekt, welcher bereits zuvor beschrieben und erläutert wurde, tritt demnach übertragbar auch bei skalierten Bauteilgeometrien auf. Das Volumen in der Zarge der Funktionsbauteile liegt bei $V = 70,90 \text{ mm}^3$ für $d_o = 80 \text{ mm}$ und bei $V = 130,30 \text{ mm}^3$ für $d_o = 120 \text{ mm}$. Diese Werte entsprechen Formfüllungen von 84 Prozent beziehungsweise 99 Prozent. Des Weiteren zeigt Bild 71 die Umformgradverteilungen für die Zargen der beiden gestauchten Bauteile. Hier kann für den Rondendurchmesser von $d_o = 80 \text{ mm}$ auch nach dem finalen Prozessschritt eine deutlich größere Inhomogenität hinsichtlich der auftretenden Dehnungen festgestellt werden als für den Rondendurchmesser von $d_o = 120 \text{ mm}$. Diese ist zum einen durch die vorherigen Prozessschritte, zum anderen aber auch durch die unzureichende Stoffflusskontrolle während des Stauchens zu erklären. Für den vergrößerten Durchmesser lässt sich eine deutlich homogenere Verteilung nachweisen, welche auch im Hinblick auf einen Einsatz der Bauteile günstiger erscheint. An dieser Stelle ist festzuhalten, dass während der Auslegung zu prüfen ist, ob sich ein prozessangepasstes Halbzeug entsprechend der entwickelten Methodik fertigungstechnisch herstellen lässt.

7.2 Herstellung und Weiterverarbeitung prozessangepasster Halbzeuge unter Einsatz von Stahlgütern höherer Festigkeit

Je nach Anwendungsfall können Festigkeiten gefordert sein, welche sich, trotz der starken Kaltverfestigung des Werkstoffs durch einen weichen Tiefziehstahl, wie den zuvor eingesetzten DCo4, nicht erreichen lassen. Um die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf Stahlgütern höherer Festigkeit nachzuweisen, wurden zudem der mikrolegierte Stahlwerkstoff HC260 LA sowie der Dualphasenstahl DP600 eingesetzt. Für die experimentellen Umformversuche wurde der im fünften Kapitel der Arbeit ausgelegte Werkzeugeinsatz verwendet, um die prozessangepassten Halbzeuge aus den Stahlronden herzustellen. Hierbei wird dem Vorgehen aus Kapitel 6 gefolgt, in welchem die Sollblechdicke im Aufdickungsbereich sukzessive bis zu einer Blechdicke von $s = 2,5 \text{ mm}$ gesteigert wurde. Die Ausgangsblechdicke der eingesetzten Ronden liegt ebenfalls bei $s_o = 2 \text{ mm}$ und der Ausgangsdurchmesser beträgt $d_o = 100 \text{ mm}$. Für die Weiterverarbeitung kommt das in den vorherigen Kapiteln eingesetzte Werkzeug für die Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen zum Einsatz. Für Erweiterungen des experimentell abbildbaren Versuchsraumes wird auf das aufgebaute FE-Modell zurückgegriffen.

7.2.1 Herstellung prozessangepasster Halbzeuge aus Stahlgütern höherer Festigkeit

Die Überprüfung der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse erfolgt analog zum Vorgehen im vorherigen Kapitel. Demnach wird die Materialvorverteilung für die Werkstoffe höher Festigkeit schrittweise gesteigert, um die Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften zu analysieren. Die Soll- und Istwerte für die gemittelte Blechdicke im Randbereich sowie die gewählten Prozessparameter sind Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Auflistung der mittleren Halbzeug- Sollblechdicken im Randbereich mit den gewählten Prozessparametern für das Taumelpressen von Stahlwerkstoffen höherer Festigkeit

s _{Soll}	Werkstoff	s in mm	Taumelkraft in kN	Taumelrunden
2,1	HC260 LA	2,08 ±0,00	1.000	5-1-1
	DP600	2,11 ±0,01	3.500	5-1-1
2,2	HC260 LA	2,22 ±0,01	2.000	5-1-1
	DP600	2,22 ±0,02	4.000	2 x 5-1-1
2,3	HC260 LA	2,29 ±0,01	2.500	5-1-1
	DP600	2,32 ±0,04	4.000	3 x 10-1-1
2,4	HC260 LA	2,42 ±0,01	3.500	5-1-1
	DP600	2,38 ±0,04	4.000	5 x 30-1-1
2,5	HC260 LA	2,47 ±0,01	4.000	2 x 5-1-1
	DP600	-	-	-

Ausgehend von den gleichen Rondenabmessungen und demselben Werkzeugaufbau wurden die Aufdickungen im Randbereich ebenfalls in Zehntelmillimeterschritten von der Ausgangsblechdicke $s_0 = 2$ mm bis hin zur maximalen Dicke von $s_{\max} = 2,5$ mm gesteigert. Für den mikrolegierten HC260 LA ließen sich sämtliche Soll-Blechdicken über eine Steigerung der Umformkraft sowie eine Steigerung der Taumelrundenanzahl erreichen. Für den Dualphasenstahl DP600, welcher die im Vergleich höchste Festig-

keit aufweist, konnte die maximale Aufdickung auch bei maximaler Taumelkraft und über 150 Taumelrunden hingegen nicht erzielt werden. Die durch den Stößel bei maximaler Kraft induzierte Spannung reicht demnach nicht mehr aus um die Fließspannung des Materials, welche unter zunehmender Plastifizierung ansteigt [80], bis zur vollständigen Füllung der Kavität zu überwinden. Aus diesem Grund werden die experimentellen Untersuchungen nachfolgend um eine numerische Analyse erweitert, welche eine beliebige Steigerung der maximalen Stößelkraft im Taumelprozess zulässt. Da die gemittelten Blechdicken nur bedingt aussagekräftig sind und lediglich den Ausgangspunkt der Untersuchungen darstellen, werden auch die getaumelten Halbzeuge aus den Stahlwerkstoffen höherer Festigkeit geometrisch und mechanisch analysiert. Die geometrische Analyse der resultierenden Halbzeuggeometrien erfolgt zunächst anhand der Halbzeugkonturen, welche in Bild 72 dargestellt sind. Diese zeigen die Konturen entsprechend der Werte aus Tabelle 5. Die Ergebnisse bestätigen die gewonnenen Erkenntnisse aus [112], nach welchen sich Werkstoffe höherer Festigkeit bei gesteigerter Kraft, gegebenenfalls auch bei zusätzlich erhöhter Taumelrundenzahl, durch den Taumelprozess umformen lassen. Ebenso wie für den weichen Tiefziehstahl lässt sich die Materialvorverteilung schrittweise steigern. Die verstärkte Ausdünnung des Werkstoffs im Zentrum der Ronden ist ebenso erkennbar, wie die erhöhte Blechdicke auf der Einlaufseite der Kavität. Diese Effekte sind charakteristisch für das Taumelpressen unter den gewählten Randbedingungen und treten übertragbar auf.

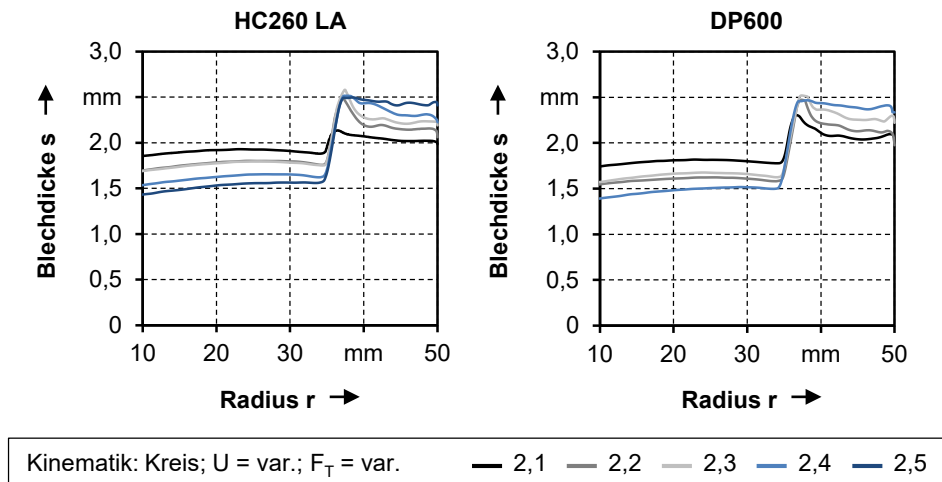


Bild 72: Resultierende geometrische Halbzeugeigenschaften nach dem Taumelpressen für Stahlwerkstoffe höherer Festigkeit

Zurückzuführen sind diese Effekte auf das verstärkte Ausdünnen des Materials in der Rondemitte [109] und die Ausführungen unter Abschnitt 5.2. Entsprechend der abgewickelten Blechdickenverläufe steigt das Volumen im Randbereich der Ronde für beide Werkstoffe an. Wie Bild 73 zu entnehmen ist, beträgt der Wert bei einer Ziel-Blechdicke von $s = 2,1$ mm für den mikrolegierten HC260 LA $V = 87,36$ mm³ und liegt somit etwa 3,5 Prozent über dem Materialvolumen, welches die konventionelle Ronde im Randbereich aufweist. Bei einer Ziel-Blechdicke von $s = 2,5$ mm liegt dieser Wert mit $V = 104,92$ mm³ etwa 25% über dem Referenzwert und entspricht einer Materialvorverteilung von über 97% bezogen auf das Sollvolumen der Bauteilzarge. Den Erkenntnissen aus Kapitel 6 folgend ist anzunehmen, dass sich durch diese Vorverteilung im Nachgang keine vollständige Formfüllung erreichen lässt, da diese eine höhere Vorverteilung erfordert. Die Werte für den Dualphasenstahl DP600 liegen, abgesehen von dem Zielwert von $s = 2,5$ mm, welcher nicht erreicht wurde, tendenziell leicht über den Werten für den mikrolegierten Stahl. In diesem Zusammenhang ist nochmals zu betonen, dass ein Erreichen gleicher Mittelwerte mit enormen Versuchsaufwand verbunden wäre, welcher hinsichtlich der zu erwartenden Erkenntnisse keinen Mehrwert bietet.

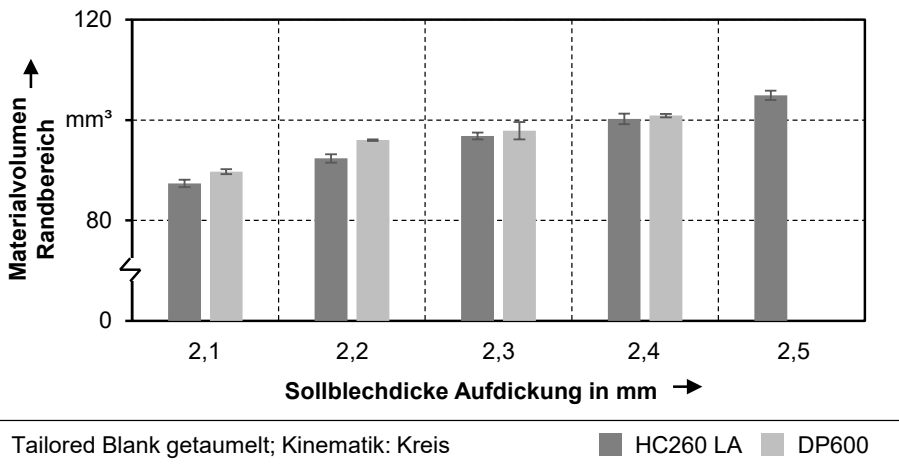


Bild 73: Gegenüberstellung der Materialvolumina prozessangepasster Halbzeuge für Stahlwerkstoffe höherer Festigkeit mit zunehmender Materialvorverteilung

Die Analyse der mechanischen Halbzeugeigenschaften für die durchgeführten Umformversuche erfolgt, wie in den vorangegangenen Abschnitten, anhand der ausgewerteten Mikrohärtmessungen für die Rondemitte sowie für den Randbereich. Die gemittelten Werte für die beiden Halbzeugbereiche sowie die dazugehörigen Standardabweichungen sind in Bild

74 dargestellt. Die Diagramme lassen vorab die unterschiedlichen Festigkeitsklassen der beiden Werkstoffe erkennen, da die für den Dualphasenstahl bestimmten Mittelwerte jene des mikrolegierten Stahls signifikant übersteigen. Verantwortlich dafür sind die in Abschnitt 4.3 vorgestellten Festigkeiten sowie das Verfestigungsverhalten der eingesetzten Werkstoffe. Die erhöhte Festigkeit der Halbzeuge aus dem Dualphasenstahl wird in erster Linie durch die martensitische Zweitphase hervorgerufen. Für die Erhöhung der Blechdicke bei den jeweiligen Versuchswerkstoffen lassen sich jedoch nur tendenzielle Anstiege nachweisen.

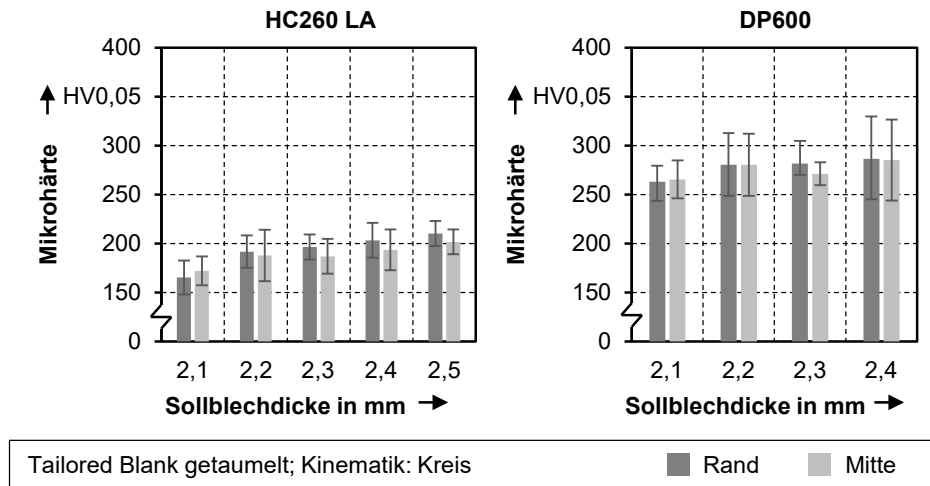


Bild 74: Gemessene Mikrohärtigkeit für Halbzeuge aus Stahlwerkstoffen höherer Festigkeit nach dem Taumelpressen

Dieses Verhalten entspricht den Ergebnissen für den Referenzwerkstoff und ist somit übertragbar auch für Werkstoffe höherer Festigkeit nachweisbar. Für den mikrolegierten HC260 LA liegt die gemittelte Mikrohärtigkeit für die Zielblechdicke $s = 2,1$ mm nach dem Taumelpressen bei $165 \text{ HV}_{0,05} \pm 17$ und damit 21% über der Ausgangshärte. Für die höchste Maximalvorverteilung von $s = 2,5$ mm steigt die Mikrohärtigkeit auf $210 \text{ HV}_{0,05} \pm 13$ an. Der Dualphasenstahl verfestigt auf der kleinsten Stufe um fast 24% auf $263 \text{ HV}_{0,05} \pm 16$ und auf der höchsten Stufe auf $287 \text{ HV}_{0,05} \pm 19$.

7.2.2 Weiterverarbeitung prozessangepasster Halbzeuge aus Stahlgütern höherer Festigkeit zu Funktionsbauteilen

Die prozessangepassten Halbzeuge werden nun entlang der Prozesskette über die einstufige Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen zu Funktionsbauteilen weiterverarbeitet. Wie bereits im vorherigen Kapitel

wird der Einfluss der geometrischen und mechanischen Eigenschaften auf die resultierenden Bauteileigenschaften untersucht, um die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf Stahlwerkstoffe höherer Festigkeit überprüfen zu können. Um eine durchgängige Analyse der Eigenschaften vornehmen zu können, wird die einstufige Prozesskombination, analog zu den Versuchen in vorherigen Kapiteln, nach Beendigung der Tiefziehoperation unterbrochen, um die Näpfe zu entnehmen und zu untersuchen. Für die experimentellen Umformversuche wurden sowohl dieselbe Versuchsanlage als auch derselbe Werkzeugaufbau verwendet, wie für die Untersuchungen im fünften und sechsten Kapitel der vorliegenden Arbeit. Der Ziehstempelradius liegt dementsprechend bei $r = 1 \text{ mm}$ und die Zielhöhe der gestauchten Bauteile liegt bei $h_{\text{Ziel}} = 11 \text{ mm}$.

7.2.2.1 Tiefziehen

Zu Beginn der Analyse der Napfeigenschaften nach dem Tiefziehen wird zunächst der Einfluss der jeweiligen Werkstoffe in Verbindung mit den Halbzeugeigenschaften auf den Umformprozess untersucht. Die Ziehkräfte, welche zur Herstellung der Napfgrundform erforderlich sind, zeigt Bild 75 sowohl für den mikrolegierten HC260 LA als auch für den Dualphasenstahl DP600.

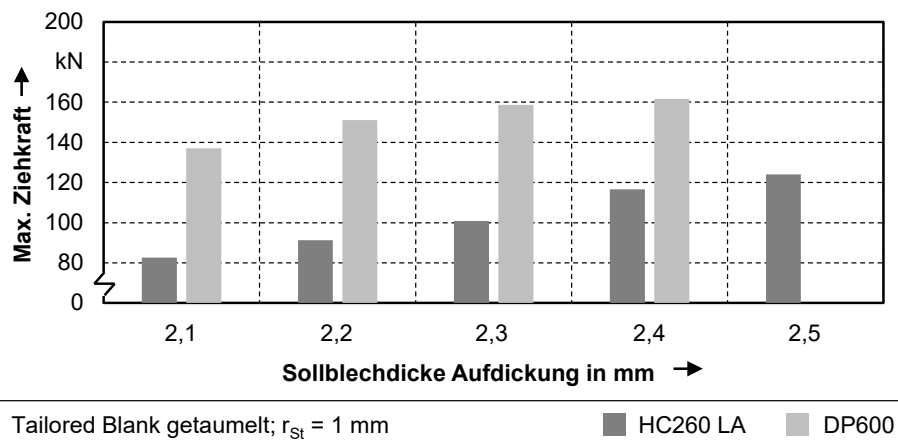


Bild 75: Gegenüberstellung der maximal benötigten Ziehkräfte für getaumelte Halbzeuge mit zunehmender Materialvorverteilung aus Stahlwerkstoffen höherer Festigkeit

Für beide Versuchswerkstoffe lässt sich mit zunehmender Materialvorverteilung auch ein Anstieg der benötigten Umformkraft nachweisen, welcher den Erkenntnissen aus Kapitel 6 entspricht. Dieser Zusammenhang besteht

Die Analyse der geometrischen Eigenschaften der tiefgezogenen Näpfe wird ergänzt durch die Auswertung der Volumina des Materials in der Napfzarge, welche Bild 77 entnommen werden kann. Die Erkenntnisse aus dem vorherigen Kapitel hinsichtlich des Materialvolumens in der Napfzarge sind für die zusätzlichen Versuchswerkstoffe übertragbar. Auch die Stahlwerkstoffe höherer Festigkeit weisen, bedingt durch die auftretenden Spannungs- und Dehnungszustände beim Tiefziehen, im Vergleich zum prozessangepassten Halbzeug eine Zunahme des Materialvolumens im Bereich der Napfzarge auf. Für eine Sollblechdicke von $s = 2,1$ mm beträgt das Materialvolumen in der Zarge $V = 89,68$ mm³ für den mikrolegierten Stahl und $V = 91,94$ mm³ für den Dualphasenstahl. Die Anstiege des Volumens im Bereich außerhalb von $r = 37,75$ mm liegen, wie auch beim weichen Tiefziehstahl bei knapp unter 3%. Das Materialvolumen in den 4,5°-Segmenten steigt erwartungsgemäß mit zunehmender Materialvorverteilung weiter an. Für die höchste Materialvorverteilung mit einer Sollblechdicke von $s = 2,5$ mm ergibt sich in der für den HC260 LA ein Volumen von $V = 108,74$ mm³. Der Anstieg gegenüber der getaumelten Ronde liegt im entsprechenden Bereich bei 3,6% und weicht somit lediglich 0,1% vom Anstieg des Volumens beim Referenzwerkstoff DCo4 ab. Wie bereits im vorherigen Abschnitt in Bezug auf die prozessangepassten Halbzeuge erläutert, ist eine Einstellung gleicher Volumina für die einzelnen Stufen möglich, aber nicht zielführend im Kontext der durchgeführten Untersuchungen.

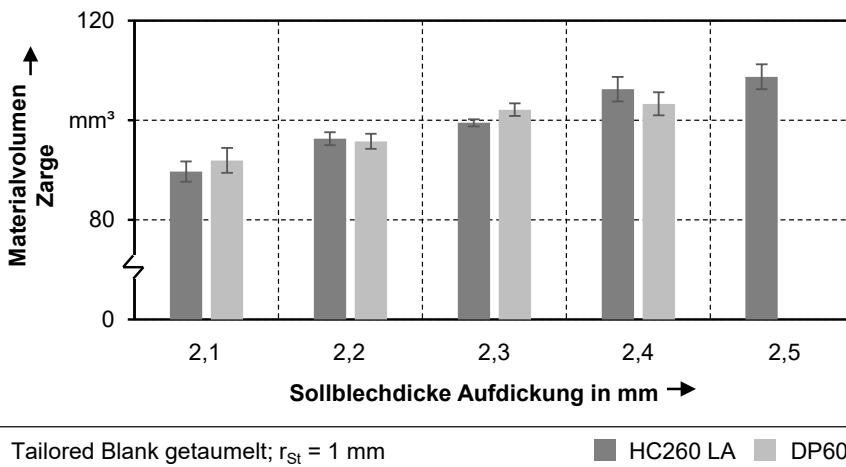


Bild 77: Gegenüberstellung der Materialvolumina tiefgezogener Näpfe für Stahlwerkstoffe höherer Festigkeit mit zunehmender Materialvorverteilung

Zur Sicherstellung der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften wurden an den gezogenen Näpfen Mikrohärtemessungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigt Bild 78. Für beide Werkstoffe steigt die gemittelte Mikrohärte im Zargenbereich bedingt durch die auftretenden Dehnungen an. Die höchsten berechneten Werte liegen bei 224,60 HV_{0,05} für den HC260 LA und bei 315,30 HV_{0,05} für den DP600. Im Verhältnis zum vorherigen Prozessschritt repräsentieren diese Werte einen Anstieg von 7%, beziehungsweise 10%. Tendenziell ist bei geringerer Materialvorverteilung eine höhere Verfestigung des Werkstoffs während des Tiefziehens feststellbar. Hervorgerufen wird diese, da durch eine erhöhte Verfestigung die Materialausdünnung im Bereich des Ziehstempelradius abnimmt [132]. Die Verfestigung wirkt als Fließbehinderung und reduziert die Plastifizierung in diesem Bereich. Damit verhalten sich die prozessangepassten Halbzeuge aus Blechwerkstoffen höherer Festigkeit im Tiefziehprozess übertragbar zu jenen aus dem Referenzwerkstoff DCo₄.

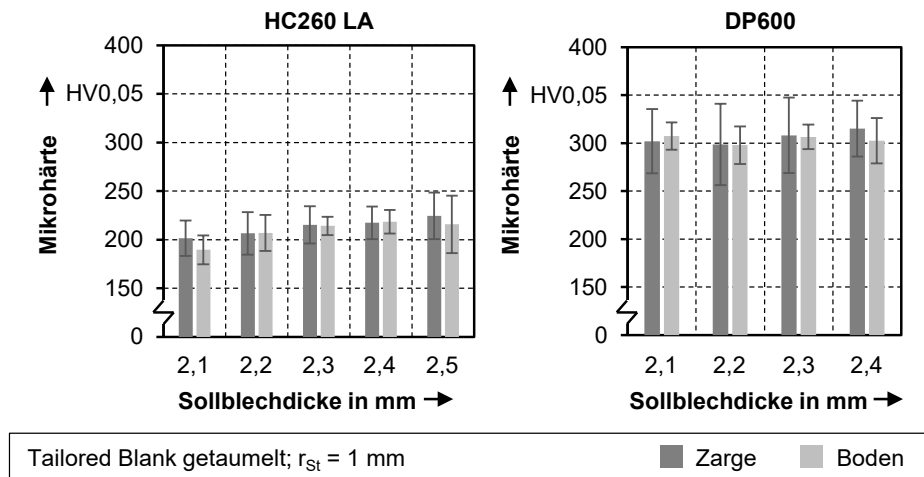


Bild 78: Gemessene Mikrohärte für Halbzeuge aus Stahlwerkstoffen höherer Festigkeit nach dem Tiefziehen

7.2.2.2 Stauchen

Im abschließenden Stauchprozess erhalten die tiefgezogenen Näpfe ihre finale Geometrie. Zunächst werden, wie bereits für den vorherigen Prozessschritt, die maximal benötigten Stößelkräfte analysiert, zielführende Ergebnisse für Prozess- und Werkzeugauslegung darzulegen. Bild 79 zeigt die benötigte Stauchkraft für die beiden Versuchswerkstoffe bei zunehmender

Materialvorverteilung. Analog zu den Ergebnissen für den Referenzwerkstoff führt eine zunehmende Materialvorverteilung erwartungsgemäß auch bei den beiden weiteren Versuchswerkstoffen zu einem gesteigerten Kraftbedarf im Stauchprozess. Bedingt durch die unterschiedliche Festigkeit liegen die Werte für den Dualphasenstahl auf den jeweiligen Stufen stets deutlich über jenen für den mikrolegierten Stahl. Das Stauchen der Näpfe mit der geringsten Materialvorverteilung auf die Zielhöhe von $h_Z = 11$ mm erfordert beim DP600 etwa doppelt so viel Kraft wie beim HC260 LA. Hintergrund ist neben der grundsätzlich höheren Fließspannung die erhöhte Verfestigung des Materials bei geringen Umformgraden. Bei den höchstmöglichen Materialvorverteilungen ergeben sich maximal benötigte Stößelkräfte von $F_S = 1219,49$ kN für den DP600, beziehungsweise $F_S = 1.066,06$ kN für den HC260 LA. Der Unterschied zwischen den aufgezzeichneten Werten nimmt ab einer Sollblechdicke von $s = 2,4$ mm erwartungsgemäß ab. Dieser Effekt lässt sich durch die in Bild 77 aufgezeigten Materialvolumina erklären, da ab einer Dicke von $s = 2,4$ mm für den mikrolegierten Stahl tendenziell ein höheres Volumen vorliegt. Dieses erhöhte Materialvolumen führt, bedingt durch die in [23] beschriebenen Mechanismen, zu einem verstärkten Anstieg der benötigten Umformkraft im Stauchprozess.

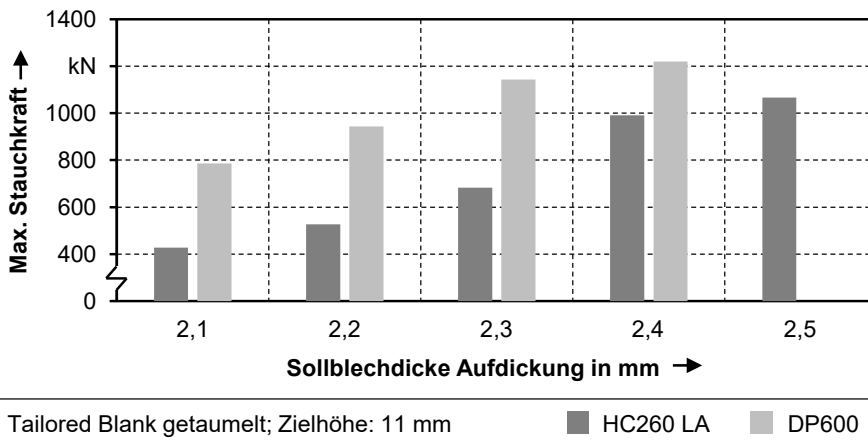


Bild 79: Gegenüberstellung der maximal benötigten Stauchkräfte für getaumelte Halbzeuge mit zunehmender Materialvorverteilung aus Stahlwerkstoffen höherer Festigkeit

Die Analyse der resultierenden Bauteilgeometrien erfolgt zunächst wieder anhand der Kontur der Bauteilzargen in der Schnittdarstellung. Gemäß den Untersuchungen in [23] können grundsätzliche Effekte, wie das Ausknicken der Bauteilzarge unter der Stauchkraft bei verhältnismäßig geringer Blechdicke auch für Werkstoffe höherer Festigkeit identifiziert werden. Die

Analyse der Konturdiagramme in Bild 80 führt zu der Annahme, dass der positive Einfluss der Materialvorverteilung auf die resultierende Formfüllung auch für die weiteren Versuchswerkstoffe bestätigt werden kann. Damit ist eine Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse für das Stauchen von prozessangepassten Halbzeugen aus Werkstoffen höherer Festigkeit grundsätzlich belegt, jedoch gilt es in diesem Zusammenhang die maximal zur Verfügung stehende Taumelkraft als limitierenden Faktor der möglichen Materialvorverteilung zu berücksichtigen. Entsprechend der Materialvorverteilung durch das Taumelpressen und der Auswertung der Volumina nach dem Tiefziehen kann die zuvor getroffene Annahme für die Volumina der untersuchten Bauteile bestätigt werden.

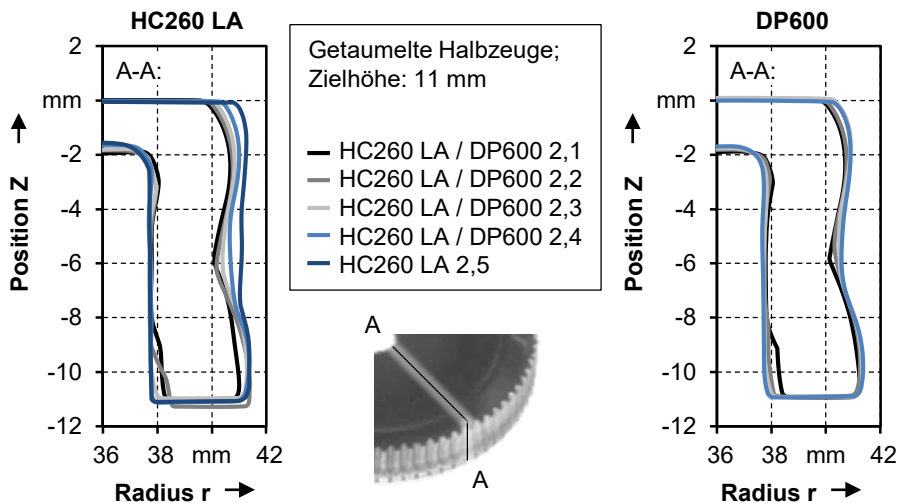


Bild 80: Konturen der gestauchten Bauteile für getaumelte Halbzeuge mit zunehmender Materialvorverteilung aus Stahlwerkstoffen höherer Festigkeit

Das Materialvolumen in der Bauteilzarge lässt sich durch eine prozessangepasste Materialvorverteilung auch für Werkstoffe höherer Festigkeit steigern. Übertragbar zum Referenzwerkstoff lässt sich zudem feststellen, dass auch bei den Vergleichswerkstoffen ein Materialfluss aus der Zarge in den Bauteilboden auftritt, wie unter Abschnitt 5.3.3 beschrieben. Allerdings ist dieser Effekt, wie in [23] für konventionelle Halbzeuge nachgewiesen, schwächer ausgeprägt, da die höhere Fließspannung des Materials dem Materialfluss entgegenwirkt. Somit geht das Volumen in der Zarge im Vergleich zum tiefgezogenen Napf ab einer mittleren Blechdicke von

s = 2,3 mm zurück, verbleibt allerdings über dem vorverteilten Materialvolumen der prozessangepassten Halbzeuge. Die gemessenen Ergebnisse zeigt Bild 81.

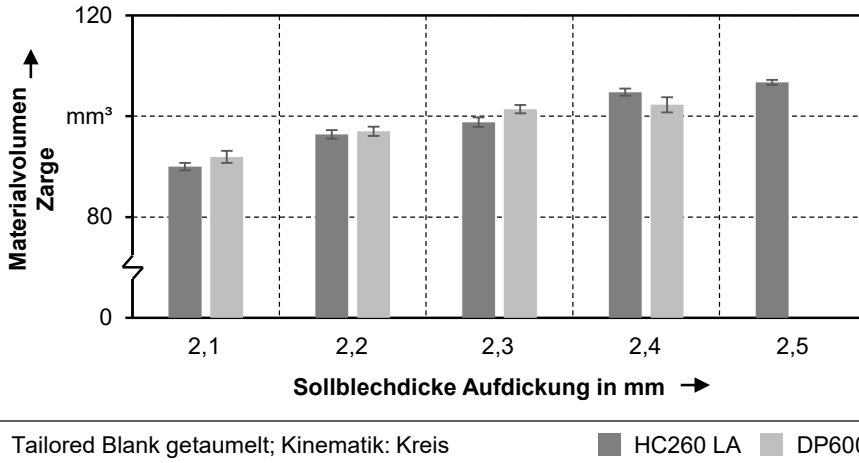


Bild 81: Gegenüberstellung der Materialvolumina gestauchter Bauteile für Stahlwerkstoffe höherer Festigkeit mit zunehmender Materialvorverteilung

Bedingt durch die Umformung, welche den jeweiligen Näpfen ihre finale Geometrie verleiht, ist analog zu den vorher beschriebenen Versuchen auch im letzten Prozessschritt eine Steigerung der Härtewerte feststellbar. Die Analyse der mechanischen Eigenschaften der finalen Bauteilgeometrien für die Vergleichswerkstoffe bestätigt die zuvor gezeigten Ergebnisse für den Referenzwerkstoff DCo₄, nach denen sich für die einzelnen Stufen keine signifikanten Unterschiede nachweisen lassen. Des Weiteren ergeben sich auch für die Stahlwerkstoffe höherer Festigkeiten tendenziell höhere Härtewerte im Bereich der Bauteilzarge, da in diesem Bereich eine im Vergleich zum Bauteilboden erhöhte Plastifizierung auftritt. Die mittlere Härte in der Zarge steigt bei den Bauteilen aus dem mikrolegierten Stahl im Vergleich zur vorausgegangenen Tiefziehoperation zwischen 10% und 15% an. Die relative Zunahme der Mikrohärtigkeit für den Dualphasenstahl liegt für die jeweiligen Stufen der Materialvorverteilung zwischen 7% und 11%. Die maximalen Härtewerte in der Zarge betragen 250,30 HV_{0,05} ±25,5 beziehungsweise 343,00 HV_{0,05} ±23,6. Ursächlich für die tendenziell etwas geringere Festigkeitssteigerung des Dualphasenstahls sind dessen mechanische Eigenschaften sowie die Abweichungen hinsichtlich des Materialvolumens in den einzelnen Bauteilbereichen. Diese Unterschiede führen, wie in Kapitel 6 dargestellt, dazu, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Mikrohärtigkeit in den jeweiligen Bauteilbereichen

feststellbar sind. Sämtliche Mittelwerte sowie die dazugehörigen Standardabweichungen sind Bild 82 zu entnehmen.

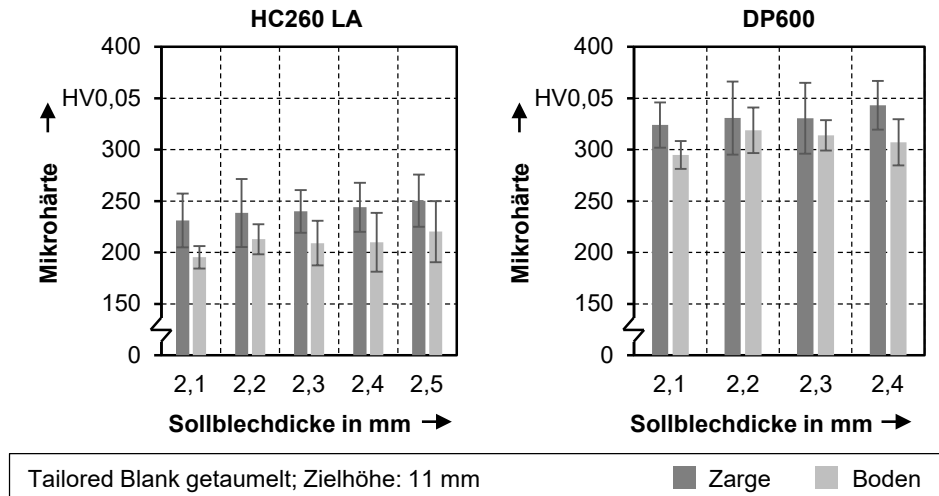


Bild 82: Gemessene Mikrohärte für Halbzeuge aus Stahlwerkstoffen höherer Festigkeit nach dem Stauchen

Abschließend wird, unter Zuhilfenahme des numerischen Prozessmodells, überprüft, ob sich für den Dualphasenstahl, entsprechend der Erkenntnisse aus [112] eine erhöhte Materialvorverteilung unter gesteigerter Stößelkraft erreichen lässt. Die maximal zur Verfügung stehende Kraft von $F_{\max} = 4.000 \text{ kN}$ reichen, wie vorab gezeigt, nicht aus, um den ausgelegten Werkzeugeinsatz vollständig zu füllen und bedingen somit bei der gewählten Zielhöhe eine verhältnismäßig geringere Füllung der Zahnkavität. Der linearen Interpolation aus [112] folgend, wird die Stößelkraft im Taumelprozess auf $F_{\max} = 6.000 \text{ kN}$ gesteigert. Die Erhöhung der maximalen Taumelkraft führt zu einem Anstieg der gemittelten Blechdicke im Aufdickungsbereich auf $s = 2,48 \text{ mm}$ und ermöglicht somit annähernd das Erreichen der Zielblechdicke von $s = 2,5 \text{ mm}$. Das vorverteilte Volumen beträgt $V = 103,64 \text{ mm}^3$ und entspricht, bezogen auf die Sollgeometrie, einer knapp 96%-igen Materialvorverteilung. Während des Tiefziehprozesses steigt das Materialvolumen in der Zarge auf $V = 107,16 \text{ mm}^3$ an. Wie zuvor beschrieben, ist diese Zunahme durch die auftretenden Spannungs- und Dehnungszustände zu erklären. Ebenfalls durch diese bedingt, ist die Abnahme des Materialvolumens im Stauchprozess. Bedingt durch die hohe Verfestigung sowie die große Kontaktfläche fließt ein Teil des Materials unter Zunahme der Stauchkraft zurück in den Bauteilboden. Dennoch wurde in der nume-

rischen Stoffflussanalyse eine Formfüllung von 96% erreicht. Die resultierenden Konturen des getaumelten Halbzeugs, des tiefgezogenen Napfes und des gestauchten Bauteils sind in Bild 83 dargestellt. Durch die Erweiterung des Versuchsraums um die numerische Stoffflussanalyse mit erhöhter Taumelkraft lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich des Potentials prozessangepasster Halbzeuge auch auf den Vergleichswerkstoff mit der höchsten Festigkeit übertragen.

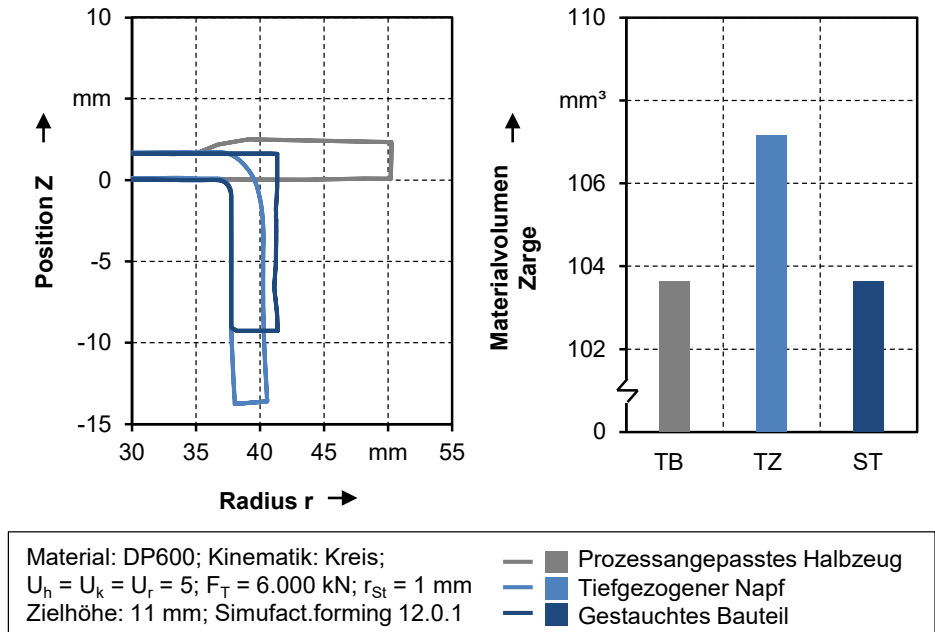


Bild 83: Gegenüberstellung der Konturen und der jeweiligen Volumina für die einzelnen Schritte der Prozesskette bei erhöhter Taumelkraft für den Dualphasenstahl

7.3 Zusammenfassende Bewertung

Im vorliegenden Kapitel wurden das Vorgehen zur Untersuchung der Einflüsse geometrischer und mechanischer Eigenschaften prozessangepasster Halbzeuge auf die resultierenden Bauteileigenschaften aus dem vorherigen Kapitel sowohl auf skalierte Bauteilgeometrien als auch auf den Einsatz von Vergleichswerkstoffen höherer Festigkeit übertragen. Die durchgeführten experimentellen und numerischen Untersuchungen bestätigen, dass die zuvor gewonnenen Erkenntnisse auch auf skalierte Bauteilgeometrien sowie auf die Anwendung von Stahlwerkstoffen höherer Festigkeit übertragbar sind und sich auch für diese durch den Einsatz prozessangepasster Halbzeuge verbesserte Bauteileigenschaften erzielen lassen. Begrenzt wird

dieses Potential in erster Linie durch das zur Verfügung stehende Materialvolumen sowie durch die verfügbare Maximalkraft bei der Materialverteilung.

Bei Verringerung des Außendurchmessers der Ausgangsrunde verschiebt sich, bei gleichbleibender Werkzeugkavität, das Verhältnis des Materialvolumens im radial inneren und äußeren Rondensbereich. Diese wird insofern ungünstiger, als dass im inneren Bereich verhältnismäßig weniger Materialvolumen zur Füllung der Werkzeugkavität zur Verfügung steht. Für Werkstoffe höherer Festigkeit wird die Materialverteilung in erster Linie durch die verfügbare Taumelkraft beschränkt. Durch eine Erhöhung der Taumelkraft über die verfügbare Anlagenkraft hinaus, konnte im numerischen Modell auch für den Dualphasenstahl eine entsprechend hohe Materialverteilung realisiert werden. Als Nachweis der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse zeigt Bild 84 den hypothetischen Zusammenhang aus dem vorherigen Kapitel mitsamt den experimentellen und numerischen Ergebnissen für Materialverteilung und Formfüllung.

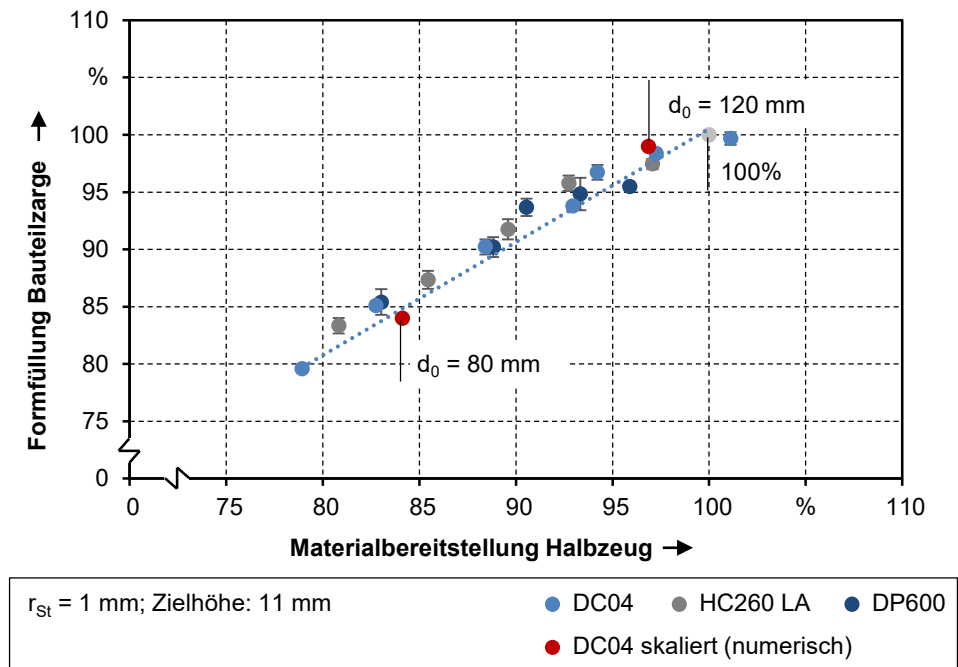


Bild 84: Bestätigung der funktionalen Zusammenhänge für den Einsatz von skalierten Geometrien und Stahlwerkstoffen höherer Festigkeit

Des Weiteren kann die Annahme bestätigt werden, dass die finalen Bauteile durch die verbesserte Stoffflusskontrolle keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich ihrer Verfestigung aufweisen. Wie bereits in Kapitel 6 nachgewiesen, lassen sich durch die unkontrollierte Deformation auf der einen Seite und der hohen Materialvorverteilung auf der anderen Seite keine signifikanten Unterschiede nachweisen. Eine geringe Materialvorverteilung geht mit einer geringen Festigkeitssteigerung in der Halbzeugherstellung einher. Ein hoher Anteil unkontrollierter Stoffflussanteile und das dadurch bedingte Ausknicken führen jedoch zu einer hohen Festigkeitssteigerung beim Stauchen. Für eine hohe Materialvorverteilung tritt bereits zu Beginn der Prozesskette eine vergleichsweise hohe Festigkeitssteigerung auf. Beim abschließenden Stauchprozess fällt diese, bedingt durch deutlich verkürzte Fließwege, wesentlich geringer aus. Als Nachweis sind die mittleren Mikrohärtewerte der Bauteilzargen für die unterschiedlichen Stufen der Materialvorverteilung und die drei eingesetzten Versuchswerkstoffe in Bild 85 dargestellt.

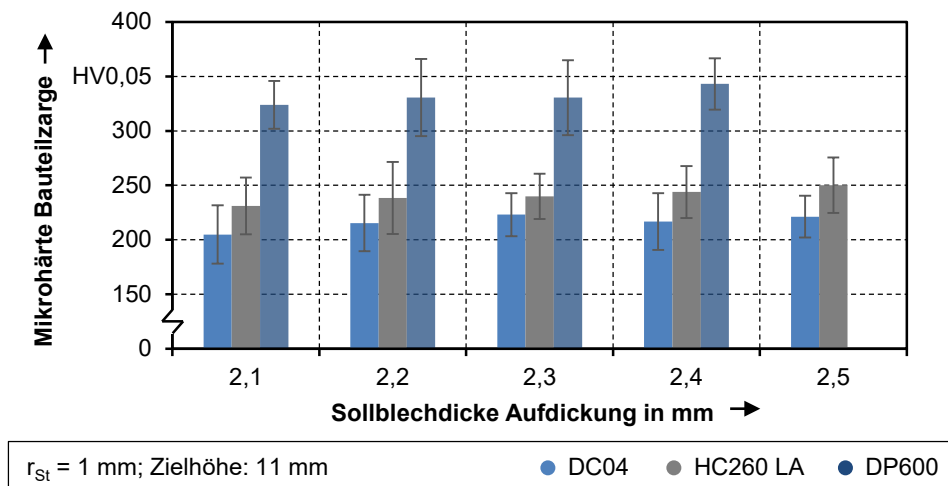


Bild 85: Gemittelte Mikrohärtigkeit im Zargenbereich für die unterschiedlichen Stufen der Materialvorverteilung der drei Versuchswerkstoffe für die Zielhöhe von 11 Millimetern

Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus dem vorherigen Kapitel auf skalierte Geometrien und den Einsatz von Werkstoffen höherer Festigkeit wurde somit nachgewiesen und auch die funktionalen Zusammenhänge wurden bestätigt. Im nachfolgenden Kapitel wird das Prozessverständnis um den Einsatz einer weiteren Werkstoffklasse sowie um die Anwendung einer lokalen Kurzzeitlaserwärmebehandlung erweitert.

8 Erweiterung des Werkstoffspektrums um eine ausscheidungshärtbare Aluminiumlegierung und Erweiterung der Prozessgrenzen durch den Einsatz lokaler Wärmebehandlung

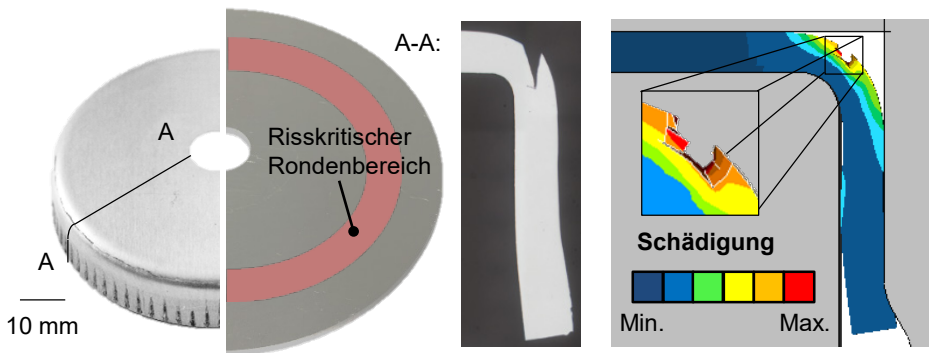
Wie bereits in den Abschnitten 2.3.2 und 2.3.3 beschrieben wurden neben den untersuchten Stahlwerkstoffen unterschiedlicher Festigkeit auch Aluminiumlegierungen eingesetzt, um das Prozessverständnis bezüglich des Einsatzes dieser Werkstoffklasse zu erweitern. Bekannte Anwendungsfälle für außenverzahnte Funktionsbauteile aus Aluminiumlegierungen stellen Zahnscheiben und Nockenwellenräder dar [133], welche näherungsweise der untersuchten Modellgeometrie entsprechen. Im Rahmen der Untersuchungen soll durch eine Kurzzeit-Laserwärmebehandlung zunächst eine versagensfreie Umformung einer ebenen Ronde realisiert werden, um diesen Ansatz anschließend auf den Einsatz von Tailored Blanks aus einer Aluminiumlegierung der 6000er-Serie zu übertragen.

8.1 Identifikation von Prozessgrenzen für die ausscheidungshärtbare Aluminiumlegierung AA6016 in der Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen

Die Aluminiumlegierung AA6016, welche gute Umformeigenschaften mit hoher Korrosionsbeständigkeit verbindet, findet im Karosseriebau Anwendung und kann dort durch die kathodische Tauchlackierung eine zusätzliche Festigkeitssteigerung erfahren [134]. Diese Legierung im Zustand T4 wurde ebenfalls in $s_0 = 2$ mm verwendet und soll eine Bewertung der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf eine weitere relevante Aluminiumlegierung ermöglichen, nachdem diese für eine Legierung der 5000er-Serie, wie unter Abschnitt 2.3.2 beschrieben, bereits nachgewiesen werden konnte [84].

Während des Tiefziehens kommt es jedoch bei der ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierung zur Rissbildung, welche durch das gegenüber den Stahlwerkstoffen eingeschränkte Formänderungsvermögen in Verbindung mit dem verhältnismäßig kleinen Ziehstempelradius bedingt ist. An der äu-

ßeren Faser, an welcher, wie unter Abschnitt 5.1 gezeigt, die höchsten Biegespannungen im kritischen Zugbereich auftreten, übersteigen die resultierenden Dehnungen das Formänderungsvermögen des Werkstoffs. Es kommt demnach, wie Bild 86 zeigt, zum Verlust des Werkstoffzusammenhalts. Zum Zwecke einer rissfreien Tiefziehoperation soll das Potential einer lokalen Kurzzeitwärmebehandlung im risskritischen Bereich numerisch evaluiert werden. Um die Rissbildung realitätsnah abbilden zu können, wurde das numerische Modell um das phänomenologische Schädigungskriterium nach Cockcroft-Latham erweitert, welches auf der kritischen Deformationsenergie beruht. Diese berechnet sich aus der größten positiven Hauptachsenspannung und der äquivalenten plastischen Dehnung für ein gegebenes Werkstoffvolumen [135]. Demnach werden druckdominierte Spannungszustände, welche, wie bereits unter Abschnitt 2.2.1 beschrieben weniger kritisch für das Versagen von Werkstoffen in Blechumformverfahren sind, von diesem Modell nicht berücksichtigt. Als kritischer Schädigungswert wurde, basierend auf einem Abgleich numerischer und experimenteller Ergebnisse, $C_{krit} = 0,4$ gewählt. Die numerische Stoffflussanalyse zeigt, wie in Bild 86 dargestellt, den Verlust des Werkstoffzusammenhalts in guter Übereinstimmung zum experimentellen Versuch.



Material: AA6016-T4; $d_0 = 100$ mm; $s_0 = 2$ mm; $r_{St} = 1$ mm; Simufact.forming 12.0.1

Bild 86: Schädigung des experimentellen Napfes im Tiefziehprozess und Abbildung der Schädigung im numerischen Modell als Basis zur Erweiterung der Prozessgrenzen

Die Berechnung der Schädigung ist in diesem Zusammenhang von hoher Relevanz, da das numerische Modell im Nachgang genutzt werden soll, um den Potential einer lokalen Kurzzeit-Laserwärmebehandlung zur Erweiterung der identifizierten Prozessgrenzen zu bewerten. Grundlegende Voraussetzung ist zunächst jedoch die realitätsnahe Abbildung des Prozesses.

Basierend auf diesen Ergebnissen wird nachfolgend, wie ebenfalls in Bild 86 zu sehen, der risskritische Bereich definiert, um diesem die Eigenschaften des Werkstoffs unter Einfluss der lokalen Laser-Kurzzeitwärmebehandlung zuzuweisen und die Auswirkungen auf den gezogenen Napf zu untersuchen.

8.2 Anwendung lokaler Kurzzeitwärmebehandlung zur Erweiterung der identifizierten Prozessgrenzen

Im Zusammenhang mit der Erweiterung der Formgebungsgrenzen von ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen der 6000er-Serie wurde das Potential einer lokalen Kurzzeit-Laserwärmebehandlung, wie in Abschnitt 2.2.3 ausgeführt, bereits erfolgreich nachgewiesen. Den nachfolgenden Ausführungen liegt demnach die Annahme zugrunde, dass sich diese Methode auf den ersten Prozessschritt der Verfahrenskombination übertragen lässt und zu einer versagensfreien Umformung beitragen kann. Nach den Erkenntnissen aus [136] ermöglicht eine Wärmebehandlung außerhalb der Umformzone ein verbessertes Nachfließen von Werkstoff und dadurch ein verbessertes Umformergebnis. Allerdings erscheint durch das zuvor gezeigte Fehlerbild, welches vorrangig durch Biegespannungen in der äußeren Faser hervorgerufen wird, eine Erhöhung der Duktilität im Bereich der risskritischen Umformzone, entsprechend des in Bild 86 gekennzeichneten Bereichs, zielführend.

Als Grundlage für die numerische Stoffflussanalyse wurde zunächst, basierend auf den Parametern aus [137], eine Fließkurve aufgenommen, nachdem die Proben zuvor, in Anlehnung an die Ausführungen unter Abschnitt 2.3.3, mit einer Temperatur von $T_{HT} = 400\text{ °C}$ wärmebehandelt wurden. Der Fließbeginn und die Fließspannung wurden durch die Wärmebehandlung von $k_{f0} = 160\text{ MPa}$ auf $k_{f0} = 75\text{ MPa}$ gesenkt. Im numerischen Prozessmodell wurde der Einfluss der Wärmebehandlung über die Zuordnung der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften zu den jeweiligen Rondenbereichen abgebildet. Dem inneren und äußeren Rondenbereich wird der Ausgangszustand T_4 zugeordnet, im Bereich des Ziehstempelradius hingegen wird die verringerte Fließspannung angenommen. Die verringerte Fließspannung wird der Ronde im Bereich T_{HT} zwischen $r = 32,00\text{ mm}$ und $r = 44,00\text{ mm}$ zugeordnet, da eine Spotbreite von 12 mm den Bereich der höchsten Dehnungen abdeckt und sich im Nachgang auch experimentell abbilden lässt. Eine Abbildung des Wärmeübergangsbereiches im numerischen Modell lässt die eingesetzte Software nicht zu, diese

ist zur Abschätzung des Potentials allerdings auch nicht zwingend erforderlich. Die numerische Stoffflussanalyse zeigt für die lokal wärmebehandelte Ronde eine versagensfreie Umformung unter reduzierten Zugspannungen und bestätigt somit die zuvor getroffene Annahme eines verbesserten Prozessergebnisses durch die lokale Kurzzeit-Laserwärmebehandlung. Bild 87 zeigt die im Vergleich zur Referenz-Fließkurve für den Zustand T4 reduzierte Fließspannung sowie die Ergebnisse der numerischen Umformsimulation unter Anpassung der Materialeigenschaften in den jeweiligen Rondenbereichen.

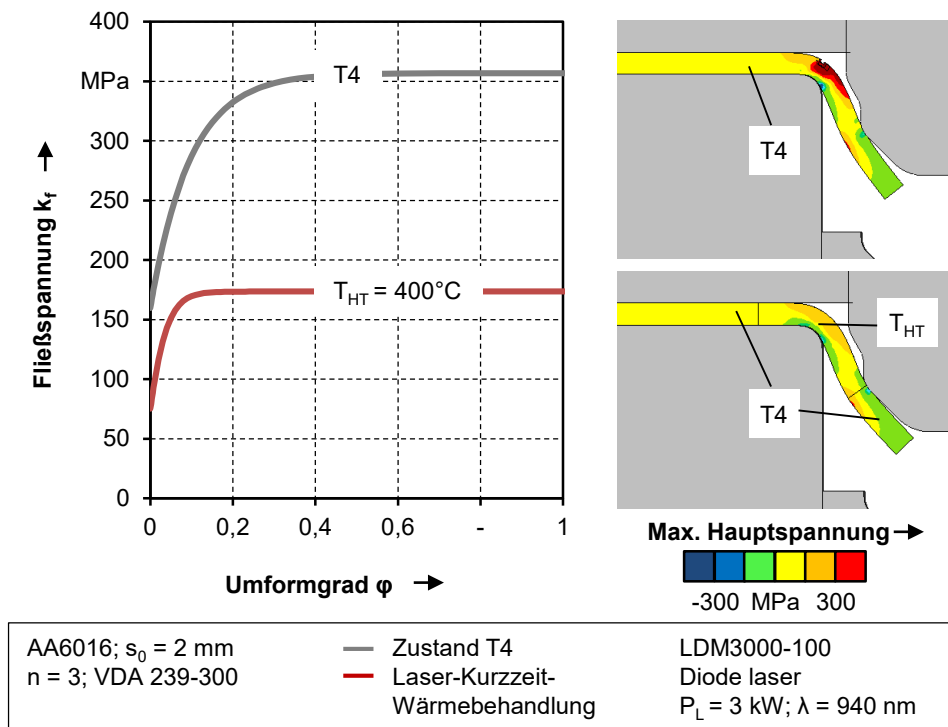


Bild 87: Herabsetzen der Fließspannung durch eine lokale Kurzzeit-Laser-Wärmebehandlung zur Erweiterung der Prozessgrenzen

Um diese Ergebnisse zu verifizieren, wird das gewählte Layout in Realversuche übertragen. Zu diesem Zweck wurde ein Diodenlaser der Firma Laserline GmbH eingesetzt. Die graphitierte Ronde wurde mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von $v_L = 2,50 \text{ mm/s}$ bestrahlt. Der Radius, auf welchem der Laserspot verfährt, beträgt analog zum numerischen Modell $r = 38,00 \text{ mm}$, als Spotdurchmesser wurden 12 mm gewählt. Somit entspricht auch die Breite des wärmebehandelten Bereichs dem numerischen Modell. Über ein Pyrometer und die integrierte Leistungsregelung kann eine homogene

Temperaturverteilung über den gesamten Verfahrensweg realisiert werden. Bild 88 ist zu entnehmen, dass die Bereiche der Wärmebehandlung und der Entfestigung bei der untersuchten Ronde erwartungsgemäß korrelieren und der Wärmeeintrag die Härte nach Vickers um bis zu 30% reduziert. Die hohe Entfestigung kann durch das Auflösen der MgSi-Cluster im Gefüge erklärt werden.

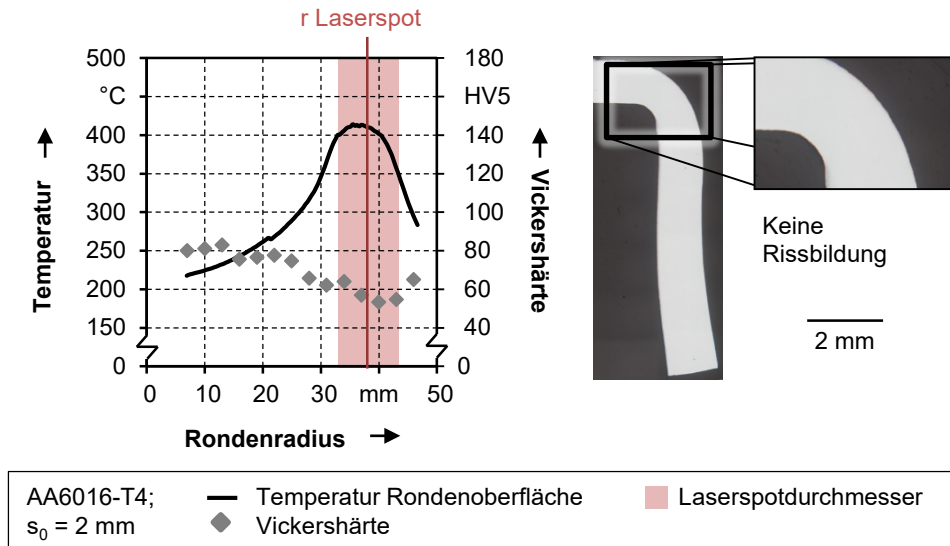


Bild 88: Radialer Temperaturverlauf an der Rondenoberfläche und gemessenen Härtewerte für die wärmebehandelte Aluminiumronde

Diese Eigenschaften ermöglichen auch im experimentellen Umformversuch das Tiefziehen eines versagensfreien Napfes und verifizieren somit die Ergebnisse der numerischen Stoffflussanalyse. Die versagensfrei tiefgezogene Ronde wird im Anschluss durch den Stauchprozess zu einem Funktionsbauteil umgeformt.

Unter einer eingestellten maximalen Stauchkraft von $F_s = 400 \text{ kN}$ wird eine Napfhöhe von $h = 8,89 \text{ mm}$ erreicht. Der Anstieg des vor Prozessbeginn für die Füllung der Zarge zur Verfügung stehende Volumen während des Tiefziehens ist übertragbar zu den Stahlwerkstoffen nachweisbar. Das Ausgangsvolumen pro Zahnvegment steigt während des Tiefziehens von $V = 84,43 \text{ mm}^3$ auf $V = 87,80 \text{ mm}^3$ an und fällt hervorgerufen durch das Bodenfließen nach Beendigung des Stauchprozesses wieder auf $V = 84,43 \text{ mm}^3$ ab. Bedingt durch die resultierende Napfhöhe, welche über 2 mm unterhalb der Zielhöhe aus den vorherigen Kapiteln liegt, fließt entsprechend der Ausführungen unter Abschnitt 5.5 mehr Material in aus der Zarge in den Bauteilboden. Die Werte der Volumina entsprechen demnach

qualitativ jenen der vorherigen Untersuchungen. Die gemessenen Volumina sind Bild 89 zu entnehmen.

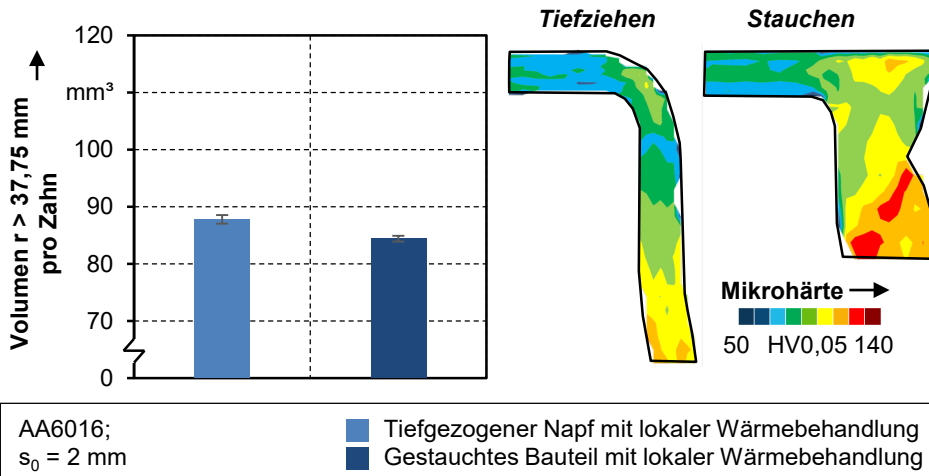


Bild 89: Gemessene Volumina sowie qualitative Verteilung der Mikrohärte für die wärmebehandelte Ronde nach den beiden Prozessschritten

Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften konnte das Prozessverständnis um Erkenntnisse zum Einfluss der Wärmebehandlung erweitert werden, da die lokale Entfestigung vor Prozessbeginn maßgeblich auf die Prozessergebnisse der nachfolgenden Umformschritte auswirkt. Für die untersuchten Stahlwerkstoffe wurde bereits in [23] eine radiale Inhomogenität der gemessenen Härte über die Zarge nachgewiesen. Diese resultiert vorrangig aus dem unkontrollierten Ausknicken der Ronde unter der Stauchkraft. Mit dieser Plastifizierung geht ein deutlicher Anstieg des Mittelwerts der Mikrohärte einher. Bei dem Aluminiumbauteil resultiert, bedingt durch die lokale Wärmebehandlung, eine axial ausgeprägte Inhomogenität der Härtewerte. Zudem fällt der Anstieg der Mikrohärte von $77,01 \text{ HV}_{0,05} \pm 7,26$ auf $100,86 \text{ HV}_{0,05} \pm 18,50$ verhältnismäßig gering aus. Obwohl die Realisierung der versagensfreien Umformung der Aluminiumlegierung AA6016 in der Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen als positiv zu bewerten ist, geht diese mit den für konventionelle Halbzeuge identifizierten Fehlerbildern einher. Nachfolgend sollen daher, wie in den vorherigen Kapiteln, prozessangepasste Halbzeuge aus der Aluminiumlegierung AA6016 hergestellt und weiterverarbeitet werden.

8.3 Transfer der Erkenntnisse auf prozessangepasste Halbzeuge aus der Aluminiumlegierung AA6016

Um die Prozessergebnisse für die untersuchte Aluminiumlegierung zu verbessern, wird der bereits in den vorherigen Kapiteln angewandte und unter Abschnitt 4.1 beschriebene Taumelprozess zur prozessangepassten Materialvorverteilung genutzt. Basierend den Auswertungen von Vorversuchen wurde eine Taumelkraft von $F_T = 2.000 \text{ kN}$ bei fünf Runden in der ersten Prozessphase und je einer Rund in den nachfolgenden beiden Phasen als zielführend identifiziert, da sich die Kavität durch diese Einstellung bereits annähernd vollständig füllen lässt. Das druckspannungsdominierte Umformverfahren lässt sich auch für Aluminiumlegierungen einsetzen [138], allerdings wird das Formänderungsvermögen des Werkstoffs durch die Umformung weiter reduziert. Dadurch bedingt kommt es bereits vor Beendigung des Tiefziehprozesses zum Bodenreißer, wie Bild 90 zeigt. Das Versagen tritt somit erwartungsgemäß früher ein als bei der konventionellen Ronde mit einer Ausgangsblechdicke von $s_0 = 2 \text{ mm}$.

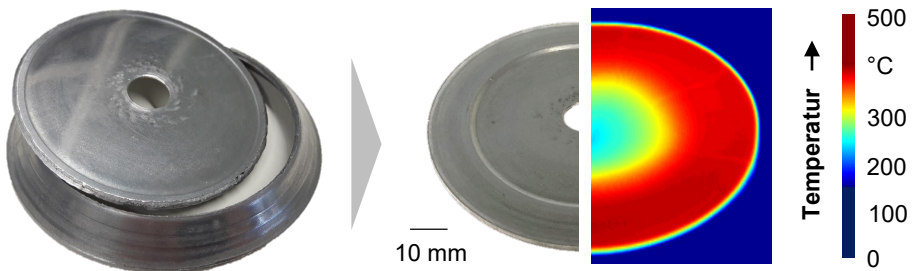


Bild 90: Bodenreißer während des Tiefziehens eines prozessangepassten Halbzeugs im Zustand T4 und Temperaturverteilung bei der Kurzzeit-Laser-Wärmebehandlung zur Vermeidung dieses Prozessfehlers

Basierend auf diesem Ergebnis und der zuvor festgestellten Inhomogenität der Härteverteilung bei konventionellen Halbzeugen wurde die Wärmebehandlungsstrategie für prozessangepasste Halbzeuge angepasst, indem der Spotdurchmesser von $d = 12 \text{ mm}$ auf $d = 24 \text{ mm}$ vergrößert wurde. Die getaumelte Ronde sowie die Aufnahme der Thermokamera sind ebenfalls in Bild 90 dargestellt. Bereits der qualitativen Darstellung kann entnommen werden, dass während der Wärmebehandlung eine homogene Temperaturverteilung im Bereich der Zieltemperatur von 400 °C erreicht wurde.

Durch die Anpassung des Spotdurchmessers lassen sich im Randbereich der Ronde homogenere Eigenschaften einstellen. Im Vergleich zum konventionellen Halbzeug fällt zunächst die durch die Plastifizierung während

des Taumelns deutlich gesteigerte Festigkeit im inneren Bereich der Ronde auf. Der Mittelwert im Randbereich beträgt lediglich $61,23 \text{ HV}_{0,05} \pm 4,75$ und weicht damit nur geringfügig von der gemessenen Härte des konventionellen Halbzeugs im wärmebehandelten Bereich ab. Auch die getaumelte Ronde lässt sich, bedingt durch die lokale Kurzzeit-Laserwärmebehandlung und das dadurch bedingte Auflösen der MgSi-Cluster, versagensfrei tiefziehen, wie Bild 91 zeigt.

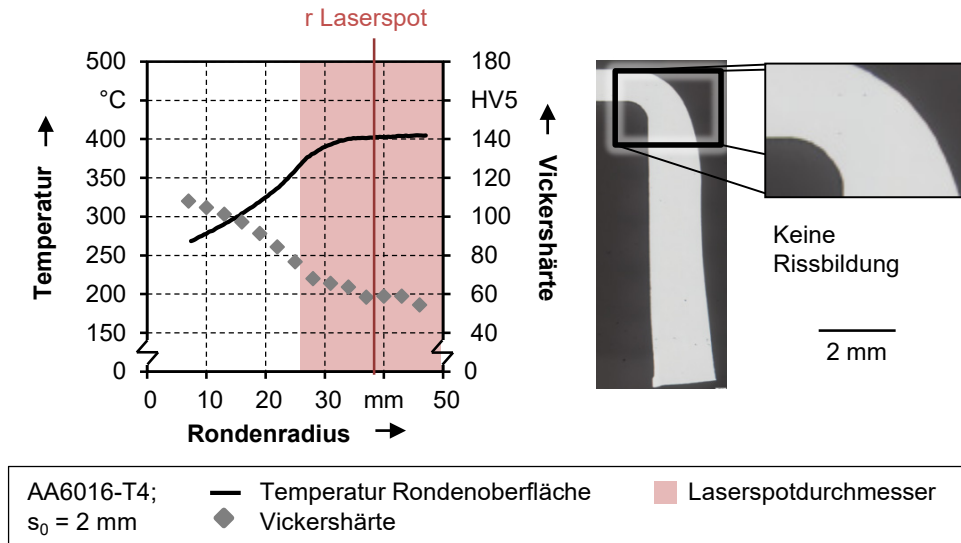


Bild 91: Radialer Temperaturverlauf an der Rondenoberfläche und gemessenen Härtewerte für das prozessangepasste Halbzeug zur Erweiterung der Prozessgrenzen

Aufbauend auf dem Nachweis der Machbarkeit wurden auch die tiefgezogenen Näpfe aus prozessangepassten Halbzeugen gestaucht, um die Analyse der Halbzeug- und Bauteileigenschaften über die gesamte Prozesskette hinweg durchführen zu können. Bei einer Umformkraft von $F_s = 600 \text{ kN}$ ergibt sich eine Bauteilhöhe von $h = 11,36 \text{ mm}$. Diese liegt, trotz fünfzigprozentiger Erhöhung der Stauchkraft, deutlich über der Höhe des Bauteils aus dem konventionellen Halbzeug. Erklären lässt sich dieser Effekt durch das deutlich höhere Materialvolumen im Randbereich und dem damit verbundenen starken Anstieg des Kraftbedarfs. Zu Beginn erfolgt die Analyse des Materialvolumens, welches für die Füllung der Zarge pro Zahn zur Verfügung steht. Die jeweiligen Werte sind in Bild 92 dargestellt. Wie eingangs beschrieben, wird die Kavität des Werkzeugeinsatzes im Taumelprozess durch die gewählten Parameter mit einem Volumen von $V = 105,36 \text{ mm}^3$ beinahe vollständig gefüllt. Während des Tiefziehens steigt dieser Wert auf

$V = 114,51 \text{ mm}^3$ an, da auftretende Spannungen früher über plastische Dehnungen abgebaut werden [81]. Nach dem Stauchen liegt der gemessene Wert bei $110,63 \text{ mm}^3$. Über den im sechsten Kapitel angenommenen linearen Zusammenhang zwischen Materialvorverteilung und Formfüllung ergibt sich für die Materialvorverteilung rechnerisch eine Formfüllung von 98,02%, der auf der Messung des finalen Bauteils basierende Wert liegt bei 99,30%. Somit kann die Annahme hinsichtlich der geometrischen Zusammenhänge auch für die Aluminiumlegierung AA6016 bestätigt werden. Zudem lassen sich, wie die Konturen in Bild 92 b) zeigen, identifizierte Prozessfehler durch den Einsatz prozessangepasster Halbzeuge vermeiden.

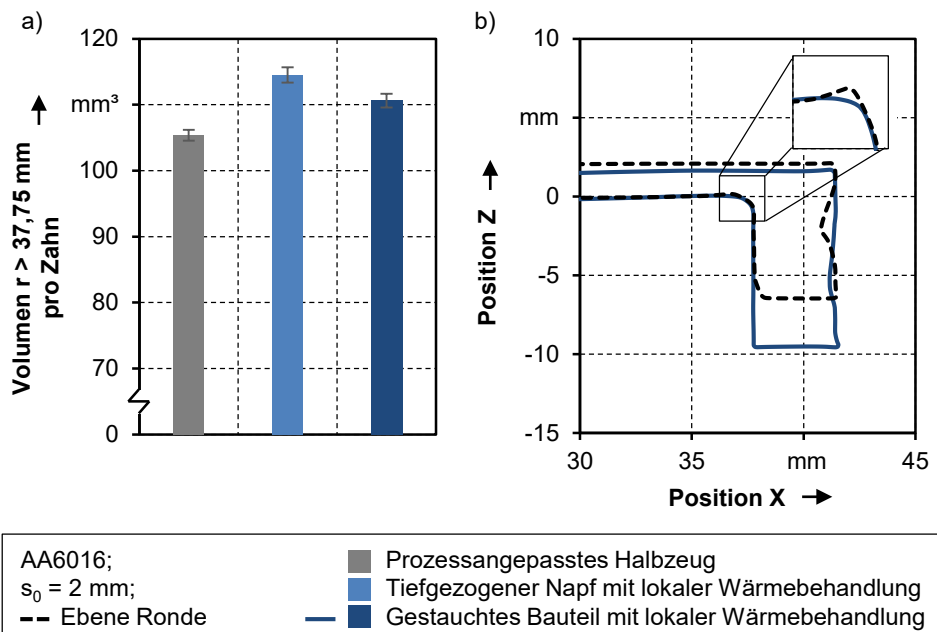


Bild 92: Gemessene Volumina für die einzelnen Prozessschritte sowie Konturvergleich der Bauteilzargen für den Einsatz konventioneller und prozessangepasster Halbzeuge

Die Auswertung der gemessenen Mikrohärtigkeit unterstreicht das Potential der lokalen Kurzzeit-Laserwärmebehandlung, da zu Prozessende eine deutlich homogenere Härteverteilung realisiert werden kann, was ein günstigeres Einsatzverhalten erwarten lässt. Nach Beendigung des Tiefziehprozesses beträgt der Mittelwert der Mikrohärtigkeit in der Napfzarge $79,64 \text{ HV}_{0,05} \pm 5,52$. Im letzten Prozessschritt steigt der Mittelwert auf $83,75 \text{ HV}_{0,05} \pm 6,44$ an. Die gesteigerte Homogenität der Härteverteilung zeigen die qualitativen Auswertungen der Mikrohärtigkeitsmessungen in Bild 93. Quantitativ wird dieses Ergebnis durch die berechneten Standardabweichungen gestützt, welche unterhalb jener der Messungen für den Ausgangszustand

des Werkstoffs liegen. Bezogen auf die gemessene Ausgangshärte entsprechen die Werte Anstiegen von drei, beziehungsweise acht Prozent. Dem entgegen steht ein Härteanstieg von etwa 40 Prozent in der nicht wärmebehandelten Rondenmitte.

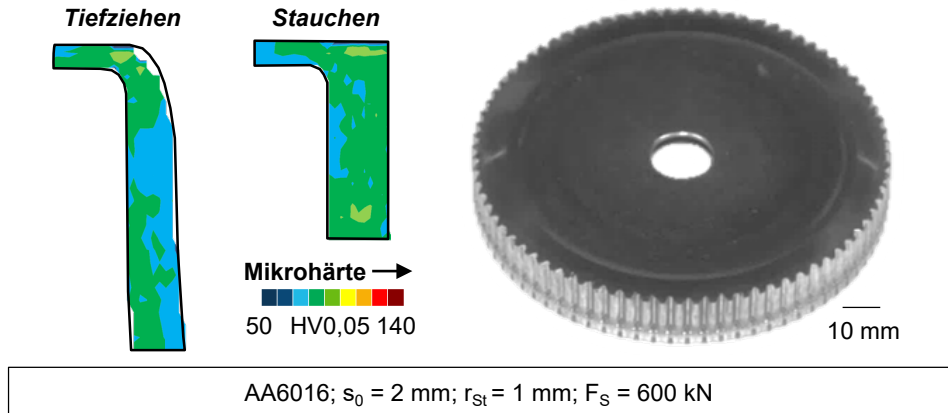


Bild 93: Qualitative Verteilung der Mikrohärtigkeit für den tiefgezogenen Napf und das Funktionsbauteil sowie Aufnahme der resultierenden Bauteilgeometrie

8.4 Zusammenfassende Bewertung

Aluminiumlegierungen weisen für vielfältige Anwendungen, zum Beispiel im Riementrieb, großes Potential auf. Deren Verarbeitung in Verfahren der Blechmassivumformung stellt die Forschung jedoch vor neue Herausforderungen, welche oftmals durch das eingeschränkte Formänderungsvermögen, besonders unter Aufbringen von Zugspannungen, bedingt sind. Die Erweiterung des Formänderungsvermögens ist demnach eine Grundvoraussetzung für eine zielführende Anwendung dieser Legierungen in Verfahren, welche hohe plastische Dehnungen hervorrufen.

In diesem Zusammenhang wurde eine lokale Kurzzeit-Laserwärmebehandlung eingesetzt, um zunächst die versagensfreie Umformung von ebenen Aluminiumronden in der Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauhen zu ermöglichen. In einem nächsten Schritt wurde dieses Vorgehen, unter Anpassung des Wärmebehandlungslayouts, auf prozessangepasste Halbzeuge aus Aluminium übertragen. In beiden Fällen konnten versagensfreie Bauteile durch die Verfahrenskombination hergestellt werden. Sowohl für die konventionellen als auch für die prozessangepassten Halbzeuge konnte, hinsichtlich der geometrischen Eigenschaften, die Übertrag-

barkeit der vorab gewonnenen Erkenntnisse nachgewiesen werden. Bezüglich der mechanischen Eigenschaften wurde das Prozessverständnis um die Anwendung einer lokalen Kurzzeit-Laserwärmebehandlung erweitert

Für prozessangepasste Halbzeuge ist insbesondere die hohe Homogenität der Härte in der Bauteilzarge positiv zu bewerten. Das verringerte Festigkeitsniveau ist aus technologischer Sicht zu vernachlässigen, da sich die gewünschten Eigenschaften insbesondere bei dieser Legierungsklasse durch Kalt- oder Warmauslagerungsprozesse gezielt einstellen lassen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Spannungsfeld zwischen ökologischen und ökonomischen Herausforderungen werden im Bereich der Produktionstechnik innovative Verfahren benötigt, um die steigenden Anforderungen an neue Produkte erfüllen zu können. Insbesondere in der Automobilindustrie wächst der Bedarf an effizienteren Lösungen stetig. Trends, wie das Downsizing oder die Hybridisierung und Elektrifizierung erfordern einerseits die Einsparung von Bauteilgewicht und andererseits eine erhöhte Belastbarkeit von Funktionsbauteilen. Die Blechmassivumformung stellt in diesem Zusammenhang eine vielversprechende Technologie dar, welche die Potentiale etablierter Verfahren der Blech- und Massivumformung kombiniert. Die Möglichkeit zur Herstellung komplizierter Funktionsbauteile aus Blechhalbzeugen trägt dem Leichtbaugedanken Rechnung, geht jedoch mit Herausforderungen einher. Diese bestehen vor allem in der Sicherstellung einer ausreichenden Kontrolle der lokal variierenden zwei- und dreiachsigen Spannungs- und Dehnungszustände zur Herstellung endkonturnaher Bauteile.

Vor diesem Hintergrund wurde in der vorliegenden Arbeit das Prozessverständnis hinsichtlich der Auslegung und des Einsatzes prozessangepasster Halbzeuge vertieft und erweitert, um die Stoffflusskontrolle entsprechend den geforderten Bauteileigenschaften steigern zu können. Die Realisierung einer ausreichend hohen Stoffflusskontrolle ist bei Verfahren der Blechmassivumformung eine der Grundvoraussetzungen für die effiziente Herstellung fehlerfreier Funktionsbauteile.

Als Grundlage der Untersuchungen wurde die anforderungsbasierte Auslegung einer zielführenden Werkzeuggeometrie anhand einer numerischen Variantensimulation durchgeführt, welche nachfolgend um einen effizienteren Auslegungsansatz ergänzt wurde. Die zentralen Anforderungen umfassen die Vermeidung identifizierter Fehlerbilder an den außenverzahnten Funktionsbauteilen, welche durch die einstufige Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen hergestellt werden. Der ausgelegte Werkzeugeinsatz erlaubt eine prozessangepasste Materialverteilung zur Steigerung der Stoffflusskontrolle im Umformprozess und zur verbesserten Füllung der Funktionselemente und ermöglicht die beabsichtigte Fehlervermeidung. Als wichtigste Größe ist die radiale Position des Aufdickungsbeginns zu bewerten, da diese den stärksten Einfluss auf die resultierenden Bauteileigenschaften hat. Die numerische Berechnung des Ausdünnungsbeginns einer ebenen Ronde nach dem Tiefziehen erlaubt eine Näherung an den in aufwendigen Variantensimulationen bestimmten

Wert mit einer Abweichung von lediglich 0,01 mm. Die Ergebnisse wurden nachfolgend durch experimentelle Umformversuche validiert. Um das Prozessverständnis zu vertiefen, wurden anschließend im Taumelprozess unterschiedliche hohe Materialvorverteilungen erzeugt, so dass deren Einfluss auf die Prozessergebnisse analysiert werden konnte. Die Annahmen, welche zum einen beinhalten, dass es einen linearen Zusammenhang zwischen der Materialvorverteilung in der Halbzeugherstellung und resultierender Formfüllung bei den umgeformten Funktionsbauteilen gibt und zum anderen, dass die finale Festigkeit nicht signifikant durch den Grad der Vorverteilung beeinflusst wird, konnten durch experimentelle Ergebnisse belegt und somit betätigt werden. Durch die höchste Materialvorverteilung konnte eine rechnerische Formfüllung von 100% erreicht werden und bereits ab einer mittleren Formfüllung nähert sich die gemittelte Rautiefe an den Zahnflanken der Werkstücke der Rautiefe der Werkzeuge an. Um die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse zu gewährleisten, wurden nachfolgend sowohl die Bauteilgeometrien skaliert als auch Stahlwerkstoffe höherer Festigkeit eingesetzt. Die Skalierung des Bauteils und Rondendurchmessers wurde im numerischen Prozessmodell abgebildet und führte, basierend auf den funktionalen Zusammenhängen, zu übertragbaren Ergebnissen. Festzuhalten bleibt jedoch, dass das zur Verfügung stehende Rondenvolumen der Materialvorverteilung Grenzen setzt. Dadurch bedingt ist es für runterskalierte Geometrien nicht mehr möglich ein entsprechend hohes Materialvolumen im Bereich der Aufdickung bereitzustellen. Für den mikrolegierten HC260 LA und den hochfesten DP600 konnten die getroffenen Annahmen ebenso als zutreffend bewertet werden. Für den hochfesten DP600 wurden allerdings ebenfalls Prozessgrenzen hinsichtlich der maximal möglichen Materialvorverteilung identifiziert. Diese ließen sich durch eine Erhöhung der maximal zur Verfügung stehenden Stoßkraft im numerischen Modell überwinden, so dass die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auch über die Grenzen des experimentellen Versuchsraums hinaus nachgewiesen werden konnten. Aufbauend auf den dargelegten Arbeitsschwerpunkten wurde das Prozessverständnis um den Einsatz einer ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierung unter Anwendung einer lokalen Kurzzeit-Laserwärmebehandlung erweitert. Diese ermöglichte die versagensfreie Umformung ebener Aluminiumronden in der Verfahrenskombination und wurde anschließend auch für prozessangepasste Halbzeuge angewandt und qualifiziert.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen ist in nachfolgenden Arbeiten zu klären, wie sich die hergestellten Bauteile in unterschiedlichen An-

wendungsfällen verhalten und wie sich die Vorzüge blechmassivumformtechnisch hergestellter Bauteile gezielt nutzen lassen, um deren Einsatzverhalten zu verbessern. Zudem stellt die Ausformung diskreter Funktionselemente bereits in der Halbzeugherstellung einen vielversprechenden Ansatz dar. Darüber hinaus sollten Potentiale, welche sich durch die Kombination unterschiedlicher Werkstückwerkstoffe oder die Erweiterung der Grenzen bei der Herstellung prozessangepasster Halbzeuge durch Verfahren der Additiven Fertigung, weitergehend untersucht werden

10 Summary and outlook

In the field of production technology, innovative processes are required to meet the increasing demands on new products in the area of conflict between ecological and economic challenges. Especially in the automotive industry, the demand for more efficient solutions is constantly growing. Trends such as downsizing or hybridization and electrification require on the one hand the reduction of component weight and on the other hand a higher load capacity of functional components. In this context, sheet-bulk metal forming represents a promising technology that combines the potentials of established sheet metal and bulk forming processes. The possibility of producing complex functional components from sheet metal takes into account the idea of lightweight construction, but is accompanied by challenges. These challenges consist above all in ensuring adequate control of the locally varying two- and three-dimensional stress and strain states for the manufacture of near-net-shape components.

Against this background, the present work deepened and broadened the process understanding with regard to the design and use of process-adapted semi-finished products in order to increase the material flow control according to the required component properties. The realization of a sufficiently high material flow control is one of the basic requirements for the efficient production of failure-free functional components in sheet-bulk metal forming processes.

As a basis for the investigations, the requirements-based design of a target-oriented tool geometry was carried out using a numerical variant simulation, which was subsequently supplemented by a more efficient design approach. The central requirements include the avoidance of identified defect patterns on the externally geared functional components, which are produced by the single-stage process combination of deep drawing and upsetting. The designed tool insert allows a process-adapted material pre-distribution to increase the material flow control in the forming process and to improve the filling of the functional elements and enables the intended avoidance of defects. The radial position of the start of thickening is to be evaluated as the most important parameter, as this has the strongest influence on the resulting component properties. The numerical calculation of the thinning start of a flat blank after deep drawing allows an approximation to the value determined in elaborate variant simulations with a deviation of only 0.01 mm. The results were subsequently validated by experimental forming tests. In order to deepen the understanding of the process,

different high material pre-distributions were then generated in the orbital forming process, so that their influence on the process results could be analyzed. The functional correlations established, which on the one hand imply that there is a linear relationship between the material predistribution in the semi-finished product production and the resulting die filling in the formed functional components and on the other hand that the final strength is not significantly influenced by the degree of predistribution, could be proven by experimental results and thus be confirmed. Due to the highest degree of material pre-distribution, a calculated die filling of 100% could be achieved and already from an average die filling the average roughness on the tooth flanks of the workpieces approaches the roughness of the tools. In order to ensure the transferability of the gained knowledge, the component geometries were scaled and higher strength steel materials were used. The scaling of the component and the diameter of the circular blank was mapped in the numerical process model and led to transferable results based on the first working hypothesis. However, it remains to be noted that the available volume of blanks sets limits to the material predistribution. Therefore, it is no longer possible to provide a correspondingly high material volume in the thickening area for scaled-down geometries. The assumptions made for the micro-alloyed HC260 LA and the high-strength DP600 were also found to be correct. For the high-strength DP600, however, process limits were also identified with regard to the maximum possible material pre-distribution. These could be overcome by increasing the maximum available ram force in the numerical model, so that the transferability of the findings could be proven beyond the limits of the experimental test space. Based on the work priorities described above, the process understanding was extended to include the use of a precipitation-hardenable aluminum alloy using local short-term laser heat treatment. This enabled the failure-free forming of flat aluminium blanks in the process combination and was subsequently also applied and qualified for process-adapted semi-finished products.

Based on the knowledge gained, subsequent work will clarify how the manufactured components behave in different applications and how the advantages of sheet metal forming components can be used to improve their performance. In addition, the forming of discrete functional elements already in the semi-finished product production represents a promising approach. In addition, the potentials that can be achieved by combining different workpiece materials or by extending the limits in the production of process-adapted semi-finished products by means of additive manufacturing processes should be further investigated.

Literaturverzeichnis

- [1] <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/wie-simulation-die-entwicklungszeit-von-autos-deutlich-verringert-a-788550/>, (abgerufen am 31.08.2020).
- [2] Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von, Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen.
- [3] <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/wissenschaftliche-grundlagen/>, (abgerufen am 31.08.2020).
- [4] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/312450/umfrage/treibhausgasemissionen-in-deutschland-nach-quellgruppe/>, (abgerufen am 31.08.2020).
- [5] <https://www.tagesschau.de/faktenfinder/co2-emissionen-103.html>, (abgerufen am 31.08.2020).
- [6] https://www.helmholtz.de/erde_und_umwelt/wie-viel-co2-steckt-in-einem-liter-benzin/, (abgerufen am 31.08.2020).
- [7] <https://www.umweltbundesamt.de/bild/durchschnittlicher-kraftstoffverbrauch-von-pkw>, (abgerufen am 31.08.2020).
- [8] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/399048/umfrage/entwicklung-der-co2-emissionen-von-neuwagen-deutschland/>, (abgerufen am 31.08.2020).
- [9] Siebenpfeiffer, W.: Energieeffiziente Antriebstechnologien Hybridisierung - Downsizing - Software und IT. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [10] Merklein, M.; Allwood, J.M.; Behrens, B.-A.; Brosius, A.; Hagenah, H.; Kuzman, K.; Mori, K.; Tekkaya, A.E.; Weckenmann, A.: Bulk forming of sheet metal. *Annals of the CIRP* 61(2012)2, S. 725-745.

- [11] Henning, F.; Moeller, E.: Handbuch Leichtbau - Methoden, Werkstoffe, Fertigung, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. München und Wien: Hanser, 2020.
- [12] Henning, F.; Moeller, E.: Handbuch Leichtbau - Methoden, Werkstoffe, Fertigung. ISBN: 978-3-446-42267-4, München: Hanser, 2011.
- [13] Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [14] <https://www.ingenieur.de/fachmedien/vdi-z/automobilindustrie/aluminium-ein-begehrter-werkstoff-im-automobilbau/>, (abgerufen am 31.08.2020).
- [15] <https://www.bmwgroup-werke.com/de/produktion/bmw-i.html>, (abgerufen am 31.08.2020).
- [16] <https://www.springerprofessional.de/werkstofftechnik/fertigungstechnik/hochfeste-staehle-verhelfen-zu-leichtigkeit/6594408>, (abgerufen am 31.08.2020).
- [17] Kopp, R.; Böhlke, P.: A new rolling process for strips with a defined cross section. CIRP Annals of Manufacturing Technology 52(2003), S. 197-200.
- [18] <https://www.mubea.com/de/tailor-rolled-products>, (abgerufen am 31.08.2020).
- [19] Bambach, M.; Sviridov, A.; Weisheit, A.; Schleifenbaum, J.H.: Case Studies on Local Reinforcement of Sheet Metal Components by Laser Additive Manufacturing. Metals 7(2017)4:113.
- [20] Mori, K.; Nakano, T.: State-of-the-art of plate forging in Japan. Production Engineering 10(2016)1, 81-91.
- [21] Schneider, T.; Merklein, M.: Sheet-Bulk Metal Forming of Preformed Sheet Metal Parts. Key Engineering Materials 473(2011), S. 83-90.
- [22] Merklein, M.; Schneider, T.: Functional Integration of Sheet Metal Parts by Deep Drawing. Steel research international - special edition: 10th International Conference on Technology in Plasticity (2011), S. 1036-1041.

- [23] Schneider, T.: Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Bamberg: Meisenbach, 2016.
- [24] Gröbel, D.: Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung, Dissertation, Erlangen: FAU University Press, 2019.
- [25] Merklein, M.; Löffler, M.; Schneider, T.: Plastic flow and its control in sheet-bulk metal forming of thin-walled functional components. *Annals of the CIRP* 64(2015)1, S. 245-248.
- [26] Merklein, M.; Gröbel, D.; Löffler, M.; Schneider, T.; Hildenbrand, P.: Sheet-bulk metal forming - Forming of functional components from sheet metals. In: Qin, Y.; Dean, T.A.; Lin, J.; Yuan, S.J.; Vollertsen, F. (Hrsg.): *Proceedings of the 4th, International Conference on New Forming Technology, MATEC Web of Conferences*, 2015, S. 1-12.
- [27] Sieczkarek, P.; Wernicke, S.; Gies, S.; Martins, P.A.F.; Tekkaya, A.E.: Incipient and repeatable plastic flow in incremental sheet-bulk forming of gears. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86(2016)9-12, S. 3091-3100.
- [28] DIN 8580: *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Berlin: Beuth, 2003.
- [29] DIN 8582: *Fertigungsverfahren Umformen - Einordnung; Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht*. Berlin: Beuth, 2003.
- [30] Tekkaya, A.E.; Ben Khalifa, N.; Hering, O.; Meya, R.; Myslicki, S.; Walther, F.: Forming-induced damage and its effects on product properties. *Annals of the CIRP* 66(2017)1, S. 281-284.
- [31] Silva, C.M.A.; Silva, M.B.; Alves, L.M.; Martins, P.A.F.: A new test for determining the mechanical and fracture behavior of materials in sheet-bulk metal forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials, Design and Applications*, 231(2017), S. 693-703.
- [32] Merklein, M.; Tekkaya, A.E.; Brosius, A.; Opel, S.; Koch, J.: Overview on sheet-bulk metal forming processes. In: Hirt, G.; Tekkaya, A.E.

- (Hrsg.): Proceedings of the 10th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP), ICTP2011, Aachen, 2011, S. 1109-1114.
- [33] Wang, Z.G.; Hirasawa, K.; Yoshikawa, Y.; Osakada, K.: Forming of light-weight gear wheel by plate forging. *Annals of the CIRP* 65(2016)1, S. 293-296.
- [34] Abe, Y.; Mori, K.; Ito, T.: Plate forging of drawn cup with flange including thickening of corners. *Manufacturing Review* 1(2014)16.
- [35] https://www.umformtechnikmagazin.de/umformtechnik-fachartikel/zahnradproduktion-vereinfacht_14779_de/, (abgerufen am 31.08.2020).
- [36] Loderer, A.; Timmermann, M.; Matthias, S.; Kästner, M.; Schneider, T.; Hausotte, T.; Reithmeier, E.: Measuring systems for sheet-bulk metal forming. *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications (2015). S. 291-298.
- [37] Beese, S.; Beyer, F.; Blum, H.; Isik, K.; Kumor, D.; Löhnert, S.; Rademacher, A.; Tekkaya, A.E.; Willner, K.; Wriggers, P.; Zeller, S.: Simulation of Sheet-Bulk Metal Forming Processes with Simufact.forming using User-Subroutines. *Proceedings of the, 19th ESAFORM Conference* (2016).
- [38] Loderer, A.: *Holistische, fertigungsnahe, mehrskalige Messung blechmassivumgeformter Bauteile*, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen: FAU University Press, 2017.
- [39] Hinz, L., Schulte, R., Pilz, F., Kastner, M., Reithmeier, E.: Quantifizierung der Werkzeugkondition bei der Blechmassivumformung durch faseroptische Streifenprojektion. In: Merklein, M., Behrens, B.-A., Tekkaya, A. E. (Hrsg.): 4. Workshop, Blechmassivumformung - Umformtechnische Herstellung von komplexen Funktionsbauteilen mit Nebenformelementen aus Feinblechen. Erlangen: FAU University Press, 2019.
- [40] Ashhab, M.; Breitsprecher, T.; Wartzack, S.: Neural network based modeling and optimization of deep drawing - extrusion combined process. *Journal of Intelligent Manufacturing* 25(2014)1, S. 77-84.

- [41] Pragana, J.P.M.; Silva, C.M.A.; Braganca, I.M.F.; Alves, L.M.; Martins, P.A.F.: A new joining process to produce lap joints in metal sheets. *Annals of the CIRP* 67(2018)1, S. 301-304.
- [42] Braganca, I.M.F.; Silva, C.M.A.; Alves, L.M.; Martins, P.A.F.: Joining sheets perpendicular to one other by sheet-bulk metal forming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89 (2017)1-4, S. 77-86.
- [43] Schneider, T.; Merklein, M.: Manufacturing of geared sheet metal components by a single-stage Sheet-bulk metal forming process. In: Dimitrov, D.; Schutte, C. (Hrsg.): *Proc. Conf. Competitive Manufacturing*, 2013, S. 177-182.
- [44] Sieczkarek, P.; Wernicke, S.; Weddeling, C.; Martins, P.A.F.; Tekkaya, A.E.: Local indentation of sheets. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 232(2016)5, S. 838-847.
- [45] Merklein, M.; Koch, J.; Opel, S.; Schneider, T.: Fundamental investigations on the material flow at combined sheet and bulk metal forming processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60(2011)1, S. 283-286.
- [46] Pilz, F.; Gröbel, D.; Merklein, M.: Investigation of Fatigue Strength of Tool Steels in Sheet-Bulk Metal Forming. *AIP Conference Proceedings* 1960 (Hrsg.): *The 21st International ESAFORM Conference on Material Forming*, (2018)160022, AIP Publishing, S., 1-6.
- [47] Schulte, R.; Hildenbrand, P.; Lechner, M.; Merklein, M.: Designing, manufacturing and processing of Tailored Blanks in a sheet-bulk metal forming process. In: (Hrsg.): *Procedia Manufacturing*, 2017, S. 286-297.
- [48] Vierzigmann, U.; Schneider, T.; Koch, J.; Gröbel, D.; Merklein, M.; Engel, U.; Hense, R.; Biermann, D.; Krebs, P.; Kersting, P.; Henning, L.; Denkena, B.; Herper, J.; Tillmann, W.: Untersuchungen von Tailored Surfaces für die Blechmassivumformung mittels angepasstem Ringstauchversuch. In: Merklein, M.; Behrens, B. A.; Tekkaya, A. E. (Hrsg.): *2. Workshop Blechmassivumformung*, Bamberg: Meisenbach, 2013, S. 137-162.

- [49] Löffler, M.; Andreas, K.; Engel, U.; Schulte, R.; Gröbel, D.; Krebs, E.; Freiburg, D.; Biermann, D.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Weikert, T.; Wartzack, S.; Tremmel, S.; Lucas, H.; Denkena, B.; Merklein, M.: Tribological measures for controlling material, flow in sheet-bulk metal forming. *Production Engineering* 10(2016), S. 459-470.
- [50] Merklein, M.; Lechner, M.; Gröbel, D.; Löffler, M.; Schneider, T.; Schulte, R.; Hildenbrand, P.: Innovative approaches for controlling the material flow in sheet-bulk metal forming processes. *Manufacturing Review* 3(2016)2, S. 1-17.
- [51] Sieczkarek, P.; Wernicke, S.; Gies, S.; Tekkaya, A.E.; Krebs, E.; Wiederkehr, P.; Biermann, D.; Tillmann, W.; Stangier, D.: Improvement strategies for the formfilling in incremental gear forming processes. *Production Engineering* 11(2017)6, S. 623-631.
- [52] https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/publikationen/compact_steel_2007_2_de.pdf, (abgerufen am 31.08.2020).
- [53] Zadpoor, A.A.; Sinke, J.; Benedictus, R.: Mechanics of Tailor Welded Blanks: An Overview. *Key Engineering Materials* 344 (2007), S. 373-82.
- [54] Mennecart, T.; Ul Hassan, H.; Güner, A.; Ben Khalifa, N.; Hosseini, M.: Deep Drawing of High-Strength Tailored Blanks by Using Tailored Tools. *Materials* 9(2016)2, S. 77.
- [55] Ryabkov, N.; Jackel, F.; van Putten, K.; Hirt, G.: Production of blanks with thickness transitions in longitudinal and lateral direction through 3D-Strip Profile Rolling. *International Journal of Material Forming* (2008), S. 391-394.
- [56] Ganesan, V.; Rodriguez, J.; Singh, H.; Mudalagi, A.; Panchal, P.: Full Vehicle Tailored Parts Optimization - Light Weighting. *SAE World Congress & Exhibition*, 2015.
- [57] Klinke, N., Schumacher, A.: Finding the best thickness run parameterization for optimization of Tailor Rolled Blanks, 14. LS-Dyna Forum, Bamberg, 2016.

- [58] Saito, Y.; Watanabe, T.; Utsunomiya, H.: Development of satellite mill and trial rolling of profiled metal strip. *Journal of Material Engineering Performance* 1(1992), S. 789-796.
- [59] Wang, X. G.; Liu, X. H.; Wang, S.; Zhi, Y.: Experiment and simulation to rolled profile strip with variable thicknesses in lateral direction. *Journal of Materials Processing Technology* 258 (2018), S. 259-270.
- [60] Han, S.W.; Hwang, T.W.; Oh, I.Y.; Moon, Y.H.: Feasibility studies on manufacturing tailored blanks by rolling partially stacked blanks. *Journal of Mechanical Science and Technology* 32(2018)4, S. 1575-1584.
- [61] Jin, J.; Wang, X.; Li, L.: A sheet blank rotary forging process for disc-like parts with thickened rims. *Journal of Mechanical Science and Technology* 30(2016)6, S. 2723-2729.
- [62] Rosochowski, A.; Olejnik, L.: New method of producing tailored blanks with constant thickness. *Procedia Engineering* 207(2017), S. 1433-1438.
- [63] Tajul, L.; Maeno, T.; Kinoshita, T.; Mori, K.: Successive forging of tailored blank having thickness distribution for hot stamping. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89(2017)9-12, S. 3731-3739.
- [64] Wernicke, S.; Sieczkarek, P.; Martins, P.A.F.; Tekkaya, A.E.: Local sheet thickening by in-plane swaging. *International Journal of Mechanical Sciences* 119(2016), S. 59-67.
- [65] Gagliardi, F.; Ambrogio, G.; Cozza, A.; Pulice, D.; Filice, L.: Numerical analysis of tailored sheets to improve the quality of components made by SPIF. *AIP Conference Proceedings* 1960(2018)1, S. 1.
- [66] Vollertsen, F., Lange, K.: Enhancement of Drawability by Local Heat Treatment. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 47(1), 1998, S. 181-184.
- [67] Wang, X.; Jin, J.; Hu, Y.; Deng, L.; Li, J.: Study on the rotary forming process of a rim-thickened disc-like part using a local heating method. *International Journal of Mechanical Sciences* 131-132(2017), S. 252-264.

- [68] Merklein, M.; Graser, M.; Degner, J.; Lechner, M.; Herrmann, J.: Tailoring material properties in forming technology by a local heat treatment. In: Gronostajski, Z. (Hrsg.): *Advanced Metal Forming Processes in Automotive Industry*, 2016, S. 45-52.
- [69] Jin, J.; Wang, X.; Deng, L.; Luo, J.: A single-step hot stamping-forging process for aluminum alloy shell parts with nonuniform thickness. *Journal of Materials Processing Technology* 228(2016), S. 170-178.
- [70] Laue, R.; Härtel, S.; Awiszus, B.: Radial-rotation profile forming: a new processing technology of incremental sheet metal forming. *AIP Conference Proceedings* 1960(2018)1.
- [71] Wang, Z.; Yoshikawa, Y.: A new forming method of triple cup by plate forging. *Procedia Engineering* 81(2014), S. 389-394.
- [72] Zhu, S.; Zhuang, X.; Zhu, Y.; Zhao, Z.: Thickening of cup sidewall through sheet-bulk forming with controllable deformation zone. *Journal of Materials Processing Technology* 262(2018), S. 597-604.
- [73] Hauger, A.: *Flexibles Walzen als kontinuierlicher Fertigungsprozess für Tailored Rolled Blanks*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen: Shaker, 2000.
- [74] Groche, P.; Taplick, C.; Özel, M.; Mahajan, P.; Stahl, S.: Benefits of stress superposition in combined bending-linear flow splitting process. *International Journal of Material Forming* 11(2018)1, S. 19-29.
- [75] Moneke, M.; Mahajan, P.; Groche, P.: End flare of linear flow split profiles. *International Journal of Material Forming* 12(2019)3, S. 429-440.
- [76] Braganca, I.M.F.; Silva, C.M.A.; Alves, L.M.; Martins, P.A.F.: Lightweight Joining of Polymer and Polymer-Metal Sheets by Sheet-Bulk Metal Forming. *Journal of Cleaner Production* 145(2017), S. 98-104.
- [77] Jirathearanat, S.; Taureza, M.; Atsushi, D.: Successive Forming of Multi-Thickness Plates by Using Wedge-shaped Tool. *Procedia Engineering* 207(2017), S. 1147-1152.
- [78] Gerstein, G.; Isik, K.; Gutknecht, F.; Sieczkarek, P.; Ewert, J.; Tekkaya, A.E.; Clausmeyer, T.; Nürnberger, F.: Microstructural

- characterization and simulation of damage for geared sheet components. *Journal of Physics: Conference Series*, 896(2017).
- [79] Schulte, R.; Schneider, T.; Lechner, M.; Merklein, M.: Interaction of various functional elements in thin-walled cups formed by a sheet-bulk metal forming process. In: K. Saanouni (Hrsg.): NUMIFORM 2016: The 12th International Conference on Numerical, Methods in Industrial Forming Processes, MATEC Web Conf. , 2016, Artikelnr. 07003.
- [80] Lange, K.: *Umformtechnik - Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 2: Massivumformung*. Berlin/Heidelberg: Springer, 1988, 2. Auflage.
- [81] Lange, K.: *Umformtechnik - Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 3: Blechbearbeitung*. Berlin/Heidelberg: Springer, 1990, 2. Auflage.
- [82] Schneider, T.; Vierzigmann, U.; Merklein, M.: Analysis of Varying Properties of Semi-finished Products in Sheet-bulk Metal Forming of Functional Components. *AIP Conference Proceedings* 1567(2014)1, S. 930-933.
- [83] Merklein, M.; Hagenah, H.; Schneider, T.: Sheet-Bulk Metal Forming Processes - State of the Art and its Perspectives. In: Kolleck, R. (Hrsg.): TTP 2013 - Tools and Technologies for Processing Ultra High Strength Materials, Verlag der TU Graz, 2013, S. 197, -204.
- [84] Schulte, R.; Merklein, M.: Manufacturing of functional aluminum components by using sheet bulk metal forming processes. In: Dimitrov, Dimitar; Hagedorn-Hansen, Devon; Von Leipzig, Konrad (Hrsg.): *International Conference on Competitive Manufacturing, (COMA 19) Proceedings*, ISBN: 978-0-7972-1779-9, 2019, S. 331-336.
- [85] Schulte, R.; Graser, M.; Merklein, M.: Enhancement of Forming Limits for Aluminum in Sheet-bulk Metal Forming by Local Laser Heat Treatment. In: Yannis Korkolis, Brad Kinsey, Marko Knezevic, and Nikhil Padhye (Hrsg.): *Proceedings of NUMIFORM 2019: The 13th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes*, 2019, S. 333-336.
- [86] Löffler, M.; Andreas, K.; Engel, U.; Schulte, R.; Gröbel, D.; Krebs, E.; Freiburg, D.; Biermann, D.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Weikert, T.;

- Wartzack, S.; Tremmel, S.; Lucas, H.; Denkena, B.; Merklein, M.: Tribological measures for controlling, material flow in sheet-bulk metal forming. *Production Engineering* 10(2016)4-5, S. 459-470.
- [87] Löffler, M.; Schneider, T.; Vierzigmann, U.; Engel, U.; Merklein, M.: Locally Adapted Tribological Conditions as a Method for Influencing the Material Flow in Sheet-Bulk Metal Forming Processes. *Key Engineering Materials* 639(2015), S. 267-274.
- [88] Löffler, M.; Andreas, K.; Engel, U.; Merklein, M.: Applicability of blasted blanks for adaption of tribological conditions in sheet-bulk metal forming. *Procedia CIRP* 45(2016), S. 239-242.
- [89] Löffler, M.; Engel, U.; Willner, K.; Beyer, F.; Merklein, M.: Investigation of the tribological behaviour of microstructures for controlling the material flow in sheet-bulk metal forming. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 22(2018), S. 66-75.
- [90] Löffler, M.; Schulte, R.; Freiburg, D.; Biermann, D.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Merklein, M.: Control of the material flow in sheet-bulk metal forming using modifications of the tool surface. *International Journal of Material Forming* 12(2019)1, S. 17-26.
- [91] Gröbel, D.; Schneider, T.; Merklein, M.: Sheet-bulk metal forming. In: Tekkaya, A.E.; Homberg, W.; Brosius, A. (Hrsg.): 60 Excellent Inventions in Metal Forming. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [92] Vogel, M., Schulte, R., Freiburg, D., Lechner, M., Biermann, D., Merklein, M.: Maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen in einem flexiblen Walzprozess. In: Merklein, M., Behrens, B.-A., Tekkaya, A. E. (Hrsg.): 4. Workshop Blechmassivumformung -, Umformtechnische Herstellung von komplexen Funktionsbauteilen mit Nebenformelementen aus Feinblechen. Erlangen: FAU University Press, 2019.
- [93] Merklein, M.; Plettke, R.; Schneider, T.; Opel, S.; Vipavc, D.: Manufacturing of sheet metal components with variants using process adapted semi-finished products. *Key Eng. Mater.* 504-506(2012), S. 1023-1028.
- [94] Merklein, M.; Gröbel, D.; Löffler, M.; Schneider, T.; Hildenbrand, P.: Sheet-bulk metal forming – forming of functional components from

- sheet metals. In: Y. Qin, T.A. Dean, J. Lin, S.J. Yuan, F. Vollertsen (Hrsg.): Proceedings of the 4th International Conference on New Forming Technology, MATEC Web of Conferences, 2015, S. 1-12.
- [95] Gröbel, D.; Hildenbrand, P.; Engel, U.; Merklein, M.: Influence of tailored blanks on forming of cold forged functional elements in a sheet bulk metal forming process. In: Stahl-Institut VDEh (Hrsg.): Proceedings METEC & 2nd ESTAT, 2015, auf CD, veröffentlicht.
- [96] Merklein, M.; Opel, S.; Schneider, T.: Herstellung funktionaler Blechkomponenten. wt Werkstattstechnik online 11/12(2010), S. 910-915.
- [97] Merklein, M.; Behrens, B.-A.; Plettke, R.; Krimm, R.; Opel, S.; Schneider, T.; Matthias, T.; Salfeld, V.: Integrierte Fertigung von tiefgezogenen Blechbauteilen mit Verzahnungselementen unter Einsatz von prozessangepassten Halbzeugen. In: Merklein, M.; Bach, Fr.-W.; Tekkaya, A. E. (Hrsg.): Tagungsband zum 1. Erlanger Workshop Blechmassivumformung 2011, Bamberg: Meisenbach, 2011, S. 159-180.
- [98] Opel, S.: Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Bamberg: Meisenbach, 2013.
- [99] Hildenbrand, P.; Sieczkarek, P.; Matthias, S.; Löffler, M.; Besserer, H.: Inkrementelles Umformen dünnwandiger Funktionsbauteile unter Einsatz prozessangepasster Halbzeuge durch Verfahren der Blechmassivumformung. In: Tagungsband zum 18. Workshop, Simulation in der Umformtechnik & 3. Industriekolloquium Blechmassivumformung 2015 - DFG Transregio 73 (Hrsg.): Tekkaya, A. E.; Liewald, M.; Merklein, M.; Behrens, B.-A., Shaker Verlag Aachen, 2015, S. 149-170.
- [100] Hildenbrand, P.; Schneider, T.; Merklein, M.: Flexible Rolling of Process Adapted Semi-finished Parts and its Application in a Sheet-Bulk Metal Forming Process. Key Engineering Materials 639(2015), S. 259-266.
- [101] Plancak, M.E.; Vilotic, D.Z.; Stefanovic, M.C.; Movrin, D.Z.; Kacmarcik, I.Z.: Orbital Forging - A plausible Alternative for Bulk

- Metal Forming. *Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology* 16(2012)1, S. 35–38.
- [102] Schneider, T.; Merklein, M.: Sheet-bulk metal forming - potential and challenges of a new class of forming processes. In: Khan, A.; Yu, H.Y. (Hrsg.): *Proceedings of PLASTICITY '15: The Twenty First International Symposium on Plasticity and its Current, Applications*, 2015, S. 169-171.
- [103] https://www.umformtechnikmagazin.de/umformtechnik-fachartikel/taumeln-statt-verzahnen_1755_de/, (abgerufen am 31.08.2020).
- [104] https://www.b-t-k.ch/uploads/attachment/attachment/50/Brosch%C3%BCre_Taumel-Kaltumformpresse_anschauen..pdf, (abgerufen am 31.08.2020).
- [105] Schondelmaier, J.: *Grundlagenuntersuchung über das Taumelpresen*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1992.
- [106] Standring, P.M.: The significance of nutation angle in rotary forging. In: Geiger, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 6th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP)*, Nürnberg, 1999, S. 1739-1744.
- [107] Standring, P.M.: Characteristics of rotary forging as an advanced manufacturing tool. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 215(2001)7, S. 935-945.
- [108] Groche, P.; Fritsche, D.; Tekkaya, E.A.; Allwood, J.M.; Hirt, G.; Neugebauer, R.: Incremental Bulk Metal Forming. *Annals of the CIRP* 56(2007)2, S. 635-656.
- [109] Oh, H.-K.; Choi, S.: A study on center thinning in the rotary forging of a circular plate. *Journal of Materials Processing Technology* 66(1997)1-3, S. 101-106.
- [110] Marciniak, Z.: A rocking-die technique for cold-forming operations. *Machinery and production engineering* 117(1970), S. 792-797.
- [111] Han, X.; Jin, Q.; Hua, L.: Research on Cold Orbital Forming of Complex Sheet Metal of Aluminum Alloy. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 139(2017)6.

- [112] Hildenbrand, P.: Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen: FAU: University Press, 2019.
- [113] Besserer, H.B.; Hildenbrand, P.; Gerstein, G.; Rodman, D.; Nürnberger, F.; Merklein, M.; Maier, J.: Ductile Damage and Fatigue Behaviour of Semi-Finished Tailored Blanks for Sheet-Bulk Metal Forming Processes. *Journal of Materials Engineering and Performance* 25(2016)3, S. 1136-1142.
- [114] Besserer, H.-B.; Hildenbrand, P.; Gerstein, G.; Rodman, D.; Nürnberger, F.; Merklein, M.; Maier, H. J.: Induction heat treatment of sheet-bulk metal-formed parts assisted by water-air spray cooling. *Steel Research Int.* 87(2016)9, S. 1220-1227.
- [115] Schulte, R.; Hildenbrand, P.; Vogel, M.; Lechner, M.; Merklein, M.: Analysis of fundamental dependencies between manufacturing and processing Tailored Blanks in sheet-bulk metal forming processes. In: (Hrsg.): *Procedia Engineering*, 2017, S. 305-310.
- [116] Löffler, M.: Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen: FAU University Press, 2018.
- [117] Caspari, M.; Landkammer, P.; Steinmann, P.: A non-invasive node-based form finding approach with discretization-independent target configuration. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences* 5(2018)11.
- [118] Landkammer, P., Caspari, M., Steinmann, P.: Improvements on a non-invasive, parameter-free approach to inverse formfinding. In: *Computational Mechanics*, 61.4 (2017), S. 443-447.
- [119] Germain, S.: On Inverse Form Finding for Anisotropic Materials in the Logarithmic Strain Space, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Bamberg: Meisenbach, 2013.
- [120] Landkammer, P.; Loderer, A.; Krebs, E.; Söhngen, B.; Steinmann, P.; Hausotte, T.; Kersting, P.; Biermann, D.; Willner, K.: Experimental verification of a benchmark forming simulation. *Key Engineering Materials* 639(2015), S. 251-258.

- [121] Landkammer, P.: Inverse Formfindungsverfahren zur Anwendung in der Umformtechnik, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen: FAU University Press, 2018.
- [122] Kerausch, M., Merklein, M., Geiger, M.: Improved material flow for deep drawing of aluminium blanks by local laser heat treatment. In: H. J. J. Kals; B. Shirvani; U. P. Sing; M. Geiger (Hrsg.): Proceedings of the 10th International Conference on Sheet, Metal, SheMet 2003; University of Ulster, Jordanstown (Irland), S. 73-80, 2003.
- [123] Fröck, H.; Graser, M.; Milkereit, B.; Reich, M.; Lechner, M.; Merklein, M.; Kessler, O.: Precipitation Behaviour and Mechanical Properties during Short-Term Heat Treatment for Tailor Heat Treated Profiles (THTP) of Aluminium Alloy 6060 T4. In: MSF, 877(2016), S. 400-406.
- [124] https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/publikationen/thyssenkrupp_dd-dc-dx_produkthinformation_steel_de.pdf, (abgerufen am 31.08.2020).
- [125] https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/produkte/feinblech-oberflaechenveredelte-produkte/mehrphasenstahl/dualphasenstahl/?gclid=EA1aIQobChMIvLDR94jr6QIVmLp3Ch2JpgewEAAYASAAEgKMA_D_BwE, (abgerufen am 31.08.2020).
- [126] DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Berlin: Beuth, 2020.
- [127] DIN 50106: Prüfung metallischer Werkstoffe - Druckversuch bei Raumtemperatur. Berlin: Beuth, 2016.
- [128] I. Y. und N. K., „Surface triangulation for polygonal models based on CAD data,“ International Journal for numerical methods in fluids, pp. 75-96, 2002.
- [129] Helmut Fischer GmbH & Co. KG: Bedienungsanleitung Fischerscope HM2000.
- [130] DIN EN ISO 6507-1: Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren. Berlin: Beuth, 2018.

- [131] Benesch, T.: Schlüsselkonzepte zur Statistik: die wichtigsten Methoden, Verteilungen, Tests anschaulich erklärt. Springer-Verlag, 2013.
- [132] Meyer, A.: Erhöhung der erreichbaren Ziehtiefe durch den Einsatz von Tailor Rolled Blanks. In: Umformtechnische Schriften, Band 145, Shaker, 2009.
- [133] <https://www.maedler.de/product/1643/1616/986/zahnriemenraeder-t5-fuer-riemenbreite-10-mm-aus-aluminium>, (abgerufen am 31.08.2020).
- [134] Graser, M., Fröck, H., Lechner, M., Reich, M., Kessler, O., Merklein, M.: Influence of short-term heat treatment on the microstructure and mechanical properties of EN AW-6060 T4 extrusion profiles, - Part B. Production Engineering 10(2016), S. 391-398.
- [135] Liu, A.F.: Mechanics and Mechanisms of Fracture: An Introduction. ASM International, Ohio, 2005.
- [136] Vogt, U: Seriennahe Auslegung von Aluminum Tailored Heat Treated Blanks. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Bamberg: Meisenbach, 2009.
- [137] Fröck, H.; Graser, M.; Milkereit, B.; Reich, M.; Lechner, M.; Merklein, M.; Kessler, O.: Precipitation Behaviour and Mechanical Properties during Short-Term Heat Treatment for Tailor Heat Treated Profiles (THTP) of Aluminium Alloy 6060 T4. In: MSF 877(2016), S. 400-406.
- [138] Hetzel, A.; Lechner, M.: Lokale Kurzzeitwärmebehandlung zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen prozessangepasster Halbzeuge der Aluminiumlegierung AA6016. In: Bernd-Arno Behrens (Hrsg.): Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Umformtechnik -, 23. Umformtechnisches Kolloquium Hannover 04. und 05. März 2020, TEWISS, 2020, S. 86-93.
- [139] Merklein, M.; Hildenbrand, P.; Schneider, T.: Application of Process adapted semi-finished Parts for the Production of Thin-walled Components via Sheet-Bulk Forming. In: Kawalla, R. (Hrsg.): AutoMetForm / SFU 2014, ACATRAN e.V., 2014, S. 58-66.

- [140] Landkammer, P.; Loderer, A.; Krebs, E.; Söhngen, B.; Steinmann, P.; Hausotte, T.; Kersting, P.; Biermann, D.; Willner, K.: Experimental verification of a benchmark forming simulation. *Key Engineering Materials* 639(2015), S. 251-258.
- [141] Vogt, U.: Seriennahe Auslegung von Aluminum Tailored Heat Treated Blanks, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Bamberg: Meisenbach, 2009.

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Hildenbrand, P.; Schulte, R.; Merklein, M.: New process strategies to manufacture tailored blanks out of DP600 by orbital forming. *Applied Mechanics and Materials* 794(2015), S. 144-151
- [P2] Schulte, R.; Schneider, T.; Lechner, M.; Merklein, M.: Interaction of various functional elements in thin-walled cups formed by a sheet-bulk metal forming process. In: K. Saanouni (Hrsg.): *NUMIFORM 2016: The 12th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes*, MATEC Web Conf., 2016, Artikelnr. 07003
- [P3] Löffler, M.; Andreas, K.; Engel, U.; Schulte, R.; Gröbel, D.; Krebs, E.; Freiburg, D.; Biermann, D.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Weikert, T.; Wartzack, S.; Tremmel, S.; Lucas, H.; Denkena, B.; Merklein, M.: Tribological measures for controlling material flow in sheet-bulk metal forming. *Production Engineering* 10(2016), S. 459-470
- [P4] Gröbel, D.; Schulte, R.; Hildenbrand, P.; Lechner, M.; Engel, U.; Sieczkarek, P.; Wernicke, S.; Gies, S.; Tekkaya, A.E.; Behrens, B.A.; Hübner, S.; Vucetic, M.; Koch, S.; Merklein, M.: Manufacturing of functional elements by sheet-bulk metal forming processes. *Production Engineering: Research and Development* 10(2016)1, S. 63-80
- [P5] Landkammer, P.; Schneider, T.; Schulte, R.; Steinmann, P.; Merklein, M.: A non-invasive form finding method with application to metal forming. *Production Engineering: Research and Development* 10(2016)1, S. 93-102
- [P6] Isik, K.; Gerstein, G.; Schneider, T.; Schulte, R.; Rosenbusch, D.; Clausmeyer, T.; Nürnberger, F.; Vucetic, M.; Koch, S.; Hübner, S.; Behrens, B.-A.; Tekkaya A. E.; Merklein, M.: Investigations of ductile damage during the process chains of toothed functional components manufactured by sheet-bulk metal forming. *Production Engineering: Research and Development* 10(2016)1, S. 5-15

- [P7] Merklein, M.; Lechner, M.; Gröbel, D.; Löffler, M.; Schneider, T.; Schulte, R.; Hildenbrand, P.: Innovative approaches for controlling the material flow in sheet-bulk metal forming processes. *Manufacturing Review* 3(2016)2, S. 1-17
- [P8] Schulte, R.; Hildenbrand, P.; Vogel, M.; Lechner, M.; Merklein, M.: Analysis of fundamental dependencies between manufacturing and processing Tailored Blanks in sheet-bulk metal forming processes. *Procedia Engineering*, 2017, S. 305-310
- [P9] Schulte, R.; Hildenbrand, P.; Lechner, M.; Merklein, M.: Designing, manufacturing and processing of Tailored Blanks in a sheet-bulk metal forming process. *Procedia Manufacturing*, 2017, S. 286-297
- [P10] Schulte, R.; Lechner, M.; Vogel, M.; Hildenbrand, P.; Merklein, M.: Umformtechnische Herstellung von Funktionsbauteilen aus Tailored Blanks durch Blechmassivumformverfahren. In: Bernd-Arno Behrens (Hrsg.): 22. Umformtechnisches Kolloquium Hannover – Innovationspotentiale in der Umformtechnik. 15 und 16. März 2017
- [P11] Vogel, M.; Lechner, M.; Hildenbrand, P.; Schulte, R.; Merklein, M.: Manufacturing of tailored blanks by flexible rolling and its application in a sheet-bulk metal forming process. In: Wieland, H. (Hrsg.): *Proceedings SCT2017*, Verlag Stahleisen GmbH, 2017, auf CD veröffentlicht
- [P12] Hinz, L.; Schulte, R.; Pilz, F.; Kästner, M.; Reithmeier, E.: Quantifizierung der Werkzeugkondition bei der Blechmassivumformung durch faseroptische Streifenprojektion. In: M. Merklein, B.-A. Behrens, A. E. Tekkaya (Hrsg.): 4. Workshop Blechmassivumformung, FAU University Press, 2019, S. 69-87
- [P13] Clausmeyer, T.; Nürnberger, F.; Gutknecht, F.; Isik, K.; Besserer, H.-B.; Gerstein, G.; Wernicke, S.; Schulte, R.; Tekkaya, A. E.; Merklein, M.; Maier, H. J.: Analyse und Modellierung von Schädigungs-

- gung und Versagen in der Blechmassivumformung. In: M. Merklein, B.-A. Behrens, A. E. Tekkaya (Hrsg.): 4. Workshop Blechmassivumformung, FAU University Press, 2019, S. 33-60
- [P14] Vogel, M.; Schulte, R.; Freiburg, D.; Lechner, M.; Biermann, D.; Merklein, M.: Maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen in einem flexiblen Walzprozess. In: M. Merklein, B.-A. Behrens, A. E. Tekkaya (Hrsg.): 4. Workshop Blechmassivumformung, FAU University Press, 2019, S. 89-108
- [P15] Schulte, R.; Lechner, M.; Merklein, M.: Fundamental analysis of the application of hybrid semi-finished products in sheet-bulk metal forming. 1st International Conference on Advanced Joining Processes AJP 2019, 2019, auf CD veröffentlicht
- [P16] Hetzel, A.; Schulte, R.; Vogel, M.; Degner, J.; Merklein, M.: Maßgeschneiderte Halbzeuge - Umformtechnische Herstellung von Funktionsbauteilen zur Realisierung von Leichtbaukomponenten. Werkstattstechnik online 109 10(2019), S. 745-749
- [P17] Gutknecht, F.; Vogel, M.; Schulte, R.; Merklein, M.; Rosenbusch, D.; Koch, S.; Hübner, S.; Behrens, B.-A.; Tekkaya, A. E.; Clausmeyer, T.: Comparison of Strain-path Indicators for Analysis of Processes in Sheet-bulk Metal Forming. In: Yannis Korkolis, Brad Kinsey, Marko Knezevic, and Nikhil Padhye (Hrsg.): Proceedings of NUMIFORM 2019: The 13th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes, 2019, S. 123-126
- [P18] Schulte, R.; Graser, M.; Merklein, M.: Enhancement of Forming Limits for Aluminum in Sheet-bulk Metal Forming by Local Laser Heat Treatment. In: Yannis Korkolis, Brad Kinsey, Marko Knezevic, and Nikhil Padhye (Hrsg.): Proceedings of NUMIFORM 2019: The 13th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes, 2019, S. 333-336
- [P19] Schulte, R.; Merklein, M.: Manufacturing of functional aluminum components by using sheet bulk metal forming processes. In: Dimitrov, Dimiter; Hagedorn-Hansen, Devon; Von Leipzig, Konrad

- (Hrsg.): International Conference on Competitive Manufacturing (COMA 19) Proceedings, ISBN: 978-0-7972-1779-9, 2019, S. 331-336
- [P20] Löffler, M.; Schulte, R.; Freiburg, D.; Biermann, D.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Merklein, M.: Control of the Material flow in sheet-bulk metal forming using modifications of the tool surface. International Journal of Material Forming 12(2019), S. 17 - 26
- [P21] Vogel, M.; Schulte, R.; Hetzel, A.; Lechner, M.; Merklein, M.: Verfahrenskombination zur umformtechnischen Herstellung von verzahnten, dünnwandigen Funktionselementen aus prozessoptimierten Halbzeugen. In: Bernd-Arno Behrens (Hrsg.): Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Umformtechnik - 23. Umformtechnisches Kolloquium Hannover 04. und 05. März 2020, TEWISS, 2020, S. 178

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] J. Loos. Analyse und Definition von Anforderungen an Tailored Blanks in der Blechmassivumformung. Masterarbeit. Erlangen, 2015
 - [S2] C. Betz. Umformtechnische Herstellung und Charakterisierung prozessangepasster Halbzeuge aus Stahlblech. Masterarbeit. Erlangen, 2017
 - [S3] A. Hetzel. Analyse einer Prozesskette der Blechmassivumformung zur Herstellung von Funktionsbauteilen mit verschiedenartigen Nebenformelementen. Masterarbeit. Erlangen, 2017
 - [S4] L. Dürr. Analyse des Einflusses prozessangepasster Halbzeuge auf resultierende Bauteileigenschaften für höherfeste Stahlwerkstoffe. Masterarbeit. Erlangen, 2018
 - [S5] A. Hetzel. Optische Formänderungsanalyse in der Blechmassivumformung. Projektarbeit. Erlangen, 2017
 - [S6] L. Paul. Analyse des Einflusses von Anfangsfließspannung und Verfestigungsexponent in einer Prozesskombination aus Tiefziehen und Stauchen. Bachelorarbeit. Erlangen, 2015
 - [S7] S. Wituschek. FE-basierte Stoffflussanalyse der gesamten Prozesskette zur Herstellung dickwandiger Funktionselemente an Blechbauteilen durch Verfahren der Blechmassivumformung. Bachelorarbeit. Erlangen, 2016
-

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2022):
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
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

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 Matrize
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
Spulwickeln
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 Meißner
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 mechani-
scher 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 Schuberth
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
Oberflächenausbildung 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 wissenschaftlicher 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 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen
durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissenschaftliche 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 Prechtl
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 Aluminiumplatinen
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 Herstellungs-
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-
rung von einsatzgerechten elektroni-
schen 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 Rührreißschweißen 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 Laserstrahltschweißen
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
Laserdurchstrahlschweißen
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 Größeneffekten 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 Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer 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 Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung 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 Optimierung 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 Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer 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 Lichtwellenleitern
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, Prozess-
simulation 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 Elektrofahr-
zeugen
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 Karosseriebau-
teile 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 Prozess
simulation von Biegeumform- und Falz-
verfahren
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 Laserstrahl-tiefschweißprozesses 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
zwischeneschalteten 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 Zöllner
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 Böning
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
diskret 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
Kohlenstoffaserverbundwerkstoffe 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
Großorientaugliche 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 Stellin
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
Schneidlinchverfahren
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.

Band 320: David Meinel
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge
FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile
LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen
LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller
Mapping Individual Subjective Values to Product Design
KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur
semiempirischen Ermittlung der
Umwandlungskinetik durchhärtender
Wälzlagerstähle für die Wärme-
behandlungssimulation
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnihl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung
rührreibgeschweißter Aluminium-
halbzeuge zur umformtechnischen
Herstellung höchstfester Leichtbau-
strukturteile
LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur
Lastflexibilisierung durch intelligente
elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von
mehrlagigen Aluminiumblechwerk-
stoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathemati-
sche Modellierung und Ableitung einer
Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe
nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung
transienter optischer Materialeigen-
schaften bei der Ultrakurzpuls-Laser-
materialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogistics Execution System mit
integrierten autonomen, servicebasierten
Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung
in der produzierenden Industrie im Kon-
text der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten
muskuloskeletalen Analyse der Mensch-
Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirekt-
strukturierter mechatronisch integrierter
Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozess-
überwachung auf Basis sozio-cyber-phy-
sischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozess- und Werkstoffverhalten bei
schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes
Wissensmanagement im Umfeld der
industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung
lernender Algorithmen bei der Herstel-
lung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schräg-
verzahnten Zahnradern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische
Modellierung des Heißcrimpprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses
zur Verbesserung der tribologischen
Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour
of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung hochfester Aluminiumblech-
bauteile in einem kombinierten Umform-
und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Auf-
teilung von Prozessbewegungen in syn-
chrone Werkstück- und Werkzeugbewe-
gungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses
hochminiaturisierter elektronischer Bau-
elemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung
in einer hybriden Produktion mittels
betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend
Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen
LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder.
2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert
Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung
KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander
Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten
KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz
Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen
LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona
Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle
KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann
Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014
LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner
Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung
KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläßel
Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenumwicklungen für automobiler Traktionsantriebe
FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel
Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern
KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle
Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation
FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf
Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen
FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari
Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production
FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand
Prozessübergreifende Analyse komplexer
Montageprozessketten mittels
Data Mining
FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl
Closed-Loop Control of a Storage-Sup-
ported Hybrid Compensation System for
Improving the Power Quality in Medium
Voltage Networks
FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2
Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger
Additive Fertigung polymerer optischer
Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren
FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter
Modellierung von Vorentwürfen in der
virtuellen Realität mit natürlicher
Fingerinteraktion
KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer
Oberflächenmodifizierung und Entwick-
lung einer Auswertemethodik zur Ver-
schleißcharakterisierung im Presshär-
teprozess
LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäffer
Web- und wissensbasierter Engineering-
Konfigurator für roboterzentrierte Auto-
matisierungslösungen
FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25
Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross
Untersuchungen zur kohlenstoffdioxid-
basierten kryogenen Minimalmengens-
schmierung
REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker
Qualifizierung laser-additiv gefertigter
Komponenten für den Einsatz im Werk-
zeugbau der Massivumformung
LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied
Totally Integrated Ecology Management
for Resource Efficient and Eco-Friendly
Production
FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein
Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine
Analysestrategie zur Bestimmung des
Reibungs-, Axialschub- und Temperatur-
verhaltens von Nadelkränzen –
KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder,
39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf
Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl
Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen
Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian
Numerische Auslegung von Oberflächenmikrostrukturen für geschmierte tribologische Kontakte
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß
Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder.
2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann
Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy
LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß
Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen
FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel
Assistenzsystem für den wissenschaftlichen Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen
KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen
Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen
FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider
Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten
FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel
Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering
KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner
Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpuls
LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling
Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungsbehaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design
KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb
Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems
LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt
Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit
LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer
Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik
LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler
Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechanische Baugruppen
FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann
Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle
LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen
Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies
LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein
Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements
LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban
Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten
FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN: 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu
Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop
FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke
Untersuchungen zur Umformbarkeit
hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper
und additiv gefertigter Struktur
LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab.
2022. ISBN 978-3-96147-515-5

Band 392: Bastian Zimmermann
Einfluss des Vormaterials auf die mehr-
stufige Kaltumformung vom Draht
LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab.
2022. ISBN 978-3-96147-519-3

Band 393: Harald Völkl
Ein simulationsbasierter Ansatz zur Aus-
legung additiv gefertigter FLM-Faserver-
bundstrukturen
KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22
Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-523-0

Band 394: Robert Schulte
Auslegung und Anwendung prozessange-
passster Halbzeuge für Verfahren der
Blechmassivumformung
LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab.
2022. ISBN 978-3-96147-525-4

Abstract

In the area of tension between ecological and economic challenges, innovative processes are required in the field of production technology in order to be able to meet the increasing demands on new products. In this context, sheet-bulk metal forming represents a promising technology that combines the potentials of established sheet metal and bulk metal forming processes. The central challenges are mainly to ensure sufficient control of the locally varying biaxial and triaxial stress and strain states for the production of near-net-shape functional components. Against this background, the present work deepened and extended the understanding of the process with regard to the design and use of process-adapted semi-finished products in order to be able to increase the material flow control in accordance with the required component properties. As a basis for the investigations, the requirements-based design of a tool geometry to manufacture process-adapted semi-finished products was carried out using a numerical variant simulation, which was subsequently supplemented by a more efficient design approach. The central requirements include the avoidance of identified defect patterns on the externally toothed functional components, which are produced by the single-stage process combination of deep drawing and upsetting. The realisation of a sufficiently high material flow control is one of the basic prerequisites for the efficient production of defect-free functional components made of steel and aluminium alloys in sheet-bulk metal forming processes.

Im Spannungsfeld zwischen ökologischen und ökonomischen Herausforderungen werden im Bereich der Produktionstechnik innovative Verfahren benötigt, um die steigenden Anforderungen an neue Produkte erfüllen zu können. Die Blechmassivumformung stellt in diesem Zusammenhang eine vielversprechende Technologie dar, welche die Potentiale etablierter Verfahren der Blech- und Massivumformung kombiniert. Die zentralen Herausforderungen bestehen vor allem in der Sicherstellung einer ausreichenden Kontrolle der lokal variierenden zwei- und dreiachsigen Spannungs- und Dehnungszustände zur Herstellung endkonturnaher Bauteile. Vor diesem Hintergrund wurde in der vorliegenden Arbeit das Prozessverständnis hinsichtlich der Auslegung und des Einsatzes prozessangepasster Halbzeuge vertieft und erweitert, um die Stoffflusskontrolle entsprechend den geforderten Bauteileigenschaften steigern zu können. Als Grundlage der Untersuchungen wurde die anforderungsbasierte Auslegung einer zielführenden Werkzeuggeometrie zur Herstellung prozessangepasster Halbzeuge anhand einer numerischen Variantensimulation durchgeführt, welche nachfolgend um einen effizienteren Auslegungsansatz ergänzt wurde. Die zentralen Anforderungen umfassen die Vermeidung identifizierter Fehlerbilder an den außenverzahnten Funktionsbauteilen, welche durch die einstufige Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen hergestellt werden. Die Realisierung einer ausreichend hohen Stoffflusskontrolle ist bei Verfahren der Blechmassivumformung eine der Grundvoraussetzungen für die effiziente Herstellung fehlerfreier Funktionsbauteile aus Stahl- und Aluminiumlegierungen.

