

FAU Studien aus dem Maschinenbau 448

**Jan Hafenecker**

# Systematische Untersuchung zur Blechumformung von Hybridbauteilen



Jan Hafenecker

Systematische Untersuchung zur Blechumformung von Hybridbauteilen

# **FAU Studien aus dem Maschinenbau**

## **Band 448**

Herausgeber/-innen:

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. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Jan Hafenecker

# **Systematische Untersuchung zur Blechumformung von Hybridbauteilen**

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

Erlangen  
FAU University Press  
2024

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.

Kontakt: Jan Hafenecker, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, (<sup>ROA</sup> <https://ror.org/oof7hpc57>)

Bitte zitieren als

Hafenecker, Jan. 2024. *Systematische Untersuchung zur Blechumformung von Hybridbauteilen*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 448. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-765-4

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 OPEN FAU der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: <https://open.fau.de/home>

Verlag und Auslieferung:  
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-764-7 (Druckausgabe)  
eISBN: 978-3-96147-765-4 (Online-Ausgabe)  
ISSN: 2625-9974  
DOI: 10.25593/978-3-96147-765-4

# **Systematische Untersuchung zur Blechumformung von Hybridbauteilen**

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

zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von  
Jan Hafenecker, M.Sc.  
aus Coburg

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

Tag der mündlichen  
Prüfung:

25.03.2024

Gutachter/in: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein  
Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt  
Prof. Dr.-Ing. Peter Hoffmann

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg entstanden. Daher gilt mein erster Dank Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein, Ordinaria des Lehrstuhls, für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die wissenschaftliche Betreuung meiner Dissertation sowie die Möglichkeit zur fachlichen und persönlichen Weiterentwicklung. Die grundlegenden Untersuchungen dieser Arbeit basieren auf den Ergebnissen des Teilprojektes B5 „Additive und umformtechnische Fertigung hybrider Bauteile mit lokal angepassten Eigenschaften“ innerhalb des durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereichs 814 – „Additive Fertigung“. Das Teilprojekt B5 ist in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Photonische Technologien bearbeitet worden, weshalb ich meinem Projektpartner Richard Rothfelder für die gelungene Zusammenarbeit danken möchte.

Weiterhin bedanke ich mich im Allgemeinen bei den Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl, spreche jedoch vereinzelt meinen besonderen Dank aus. Weil sie mir zum Start meiner Zeit am Lehrstuhl, aber auch während des weiteren Verlaufs, fachliche und persönliche Unterstützung geboten haben, bedanke ich mich im Besonderen bei Herrn Dr.-Ing. Thomas Papke, Herrn Dr.-Ing. Philipp Frey und Frau Dr.-Ing. Clara-Maria Kuball. Als Bürokollegen, Gruppenleiter und Pate habt ihr mir ideale Startbedingungen ermöglicht und meinen Blick durch fachliche und fachfremde Diskussionen geöffnet. Ich habe die gemeinsame Zeit sehr genossen und bedanke mich dafür. Darüber hinaus danke ich Herrn Dr.-Ing. Harald Schmid und David Römisch für die Bereicherung durch den regen und humorvollen Austausch. Zuletzt bedanke ich mich bei Herrn Hermann Ebel und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Univ. Michael Lechner für die Unterstützung bei der Erzeugung und Darstellung der Forschungsergebnisse. Egal ob wieder kurzfristig benötigte Proben, angesetzte Fristen oder unleserliche Anmerkungen, habt auch ihr einen großen Teil zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen, wofür ich euch danke.

Anschließend möchte ich mich auch noch bei meinen Studierenden bedanken, die mir bei meinen Untersuchungen als studentische Hilfskräfte und in Form von studentischen Arbeiten eine große Unterstützung waren. Hervorheben möchte ich dabei Herrn Luca Franke, Herrn Markus Winterstein und Frau Eva Vallaster, die meine Zeit am Lehrstuhl durch die wissenschaftliche Unterstützung und ihre Begeisterung bereichert haben. Auf eurem weiteren Lebensweg wünsche ich euch nur das Beste.

Zuletzt gilt mein besonderer Dank meinen Eltern, die mir den akademischen Werdegang und die erfolgreiche Promotion überhaupt erst ermöglicht haben. Vielen Dank dafür, dass ihr mir nicht nur während der Promotionszeit als moralische Unterstützung und Motivation zur Seite steht.

## Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
$a_o$	mm	Ausgangsbreite der Probe
$b_1$	mm	Bahnhöhe
$b_2$	mm	Bahntiefe
$b_3$	mm	Bahnbreite
$d_M$	mm	Matrizendurchmesser
$d_P$	mm	Stempeldurchmesser
$d_{SSV}$	mm	Durchmesser der Plättchen für den Schichtstauchversuch
$d_{SV,o}$	mm	Ausgangsdurchmesser Stauchprobe
$d_{SV,max}$	mm	Maximaler Durchmesser Stauchprobe nach Versuch
$d_{SV,min}$	mm	Minimaler Durchmesser Stauchprobe nach Versuch
$f_F$	mm	Fokuslage
$h$	mm	Hatchabstand
$h_{SV,o}$	mm	Ausgangshöhe Stauchprobe
$h_{SV,i}$	mm	Höhe Stauchprobe nach Versuch
$k_f$	N/mm <sup>2</sup>	Fließspannung
$k_{f,max}$	N/mm <sup>2</sup>	Maximale Fließspannung
$k_{fo}$	N/mm <sup>2</sup>	Anfangsfließspannung unter einachsiger Zugbelastung
$k_{fo,SV}$	N/mm <sup>2</sup>	Anfangsfließspannung unter einachsiger Druckbelastung
$l_{AME}$	mm	Durch Funktionselemente bedeckte Länge
$n$	-	Anzahl der Wiederholversuche
$n_{SSV}$	-	Anzahl der Plättchen für den Schichtstauchversuch
$n_v$	-	Verfestigungsexponent

$r$	-	Senkrechte Anisotropie
$r_b$	-	Biaxialer Anisotropiekoeffizient
$r_M$	mm	Matrizenradius
$r_{Nutz}$	mm	Radius der für Additivstrukturen nutzbaren Fläche des Hybridbauteils
$r_P$	mm	Stempelradius
$s$	mm	Abstand zwischen Messpunkten
$s_Z$	mm	Ziehtiefe
$t$	mm	Schichtdicke
$t_B$	mm	Blechdicke
$v_S$	mm/s	Scangeschwindigkeit
$A$	%	Bruchdehnung
$A_{AME}$	mm <sup>2</sup>	Durch Funktionselemente bedeckte Fläche
$A_g$	%	Gleichmaßdehnung
$A_{Nutz}$	mm <sup>2</sup>	Für Additivstrukturen nutzbare Fläche des Hybridbauteils
$AR$	-	Aspektverhältnis
$A_s$	mm <sup>2</sup>	aktuelle Querschnittsfläche
$D$	mm	Durchmesser der additiv gefertigten Funktionselemente
$E_L$	J/mm <sup>2</sup>	Linienenergie
$E_V$	J/mm <sup>3</sup>	Volumenenergie
$F$	N	Kraft
$F_{NH}$	N	Niederhalterkraft
$H$	mm	Höhe der additiv gefertigten Funktionselemente
$Num$	-	Anzahl der additiv gefertigten Funktionselemente
$P_L$	W	Laserleistung

$Pos$	mm	Abstand der additiv gefertigten Funktionselemente zum Zentrum des Bauteils
$R_a$	$\mu\text{m}$	Arithmetischer Mittenrauwert
$Rad$	mm	Übergangsradius am Fuß der additiv gefertigten Funktionselemente
$R_F$	%	Anteil der durch Funktionselemente überlagerten Fläche bezogen auf die nutzbare Fläche
$R_L$	%	Maximaler Anteil der durch Funktionselemente überlagerten radialen Länge bezogen auf den nutzbaren Radius
$R_m$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Dehngrenze
$R_V$	-	Richtwert der Gleichmäßigkeit der Verteilung der Funktionselemente
$R_z$	$\mu\text{m}$	Gemittelte Rautiefe
$\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z$	%	Dehnung
$\mu$	-	Reibzahl
$\rho$	%	Relative Dichte
$\sigma_s$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Scherfestigkeit
$\varphi$	-	Umformgrad

**Abkürzung Bedeutung**

hdp	Hexagonal dichtest gepackt
kfz	Kubisch flächenzentriert
krz	Kubisch raumzentriert
AM	Additive manufacturing – additive Fertigung
AME	Additiv gefertigtes Funktionselement
CAD	Computer-Aided-Design

DED/LB-M	Laserbased directed energy deposition of metals – laserbasierte gerichtete Energieeinbringung von Metallen
ESB	Einzelweißbahnen
FE	Finite-Elemente
FLC	Grenzformänderungskurve aus dem englischen forming limit curve
HIP	Heiß isostatisches Pressen
HTV	Hydraulischer Tiefungsversuch
NRFP	Napfrückwärtsfließpressen
PBF/LB-M	Laserbased Powderbed fusion of metals – laserbasiertes Pulverbettsschmelzen von Metallen
STL	Standard Triangulation Language
TRIP	Transformation induced plasticity – durch Phasenumwandlung induzierte Plastizität
TWIP	Twinning induced plasticity – durch Zwillingsbildung induzierte Plastizität
WAAM	Wire + arc additive manufacturing – additive Fertigung durch drahtbasiertes Lichtbogenschweißen

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>v</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>xiii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>xv</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik und Forschung .....</b>	<b>3</b>
2.1 Additive Fertigungsverfahren.....	3
2.2 Umformbarkeit von metallischen Werkstoffen für Fertigung von Hybridbauteilen .....	5
2.2.1 Charakterisierung mechanischer Eigenschaften und des Umformverhaltens.....	5
2.2.2 Werkstoffkenngrößen für die numerische Werkstoffmodellierung .....	7
2.2.3 Metallische Werkstoffe für die Fertigung von Hybridbauteilen.....	7
2.3 Hybridbauteile .....	12
2.3.1 Definition „Hybrid“ in der Fertigung .....	12
2.3.2 Hybride additive Fertigung.....	13
2.3.3 Hybridbauteile hergestellt durch additive Fertigung und Umformtechnik .....	14
2.4 Zusammenfassende Bewertung des Standes der Forschung und Technik .....	24
<b>3 Zielsetzung und methodische Vorgehensweise.....</b>	<b>27</b>
<b>4 Verwendete Werkstoffe, Anlagen, Methoden und numerische Modelle.....</b>	<b>31</b>
4.1 Versuchswerkstoff – austenitischer rostfreier Edelstahl 1.4404.....	31
4.2 Herstellung von Additivstrukturen .....	33
4.3 Metallographische Aufbereitung der Proben .....	35

4.4	Methoden zur Bestimmung der mechanischen Werkstoffeigenschaften .....	36
4.4.1	Optische Dehnungsmessung mittels digitaler Bildkorrelation .....	36
4.4.2	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften bei Raumtemperatur .....	36
4.4.3	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen .....	43
4.5	Methoden zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften .....	44
4.5.1	Bauteilgeometrieerfassung mittels Streifenlichtprojektion ...	44
4.5.2	Bauteilgeometrieerfassung mittels Fokusvariation .....	44
4.6	Umformtechnische Formgebung durch Tiefziehen mit halbkugelförmigem Stempel .....	45
4.7	Finite-Elemente-Simulation .....	46
<b>5</b>	<b>Erarbeitung einer Prozessführungsstrategie zur Fertigung von Hybridbauteilen .....</b>	<b>49</b>
5.1	Untersuchung von Einzelschweißbahnen als Grundlage für Additivkörper .....	50
5.2	Analyse volumenhafter Prüfkörper .....	56
5.3	Additive Fertigung von Charakterisierungsproben .....	62
5.4	Abgeleitete Prozessführungsstrategie zur Fertigung von Hybridbauteilen .....	63
<b>6</b>	<b>Analyse der mechanischen Werkstoffeigenschaften .....</b>	<b>65</b>
6.1	Ermittlung der mechanischen Kennwerte unter Temperatureinfluss ..	65
6.1.1	Ermittlung der Kennwerte bei Raumtemperatur .....	65
6.1.2	Ermittlung der Kennwerte bei erhöhten Temperaturen .....	73
6.1.3	Kennwertermittlung für die numerische Werkstoffmodellierung .....	76
6.2	Numerische Werkstoffmodellierung in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens .....	80
6.3	Vergleich der mechanischen Eigenschaften von konventionell und additiv gefertigtem Material .....	85

<b>7</b>	<b>Erarbeitung der Einflussmechanismen bei der Herstellung von Hybridbauteilen durch einen kombinierten experimentellen und numerischen Ansatz .....</b>	<b>89</b>
7.1	Spannungszustände in der Blechumformung .....	89
7.2	Untersuchung des Tiefziehprozesses von Hybridbauteilen mithilfe eines kombinierten numerisch experimentellen Ansatzes ....	94
7.2.1	Grundlagenuntersuchungen .....	95
7.2.2	Ganzheitliche Untersuchung der geometrischen Einflussfaktoren additiv gefertigter Funktionselemente auf das Materialverhalten von Hybridbauteilen im Tiefziehprozess .....	104
7.3	Zusammenfassende Bewertung der Wirkzusammenhänge bei der Blechumformung von Hybridbauteilen .....	130
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>135</b>
<b>9</b>	<b>Summary and outlook .....</b>	<b>139</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>143</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>147</b>



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht ausgewählter mechanischer Eigenschaften der additiv verarbeiteten Edelstahllegierung 1.4404 aus der Literatur (- = keine Angaben) .....	9
Tabelle 2:	Übersicht ausgewählter Nachbearbeitungsverfahren für Additivbauteile .....	15
Tabelle 3:	Chemische Zusammensetzung des untersuchten Edelstahls 1.4404 in Pulverform .....	31
Tabelle 4:	Chemische Zusammensetzung des untersuchten Blechwerkstoffs 1.4404 .....	32
Tabelle 5:	Mechanische Eigenschaften des verwendeten Werkstoffs 1.4404 als Blechwerkstoff und im additiv gefertigten Zustand.....	32
Tabelle 6:	Vollfaktorieller Versuchsplan zur Herstellung von volumenhaften additiv gefertigten Probekörpern .....	143



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Methodische Vorgehensweise zur Erarbeitung des Prozessverständnisses für die Blechumformung von Hybridbauteilen .....	28
Abbildung 2:	Schematischer Aufbau des PBF-LB/M-Prozesses nach [156] .....	33
Abbildung 3:	Werkzeugaufbau der Stauchversuche .....	40
Abbildung 4:	a) Aufbau der Kamerasysteme für den Schichtstauchversuch b) beispielhafter Probenstapel .....	41
Abbildung 5:	a) Prüfaufbau zur Analyse der Verbundfestigkeit unter Scherbelastung in Anlehnung an [138], b) zuvor verwendete Stempelgeometrie, c) angepasste Stempelgeometrie .....	42
Abbildung 6:	Werkzeugaufbau zum Tiefziehen bei Temperaturen bis zu 600 °C und Abmaße der Aktivteile .....	45
Abbildung 7:	Vorgehen für die additive Fertigung von Hybridbauteilen: a) Einzelschweißbahnen, b) volumenhafte Probekörper, c) Charakterisierungsproben .....	49
Abbildung 8:	Planung der Einzelschweißbahnuntersuchung auf Blechsubstrat .....	50
Abbildung 9:	a) Schematische Darstellung der ermittelten Einzelschweißbahngeometrien, b) beispielhaftes metallographisches Schliffbild mit eingezeichneten Messgrößen .....	51
Abbildung 10:	a) Einflussuntersuchung und b) Haupteffektdiagramm bezüglich der Bahnhöhe .....	52
Abbildung 11:	a) Einflussuntersuchung und b) Haupteffektdiagramm bezüglich der Bahntiefe .....	53
Abbildung 12:	a) Einflussuntersuchung und b) Haupteffektdiagramm bezüglich der Bahnbreite .....	53
Abbildung 13:	a) Einflussuntersuchung und b) Haupteffektdiagramm bezüglich des Aspektverhältnisses .....	54

Abbildung 14:	Beispielhafte Prozessfehler bei der Fertigung von Einzelschweißbahnen .....	55
Abbildung 15:	Untersuchter Versuchsraum für die Fertigung von volumenhaften Prüfkörpern auf Blechsubstrat .....	56
Abbildung 16:	Vorgehen zur Messung der relativen Dichte $\rho$ der Volumenkörper .....	57
Abbildung 17:	Ergebnisse der Dichtemessung volumenhafter Prüfkörper auf Blechsubstrat innerhalb des untersuchten Versuchsraumes.....	57
Abbildung 18:	Schliffbilder volumenhafter Additivkörper mit a) zu geringem Energieeintrag – Anbindungsfehler, b) ausreichendem Energieeintrag – keine Poren, c) zu hohem Energieeintrag - Gasporenbildung.....	58
Abbildung 19:	a) Relative Dichte und b) Scherfestigkeit additiv gefertigter Elemente in Abhängigkeit der Volumenenergiedichte für die Fokuslage -0,5 mm.....	60
Abbildung 20:	Vorgehen zur Härtemessung der volumenhaften Prüfkörper auf Blechsubstrat inklusive Verteilung der Messpunkte und Auswertungsbereiche .....	60
Abbildung 21:	Härteverteilung der volumenhaften Probekörper a) in Baurichtung (axial) und b) senkrecht (radial) dazu für Parametersatz 24.....	61
Abbildung 22:	Im PBF-LB/M hergestellt: a) Rohling für Flachzugprobe, b) Flachzugprobe nach der spanenden Bearbeitung, c) horizontal gefertigter Rohling für Stauchproben, d) vertikal gefertigter Rohling für Stauchproben, e) Zylinderstauchprobe nach der spanenden Bearbeitung .....	63
Abbildung 23:	Im Stauchversuch bei Raumtemperatur ermittelten a) Kennwerte und b) Fließkurven für konventionell und additiv gefertigten Werkstoff 1.4404.....	66
Abbildung 24:	Stauchproben vor (a) und nach der Prüfung: b) konventionell, c) additiv vertikal gebaut, d + e) additiv horizontal gebaut .....	67
Abbildung 25:	Schematische Darstellung der Ausrichtung der Dendriten additiv gefertigter Stauchproben mit unterschiedlichen Aufbaurichtungen .....	68

Abbildung 26:	Querschnitt von additiv gefertigten Stauchproben a) vor der Umformung und b) nach der Umformung .....	69
Abbildung 27:	Im einachsigen Zugversuch bei Raumtemperatur ermittelte mechanische Kennwerte für konventionell und additiv gefertigten Werkstoff 1.4404 .....	70
Abbildung 28:	a) Additiv gefertigte Zugprobe a) vor der Prüfung und b) nach der Prüfung mit schematischer Darstellung der Kornstruktur und Schlibbildern .....	72
Abbildung 29:	Mechanische Kennwerte von 1.4404 a) Blechwerkstoff und b) Additivwerkstoff für untersuchte Temperaturen .....	74
Abbildung 30:	Im Schichtstauchversuch ermittelte Kennwerte für den untersuchten Werkstoff 1.4404; a) Probenstapel vor der Umformung, b) Probenstapel nach der Umformung und c) zur Kennwertberechnung gemessene Probendurchmesser .....	76
Abbildung 31:	Haupt- und Nebenumformgrade des untersuchten Werkstoffs 1.4404 im mechanischen Tiefungsversuch.....	77
Abbildung 32:	Grenzformänderungskurve (FLC) aus den im mechanischen (Nakajima) und hydraulischen Tiefungsversuch (HTV) ermittelten Umformgrade für den Stahl 1.4404 .....	79
Abbildung 33:	Modellierte Fließortkurven des additiv gefertigten und des Blechwerkstoffs für die numerische Simulation .....	81
Abbildung 34:	a) Experimentell ermittelte Fließkurven, b) Fließkurven zur Extrapolation nach DIN EN ISO 16808 [168], c) experimentell ermittelte Fließkurve des Additivwerkstoffs mit Extrapolationsansätzen nach Ghosh [48], Swift [46] und Hockett-Sherby [47], d) Extrapolierte Fließkurven für die numerische Prozesssimulation .....	82
Abbildung 35:	Beispielhaftes FLC-Diagramm für die numerische Abbildung eines Blechumformprozesses .....	84
Abbildung 36:	Vergleich der Eigenschaften konventionell und additiv gefertigten Materials hinsichtlich ausgewählter Kriterien.....	86

Abbildung 37:	a) Blechrolle als Halbzeug für das Tiefziehen, b) tiefgezogener Napf, c) charakteristische Bereiche und Spannungszustände beim Tiefziehen nach [7].....	90
Abbildung 38:	a) Blechrolle als Halbzeug für das Streckziehen, b) streckgezogener, halbkugelförmiger Napf, c) charakteristische Bereiche und dazugehörige Spannungszustände beim Streckziehen nach [7].....	91
Abbildung 39:	a) Platine als Halbzeug für den Biegeprozess, b) gebogenes Bauteil, c) charakteristische Bereiche und Spannungszustände beim Biegen nach [7] .....	92
Abbildung 40:	Zusammenfassung der für Additivkomponenten nutzbaren Flächen (farblich hervorgehoben) und dort anliegenden Spannungszustände für die Verfahren a) Tiefziehen, b) Streckziehen und c) Biegen .....	93
Abbildung 41:	a) Tiefgezogenes Bauteil, b) Spannungszustände im Bauteil und farblich hervorgehobene, für Additivkomponenten nutzbare Fläche, c) Haupt- und Nebenumformgrad der Elemente in der nutzbaren Fläche aus der numerischen Simulation .....	94
Abbildung 42:	Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe aus numerischer Simulation und durchgeführten Experimenten für a) einfaches Blech und b) Hybridbauteil.....	95
Abbildung 43:	Vergleich der Geometrieschnitte entlang der Walzrichtung aus numerischer Simulation und durchgeführten Experimenten für a) einfaches Blech und b) Hybridbauteil.....	96
Abbildung 44:	Vergleich der Blechdickenverteilung entlang der Walzrichtung aus numerischer Simulation und durchgeführten Experimenten für a) einfaches Blech und b) Hybridbauteil.....	97
Abbildung 45:	a) Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe von Blech und Hybridbauteil, beispielhaftes tiefgezogenes b) Blechbauteil und c) Hybridbauteil .....	98
Abbildung 46:	Spannungsverteilung aus der numerischen Simulation für a) Blechhalbzeug und b) Hybridbauteil im Tiefziehprozess .....	99
Abbildung 47:	Vergleich der gemessenen Blechdickenverteilung von a) Blech und b) Hybridbauteil .....	100

Abbildung 48: Maximale Umformgrade aus der numerischen Simulation eines Blechs ohne und mit Funktionselement (Hybrid) .....	101
Abbildung 49: Übersicht identifizierter Einflussfaktoren bei der Umformung von Hybridbauteilen .....	102
Abbildung 50: a) Maximale Umformgrade, b) Blechdickenverteilung entlang der Walzrichtung und c) Abweichungen für Simulationen mit gleichen und unterschiedlichen Fließkurven.....	103
Abbildung 51: Übersicht über die untersuchten Parameter der additiv gefertigten Elemente .....	105
Abbildung 52: Untersuchte Varianten der Höhe und des Durchmessers des additiv gefertigten Funktionselements .....	106
Abbildung 53: Gemessene Blechausdünnung der umgeformten Hybridbauteile mit einem Funktionselement für variierende a) Höhe und b) Durchmesser.....	107
Abbildung 54: Spannungen in x-Richtung aus der numerischen Simulation eines Hybridbauteils mit einem Funktionselement mit variierender a) Höhe und b) Durchmesser .....	108
Abbildung 55: Maximale Umformgrade aus der numerischen Simulation eines Hybridbauteils mit einem Funktionselement für variierende a) Höhe und b) Durchmesser .....	108
Abbildung 56: Spannungen in radialer und axialer Richtung aus der numerischen Simulation im Funktionselement für unterschiedliche Elementhöhen (a-c) und Elementdurchmesser (d-f) .....	109
Abbildung 57: Schematische Darstellung des Materialverhaltens von Hybridbauteilen mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften für Belastungen a) in Reihe und b) in paralleler Anordnung.....	110
Abbildung 58: Im Übergangsbereich der Hybridbauteile gemessene maximale Blechausdünnung für variierte Durchmesser und Höhen .....	112

Abbildung 59:	Umgeformte Hybridbauteile mit Funktionselementen an den untersuchten Positionen entlang der Walzrichtung des Blechgrundkörpers.....	113
Abbildung 60:	Blechdickenreduktion eines Blechs ohne Funktionselemente aus der numerischen Simulation mit Positionen a) in Walzrichtung und c) senkrecht zur Walzrichtung mit den dazugehörigen Umformgraden (b und respektive d).....	114
Abbildung 61:	a) Maximale lokale Blechdünnung für die Hybridbauteile mit Funktionskörpern an den untersuchten Positionen, b) untersuchte Positionen in Relation zur Walzrichtung.....	115
Abbildung 62:	Grenzformänderungsdiagramme aus der numerischen Simulation für Hybridbauteile mit zwei Funktionselementen mit Abständen 5-20 mm zum Zentrum, jeweils mit Orientierung in Walzrichtung und senkrecht zur Walzrichtung.....	117
Abbildung 63:	Schematische Darstellung des Vorgehens zur Berechnung der Kennwerte a) Flächenverhältnis, b) maximales Linienverhältnis und c) Verteilungsverhältnis.....	118
Abbildung 64:	Darstellung der untersuchten Hybridbauteilvarianten mit dazugehörigen berechneten Kennwerten.....	119
Abbildung 65:	Maximale Blechdünnung über den Flächenanteil $R_F$ für die untersuchten Hybridbauteilvarianten.....	120
Abbildung 66:	Maximale Blechdünnung über den maximalen Linienanteil $R_L$ für die untersuchten Hybridbauteilvarianten.....	121
Abbildung 67:	Maximale Blechdünnung aus der numerischen Simulation über den Kennwert der Gleichmäßigkeitsabweichung $R_V$ und die berechnete Korrelation.....	122
Abbildung 68:	Grenzformänderungsdiagramme aus der numerischen Simulation für die untersuchten Varianten.....	124

Abbildung 69: Zur Untersuchung der Wechselwirkungen genutzte Faktoren und Faktorstufen mit beispielhafter Darstellungen der Ausprägungen des Parameters <i>Num</i> .....	125
Abbildung 70: Haupteinflüsse der Faktoren Durchmesser ( <i>D</i> ), Anzahl ( <i>Num</i> ) und Abstand ( <i>Pos</i> ) der additiv gefertigten Funktionselemente auf die maximale Blechausdünnung .....	125
Abbildung 71: Einfachwechselwirkungen zwischen den Faktoren Durchmesser ( <i>D</i> ), Anzahl ( <i>Num</i> ) und Abstand ( <i>Pos</i> ) der additiv gefertigten Funktionselemente.....	127
Abbildung 72: Numerisch berechnete maximale Blechausdünnungen über die Verteilungsabweichungen $R_V$ mit dazugehöriger Korrelation nach Pearson .....	128
Abbildung 73: Graphische Darstellung der erarbeiteten Zusammenhänge bei der Gestaltung von Funktionselementen hinsichtlich der Umformung von Hybridbauteilen .....	129
Abbildung 74: Zusammenfassung der Einflussfaktoren bei der Blechumformung von Hybridbauteilen .....	131
Abbildung 75: Härteverteilung der volumenhaften Probekörper a) in Baurichtung (axial) und b) senkrecht (radial) dazu für Parametersatz 12.....	144
Abbildung 76: Härteverteilung der volumenhaften Probekörper a) in Baurichtung (axial) und b) senkrecht (radial) dazu für Parametersatz 15.....	144
Abbildung 77: Härteverteilung der volumenhaften Probekörper a) in Baurichtung (axial) und b) senkrecht (radial) dazu für Parametersatz 18 .....	144
Abbildung 78: Härteverteilung der volumenhaften Probekörper a) in Baurichtung (axial) und b) senkrecht (radial) dazu für Parametersatz 21.....	145



# 1 Einleitung

„Any customer can have a car painted any color that he wants so long as it is black“ [1]. So schrieb Henry Ford einst über die Fertigung seines Model T. Eine schwarze Lackierung der Karosserieteile trocknete am schnellsten [2], weshalb die Anpassungsmöglichkeiten der Effizienz der Produktion unterlagen. Im heutigen Automobilbau sind die Möglichkeiten zur Anpassung im Laufe der Zeit gestiegen, wobei die Fertigungszeit kontinuierlich sinkt [3]. Gleichzeitig stieg die Variantenvielfalt drastisch an [3]. Weil konventionelle Verfahren durch die steigenden Anforderungen bedingt durch den Wunsch nach Personalisierung, Flexibilität und Nachhaltigkeit an ihre Grenzen gebracht werden, braucht es fortschrittliche Verfahren, um wettbewerbsfähig zu bleiben [4]. Ein Beispiel stellt der aktuelle Trend der personalisierten Massenfertigung (im englischen „mass customization“) dar, bei dem individualisierte Produkte mit einer Effizienz ähnlich der der Massenfertigung hergestellt werden [5].

Eben diese Effizienz in der Fertigung zeichnet die Umformtechnik unter anderem aus [6]. Einen weiteren Vorteil stellt die Kombination aus Formgebung und Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Bauteile dar, die nach dem Umformschritt teils direkt genutzt werden können [7]. Aber im Hinblick auf steigende Variantenanzahl und Flexibilität verhindern die hohen Anlagen- und Werkzeugkosten [6] eine stärkere Ausprägung dieser Bereiche. Gegenteilig ist es im Bereich der additiven Fertigung, bei der der werkzeuglose Ansatz ein Maximum an Flexibilität und geometrischer Freiheit bietet [8]. Im Bereich der Einzelfertigung und Kleinserie kann somit kosten- und zeiteffizient produziert werden [9]. Mit steigender Losgröße fällt die vergleichsweise hohe Fertigungszeit, gesteigert durch prozessbedingten Nachbearbeitungsaufwand, deutlich ins Gewicht [9]. Um die Grenzen der Einzelprozesse zu überwinden werden Verfahren kombiniert, um Synergien zu erzeugen [10]. Die Hybridisierung stellt einen weiteren aktuellen Trend der Fertigungstechnologie dar [10]. Hybridbauteile mit lokal unterschiedlichen Eigenschaften, gefertigt durch die Kombination aus Umformtechnik und additiver Fertigung, eröffnen einen neuartigen Ansatz in der Produktion von individualisierten Bauteilen. Die Kombination von Prozessen bietet das Potenzial, Ressourcen effizienter zu nutzen, Produktionszeiten zu reduzieren und die Anwendungsdauer von Bauteilen zu steigern [11]. Damit das Potential von Hybridbauteilend vollends genutzt werden kann, ist es unabdingbar, die Wechselwirkungen zwischen den Prozessen zu verstehen. Wegen der Neuheit dieser Prozesskom-

bination besteht noch immer Forschungsbedarf hinsichtlich der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge bei der Umformung von Hybridbauteilen.

Deshalb soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein umfassendes Prozessverständnis für die Gestaltung von Hybridbauteilen erarbeitet werden. Im Einzelnen wird der geometrische Einfluss additiv gefertigter Zylinder auf Blechgrundkörper beim Umformen von Hybridbauteilen im Hinblick auf mehrere Funktionselemente analysiert. Die Untersuchung umfasst dabei die Fertigung von Hybridbauteilen durch den additiven Aufbau von Funktionselementen auf Blechgrundkörpern mithilfe des pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzens, die anschließend tiefgezogen werden. Zur fehlerfreien Herstellung der Funktionselemente auf Blechsubstraten wird anfangs eine geeignete Prozessführungsstrategie für die Verarbeitung des verwendeten Edeltstahls 1.4404 ermittelt. Auf Charakterisierungsversuchen von additiv und konventionell gefertigtem Material basierend werden mechanische Kenngrößen ermittelt, die für einen Vergleich der beiden Komponenten der Hybridbauteile in Abhängigkeit der Temperatur genutzt werden. Darüber hinaus wird auf Basis der ermittelten Kennwerte ein lokal angepasster Materialmodellierungsansatz entwickelt, um den Umformprozess simulativ abzubilden. Durch die Kombination aus numerischer Prozessabbildung und experimenteller Versuchsdurchführung werden Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge abgeleitet, um den Einfluss der additiv gefertigten Funktionselemente auf den Tiefziehprozess zu untersuchen. Abschließend wird anhand eines Vergleichs der erarbeiteten Zusammenhänge eine umfassende Bewertung bezüglich der Hybridbauteilherstellung abgeleitet.

Auf diese Weise wird die Erforschung neuartiger Hybridbauteile vorangetrieben, um das Potenzial sowohl von wohlbekanntem Verfahren wie der Umformtechnik als auch jüngerer Verfahren wie der additiven Fertigung zu erweitern. Die Kombination beider Verfahren zur Herstellung derartiger Bauteile dient dem Fortschritt der Fertigungstechnologie, um aktuellen globalen Herausforderungen hinsichtlich Nachhaltigkeit und Flexibilität gerecht zu werden.

## 2 Stand der Technik und Forschung

In den folgenden Abschnitten werden die technischen und wissenschaftlichen Grundlagen dargeboten, die für diese Arbeit relevant sind. Der aktuelle Stand der Forschung von Hybridbauteilen steht dabei im Fokus. Neben aktuellen Beispielen wird auch die Definition des Begriffes „Hybrid“ genauer analysiert. Wegen der in dieser Arbeit untersuchten Prozesskombination aus Umformtechnik und additiver Fertigung, werden im Folgenden die Umformbarkeit von metallischen Werkstoffen und die additiven Fertigungsverfahren behandelt.

### 2.1 Additive Fertigungsverfahren

Der werkzeuglose Ansatz [12] der additive Fertigungsverfahren bietet eine hohe Flexibilität und Materialausnutzung [13]. Besonders ist die geometrische Freiheit, die es ermöglicht, Bauteile zu fertigen, die mit anderen Verfahren nicht oder nur unter erheblichem Mehraufwand herstellbar sind [8]. Damit bietet die additiv Fertigung einen Lösungsansatz zur Bewältigung der steigenden Kundenanforderungen [14]. Nachteilig zeigen sich die hohen Investitionskosten, das benötigte Fachwissen und der Aufwand zur Qualitätssicherung [13]. Weiterhin stellen die geringe Produktivität aufgrund langer Fertigungszeiten, die begrenzte Bauteilgröße und der hohe Energiebedarf zur Herstellung des pulverförmigen Ausgangsmaterials Herausforderungen dar [15].

Nach DIN EN ISO/ASTM 52900 [16] wird die additive Fertigung als Prozess des Verbindens bezeichnet, der zur Herstellung von Bauteilen aus 3D-Modelldaten, anders als subtraktive oder umformende Fertigungsmethoden, einen schichtweisen Aufbau nutzt. Unterteilt werden diese Fertigungsprozesse in sieben verschiedene Kategorien [16], von denen im Bereich der Metalle mehr als 50 % mittels pulverbettbasierter Systeme (PBF – nach englischem Begriff powder bed fusion) und gut 16 % mittels gerichteter Energieeinbringung (DED – nach englischem Begriff directed energy deposition) verarbeitet werden [17]. Eine weitere Unterteilung findet anhand der Energiequelle [18] oder des verwendeten Ausgangswerkstoff [9] statt. Für das PBF und DED kann die Prozesswärme durch Laserstrahlung (LB – nach englischem Begriff laser beam) oder Elektronenstrahl (EB – nach englischem Begriff electron beam) erfolgen [19]. Dementsprechend ergibt sich die Abkürzung wie folgt: PBF-LB/M für das laserbasierte Pulverbettsschmelzen von Metallen. Im Falle von DED-Prozessen ist die

Verarbeitung von Werkstoffen in Pulver- und in Drahtform möglich [20], wohingegen beim PBF nur Pulverwerkstoffe genutzt werden [21].

Zur additiven Fertigung von Bauteilen sind grundsätzlich drei Vorgänge notwendig: Vorbereitung, Prozess, Nachbereitung. Die Vorbereitung umfasst die Konstruktion des Bauteils im CAD (Computer-Aided-Design) [14] oder die Erzeugung von Geometrien durch optische Topographiemessung [8]. In beiden Fällen wird die Bauteilgeometrie durch eine abgeleitete STL-Datei (Standard Triangulation Language) abstrahiert, in der die Oberfläche durch Dreiecke abgebildet wird [14]. Mit steigender Größe der Dreiecke nimmt die Abweichung zwischen Originalgeometrie und STL-Datei ab, jedoch steigt auch der Berechnungsaufwand und die Dateigröße [22]. Das digitale Bauteil wird im Bauraum platziert und orientiert, gegebenenfalls werden Stützstrukturen ergänzt [8]. Die Geometrie im STL-Format wird in Schichten unterteilt, deren Größe der Schichtdicke im Prozess entsprechen [14]. Jede Schicht wird in einzelne Bahnen mit definierten Einstellungen (Laserleistung, Bahngeschwindigkeit, Fokusbereich, Hatchabstand) gefüllt [14]. Die Nachbereitung des Prozesses umfasst das Entfernen des nicht aufgeschmolzenen Pulvers, sowie vorhandener Stützstrukturen [14].

Der Prozess des PBF besteht aus einer Iteration von drei Prozessschritten: Beschichten, Belichten, Bewegen [23]. Während der kurzen Zeit, in der das Material aufschmilzt und wieder erstarrt, entstehen Abkühlraten von etwa  $10^6$  K/s [24], analog dazu  $10^3$ - $10^4$  K/s beim DED-LB/M [25], die in einer feinkörnigen Kornstruktur resultieren [26]. Diese hohen Abkühlraten erzeugen Gefüge, die mit Legierungsstoffen, Versetzungen und metastabilen Phasen gesättigt sind [27]. Die Abkühlraten können durch Anpassung der Leistung, Geschwindigkeit [24] oder Temperaturführung [25] beeinflusst werden. Außerdem führen die hohen Abkühlraten zu Eigenspannungen im Bauteil und thermisch bedingtem Verzug [28]. Das feinkörnige Gefüge und die Eigenspannungen beeinflussen die mechanischen Eigenschaften [28] additiv gefertigter Bauteile, wie auch die hohe Oberflächenrauheit und Defekte [26], die durch die Interaktion zwischen Schmelze und Pulver entstehen können [24]. Diese Einflüsse müssen vor allem im Hinblick auf die weitere Verarbeitung der Bauteile, beispielsweise durch eine Umformoperation, berücksichtigt werden.

## 2.2 Umformbarkeit von metallischen Werkstoffen für Fertigung von Hybridbauteilen

Im Folgenden wird erläutert, welche Werkstoffe in der additiven Fertigung und welche in der Umformtechnik verwendet werden sowie die Frage nach einer möglichen Schnittmenge. Zuvor wird beschrieben, wie sich die Umformbarkeit eines Werkstoffs definiert und messen lässt und wie diese Informationen innerhalb einer numerischen Prozesssimulation genutzt werden.

### 2.2.1 Charakterisierung mechanischer Eigenschaften und des Umformverhaltens

Die Kenntnis der Charakteristika metallischer Werkstoffe ermöglicht es, das Verhalten eines Werkstoffs innerhalb eines Umformprozesses zu verstehen und abbilden zu können. Die Umformbarkeit eines Werkstoffs ist abhängig von der chemischen Zusammensetzung, dem vorhandenen Gefüge, der Temperatur und der umformtechnischen Vorgeschichte, lässt sich aber nicht eindeutig messen [29]. Daher wird versucht, eine Aussage über das plastische Formänderungsvermögen anhand von mechanischen Kenngrößen zu treffen [29]. Die plastische Formbarkeit wird in erster Linie durch dessen Kristallstruktur beeinflusst [6].

Die Anzahl der Gleitsysteme gibt Auskunft darüber, wieviel Gleitmöglichkeiten für eine plastische Verformung existieren [30]. Je dichter die Gleitebenen besetzt sind, desto weniger Energie erfordert ein Gleitvorgang [31]. Das Gleiche gilt für Gleitrichtungen und die resultierende Schrittweite [30]. Der Kraftbedarf für eine plastische Verformung hängt somit von der Anzahl der Gleitsysteme, der Gleiteignung der Gleitebene und der Schrittweite der Gleitrichtung ab [6]. Bei Werkstoffe mit kfz-Kristallstruktur ( $\gamma$ -Eisen – Austenit [6]) wird aufgrund der höheren Dichte weniger Energie benötigt, als bei Werkstoffen mit krz- ( $\alpha$ -Eisen – Ferrit [6]) oder hdp-Kristallstruktur ( $\alpha$ -Titan [6]) [31]. Die werkstoffabhängige Spannung, bei der die plastische Formänderung beginnt, wird Fließspannung  $k_f$  genannt [6]. Trägt man die Fließspannung über den Umformgrad  $\varphi$  (logarithmierte Längenänderung) auf, so erhält man die Fließkurve, die Auskunft über das Verfestigungsverhalten eines Werkstoffs während der plastischen Verformung gibt [29].

Eine vergleichsweise einfache Möglichkeit zur Aufnahme einer Fließkurve stellt der Zugversuch dar [32]. Gleichzeitig können damit auch die Streckgrenze, die Zugfestigkeit, die Gleichmaßdehnung, die Bruchdehnung, der

Verfestigungsexponent und die Anisotropie von Blechwerkstoffen bestimmt werden [33]. Anisotropie beschreibt die Richtungsabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften, wie sie beispielsweise durch einen Walzprozess erzeugt wird [34]. Um eine präzisere Aussage über den Fließbeginn eines Blechwerkstoffs zu treffen, werden Fließkurven für gewöhnlich in Abhängigkeit der Walzrichtung aufgenommen [34]. Weil der Fließbeginn jedoch abhängig von allen Hauptnormalspannungen ist [7], werden sogenannte Fließortkurven verwendet [34]. Darin sind alle Fließspannungen in Abhängigkeit vom Verhältnis der Hauptspannungen aufgetragen [34]. Üblicherweise werden zur Modellierung der Fließortkurve Stützpunkte genutzt, die je nach Ansatz andere Versuche erfordern [34]. Exemplarisch seien an dieser Stelle die Zugbelastung in  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$  zur Walzrichtung, der biaxiale Zug und der einachsige Druck genannt [34]. Zur Abbildung von isotropen Materialien werden unter anderem die Ansätze nach Tresca [35], gemäß dem der Werkstoff zu fließen beginnt, sobald die kritische Schubfließspannung überschritten wird, und von Mises [36], der den Fließbeginn in Abhängigkeit von der elastischen Gestaltänderungsenergie der Versetzungen beschreibt, genutzt [34]. Anisotrope Fließkurven werden beispielsweise mit den Ansätzen von Hill [37] oder Barlat [38] beschrieben oder mit dem Ansatz von Cazacu-Barlat [39] für Werkstoffe mit Zug-Druck-Asymmetrie [34].

Mit dem Erreichen der Fließspannung beginnt der Werkstoff sich plastisch zu verformen, bis er versagt [6]. Die dabei gemessene Bruchdehnung  $A$  ist ein häufig angegebener Wert, jedoch hinsichtlich der Umformbarkeit weniger hilfreich [30]. Besser geeignet ist die Gleichmaßdehnung  $A_g$ , mit der die erreichbare Dehnung bis zum instabilen Bereich beschrieben wird [30]. Die genaueste Beschreibung der Umformgrenzen eines Werkstoffs liefert die Grenzformänderungskurve (FLC – nach dem englischen Begriff forming limit curve) [29]. Die Grundlagen der Grenzformänderungen gehen zurück auf Goodwin [40] und Keeler [41]. Anwendung findet die Grenzformänderung in der gleichnamigen Grenzformänderungskurve, die besonders in der Blechumformung genutzt wird [33]. Hierbei wird die maximal ertragbare Dehnung/Umfarmgrad abhängig vom Verhältnis der Hauptspannungen aufgetragen [34]. Die Kurve selbst wird über Stützpunkte konstruiert, die anhand genormter Probengeometrien bestimmt werden [34]. Alternativ dazu lassen sich relevante Kenngrößen wie Fließbeginn, Gleichmaßdehnung und Verfestigung innerhalb von Charakterisierungsversuchen für den jeweiligen Spannungszustand bestimmen [33].

### 2.2.2 Werkstoffkenngrößen für die numerische Werkstoffmodellierung

Die in Charakterisierungsversuchen bestimmten Kennwerte und Kurven lassen sich für eine präzisere Materialmodellierung innerhalb der numerischen Umformsimulation verwenden [42]. Dabei wird die Fließortkurve genutzt, um den Fließbeginn des Werkstoffs in Abhängigkeit vom anliegenden Spannungszustand zu beschreiben [34]. Für eine realitätsnahe Beschreibung des Materialverhaltens werden die Anisotropie und Asymmetrie des Werkstoffs durch geeignete Versuche charakterisiert [34]. Das Verfestigungsverhalten des Werkstoffs wird durch eine Fließkurve repräsentiert [6]. Diese wird in den meisten Fällen durch einen geeigneten Approximations- und Extrapolationsansatz erweitert, um auch Umformgrade jenseits des Zugversuchs abzudecken [32]. Gängige Ansätze beruhen auf den Erkenntnissen von Ludwik [43], Hollomon [44], Voce [45], Swift [46], Hockett-Sherby [47] und Gosh [48] oder Nemat-Nasser [49] im Falle von Ti-6Al-4V. Grundsätzlich gilt außerdem, dass für die Beschreibung des elastischen Materialverhaltens auch die dementsprechenden elastischen Kennwerte ermittelt werden müssen [7]. Ebenso werden für eine Berücksichtigung der thermischen Bedingungen auch die entsprechenden Kenngrößen und Charakterisierungsversuche benötigt [7]. Das optionale Materialversagen wird innerhalb der numerischen Simulation durch definierte Spannungen, Dehnungen oder im Idealfall durch eine Grenzformänderungskurve beschrieben [34].

### 2.2.3 Metallische Werkstoffe für die Fertigung von Hybridbauteilen

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, hängt die Umformbarkeit unter anderem von der Kristallstruktur des Materials ab [6]. Charakteristika wie eine geringe Fließspannung und hohe Verfestigung sind ideale Werkstoffeigenschaften für die Umformtechnik [32]. Weil die Umformung nur im Bereich des stabilen Materialverhaltens, also bis zur Gleichmaßdehnung, erfolgt, ist eben dieser Kennwert als Orientierung für die Duktilität des Werkstoffs ebenfalls von Bedeutung [32]. Die Anforderungen für Werkstoffe, die in der additiven Fertigung genutzt werden, unterscheiden sich von denen, die für die Umformtechnik vorgesehen sind. Für eine erfolgreiche Nutzung innerhalb pulverbasierter Additivverfahren sind eine gute Schweißbarkeit und hoher Korrosionswiderstand wichtig [8].

## **Fe-basierte Werkstoffe mit Fokus auf dem austenitischen rostfreien Edelstahl 1.4404**

Für die Umformtechnik gängige Werkstoffe wie Tiefziehstähle besitzen zwar aufgrund ihrer Legierung eine hohe Schweißbarkeit, dennoch sind die Korrosionseigenschaften nicht für die additive Fertigung geeignet. Im Bereich der additiven Fertigung werden vorwiegend rostfreie Stähle und Werkzeugstähle verarbeitet [50]. Die rostfreien Stähle umfassen dabei unter anderem austenitische Stähle, TRIP/TWIP (transformation/twinning induced plasticity)-Stähle, Dualphasenstähle und ausscheidungshärtbare Stähle [50]. Werkzeugstähle eignen sich aufgrund der hohen Festigkeiten und geringen Duktilität nicht für eine umformtechnische Verarbeitung und werden daher nicht weiter thematisiert.

Der mit Abstand am häufigsten genutzte austenitische rostfreie Stahl ist 1.4404, gefolgt von 1.4307 [50]. Der erhöhte Chromgehalt bewirkt die Korrosionsbeständigkeit, wohingegen das zulegierte Nickel die Austenitphase stabilisiert [51]. Bei der Verarbeitung von austenitischen rostfreien Stählen mit PBF-LB/M bleibt die Phase bestehen, jedoch zeigen sich als Ergebnis der Wärmeeinbringung in mehrere Schichten Grobkörner [52]. Innerhalb der Grobkörner bilden mehrere gleichgerichtete Zellen feine Austenitkörner [50], die eine geringere Größe haben als bei dem konventionell gefertigten Gegenstück [53]. An den Korngrenzen finden sich Ansammlungen von Chrom und Molybdän, deren Menge nicht zur Stabilisierung von Ferrit ausreichen [50]. Dagegen segregiert beim DED-LB/M des Edelstahls 1.4404 genug Chrom und Molybdän in die Korngrenzen, damit dünne Ferrit-Schichten stabilisiert werden [50]. Ungeachtet des Verfahrens, zeigt sich eine Abhängigkeit des Gefüges von den Prozessparametern, die auch in den mechanischen Eigenschaften widerspiegelt wird. So findet sich in der Literatur ein breites Spektrum an mechanischen Eigenschaften, wie eine Auswahl in Tabelle 1 zeigt.

Zugfestigkeiten für PBF-LB/M aus dem rostfreien Stahl 1.4404 liegen in einem Bereich von  $376 \text{ N/mm}^2$  [54] bis  $764 \text{ N/mm}^2$  [55]. Bei DED-LB/M rangieren die Zugfestigkeiten zwischen  $540 \text{ N/mm}^2$  [56] und  $660 \text{ N/mm}^2$  [57]. Konventionell gefertigt ist eine Zugfestigkeit von  $579 \text{ N/mm}^2$  gängig [58]. Auch bei der Bruchdehnung spannt mittels PBF-LB/M hergestellter Edelstahl 1.4404 mit  $9,2 \%$  [55] bis  $66,5 \%$  [58] einen weiten Bereich auf, in dem auch das konventionelle Gegenstück zu finden ist ( $50 \%$  [58]). Bei der Herstellung durch DED-LB/M ergibt sich aufgrund der geringeren Abkühlrate eine gesteigerte Bruchdehnung. Zusammenfassend ermöglichen die Eigenschaften der Legierung 1.4404 eine Verwendung sowohl in Umformtechnik als auch in der additiven Fertigung.

Tabelle 1: Übersicht ausgewählter mechanischer Eigenschaften der additiv verarbeiteten Edelstahllegierung 1.4404 aus der Literatur (- = keine Angaben)

Prozess	Zustand	$\rho$ in %	$R_{p0,2}$ in N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ in N/mm <sup>2</sup>	A in %	Quelle
PBF-LB/M	wie gebaut	100	-	480-520	10-15	[59]
		99	549-643	595-745	14-36	[60]
		99,9	528-678	569-691	25-44,4	[61]
		99	355-652	458-764	9,2-49,8	[55]
		99	316-416	376-496	7-11	[54]
		-	528-678	569-691	25-44,4	[62]
		99,7	-	501-595	10,8-11,3	[63]
		-	439-590	512-699	11,8-53,7	[28]
		-	-	600	55	[64]
		2h 650°C	-	450	618	54,1
	HIP	-	-	587	65,4	[64]
DED-LB/M	wie gebaut	-	330-345	540-560	35-43	[56]
		-	278-296	579-655	41-66,5	[19]
		-	405-415	620-660	32-40	[57]
		2h 1150°C	-	325-355	600-620	42-43

Bei TRIP/TWIP-Stählen werden lokale Verformungen durch Festigkeitssteigerungen begrenzt, was zu einer gleichmäßigeren Verteilung über den Querschnitt führt [51]. Einerseits wird die Verfestigung durch die induzierte Umwandlung von Austenit in Martensit ermöglicht (TRIP), andererseits durch Zwillingsbildung (TWIP) [51]. Die damit erreichbare hohe Duktilität macht TRIP/TWIP-Stähle besonders für die Umformtechnik rele-

vant [51]. Anders verhält es sich in der additiven Fertigung, wo nur wenige Untersuchungen mit dieser Werkstoffgruppe durchgeführt werden [50]. Ein Beispiel dafür findet sich in [65], in dem die Autoren vorlegiertes Pulver nutzen, um Bauteile aus TRIP/TWIP-Stahl mit hohem Mangan-Anteil im Pulverbett fertigen. Die Streckgrenze und Zugfestigkeit der additiv gefertigten Proben liegen mit 302-416 N/mm<sup>2</sup> und respektive 906-1085 N/mm<sup>2</sup> über denen konventioneller Proben (275 N/mm<sup>2</sup> und 894 N/mm<sup>2</sup>) [65]. Zeitgleich ist die erreichbare plastische Dehnung reduziert und beträgt mit 23,8 % bis 31,2 % (additiv) nur knapp die Hälfte der Referenzprobe (52 %) [65]. Gerade im Hinblick auf eine umformtechnische Verarbeitung ist somit das konventionell gefertigte Material vorteilhafter.

Dualphasenstähle kombinieren martensitisches und ferritisches Gefüge und weisen so eine Kombination aus hoher Festigkeit und Duktilität auf [51]. Daher finden sie in der Umformtechnik, speziell im Automobilbau, großen Anklang [51]. In der additiven Fertigung existieren dagegen nur vereinzelte Untersuchungen, die sich auf die Phasenzusammensetzung und dessen Einfluss auf mechanische Kennwerte konzentrieren [50]. Beispielsweise ist eine Phasenzusammensetzung aus Austenit und Ferrit möglich, sowohl durch Wärmebehandlung [66] als auch ohne [67]. Die Autoren in [66] erreichen mit ihrem additiv gefertigten Dualphasenstahl mechanische Kennwerte, die konventionell gefertigte Gegenstücke übersteigen. Genauer besitzt das Material eine Streckgrenze von 1214 N/mm<sup>2</sup>, eine Zugfestigkeit von 1321 N/mm<sup>2</sup> und eine Bruchdehnung von über 45 % [66]. Als Ursache für diese Kennwerte nennen die Autoren die makrostrukturelle Anordnung der Körner, die Versetzungsdichte und die Ausscheidungen [66].

Von den ausscheidungshärtbaren Stählen werden die Legierungen 1.4540 und 1.4542 am häufigsten in der additiven Fertigung genutzt [50]. Verglichen mit den austenitischen Stählen weisen die ausscheidungshärtbaren Stähle 1.4540 und 1.4542 ein martensitisches Gefüge auf [68]. Die Kristallstruktur und die namensgebenden Ausscheidungen aus Kupfer und Aluminium [50]. Während konventionell gefertigter 1.4542 in einem rein martensitischen Gefüge vorliegt, hat bereits beim Verdüsen des Pulvers die thermische Leitfähigkeit des Mediums einen Einfluss auf die entstehende Kristallstruktur [69]. Argon als Schutzgas führt zu einem Pulver mit martensitischem Gefüge, Stickstoff zu einem austenitischen [69]. Doch auch beim PBF-LB/M beeinflusst das gewählte Schutzgas das Gefüge des Bauteils [69]. Argon begünstigt Martensit, unabhängig vom Gefüge des Pulvers, wohingegen bei Stickstoff das Gefüge des Ausgangswerkstoffs beibehalten wird [69]. Neben dem gewählten Schutzgas lässt sich der Auste-

nitgehalt auch durch die Belichtungsstrategie, die Energiedichte und die resultierenden thermischen Gradienten beeinflussen [50]. Vor allem im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften ist der Anteil an Austenit entscheidend, weil mit steigendem Austenitgehalt die Festigkeit die Festigkeit und Härte sinkt [50]. Für 1.4540 Bauteile, die mit PBF-LB/M hergestellt werden, finden sich Streckgrenzen zwischen  $930 \text{ N/mm}^2$  [70] und  $1297 \text{ N/mm}^2$  [68], Zugfestigkeiten zwischen  $1200 \text{ N/mm}^2$  [70] und  $1470 \text{ N/mm}^2$  [71] und Bruchdehnungen zwischen 10 % [70] und 15 % [71]. Analog dazu liegen die Kennwerte für 1.4542 ohne Wärmebehandlung bei  $517 \text{ N/mm}^2$  bis  $617 \text{ N/mm}^2$  (Streckgrenze),  $883 \text{ N/mm}^2$  bis  $997 \text{ N/mm}^2$  (Zugfestigkeit) und 24,3 % bis 29,4 % (Bruchdehnung) [28]. Das entspricht in etwa den Kennwerten von konventionell hergestellten Bauteilen im Wärmebehandlungszustand P800 (ausscheidungsgehärtet) [72]. Aufgrund des martensitischen Gefüges, der hohen Festigkeit und der eingeschränkten Duktilität bei Raumtemperatur eignen sich martensitische rostfreie Stähle jedoch nicht für die Kaltumformung.

### **Ti-basierte Werkstoffe mit Fokus auf Ti-6Al-4V**

Die hohe Festigkeit, der geringe E-Modul und geringe Duktilität bei Raumtemperatur erschweren auch bei Titanlegierungen eine Kaltumformung [73]. Der Grund dafür ist das hdp-Kristallgitter von  $\alpha$ -Titan, in dem Reintitan wie auch die meisten technisch angewendeten Legierung von Titan vorliegen [74]. Innerhalb der additiven Fertigung werden hauptsächlich Reintitan und Ti-6Al-4V genutzt [75]. Letztere besitzt ein  $\alpha+\beta$ -Gefüge im konventionell gefertigten Zustand [76] und ein martensitisches  $\alpha'$ -Gefüge bei einer Herstellung mit PBF/LB-M [77]. Dementsprechend unterscheiden sich die mechanischen Eigenschaften der Legierung. Konventionell gefertigt besitzt Ti-6Al-4V eine Streckgrenze von  $828 \text{ N/mm}^2$ , eine Zugfestigkeit von  $897 \text{ N/mm}^2$  und eine Bruchdehnung von 15 % [9]. Im wie-gebaut-Zustand weist die Titanlegierung eine Zugfestigkeit von  $1200\text{-}1400 \text{ N/mm}^2$  und eine Bruchdehnung von 1-2 % auf [59]. Durch eine Wärmebehandlung lässt sich das Gefüge und damit die Duktilität und Festigkeit anpassen [78]. Nach einer zweistündigen Wärmebehandlung bei  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  besitzt additiv gefertigtes Ti-6Al-4V eine Streckgrenze von  $955 \text{ N/mm}^2$ , eine Zugfestigkeit von  $1004 \text{ N/mm}^2$  und eine Bruchdehnung von 15 % [78]. Eine weiterführende Untersuchung zur Wärmebehandlung von additiv gefertigtem Ti-6Al-4V ist in [78] zu finden. Ungeachtet der Herstellungsart ist eine Umformung bei Raumtemperatur bei Ti-6Al-4V nicht sinnvoll.

Ein ähnliches Ergebnis liefert der Vergleich von additiv und konventionell gefertigtem Reintitan. AM Reintitan besitzt eine Streckgrenze von 518-522 N/mm<sup>2</sup>, eine Zugfestigkeit von 640-654 N/mm<sup>2</sup> und eine Bruchdehnung von 14,7-17,0 % [79]. Dagegen weist konventionelles Reintitan eine geringere Festigkeit auf (230 N/mm<sup>2</sup> und 345 N/mm<sup>2</sup>) und eine erhöhte Duktilität (20 %) [79].

Prozessbedingt finden sich folglich deutliche Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften und der resultierenden Umformbarkeit von Werkstoffen, die konventionell respektive additiv hergestellt werden. Weil dieser Unterschied einen Einfluss auf das Materialverhalten von Hybridbauteilen innerhalb des Prozesses ausübt, gilt es, diesen genauer zu untersuchen.

## 2.3 Hybridbauteile

Um den steigenden Anforderungen an Produktivität, Energieverbrauch und Nachhaltigkeit gerecht zu werden, werden immer häufiger Verfahren kombiniert [80]. Das Resultat sind Hybridbauteile, Hybridmaschinen und hybride Prozesse [81]. In den nachfolgenden Abschnitten wird der Begriff „Hybrid“ genauer erläutert sowie Beispiele für die hybride additive Fertigung und hybride Bauteile diskutiert.

### 2.3.1 Definition „Hybrid“ in der Fertigung

Die Hybridisierung ist ein Megatrend, der innerhalb zahlreicher Bereiche der Technik zu finden ist [81]. Dabei ist der Begriff „hybrid“ nicht eindeutig definiert [82]. Während das Ziel der Hybridisierung meist eine Steigerung der Produkteigenschaften [83], der Produktivität [82] oder eine Erweiterung der Prozessgrenzen [81] beinhaltet, existieren für Unterteilungen verschiedenste Ansätze. Beispielhaft seien an dieser Stelle Unterteilungen anhand der zeitlichen Abfolge [80], der Prozessmechanismen [84] und der Technologien [81] genannt. Angelehnt an [81] ist eine Unterteilung in die Bereiche hybride Prozesse, hybride Fertigung und Hybride Produkte möglich.

#### Hybrider Prozess

Ein hybrider Prozess umfasst die simultane Verwendung von zwei oder mehr Prozessmechanismen, Energiequellen oder Werkzeugen [84] mit der Absicht, den Prozess oder die Bauteileigenschaften zu verbessern [83]. Beispiele dafür sind das Ultraschallunterstützte Mikrofräsen [85], die Laser-

unterstützte Fräsbearbeitung [86] oder dreidimensionale gebogene Profiltrusion [87].

### **Hybride Fertigung**

Die hybride Fertigung umfasst zwei oder mehr sequentielle Prozesse, um die Produktivität des Prozesses oder die Eigenschaften des Bauteils zu steigern [81]. Weitere Vorteile sind die Erweiterung der Prozessgrenzen bis hin zu einer Funktionserweiterung der Bauteile [88]. Die Kombination aus DED und PBF [89], aber auch die Anwendung von Umformoperationen auf additiv gefertigte Körper [90] sind Beispiele dafür.

### **Hybride Werkstoffe**

Hybride Werkstoffe können bereits aus einem [91], meist aber aus zwei oder mehr Werkstoffen bestehen [92]. Wichtig ist dabei, dass die Kombination der Komponenten in einer Verbesserung der Werkstoffeigenschaften resultiert [93] oder die einzelnen Komponenten eigene Funktionen erfüllen [91]. Auf diese Weise können die steigenden Anforderungen erfüllt werden, bei denen konventionelle Werkstoffe limitiert sind [91]. Gängige Beispiele umfassen faser- oder partikelverstärkte Verbundwerkstoffe, Sandwichstrukturen, Schäume oder Gitterstrukturen [92]. Innovative Beispiele stellen exemplarisch das gleichzeitige Schmieden und Fügen zweier Werkstoffe [94] und der Aufbau additiver Strukturen auf Grundkörpern [4] dar.

Hybride Bauteile können folglich entweder durch hybride Prozesse, hybride Fertigung oder mit hybriden Werkstoffen hergestellt werden. Eine Kombination der Vorgehensweisen ist ebenfalls möglich. Im Rahmen dieser Arbeit werden Hybridbauteile untersucht, deren Komponenten durch zwei verschiedene Fertigungsverfahren hergestellt werden und dementsprechend unterschiedliche Eigenschaften besitzen. Hierbei werden durch Walzen hergestellte Bleche mit additiv hergestellten Strukturen kombiniert. Als additives Verfahren wird das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen und als umformtechnisches Verfahren das Tiefziehen genutzt. Weil die Komponenten unterschiedliche Funktionen erfüllen können, entspricht deren Gesamtheit ebenfalls der Definition eines Hybridbauteils.

### **2.3.2 Hybride additive Fertigung**

Aufgrund der Beschaffenheit von additiv gefertigten Bauteilen im wiegebaut-Zustand werden additive Verfahren zur Nachbearbeitung meist mit anderen Verfahren kombiniert. Einen detaillierten Überblick über hybride

additive Fertigungsverfahren von Metallen geben die Autoren in [10]. Typische Merkmale sind die hohe Oberflächenrauheit, die vom Prozess und den verwendeten Parametern beeinflusst wird [95], und Eigenspannungen, bedingt durch die hohen Abkühlraten [18]. Die Nachbearbeitung der Bauteile erhöht zwar die Kosten und Zeit, die zur Fertigung benötigt werden, sind aber notwendig [8]. Oberfläche und oberflächennahen Eigenschaften der Bauteile beeinflusst maßgeblich deren Leistung [96]. Deshalb ist beispielsweise die Dauerfestigkeit additiv gefertigter Bauteile aufgrund von Poren, Rauheit und Eigenspannungen reduziert [97].

Eine Wärmebehandlung kann Eigenspannungen abbauen, die Duktilität steigern, die Anisotropie reduzieren und sogar Bauteilfehler wie Poren schließen [8]. Ein gängiges Verfahren ist das heiß isostatische Pressen (HIP), das die Dauerfestigkeit von Bauteilen verbessert [98]. Ausführliche Untersuchung zur Wärmebehandlung von additiv gefertigtem Ti-6Al-4V bieten die Quellen [78] und [99].

Zur Reduktion der Oberflächenrauheit werden spanende Verfahren mit und ohne geometrisch bestimmte Schneiden eingesetzt [8]. Während Abrasivstrahlverfahren keine präzise Geometrie hervorbringen [8], werden beim Fräsen oberflächennahe Proben freigelegt [100]. Durch Laserpolitur kann die Oberfläche ebenfalls eingelätet werden [101], jedoch erfordern strahlbasierte Verfahren meist eine Schutzgasatmosphäre [100]. Ähnlich verhält es sich beim Wiederaufschmelzen des Bauteils mittels Laser [100]. Die Bearbeitung ermöglicht eine Reduktion der Oberflächenrauheit und eine Beeinflussung des Gefüges, der Härte und Eigenspannungen [100]. Das Vorgehen, das Wiederaufschmelzen bereits während des Prozesses durchzuführen, erleichtert die Anwendung, steigert jedoch die Prozesszeit zusätzlich [100]. Einen neuen Ansatz bietet die umformtechnische Einglätung, die in [90] präsentiert wird. Geometrische Präzision und Oberflächenrauheit werden verbessert, jedoch ist das Vorgehen werkzeuggebunden. Eine Übersicht der Möglichkeiten ist in Tabelle 2 aufgelistet.

### **2.3.3 Hybridbauteile hergestellt durch additive Fertigung und Umformtechnik**

Ein Bereich der hybriden additiven Fertigung stellt die Kombination mit Umformoperationen dar. Der aktuelle Stand der Forschung in diesem Bereich wird in den nachfolgenden Abschnitten anhand exemplarischer Untersuchungen zusammengefasst. Eine Unterteilung erfolgt dabei anhand der Nutzung des jeweiligen Additivprozesses. Unterschieden wird

Tabelle 2: Übersicht ausgewählter Nachbearbeitungsverfahren für Additivbauteile

Prozess	Vorteile	Einschränkungen	Quelle
Abrasivstrahlen	Einfachheit Flexibilität	Ungenauere Geometrie Teilweise noch hohe Oberflächenrauheit	[8]
Fräsen/Drehen	Hohe Oberflächenqualität Flexibilität	Freilegen von Poren	[100]
Laserpolieren	Hohe Oberflächenqualität Flexibilität	Hoher Energiebedarf Hohe Bearbeitungszeit Schutzgasatmosphäre	[100], [101]
Umformtechnik	Hohe Oberflächenqualität Verbesserung der mechanischen Eigenschaften	Werkzeuggebunden	[90]

zwischen der Fertigung von Funktionselementen, Halbzeugen oder Beschichtungen.

### Additive Fertigung zur Beschichtung und Materialvorverteilung

Die Auswirkung einer Beschichtung auf Blechwerkstoffe wird in [102] beschrieben. Stahlbleche werden mit DED/LB-M beschichtet und anschließend in Zug- und Biegeversuchen geprüft [102]. Die eingebrachte Wärme des Additivprozesses führt zu einer Vergrößerung der Körner, was sich in einer Reduktion der Fließspannung und Zugfestigkeit widerspiegelt [102]. Die Biegeversuche können ohne Versagen durchgeführt werden, was die Autoren der reduzierten Festigkeit und gesteigerten Duktilität zuschreiben [102].

Ein gegenteiliger Effekt findet sich in [103], bei dem die Autoren ebenfalls Zugversuche mit Proben durchführen, die zuvor mittels DED-LB/M beschichtet werden [103]. Die Beschichtung erfolgt senkrecht und parallel zur Belastungsrichtung und wird für  $0^\circ$  und  $90^\circ$  zur Walzrichtung durch-

geführt [103]. Weiterhin wird die Oberflächenrauheit und -struktur der beschichteten Seite untersucht, wobei lediglich die Welligkeit der Beschichtung hervorgehoben wird [103]. Durch die Aufbringung eines Werkstoffs mit höherer Festigkeit steigen Fließbeginn und Zugfestigkeit der Hybridproben, bestehend aus Blech und Additivschicht, im Vergleich zum konventionellen Blech [103]. Gleichzeitig sinkt die Duktilität, was ebenfalls auf die geringere Duktilität des Beschichtungswerkstoffs, aber auch auf die Oberflächenrauheit zurückzuführen ist [103]. Die Richtung der aufgetragenen Bahnen führt zu einer Festigkeitssteigerung, wenn diese in Belastungsrichtung erfolgt, was auf die bessere Kraffeinleitung und geringeren Kerbwirkungen begründet wird [103].

In [104] werden Zugversuche mit Stahlblechen durchgeführt, die zuvor mittels DED/LB-M beschichtet werden. Darüber hinaus finden Streckzieh- und Nakajima-Versuche statt [104]. In einem Vergleich mit konventionellem Blechmaterial wird eine Reduktion der Umformbarkeit sichtbar, jedoch lässt sich diese durch eine geeignete Wärmebehandlung relativieren [104]. Innerhalb der Zugversuche weisen die hybriden Bleche vergleichbare Ergebnisse zu konventionellem Blech auf [104]. Bei den Streckziehversuchen versagen die hybriden Bauteile indessen im Anbindungsbereich [104].

Neben der additiven Beschichtung von Blechen finden sich im aktuellen Stand der Forschung auch Beispiele für die Massivumformung von beschichteten Bauteilen. Beispielsweise wird in [105] eine verschleiß- und korrosionsbeständige Schicht auf niedriglegierte Stähle aufgebracht, gefolgt von einer Querkeilwalzoperation bei erhöhten Temperaturen. Die mechanischen Eigenschaften der auf diese Weise hergestellten Bauteile sind vergleichbar und übertreffen teilweise die konventionell gefertigter Bauteile [105]. Weitere Beispiele bilden das Freiformschmieden [106] und das Gesenkschmieden [107] beschichteter Bauteile, bei dem die Umformoperation ebenfalls zu einer Verbesserung der Eigenschaften beiträgt.

Bambach et al. [108] nutzen das DED/LB-M, um die Steifigkeit eines tiefgezogenen Napfes zu verbessern. Innerhalb der Untersuchung wird die Steifigkeit unter Zuhilfenahme der zugefügten Masse und des thermischen Verzuges optimiert [108]. In beiden Fällen wird eine deutliche Steigerung der Steifigkeit erreicht, wobei nur eine minimale Steigerung der Masse beziehungsweise des Verzugs auftreten [108]. Gleichzeitig wird in [15] ein Energieeinsparungspotenzial gegenüber einer vergleichbaren Lösung mit Patchwork-Blanks bei der Verwendung von rezykliertem Pulver aufgezeigt.

Ein weiteres Beispiel für die lokale Verstärkung von Blechen durch Additivprozesse findet sich in [109]. Die Autoren nutzen DED/LB-M zur Materialaufdickung vor einem Loch-Flansch-Prozess, was in einem thermisch bedingten Verzug resultiert [109]. Das frühere Bauteilversagen der hybriden Bleche verglichen mit konventionellen lässt sich auf die Beschichtung zurückführen [109]. Der additiv gefertigte Aluminiumwerkstoff AW 6082 weist eine deutlich reduzierte Duktilität auf, was sich während der Umformung in Form von Rissbildung in der Grenzfläche zeigt [109].

Die Idee einer Materialaufdickung wird auch in [110] aufgegriffen, jedoch in Verbindung mit dem PBF-LB/M-Prozess und der inkrementellen Umformung. Durch die lokale Blechdickensteigerung kann einerseits die Genauigkeit der Umformoperation gesteigert werden, indem eine „Stützplatte“ auf der Rückseite des Blechs additiv aufgebaut wird [110]. Darüber hinaus wird die Blechausdünnung gegenüber einem konventionellem Blech in einem weiteren Experiment durch die Blechdickenanpassung reduziert [110]. Zuletzt präsentieren die Autoren die erweiterte Formgebungsmöglichkeit, die durch die Kombination auf PBF-LB/M und Umformung entsteht [110].

In [111] wird der PBF-LB/M-Prozess ebenfalls genutzt, um eine Materialaufdickung auf einem Blechgrundkörper zu realisieren, jedoch wird das hybride Blech anschließend in einem Blech-Massiv-Umformprozess genutzt. Die Ergebnisse des hybriden Blechs sind hinsichtlich Blechausdünnung mit dem konventionellen Gegenstück vergleichbar, weisen aber nach der Stauchoperation keine Prozessfehler wie Knicken oder Faltenbildung auf [111]. Zusätzlich ist der Füllgrad der beabsichtigten Zahngeometrie größer und die Härte aufgrund der prozessbedingten Abkühlraten höher [111].

### **Additive Fertigung zur Halbzeuherstellung**

Eine Erweiterung der Möglichkeiten additiver Fertigungsverfahren ist die Nutzung zur Materialaufbringung, die über einzelne Schichten hinausgehen, in Form von Halbzeugen. Das Materialverhalten wird anhand von Charakterisierungsversuchen untersucht. Im Bereich des DED-LB/M existieren Untersuchungen zum Umformverhalten der Titanlegierung Ti-6Al-4V [112] und der Nickel-Chrom-Legierung Inconel 718 [113] bei erhöhten Temperaturen, sowie für die Aluminiumlegierung AA5083 [114] und den Edelstahl 1.4404 [57] bei Raumtemperatur. Die Fließkurven und das Gefüge von DED-LB/M Ti-6Al-4V sind nach der Warmumformung vergleichbar zu konventionellem Material [112]. Ähnliche Erkenntnisse finden sich für Inconel 718 [113] und AA5083 [114].

Analog dazu finden sich im Bereich des PBF-LB/M Forschungsergebnisse bezüglich der Warmumformbarkeit von Ti-6Al-4V in Abhängigkeit der Temperatur und Wärmebehandlungszustand. Im wärmebehandelten Zustand (0,5 h bei 955°C) weist im Pulverbett hergestelltes Ti-6Al-4V zwischen 950 °C und 1000 °C höhere Fließspannungen auf als konventionelles Material [115]. Die Umformung bei Temperaturen unter 950 °C ermöglicht die Reduktion der Poren mit steigenden Dehnungen und Dehnraten [116]. Ohne vorgelagerte Wärmebehandlung sind bei Dehnraten bis 0,01 s<sup>-1</sup> geringere Umformkräfte notwendig als für konventionelles Material [117], was auf die reduzierten Aktivierungsenergien zurückzuführen ist. Gleichzeitig lassen sich mit additiv gefertigtem Ti-6Al-4V höhere Dehnraten realisieren [117]. Beim rostfreien Stahl 1.4404, der mittels PBF-LB/M hergestellt wird, zeigt sich im Gegensatz zur Titanlegierung Ti-6Al-4V eine gesteigerte Aktivierungsenergie bei erhöhten Temperaturen [118].

Der Einfluss von Umformoperationen auf die mechanischen Eigenschaften von additiv gefertigtem Material ist ebenfalls Gegenstand der aktuellen Forschung. So wird in [119] eine Warmstauoperation auf Flachzugproben, die durch PBF-LB/M hergestellt werden, angewendet, bevor diese geprüft werden. Dabei steigert der Umformschritt die Festigkeit und Duktilität des Materials [119]. Die Ergebnisse werden in [120] bestätigt. Eine Walzoperation bei Raumtemperatur führt ebenfalls zu einer Steigerung der Festigkeit, jedoch wird zeitgleich die Duktilität des Werkstoffs verringert [121].

Beim „interlayer rolling“ wird durch DED-basierte Verfahren aufgebracht Material zwischen den Schichten durch eine Walzoperation umgeformt [122]. Forschungsschwerpunkte sind dabei unter anderem die Häufigkeit des Walzens [122], die Geometrie der Walzen [123] und der Abstand zum Schmelzbad [124]. Eine vergleichbare Vorgehensweise findet sich in [125] für ein nachgelagertes Hämmern.

Um zu zeigen, dass auch die additive Fertigung von endkonturnahen Geometrien möglich ist, wird in [126] die Durchführbarkeit von drahtbasiertes Lichtbogenschweißen (WAAM – nach englischem Begriff wire + arc additive manufacturing) auf einem umformtechnisch hergestellten Grundkörper belegt. Die unterschiedlichen Fertigungsverfahren resultieren in zwei verschiedenen Gefügeausprägungen mit unterschiedlichen Härtewerten [126]. Die Intention dieser Prozesskombination liegt in der Reduktion des Werkzeugverschleißes, die bei einer rein umformtechnischen Fertigung durch die T-förmige Geometrie des Bauteils auftreten würde [126]. Nachfolgende Untersuchungen zeigen eine Reduktion der Festigkeit des Grundmaterials als Folge des Wärmeeintrags [127].

Einen Schritt weiter gehen die Autoren in [128], indem sie die Umformbarkeit von Vorformen hergestellt durch PBF-LB/M innerhalb eines Schmiedeprozesses untersuchen. Auf diese Weise ist es möglich, ganze Stufen des Prozesses und damit auch die dazugehörigen Werkzeuge zu sparen [128]. Am Beispiel der verwendeten Titanlegierung Ti-6Al-4V ist für eine Schmiedeoperation keine vorhergehende Wärmebehandlung notwendig und Poren, die beim Additivprozess entstehen, können während der Umformung geschlossen werden [128].

Am Beispiel einer Turbinenschaufel wird in [129] aufbauend auf den Erkenntnissen aus [128] die Durchführung mit einer konkreten Anwendung bewiesen [129]. Die mit WAAM hergestellte Vorform aus Ti-6Al-4V wird in einer Schmiedestufe in die finale Geometrie gebracht [129]. Das Gefüge des geschmiedeten Bauteils ist mit dem aus konventionellem Material vergleichbar, aber wirkt sich die geringere Fließspannung des additiv gefertigten positiv auf den Werkzeugverschleiß aus [129].

Einen reduzierten Kraftbedarf und damit einhergehenden Werkzeugverschleiß belegen die Autoren in [130] bei der Herstellung von Sammlermünzen unter der Nutzung von PBF-LB/M und einer Prägeoperation. Die Umrisse der späteren Münzen wird im Pulverbett als Stange extrudiert gefertigt und anschließend mittels Funkenerosion in einzelne Scheiben geteilt [130]. Neben dem reduzierten Kraftbedarf, lassen sich auf diese Weise auch Münzen mit aufwändigerer Geometrie herstellen [130].

Aber auch flächenhafte Grundkörper werden mittels additiver Fertigung hergestellt und anschließend umgeformt. Am Beispiel von [131] wird ein „Blech“ mit PBF-LB/M aufgebaut und anschließend inkrementell umgeformt. Während des Pulverbettprozesses entstehen thermisch induzierten Druckeigenstressungen, die während der Beigebelastung der Umformoperation in Zugeigenstressungen übergehen [131]. In [132] wird der Grundkörper mit DED-LB/M hergestellt und weist in einem Vergleich mit konventionellem Blech eine geringere Umformbarkeit auf.

In [133] werden ebenfalls blechartige Halbzeuge durch PBF-LB/M hergestellt. Genauer werden analog zu Sandwichstrukturen zwei fläche Komponenten aufgebaut, in deren Mitte unterschiedliche Füllstrukturen genutzt werden [133]. Durch eine nachfolgende Umformoperation der hybriden Halbzeuge lässt sich die Effizienz gegenüber einer rein additiven Fertigung um bis zu 680 % steigern [133].

## **Additive Fertigung von Funktionselementen**

Während Schichten und Materialvorverteilungen mit der Intention einer weiteren Umformung erzeugt werden, bilden additiv gefertigte Funktionselemente eine Komponente der Hybridbauteile, die bereits vor der Umformung nutzbar sind. Die Autoren in [134] stellen Prüfaufbauten vor, die es ermöglichen, Hybridbauteile hinsichtlich der Anbindungsfestigkeit und Scher- und Zugbelastung zu untersuchen. Innerhalb der Untersuchung wird PBF-EB/M genutzt, um mit Ti-6Al-4V-Pulver zylindrische Funktionselemente auf Blech des gleichen Werkstoffs aufzubauen und zu prüfen [134]. Durch eine Variation der Leistung soll der Einfluss auf die Anbindungsfestigkeit ergründet werden, welcher sich jedoch als nicht signifikant herausstellt [134]. Als weitaus kritischer wird die Anbindungsstelle zwischen Blech und additiv gefertigtem Körper identifiziert, von der aus aufgrund der hohen Oberflächenrauheit ein Versagen des Bauteils eintritt [134].

Weil bei der Verwendung eines Lasers im Vergleich zu einem Elektronenstrahl im Pulverbett geringere Rauheiten erzielt werden können [135], wird in [136] ein Laser zur Herstellung der Funktionselemente genutzt. Bei der Prüfung der Anbindungsfestigkeit unter Zugbelastung resultieren eine Wärmebehandlung nach [78] und die Reduktion der Oxidation in anfänglichen Schichten in einer deutlichen Steigerung [136].

Die Autoren in [137] nutzen ebenfalls PBF-LB/M, um Funktionselemente aus Ti-6Al-4V auf Blechen des gleichen Werkstoffs aufzubauen. Damit die Wechselwirkungen zwischen einer Tiefziehoperation und dem Pulverbettprozess untersucht werden, wird ein Systemaufbau präsentiert, der es ermöglicht, auf bereits umgeformten Blechgrundkörpern aufzubauen [137]. Mit der Absicht, die Anbindungsfestigkeit unter Scherbelastung zu steigern, werden eine Wärmebehandlung nach [78] durchgeführt und der Übergangsbereich mit einem Radius versehen [137]. Letzterer verbessert die Anbindungsfestigkeit, in dem die Kerbwirkung reduziert wird und somit auch die entstehenden Spannungsspitzen [137]. Ohne einen Radius zeigen sich bereits nach dem Additivprozess erste Risse im Übergangsbereich, die auf thermische Spannungen zurückzuführen sind [137]. Im Vergleich zu einem Aufbau auf konventionellem Blech, bilden sich bei umgeformtem Blech Anbindungsfehler, die auf die Unebenheit des Blechs und Ungleichmäßigkeiten in der thermischen Ableitung zurückzuführen sind [137]. Unabhängig davon wirkt sich eine Wärmebehandlung positiv auf die Anbindungsfestigkeit auf, weil Spannungen, die während des Pulverbettprozesses entstehen [131], abgebaut werden [137].

Dass die relative Dichte des Ti-6Al-4V-Bauteils ebenfalls einen Einfluss auf die Anbindungsfestigkeit hat, zeigt sich in [138]. Durch die Variation der PBF-Prozessparameter lässt sich eine höhere relative Dichte und damit auch Anbindungsfestigkeit (Scherung) erzielen [138]. Trotzdem ist die Anbindungsfestigkeit noch immer geringer als bei einem spanend oder rein additiv hergestelltem Bauteil [138]. In [139] werden die Erkenntnisse zum Aufbau eines Funktionselementes auf tiefgezogenem Ti-6Al-4V-Grundkörpern grundlegend untersucht.

Ähnliche Ergebnisse finden sich für 316L [140]. Mit steigender Volumenenergie wird die relative Dichte des Bauteils erhöht, was sich wiederum positiv auf die Anbindungsfestigkeit unter Scherbelastung auswirkt [140]. Bereits ab einer Volumenenergie von  $51 \text{ J/mm}^3$  werden Bauteile mit einer relative Dichte über 99,9 % und ein konstantes Niveau der Festigkeit erzielt [140]. Bei steigender Energieeinbringung wird eine Tendenz des Festigkeitsverlust und höherer thermische Verzug erkannt [140]. Der Verzug entsteht durch thermische Spannungen, die die Fließgrenze des Werkstoffs überschreiten und somit in einer plastischen Deformation resultieren [141].

Um die Herstellung hybrider Bauteile mit weiteren Umformverfahren zu ermöglichen, wird in [142] ein Werkzeug zum Warmbiegen präsentiert und validiert. Dabei versagen Hybridbauteile (Bleche mit Additivkomponente) im Vergleich zu konventionellem Blech bereits bei geringeren Umformungen [142]. Als mögliche Ursachen für ein früheres Versagen werden die Porosität des Bauteils, das Fehlen eines Übergangsradius und die Versteifung durch die additiv gefertigte Komponente genannt [142]. Dies wird dadurch bekräftigt, dass die Härtewerte im additiv gefertigten Teil höher sind als im Blechgrundkörper [143]. Abschließend wird ein Einfluss der Prozessreihenfolge vermutet [142].

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird in [144] unter anderem die Reihenfolge der Prozesse PBF-LB/M und Warmbiegen für Ti-6Al-4V-Bauteile untersucht. Dabei zeigt sich kein Einfluss der Prozessreihenfolge auf die Anbindungsfestigkeit, jedoch auf die Umformbarkeit der Hybridbauteile [144]. Die additiv gefertigte Struktur reduziert die erreichbare Ziehtiefe ohne Bauteilversagen [144]. Zusätzlich wird die Abhängigkeit des Gefüges von den PBF-Prozessparameter aufgezeigt, jedoch ist der Einfluss auf die Anbindungsfestigkeit lediglich gering [144]. Wie auch in [137] ist die Anbindung bei einem bereits umgeformten Bauteil in [144] aufgrund der unebenen Aufbaufläche reduziert. Zwar lässt sich die Anbindung durch angepasste Systemtechnik wie variable Einspannvorrichtungen und flexible Silikonbeschichter verbessern, jedoch nur bis zu einem gewissen Grad [144]. Durch angepasste PBF-Parameter wird die Anbindungs-

festigkeit über die von spanend hergestellten Gegenstücken gehoben, bleibt aber unter der von rein additiv hergestellten Bauteilen [144].

Weitere Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der PBF-Parameter auf die Anbindungsfestigkeit weisen in [145] keine Signifikanz auf. Jedoch steigt mit der Länge der Laserbahnen auch der Verzug der Bauteile [145].

In [143] wird der Einfluss der Biegeparameter, Biegerichtung und Blechdicke auf die Anbindungsfestigkeit unter Scherbelastung von Hybridbauteile beim Warmbiegen untersucht. Die Verwendung einer höheren Blechstärke resultiert in einer größer ausgeprägten Wärmeeinflusszone und einer höheren Anbindungsfestigkeit [143]. Ebenfalls weisen Bauteile, die mit größeren Biegeradius und Matrizenbreite umgeformt werden, höheren Festigkeiten in der Anbindung auf [143]. Grundsätzlich wirkt sich die Umformung aber negativ auf die Anbindungsfestigkeit auf, weil durch die auftretenden Dehnung Risse entstehen können [143]. Eine mögliche Ursache für die Risse liegt in der gesteigerten Rauheit der zugbelasteten Oberfläche beim Warmbiegen [146]. Die Platzierung des Funktionselementes in der Druckbelasteten Umformzone weist in Anbindungstests geringere Festigkeitswerte auf als diese, die auf der Zugseite platziert werden [143].

Neben den Biegeparametern und der Blechdicke werden in [147] verschiedene Wärmebehandlungstemperaturen als Einflussgrößen auf die Anbindungsfestigkeit auf Zug untersucht. Analog zu [143] wird mit steigender Blechdicke eine höhere Anbindungsfestigkeit festgestellt [147]. Nach einer Wärmebehandlung bei 850 °C wird, anders als in [143] für Bauteile ohne Wärmebehandlung, jedoch kein Einfluss der Biegeparameter erkannt [147]. Eine Wärmebehandlung bei 450 °C oder 850 °C resultieren in einer höheren Anbindungsfestigkeit als Bauteile, die mit einer Temperatur von 1050 °C behandelt werden, vergleichbar mit Bauteilen ohne Wärmebehandlung [147]. Die Härte der Hybridbauteile lässt sich in die Bereiche Funktionselement, Wärmeeintragszone und Blechgrundkörper unterteilen [147]. Dabei wird die Härte in eben dieser Reihenfolge reduziert [147]. Die Wärmebehandlung bei 450 °C bewirkt lediglich einen Abbau der prozessbedingten Eigenspannungen, wohingegen bei den höheren Temperaturen mikrostrukturelle Veränderungen auftreten [147]. Als Ergebnis treten unterschiedliche Bruchbilder in Form eines Versagens unterhalb der Wärmeeinflusszone (450 °C) oder im Blechgrundkörper (850 °C) auf [147]. Die detaillierte Untersuchung eines Funktionslementes auf Biegebauteilen findet sich in [148].

Zum besseren Verständnis der Prozessmechaniken wird in [149] eine numerische Abbildung eines Warmumformprozesses von Ti-6Al-4V-Bauteilen vorgestellt und validiert. Darin werden unterschiedliche Material-

modelle für den Blechgrundwerkstoff und die additiv gefertigten Funktionselemente genutzt, um den Realprozess genauer abzubilden [149]. Die numerische Analyse weist gesteigerte Blechausdünnungen und Spannungen im Bereich des Übergangs auf [149], was die Bedeutung der Anbindungszone in [134], [136] und [137] unterstützt. Zusätzlich wird der Einfluss der geometrischen Größen des Funktionselementes auf die Umformbarkeit der Hybridbauteile untersucht [149].

In einer weiterführenden experimentellen Untersuchung wird ein Werkzeug zum Warmstreckziehen von Hybridbauteilen vorgestellt und validiert [150]. Ti-6Al-4V-Bauteile werden mit und ohne additiv gefertigtem Funktionselement bei 400 °C streckgezogen, um den Einfluss auf die Umformbarkeit zu untersuchen [150]. Wie in [144], wird eine verringerte Umformbarkeit für Hybridbauteile verglichen mit konventionellem Blech erzielt [150]. Als Ursache werden die geometrischen und mechanischen Eigenschaften der additiv gefertigten Komponente genannt, die zu einem Versagen im Übergangsbereich führt [150]. Prozessbedingt weist das Funktionselement eine höhere Härte [143] und Anfangsfließspannung [149] auf.

Ein Überblick über Funktionselemente in den Spannungszuständen gängiger Blechumformoperationen findet sich in [151]. Der darin verwendete Ansatz kombiniert numerische und experimentelle Herangehensweise und zeigt für den Beispielwerkstoff Ti-6Al-4V die Relevanz des Übergangsbereichs unabhängig vom Spannungszustand auf [151]. Letzterer ist jedoch ebenfalls entscheidend für die Umformbarkeit [151]. Während ein Funktionselement beim Tiefziehen eher unkritisch erachtet wird, sind beim Biegen und Streckziehen deutliche Einschränkungen der Umformbarkeit zu erwarten [151]. Um diese gering zu halten, geben die Autoren Empfehlungen für einen vorgelagerten Additivschritt [151].

Aufbauend auf den Ergebnisse von [111] werden in [152] anstelle einer Materialvorverteilung bereits die Zähne eines Funktionsbauteils mit PBF-LB/M aufgebaut. Das dabei entstehende Hybridbauteil wird in einem Blechmasivumformprozess, der eine Tiefzieh- und eine Stauchoperation kombiniert, umgeformt [152]. In einem Vergleich mit konventionellem Blech, bei dem das Material durch eine Taumeloperation vorverteilt wird, zeigen Merklein et al. [152] die Chancen der Kombination auf PBF-LB/M und Umformtechnik. Das Hybridbauteil weist nach dem Prozessschritten Tiefziehen und Stauchen jeweils deutlich besser abgebildete Zähne vor als das konventionelle Gegenstück [152]. Die Umformtechnik wird als möglicher Kalibrierschritt von Hybridbauteilen oder additiv gefertigten Körpern genannt, jedoch ist auch in dieser Untersuchung die Anbindungszone als kritischer Bereich identifiziert [152].

## 2.4 Zusammenfassende Bewertung des Standes der Forschung und Technik

Der werkzeuglose Ansatz der additiven Fertigung bietet gegenüber konventionellen Verfahren einen Vorteil hinsichtlich Flexibilität und Freiheit der geometrischen Gestaltung. Gleichzeitig ist die Materialausnutzung hoch und das Spektrum der nutzbaren Werkstoffe breit gefächert. Mit diesen Merkmalen bieten die additiven Verfahren ideale Bedingungen zur Bewältigung aktueller Trends innerhalb der Fertigungsindustrie, wie beispielsweise die steigenden Anforderungen hinsichtlich Individualisierung und Nachhaltigkeit. Doch auch die additive Fertigung besitzt Einschränkungen. Exemplarisch seien an dieser Stelle die langen Fertigungszeiten, der hohe Energieaufwand zur Herstellung des pulverförmigen Ausgangswerkstoffs, die erforderliche Nacharbeit und die Schwankungen der Bauteileigenschaften genannt.

Deshalb werden additive Verfahren teilweise mit anderen kombiniert, um eine sogenannte Hybridisierung zu betreiben. Dabei werden Prozessaufbauten, Werkstoffe oder Verfahren kombiniert, um Prozessgrenzen zu erweitern oder die Bauteileigenschaften zu verbessern. Eine feste Definition des Begriffes „hybrid“ innerhalb der Fertigungstechnologie existiert nicht, weshalb innerhalb dieser Arbeit eine Unterteilung zwischen hybrider Fertigung (simultane Nutzung von zwei oder mehr Verfahren), hybrider Fertigung (sequentielle Nutzung von zwei oder mehr Verfahren) und hybrider Bauteile (Herstellung mit hybriden Werkstoffen oder Verfahren) getroffen wird.

Im Bereich der hybriden Fertigung werden additive Verfahren in der Regel für eine Kombination genutzt. Die Kombination mit der Umformtechnik stellt eine anspruchsvolle, wenngleich erfolgversprechende Möglichkeit zur Herstellung von Bauteilen für die Luft- und Raumfahrt, aber auch für die Medizintechnik dar. Trotz der unterschiedlichen verfahrensbedingten Anforderungen an den verwendeten Werkstoff findet sich eine Schnittmenge, die eine Nutzung in beiden Prozessen ermöglicht. Ein Beispiel hierfür sind austenitische rostfreie Stähle wie die Legierung 1.4404, die sowohl über eine gute Verarbeitbarkeit im Pulverbett als auch über eine ausreichende Eignung zur Verwendung innerhalb der Umformtechnik verfügt. Je nach Herstellungsverfahren unterscheidet sich die Kornstruktur des Materials und folglich auch die mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit, Duktilität und Härte. Dies gilt es in der Prozesskombination zu beachten. Damit die Unterschiede auch innerhalb einer numerischen Prozessabbildung Beachtung finden, ist es notwendig, die Werkstoffe anhand

von Charakterisierungsversuchen und Modellierungsansätzen einzeln zu beschreiben. Bisher beschränken sich Untersuchungen additiv gefertigter Körper größtenteils auf die Ermittlung von Kennwerten und weniger auf der Umformbarkeit.

Bei einer Prozesskombination mit der Umformtechnik können additive Verfahren genutzt werden, um einzelne Schichten, Halbzeuge oder Funktionselemente aufzubauen. Prinzipiell sind dabei beide Prozessreihenfolgen möglich, Umformtechnik vor oder nach der additiven Fertigung, jedoch existieren prozessbedingt Grenzen. Weil der Aufbau von Funktionselementen im Pulverbett nur bis zu einem gewissen Grad auf umgeformten Bauteilen stattfinden kann, ist die Reihenfolge erst additiv aufbauen und anschließend umformen, zu bevorzugen. Hierbei zeigt sich jedoch ein deutlicher Einfluss der additiv gefertigten Strukturen auf den Umformprozess, bedingt durch die Steifigkeitsänderung, den Wärmeeintrag, die Eigenspannungen und den Verzug. Die Anbindungszone stellt in den meisten Untersuchungen den kritischen Punkt dar, weil an dieser Stelle die Materialeigenschaften unterschiedlich sind und Änderungen in der Geometrie existieren. Scharfe Übergänge und hohe Oberflächenrauheiten begünstigen die Kerbwirkung und daraus resultierenden Spannungsspitzen, die ein Bauteilversagen als Folge haben können.

Bisher beschränken sich die Ergebnisse einer Kombination auf Blechumformung und PBF-LB/M größtenteils auf dem Werkstoff Ti-6Al-4V und damit auf die Umformung bei erhöhten Temperaturen. Zwar existieren Untersuchungen zu einer Kombination mit dem Tiefziehen von Blechen, jedoch befindet sich das Funktionselement im vergleichsweise unkritischen Bodenbereich und wird erst nach der Umformung aufgebracht. Deswegen Einfluss auf die Umformoperation wird folglich nicht weiter untersucht.

Die Untersuchung von additiv gefertigtem Material in Form von Aufdickungen oder Zähnen im Bereich der Zug-Druck-Spannungen erfolgt für den Werkstoff 1.4404 nur auf einen konkreten Fall bezogen und mangelt an Ursache-Wirkungszusammenhängen. Weitere Spannungszustände wie die biaxiale Zugbelastung, wie es beim Streckziehen die Regel ist, werden ebenfalls nicht weiter untersucht. Hierfür sind lediglich qualitative Untersuchungen und erste Ansätze für die numerische Abbildung derartiger Prozesse vorhanden. Für den Bereich der Biegeumformung existieren Erkenntnisse für die Werkstoffe 1.4404 und Ti-6Al-4V, die sich auf die Auswirkung verschiedener Radien, Durchmesser und Höhen eines Funktionselementes beschränken. Bei der numerischen Untersuchung des Prozesses wird die Anisotropie des Bleches nicht berücksichtigt und ein fehlendes

Schädigungsmodell verhindert die Möglichkeit, Grenzbereiche vorherzusagen zu können. Zusammenfassend fehlt es an einer ganzheitlichen Analyse der Wechselwirkungen und konkreten Richtlinien für die Gestaltung von Hybridbauteilen bestehend aus Blechgrundkörpern und additiv gefertigten mehreren Funktionselementen.

Gemeinhin finden sich im Stand der Forschung Beispiele, die sich lediglich auf ein einzelnes Funktionselement beschränken, was die Möglichkeiten und eine industrielle Anwendbarkeit derartiger Bauteile limitiert. Außerdem fehlt es aktuell an einer ganzheitlichen vergleichenden Untersuchung bezüglich der Zusammenhänge von Funktionselementen in den verschiedenen anliegenden Spannungszuständen gängiger Blechumformverfahren.

### 3 Zielsetzung und methodische Vorgehensweise

Um aktuellen Forderungen nach Flexibilität, Effizienz und Nachhaltigkeit gerecht zu werden, soll im Rahmen dieser Forschungsarbeit der Ansatz der Hybridbauteile ganzheitlich untersucht und Richtlinien für deren Gestaltung abgeleitet werden. In diesem Zuge wird ein umfassendes Verständnis für die Prozesszusammenhänge bei der Herstellung von Hybridbauteilen, die additive Fertigung und Umformtechnik vereinen, erarbeitet werden. Dafür sollen die Wechselwirkungen zwischen additiver Fertigung und Blechumformung am Beispiel von Hybridbauteilen aus dem austenitischen, rostfreien Edelstahl 1.4404, der in der Umformtechnik und additiven Fertigung ein breites Nutzungsfeld besitzt, untersucht werden. Genauer werden Blechsubstrate, auf denen zuvor zylindrische Funktionselemente aufgebracht werden, in einem Tiefziehprozess mit angepasster Werkzeuggeometrie umgeformt werden. Anhand der Variation der Funktionselemente und des Vergleichs mit anderen gängigen Blechumformverfahren sollen die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge erarbeitet werden. Die dafür genutzte methodische Vorgehensweise ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die drei Bereiche dieser Arbeit umfassen die Erarbeitung einer Prozessführungsstrategie zur Herstellung von Hybridbauteilen, die Untersuchung der werkstofflichen, herstellungsbedingten Unterschiede mechanischer Eigenschaften von Hybridbauteilkomponenten sowie deren Charakterisierung und Modellierung und die Analyse der Wechselwirkungen zwischen Additivkomponente und Blechgrundkörper am Beispiel des Tiefziehprozesses. Auf diese Weise wird eine systematische Untersuchung der Zusammenhänge ermöglicht.

Ziel der Prozessführungsstrategie ist die fehlerfreie, additive Herstellung von Funktionselementen auf Blechgrundkörpern. Der Bereich, der für die Fertigung fehlerfreier Bauteile geeignet ist, wird durch Prozessfehler beschränkt, die sich bereits anhand von Einzelschweißbahnen ermitteln lassen. Deshalb müssen Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Fokuslage berücksichtigt werden, um den Einfluss der Parameter auf die Geometrie der Schweißbahnen zu erarbeiten. Dies erfordert die Analyse der Geometrie von Einzelschweißbahnen, woraus Rückschlüsse bezüglich der Eignung zur Fertigung von volumenhaften Körpern gezogen werden.

Auf Basis dieser Ergebnisse lassen sich volumetrische Körper auf Blechsubstraten aufbauen. Auch in diesem Fall sind die Parameter Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Fokuslage maßgeblich, um den Bereich zu iden-

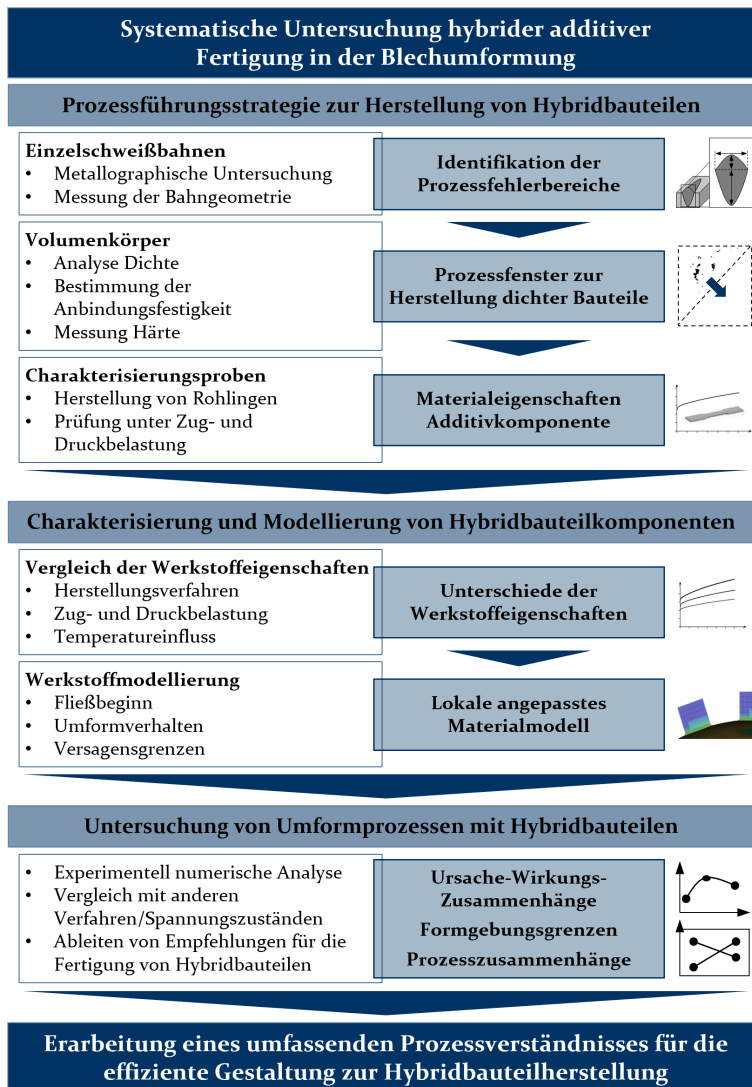


Abbildung 1: Methodische Vorgehensweise zur Erarbeitung des Prozessverständnisses für die Blechumformung von Hybridbauteilen

tifizieren, der sich für die Fertigung von Funktionselementen eignet. In diesem Sinne sind die relative Dichte, die Anbindungsfestigkeit unter Scherbelastung und die Härte der Prüfkörper entscheidend, um Rückschlüsse auf die Kausalzusammenhänge abzuleiten. Die Parameterkombination, die hinsichtlich der zuvor genannten Zielgrößen am besten geeignet ist, ermöglicht die Fertigung von Charakterisierungsproben, die für die

Zug- und Stauchprüfung genutzt werden können. Damit lassen sich Rückschlüsse auf die mechanischen Eigenschaften der additiv gefertigten Funktionselemente ziehen.

Bei der Kombination von Blech und Additivstruktur kommen die Eigenschaften und damit auch die Unterschiede beider Komponenten zum Tragen. Deshalb müssen die werkstofflichen Unterschiede der Hybridbauteilkomponenten herausgearbeitet und in der numerischen Simulation adäquat abgebildet werden. Die Charakterisierung des additiv gefertigten Materials und des konventionellen Blechhalbzeugs, das auch als Substrat verwendet wird, dient der Bestimmung mechanischer Kennwerte. Neben den Eigenschaften unter Zug- und Druckbelastung bei Raumtemperatur sind darüber hinaus die mechanischen Kennwerte unter Zugbelastung bei Temperaturen bis 600 °C für eine nachgelagerte Umformoperation oder den Einsatz der Bauteile relevant. Somit werden die Eigenschaften der Werkstoffe hinsichtlich der Belastungsart und Temperatur verglichen, um den Einfluss auf eine Umformung der einzelnen Komponenten sowie der Kombination als Hybridbauteil zu untersuchen. Gleichzeitig dienen die Ergebnisse der Charakterisierung als Eingangsgrößen für die numerische Prozessmodellierung. Aufgrund der zu erwartenden Unterschiede hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, bedingt durch die verschiedenen Herstellungsverfahren, wird ein Modellierungsansatz benötigt, mit dem die lokalen Unterschiede realitätsnah abgebildet werden können.

Die Kombination der Finite-Elemente-Simulation mit lokal angepasstem Materialmodell mit einer experimentellen Vorgehensweise bietet die Möglichkeit, die Zusammenhänge beim Tiefziehen von Hybridbauteilen bestehend aus Blech- und Additivkomponente zu analysieren. Um das Potential der additiven Verfahren auszuschöpfen, sind der Einfluss variierender Anzahl, Durchmesser und Abstände der Funktionselemente auf die Umformbarkeit der Hybridbauteile im Tiefziehprozess zu untersuchen. Auf Basis der erarbeiteten Ergebnisse liefert der Vergleich mit anderen Verfahren und dementsprechend Funktionselementen in anderen Spannungszuständen ein umfassendes Prozessverständnis bezüglich der Blechumformung von Hybridbauteilen. Darauf aufbauend lassen sich Handlungsempfehlungen ableiten, die für eine effiziente Gestaltung bei der Herstellung von Hybridbauteilen genutzt werden können. Auf diese Weise wird die Herstellung von Hybridbauteilen ganzheitlich von der Fertigung der Additivkomponenten bis zur finalen Formgebung durch den Umformprozess untersucht und ein Beitrag zur zukunftsfähigen Ausrichtung der Fertigungstechnologie geleistet.



## 4 Verwendete Werkstoffe, Anlagen, Methoden und numerische Modelle

Im Folgenden werden der untersuchte Werkstoff, die genutzten Anlagen und Methoden sowie das numerische Modell genauer beschrieben. Basierend auf einer Prozessführungsstrategie zur additiven Verarbeitung des Edelstahl 1.4404 auf Blechsubstraten des gleichen Werkstoffs werden Hybridbauteile bestehend aus Blechgrundkörper und additiv gefertigten Funktionselementen hergestellt und umgeformt. Ein Schwerpunkt liegt in der Parameterfindung zur Verarbeitung des Werkstoffs. Ein weiterer in der experimentellen Charakterisierung von Blechmaterial und additiv gefertigten Proben hinsichtlich ihrer mechanischen und geometrischen Eigenschaften. Wegen der umfangreichen Nutzung optischer Messsysteme werden deren Funktionsprinzipien ebenfalls erläutert. Der letzte Schwerpunkt liegt auf der umformtechnischen Verarbeitung von Hybridbauteilen und Additivbauteilen, weshalb die Werkzeuge am Ende des Kapitels dargestellt werden. Das numerische Abbild des Umformprozesses, das zur Steigerung des Prozessverständnisses dient, wird zuletzt beschrieben.

### 4.1 Versuchswerkstoff – austenitischer rostfreier Edelstahl 1.4404

Der austenitische Edelstahl 1.4404 ( $X_2CrNiMo_{17-12-2}$ ) findet aufgrund seiner Korrosionsbeständigkeit vorwiegend in der Chemie- und Nahrungsmittelindustrie Anwendung sowie in Küchen und Klinikeinrichtungen [153]. Der hohe Widerstand gegen Korrosion ergibt sich aus der chemischen Zusammensetzung des Materials. Diese ist in Tabelle 3 für den verwendeten Pulverwerkstoff und in Tabelle 4 für den verwendeten Blechwerkstoff aufgeführt.

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung des untersuchten Edelstahl 1.4404 in Pulverform

<b>Massenanteil der Legierungselemente des Pulverwerkstoffs 1.4404 in % nach ASTM A276 [154]</b>									
Ni	Cr	Mo	C	Mn	Si	N	P	S	Fe
10,0- 14,0	16,0- 18,0	2,0- 3,0	max. 0,03	max. 2,0	max. 1,0	max. 0,10	max. 0,045	max. 0,015	Rest

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung des untersuchten Blechwerkstoffs 1.4404

<b>Massenanteil der Legierungselemente des Blechwerkstoffs 1.4404 in % nach DIN EN 10088-3 [72]</b>									
Ni	Cr	Mo	C	Mn	Si	N	P	S	Fe
10,0- 13,0	16,5- 18,5	2,0- 2,5	max. 0,03	max. 2,0	max. 1,0	max. 0,10	max. 0,045	max. 0,03	Rest

Der hohe Gehalt an Cr erzeugt in Verbindung mit dem Sauerstoff aus der Luft eine submikroskopisch dünne Passivschicht aus Chromoxid und bewirkt somit einen Widerstand gegen Korrosion [153]. Das enthaltene Nickel stabilisiert die Austenitphase des Eisens [51]. Der reduzierten Schweißbarkeit von austenitischen Stählen bedingt durch die geringe Löslichkeit von Phosphor und Schwefel und die damit einhergehende Heißrissneigung, wird durch den hohen Mangan-Gehalt entgegengewirkt [153]. Gleichzeitig weist der Edelstahl 1.4404 eine vergleichsweise geringe Härte sowie Streckgrenze auf und lässt sich aufgrund der umwandlungsfreien Natur nicht härten [153]. Zum Vergleich finden sich in Tabelle 5 mechanische Kennwerte der Stahllegierung 1.4404 für additiv gefertigte Proben und konventionelles Blechmaterial.

Tabelle 5: Mechanische Eigenschaften des verwendeten Werkstoffs 1.4404 als Blechwerkstoff und im additiv gefertigten Zustand

Ausgangsform	$R_{p0,2}$ in N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ in N/mm <sup>2</sup>	A in %	Quelle
Blech	> 200	500-700	> 40	[72]
Additiv	> 380	> 485	< 52	[155]

Der austenitische rostfreie Edelstahl 1.4404 eignet sich aufgrund seiner geringen Festigkeit und hohen Duktilität für die umformtechnische Verarbeitung [31]. Wegen der additiven Fertigung und der damit verbundenen hohen Abkühlraten weist das Material eine reduzierte Korngröße auf [53], was wiederum in einer gesteigerten Dehngrenze [51] im Vergleich zum Blechmaterial resultiert. Aufgrund der höheren Duktilität des Blechwerkstoffs, erreicht dieser teils höhere Zugfestigkeiten als das additiv gefertigte Gegenstück.

## 4.2 Herstellung von Additivstrukturen

Die hohe Schweißleistung ermöglicht die Verarbeitung der Legierung 1.4404 innerhalb der additiven Fertigung [8]. Im Fokus dieser Arbeit steht die Verarbeitung mittels pulverbettbasiertem Laserstrahlschmelzen (PBF-LB/M). Zum besseren Verständnis des Prozesses ist in Abbildung 2 der Aufbau einer PBF-LB/M-Anlage schematisch dargestellt.

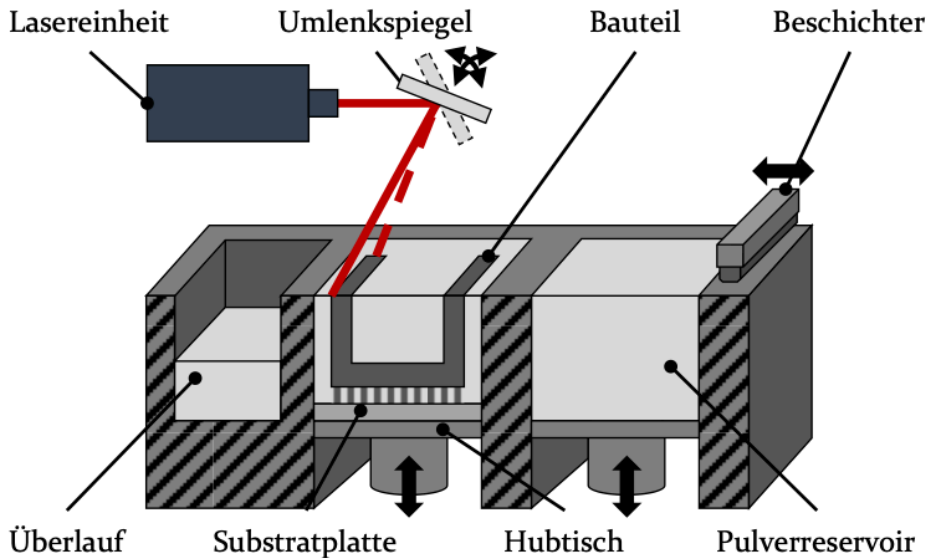


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des PBF-LB/M-Prozesses nach [156]

Die iterative Abfolge der Prozessschritte besteht aus Beschichten, Belichten und Verfahren der Bauplattform [23]. Zuerst wird eine Schicht Pulver aufgebracht, die anschließend durch die verwendete Energiequelle, in diesem Fall der Laser, lokal aufgeschmolzen wird [23]. Durch das Aufschmelzen und anschließende Erstarren erfolgt die stoffschlüssige Verbindung einzelner Bahnen zu anderen Bahnen und vorhandenen Schichten [23]. Abschließend wird die Bauplattform um eine Schichtdicke gesenkt und die nächste Schicht Pulver aufgebracht [23]. Diese Abfolge wird wiederholt, bis das Bauteil vollständig aufgebaut ist [23].

Das Kapitel der additiven Fertigung umfasst innerhalb dieser Arbeit die Herleitung einer Prozessführungsstrategie zur Fertigung von Additivstrukturen in Form von Testkörpern und Funktionselementen auf Blechsubstraten. Die Verarbeitung des pulverförmigen 1.4404 mit einer Partikelgrößenverteilung von 10-45  $\mu\text{m}$  wird mit einer Lasertec 30 SLM der Firma DMG Mori AG durchgeführt. Die Anlage verfügt über einen Laser mit einer

Nennleistung von 600 W und einen Bauraum von 300 x 300 x 300 mm. Die Bauplattform lässt sich über Heizelemente bis auf 200 °C erwärmen, um Eigenspannungen, die während des Prozesses durch die lokale thermische Ausdehnung und Kontraktion entstehen, zu minimieren. Der Arbeitsraum wird vor und während des Prozesses mit Argongas geflutet, damit der Sauerstoffgehalt unter 0,2 % bleibt. Die Vorbereitung der Daten findet mit den Programmen RDesigner und RCELOS der Firma DMG Mori statt. In RDesigner werden die dreidimensionalen Geometrien in stl-Format importiert, wo notwendig mit Stützstrukturen versehen, in Schichtebenen der Höhe 0,05 mm geteilt („slicen“) und in das rea-Datenformat exportiert. Dieses Datenformat wird in der Anlagensteuerungssoftware RCELOS verwendet, um die zuvor erstellten Schichten mit den einzelnen Bahnen des Lasers zu füllen („hatchen“). Neben der Belichtungsstrategie werden in RCELOS auch weitere Prozessparameter wie beispielsweise die Bauplattformtemperatur oder die Beschichtungsparameter eingestellt. Der Beschichtungsvorgang erfolgt mittels Silikonlippen, die bidirektional senkrecht zum Gaseinlass verfahren, um eine neue Pulverschicht aufzubringen und glatt zu streichen. Die Ausrichtung der Belichtungsstrategie wird mit jeder Schicht um 67 ° rotiert, damit eine Aufsummierung von Prozessfehlern vermieden wird [157]. Zusätzlich werden auf diese Weise die Eigenspannung möglichst isotrop verteilt [157]. Der Bereich  $\pm 30^\circ$  in Richtung des Schutzgasflusses wird dabei unterbunden. Damit wird verhindert, dass Schmelzedämpfe oder Partikel in den Laserstrahl getragen werden und den Aufschmelzprozess negativ beeinflussen [158]. Vor der Fertigung der Probekörper und Hybridbauteile wird eine geeignete Prozessführungsstrategie erarbeitet. Durch die Variation der Parameter Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Fokusbereich wird der Energieeintrag beeinflusst, der ins Pulverbett eingebracht wird, und damit auch die Porosität im Bauteil [159].

### **Prozessführungsstrategie**

Die Erarbeitung der Prozessführungsstrategie erfolgt anhand der Fertigung und Auswertung von Einzelschweißbahnen (ESB) auf Substratblechen, Volumenkörpern und Rohlingen für die Charakterisierung der Materialeigenschaften. Auf Basis der ESB werden Volumenkörper gefertigt, deren Auswertung die Parameter ergeben, mit denen Rohlinge für Charakterisierungsproben in Form von Flachzugstäben und zylindrischen Stauchproben hergestellt werden. Nach deren Prüfung werden die abgeleiteten Parameter für die Fertigung von zylindrischen Funktionselementen auf Blechsubstraten sowie zylindrischen Probekörpern verwendet.

Die Stabilität der Einzelschweißbahnen sowie deren Anbindung zueinander und auf der darunterliegenden Schicht oder dem verwendeten Substrat ist entscheidend für die Fertigung von dreidimensionalen Objekten im PBF-LB/M-Prozess [160]. Weil die Laserleistung, die Scangeschwindigkeit [161] und der Fokussdurchmesser [162] als Haupteinflussfaktoren der ESB-Querschnittsgeometrie gelten, werden diese variiert. Der Einfluss auf die Geometrie der Schweißnaht wird in metallographisch aufbereiteten Schliffbildern hinsichtlich der Abmessungen Nahtbreite, Nahthöhe und Nahttiefe untersucht. Von den Ergebnissen wird ein Versuchsraum abgeleitet, der zur Fertigung von volumetrischen Testkörpern genutzt wird.

Die Fertigung von zylindrischen [140] oder würfelförmigen [60] Testkörpern bietet einen Mittelweg zwischen Informationsgehalt und Bauzeit [60]. Aufgrund der Nähe zu der in dieser Arbeit verfolgten Bauteilgeometrie werden zylindrische Prüfkörper mit einem Durchmesser von 5 mm und einer Höhe von 5 mm genutzt. Von den gefertigten Zylindern werden ebenfalls Schliffbilder erzeugt, die zur Messung der relativen Dichte und Härte genutzt werden. Aufbauend auf den Ergebnissen der relativen Dichte- und Härtemessungen werden Charakterisierungsproben für Stauch- und Zugversuche hergestellt.

### 4.3 Metallographische Aufbereitung der Proben

Die metallographische Aufbereitung der Proben ermöglicht Gefügeaufnahmen sowie Härtemessungen und im Falle von additiv gefertigten Proben auch die Messung der relativen Dichte. Unabhängig von der Art und Verwendung der Aufnahme werden die Proben mittels Trennschleifer auf die relevanten Bereiche reduziert. Anschließend erfolgt die Einbettung in kaltaushärtendem Epoxidharz. Die aufzunehmende Seite der Proben wird stufenweise geschliffen und abschließend poliert. Für Gefügeaufnahmen wird die Probenoberfläche im Falle von 1.4404 mit einer Nitallösung (Salpetersäureanteil 3 %) geätzt. Die Aufnahme der Bilder erfolgt mittels Auflichtmikroskopie. Die Dichtemessung erfolgt anhand von Schliffbildern im polierten Zustand ohne Ätzung. Die Aufnahmen werden mit einem Matlab-Skript in Binär-Bilder umgewandelt, wobei ein Schwellwert von 0,5 verwendet wird. Das Verhältnis von weißen Pixeln zu der Gesamtanzahl der Pixel gibt die relative Dichte des Bauteils an. Außerdem werden die polierten Proben ohne Ätzung für die Härtemessung genutzt.

## 4.4 **Methoden zur Bestimmung der mechanischen Werkstoffeigenschaften**

Die additiv gefertigten Proben und der konventionelle Blechwerkstoff werden hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Die Untersuchungen umfassen dabei Versuche bei Raumtemperatur sowie erhöhten Temperaturen und werden, wo möglich, durch die optische Dehnungsmessung mittels digitaler Bildkorrelation unterstützt.

### 4.4.1 **Optische Dehnungsmessung mittels digitaler Bildkorrelation**

Die optische Dehnungsmessung basierend auf digitaler Bildkorrelation bietet eine kontaktlose, lokal auflösbare und dreidimensionale Analyse. Mit Sprühlacken wird ein stochastisches Muster auf die Probenoberfläche aufgebracht, das von zwei Kamerasystemen mit CCD-Sensoren während des Prozesses aufgenommen wird. Basierend auf Methoden der Mustererkennung können mithilfe des Programms Aramis der Firma Carl Zeiss GOM Metrology GmbH einzelne Bereiche des Musters als Facetten identifiziert und hinsichtlich Verschiebung und Formänderung nachverfolgt werden. Die Verwendung von zwei Kamerasystemen ermöglicht durch die Korrelation eine dreidimensionale Messung. Die ermittelten Dehnungen können über die Koppelung mit der Prüfmaschine in Fließkurven überführt werden. Die Sensoren, Objektive, stochastischen Muster sowie Kenngrößen der Software (Facettengröße, Facettenabstand, Aufnahmefrequenz) werden aufgrund der unterschiedlichen Bauteildimensionen an den jeweiligen Versuchsaufbau angepasst.

### 4.4.2 **Bestimmung der mechanischen Eigenschaften bei Raumtemperatur**

#### **Einachsiger Zugversuch**

In Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 6892-1 [163] werden einachsige Zugversuche mit Probengeometrien nach [164] durchgeführt, um den Fließbeginn  $k_{f0}$ , die maximale Fließspannung  $k_{f,max}$ , die Gleichmaßdehnung  $A_g$  und die senkrechte Anisotropie  $r$  zu bestimmen. Die Versuche werden mit einer Universalprüfmaschine Z100 der Firma ZwickRoell umgesetzt. Diese verfügt über einen Kraftaufnehmer, der nach DIN EN ISO 7500-1 [165] der Klasse 0,5 im Bereich 200 N–100 kN entspricht. Der Versuch wird dehnratengeregelt realisiert mit einer Dehnrate von  $0,0067 \text{ s}^{-1}$

im Bereich zwischen Streckgrenze und Bruchdehnung. Die optische Messung des Versuchs erfolgt mit dem Start des Versuchs bis zum Ende durch Bauteilversagen. Dabei wird eine Facettengröße von 19 Pixeln, ein Facettenabstand von 16 Pixeln und eine Aufnahme Frequenz von 2 Hz genutzt. Anhand der zuvor gemessenen Probenbreite und -dicke lässt sich über Gleichung (1) unter der Prämisse der Volumenkonstanz [6] und mithilfe der Dehnung in und senkrecht zur Prüfrichtung die Dickenänderung berechnen.

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (1)$$

Über die Ausgangsdicke und deren Änderung lässt sich auf die aktuelle Materialstärke zu dem jeweiligen Zeitpunkt des Versuches schließen. Analog dazu wird die Breite der Probe berechnet und mit der Dicke multipliziert, um die Querschnittsfläche  $A_s$  zu erhalten. Hierbei entsprechen  $\varepsilon_{x,y,z}$  den Dehnungen in den drei Raumrichtungen Länge, Breite und Dicke. Darauf aufbauend wird mit Gleichung (2) die anliegende Fließspannung ermittelt.

$$k_f = \frac{F}{A_s} = \frac{F}{a_0 \cdot \varepsilon_y \cdot t_B \cdot \varepsilon_z} \quad (2)$$

Die Breite  $a_0$  und Dicke  $t_B$  der Proben wird im Ausgangszustand gemessen. Bezogen auf den Zeitpunkt, an dem 0,2 % plastische Verformung auftritt, ergibt sich die Anfangsfließspannung  $k_{f0}$ . Diese kann als Richtwert für die benötigte Kraft genutzt werden, die zur plastischen Verformung des Werkstoffs benötigt wird. Die maximale Fließspannung  $k_{fmax}$  dagegen liegt bei der maximalen Kraft an und beschreibt die Fließspannung, bis zu welcher ein stabiles Materialverhalten vorliegt. Die dazugehörigen Umformgrade werden nach [6] mithilfe der Gleichung (3) berechnet.

$$\varphi = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad (3)$$

Dabei beschreibt  $l_0$  die Ausgangslänge und  $l_1$  die aktuelle Länge. Der maximale Umformgrad  $\varphi_{max}$  tritt bei der maximalen Fließspannung und der dazugehörigen Längenänderung auf. Bis zu diesem Punkt steigt die Festigkeit des Werkstoffs wegen der wachsenden Versetzungsdichte, bedingt durch die plastische Verformung, an [6]. Eine Auskunft über das Ausmaß

der Verfestigung gibt der Verfestigungsexponent  $n_v$  [33], der mithilfe der Gleichung (4) berechnet wird.

$$n_v = \frac{\ln \frac{(1+\varepsilon_2)}{(1+\varepsilon_1)} + \ln \left( \frac{F_2}{F_1} \right)}{\ln \frac{\ln(1+\varepsilon_2)}{\ln(1+\varepsilon_1)}} \quad (4)$$

Die Dehnungen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  werden an zwei Punkten unterhalb der Gleichmaßdehnung  $A_g$  gewählt und mit den dabei anliegenden Kräften  $F_1$  und  $F_2$  verrechnet. Austenitische Stähle weisen erst ab einem Umformgrad von 0,1 einen konstanten Verfestigungsexponenten auf [166]. Daher werden zur Berechnung im Folgenden nur Umformgrade größer 0,1 genutzt. Während des Zugversuches werden die Dehnungen in Belastungsrichtung aufgrund der Volumenkonstanz durch eine Reduktion der Breite und Blechdicke der Probe kompensiert. Die senkrechte Anisotropie  $r$  gibt Auskunft über das Verhältnis der Breiten und Dickenänderung und wird wie in Gleichung (5) aus dem Quotienten der Umformgrade in Breiten- und Dickenrichtung berechnet [33].

$$r = \frac{\varphi_{\text{Breite}}}{\varphi_{\text{Dicke}}} \quad (5)$$

Wegen der Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften aufgrund des Walzprozesses werden die Kennwerte für den Blechwerkstoff für die Orientierungen  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$  ermittelt. Zusätzlich zu den Kennwerten werden auch die Fließkurven aus den Anlagen- und Messdaten ermittelt. Die Fließkurven werden genutzt, um das Materialverhalten ab dem Beginn der plastischen Verformung zu beschreiben. Die Informationen über das Materialverhalten aus Fließkurven, die in einem Zugversuch ermittelt werden, beschränkt sich auf den Bereich bis zur Gleichmaßdehnung, weil anschließend der instabile Bereich in Form einer Einschnürung beginnt [32]. Wegen des dabei entstehenden mehrachsigen Spannungszustandes wird die Fließkurve für höherer Umformgrade mithilfe mathematischer Funktionen extrapoliert [7]. Gängige Ansätze dafür wurden unter anderem von Hollomon [44], Voce [45], Swift [46], Hockett und Sherby [47], Ghosh [48] und Ludwik [43] erarbeitet. Eine weitere Möglichkeit stellt die Extrapolation mittels der Ergebnisse eines hydraulischen Tiefungsversuchs dar [32], wie es im Folgenden für den Blechwerkstoff erfolgt. Die Vorgehensweise basiert auf den Erkenntnissen von Sigvant et al. [167] und wird in der DIN EN ISO 16808 [168] beschrieben.

### **Mechanischer Tiefungsversuch – Nakajima-Versuch**

Zur Ermittlung der Grenzformänderungskurve wird der mechanische Tiefungsversuch nach ISO 12004 [169] für die Probengeometrien So50, So70, So90, S100 und S125 mit einem Probendurchmesser von 245 mm durchgeführt. Die genutzte Anlage ist eine TZP 400 der Firma Lasco Umformtechnik GmbH mit einer Nennkraft von 4.000 kN. Bei der optischen Dehnungsmessung wird eine Facettengröße von 19 Pixeln, ein Facettenabstand von 16 Pixeln und eine Messfrequenz von 20 Hz verwendet. Während der Stempelbewegung wird die Dehnung der Probenoberseite durch das optische Messsystem Aramis der Firma Carl Zeiss GOM Metrology GmbH bis zum Versagen durch Rissbildung aufgezeichnet, um das Umformvermögen zu ermitteln. Durch die variierende Stegbreite der Probengeometrie lassen sich verschiedene Spannungszustände für Hauptspannungen unter Zugbelastung abbilden [34]. Von einer biaxialen Zugbelastung ( $\varphi_1 = \varphi_2$ ), über den Bereich der ebenen Dehnung ( $\varphi_2 = 0$ ), der uniaxialen Zugbelastung ( $\varphi_1 = -2 \cdot \varphi_2$ ) bis zum Bereich des Tiefziehens ( $\varphi_1 = -\varphi_2$ ), werden Kombinationen aus Haupt- und Nebenspannung genutzt, um die dazugehörigen Grenzformänderungen zu bestimmen [7]. Die kritischen Umformgrade werden nach DIN EN ISO 12004-2 [170] berechnet.

### **Hydraulischer Tiefungsversuch**

Zur Extrapolation der Fließkurve aus dem einachsigen Zugversuchs und zur Ergänzung der Grenzformänderungskurve um einen Punkt im biaxialen Zugspannungszustand wird der hydraulische Tiefungsversuch nach DIN EN ISO 16808 [168] mit einer HPDZb 630 der Firma Schuler-Hydrap durchgeführt. Die Nennkraft der Presse beträgt 6.300 kN. Der Durchmesser der Proben beträgt 395 mm und der der Matrize 200 mm. Die Dehnung der Probenoberseite wird optisch über das optische Dehnungsmesssystem Aramis der Firma Carl Zeiss GOM Metrology GmbH mit einer Frequenz von 1 Hz aufgenommen. Zur Auswertung werden Facetten der Größe 30 Pixel und mit einem Abstand von 15 Pixeln genutzt. Der Versuch erfolgt dehnratengeregelt mit einer Dehnrates von  $0,004 \text{ s}^{-1}$ . Die Regelung erfolgt über das Dehnungsmesssystem, welches auch die Berechnung der erreichbaren Haupt- und Nebenumformgrade ermöglicht. Zusätzlich erfolgt die Berechnung der Fließkurve unter biaxialer Zugspannung analog zu [168].

### **Uniaxialer Zylinderstauchversuch**

In Anlehnung an die DIN 50106 [171] wird der Stauchversuch genutzt, um den Fließbeginn unter einachsiger Druckbelastung sowie die Fließkurve unter einachsiger Druckbelastung für additiv gefertigte Probekörper zu

bestimmen. Der verwendete Aufbau ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Proben werden zwischen den Hartmetallstauchbahnen platziert und durch eine Krafteinleitung über das Oberwerkzeug umgeformt. Der Druckversuch wird mit der Universalprüfmaschine des Typs LFEM 300 der Firma Walter&Bai durchgeführt. Der Versuch wird dehnratengesteuert mit einer Dehnungsrate von  $0,0067 \text{ s}^{-1}$  bis zu einer Stauchung von 50 % oder Bauteilversagen durchgeführt. Zur Minimierung der Reibung werden Teflonfolienausschnitte zwischen den verwendeten Hartmetallstauchbahnen und dem Probekörper eingesetzt.

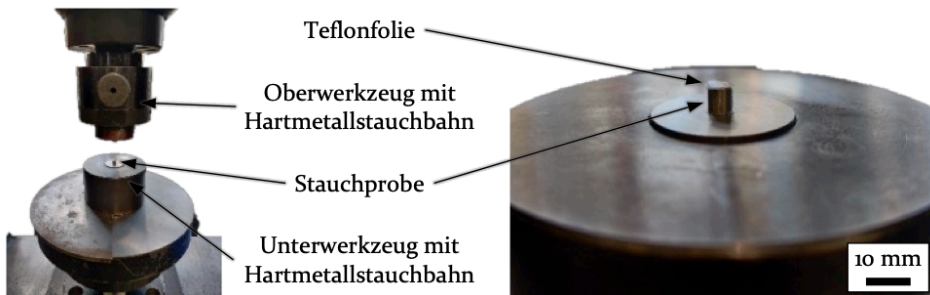


Abbildung 3: Werkzeugaufbau der Stauchversuche

Für die Fertigung der Proben werden Stangen mit einem Durchmesser von 9 mm und einer Höhe von 50 mm in vertikaler und horizontaler Ausrichtung auf der zuvor erwähnten Lasertec 30 von DMG Mori gefertigt. Die verwendete Laserleistung beträgt dabei 350 W, die Scangeschwindigkeit 500 mm/s und der Fokus ist um -0,5 mm verschoben. Die stangenförmigen Rohlinge werden anschließend spanend in die Prüfgeometrie von 5,3 mm Durchmesser und 5,5 mm Höhe gebracht. Die Formtoleranzen werden nach DIN 50106 [171] gefertigt.

Die Kraft-Weg-Daten der Prüfanlage werden mit den Ausgangsmaßen der Proben verrechnet, um die Fließkurve zu berechnen. Anhand der Weg-Daten und der Ausgangshöhe  $h_{SV,0}$  lässt sich die Stauchung  $\varepsilon_z$  und der dazugehörige Umformgrad  $\varphi$  der Probe über Gleichung (6) ermitteln.

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon_z) = \ln\left(1 + \frac{h_{SV,1}}{h_{SV,0}}\right) \quad (6)$$

Dabei beschreibt  $h_{SV,1}$  die aktuelle Probenhöhe, die durch die Traversenbewegung bestimmt werden kann. Der Quotient aus der aktuellen Querschnittsfläche  $A_s$  und der Prüfkraft  $F$  ergibt, wie in Gleichung (7) beschrieben, die anliegende Fließspannung [6].

$$k_f = \frac{F}{A_s} \quad (7)$$

$$A_s = \frac{V_{SV,1}}{h_{SV,1}} = \frac{V_{SV,0}}{h_{SV,1}} = \frac{h_{SV,0} * \left(\frac{d_{SV,0}}{2}\right)^2 * \pi}{h_{SV,1}} \quad (8)$$

Die aktuelle Querschnittsfläche  $A_s$  lässt sich über Gleichung (8) unter der Prämisse der Volumenkonstanz [6] berechnen. Die Querschnittsfläche ergibt sich aus dem Quotienten des Volumens  $V_{SV}$  und der Höhe  $h_{SV}$ . Während der Prüfung resultiert durch die Höhenreduktion eine Zunahme des Radius und somit der Querschnittsfläche.

### Schichtstauchversuch

In Anlehnung an den Druckversuch nach DIN 50106 [171] wird der Schichtstauchversuch genutzt, um den Fließbeginn unter biaxialer Zugbelastung und den biaxialen Anisotropiekoeffizienten  $r_b$  zu bestimmen. Versuchsaufbau und Auswertestrategie sind in [172] beschrieben. Der Versuch wird mit einem Stapel von sieben Ronden (Durchmesser 10 mm) auf einer Universalprüfmaschine des Typs LFEM 300 der Firma Walter&Bai realisiert. Der Aufbau erfolgt analog zu den Stauchversuchen, wie in Abbildung 3 gezeigt. Zusätzlich werden zwei Kamerasysteme genutzt, die wie in Abbildung 4 gezeigt angeordnet sind.

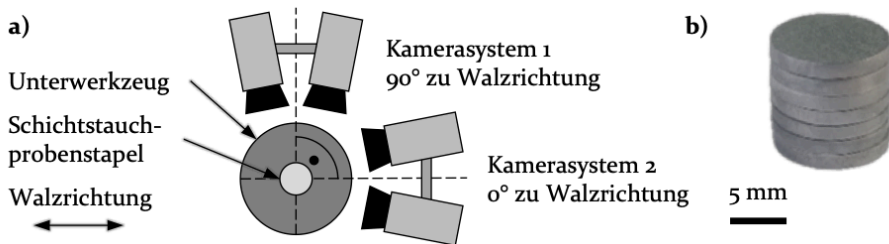


Abbildung 4: a) Aufbau der Kamerasysteme für den Schichtstauchversuch b) beispielhafter Probenstapel

Zur Bestimmung der Kennwerte werden die Dehnungen des Probekörpers in und senkrecht zur Walzrichtung mit je einem optischen Messsystem bestehend aus je zwei Kameras aufgezeichnet und ausgewertet. Somit lassen sich die Dehnungen in  $0^\circ$  und  $90^\circ$  zur Walzrichtung bestimmen, um auf die Vergleichsdehnung und die Anisotropie schließen zu können. Die verwendete Facettengröße beträgt 19 Pixel, der Facettenabstand 16 Pixel und die Aufnahme Frequenz 10 Hz. Die Ronden werden dabei nach ihrer

Walzrichtung zum optischen Dehnungsmesssystem ausgerichtet. Zur Bestimmung der Dehnungen in  $0^\circ$  und  $90^\circ$  zur Walzrichtung werden zwei Systeme mit je zwei Sensoren genutzt, wobei  $2 \times 5$  Facetten in der Mitte des mittleren Plättchens ausgewertet werden. Der Quotient der Dehnungen wird nach Barlat [38] zur Berechnung des biaxialen Anisotropiekoeffizienten  $r_b$  verwendet. Aus den Kraftdaten der Prüfanlage und den ermittelten Dehnungen lässt sich nach DIN 16808 [168] die Anfangsfließspannung für den biaxialen Zug ermitteln.

### Scherversuch

Mit Blick auf spätere Anwendungen von Hybridbauteilen steht vor allem die Verbundfestigkeit zwischen Blechgrundkörper und additiv gefertigten Funktionselementen im Fokus. Der Verlust des Werkstoffzusammenhaltes stellt ein Bauteilversagen dar und ist dementsprechend zu vermeiden. Um die Belastbarkeit der Bauteile zu ermitteln, wird Verbundfestigkeit unter Zugbelastung [136] und Scherbelastung [138] geprüft. Die Berechnung der Verbundfestigkeit ergibt sich aus der ertragbaren Kraft dividiert durch den Querschnitt des Prüfkörpers. Weil die Scherbelastung deutlich näher an konkreten Anwendungsfällen liegt, wird die Scherprüfung im Rahmen dieser Arbeit verfolgt. Der Prüfaufbau, siehe Abbildung 5 a), und das Prüfverfahren orientieren sich an [138] und werden mithilfe der Universalprüfmaschine LFEM 300 der Firma Walter&Bai realisiert. Im Vergleich zu [138] wird die Stempelgeometrie wie in Abbildung 5 dargestellt angepasst.

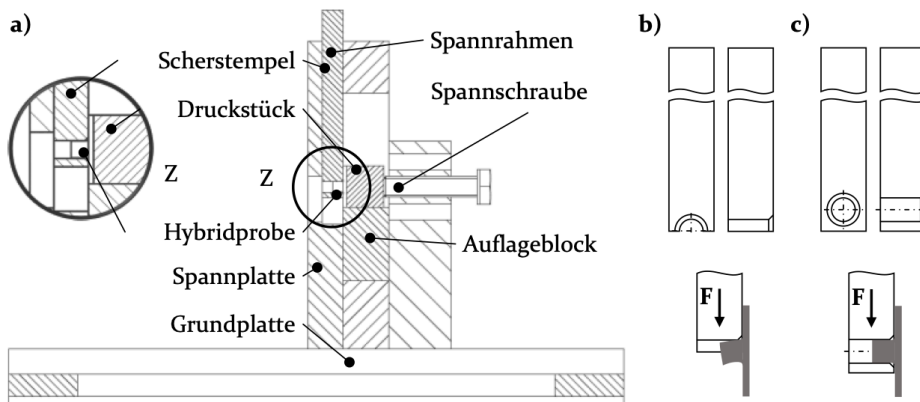


Abbildung 5: a) Prüfaufbau zur Analyse der Verbundfestigkeit unter Scherbelastung in Anlehnung an [138], b) zuvor verwendete Stempelgeometrie, c) angepasste Stempelgeometrie

Durch die umfangreiche Stützung des Funktionselementes wird mit der angepassten Stempelgeometrie (Abbildung 5 c) ein Verkippen unter Last mit resultierender Biegung vermieden. Folglich findet die Belastung zur

Bestimmung der Verbundfestigkeit nahezu ausschließlich als Scherspannung statt.

### **Härtemessung**

Anhand von Härtemessungen kann eine erste Aussage über die Festigkeit und deren Verteilung innerhalb der erzeugten Proben getroffen werden. Zusätzlich ermöglicht der Vergleich mit umgeformten Proben die Identifikation von Bereichen mit erhöhter Festigkeit. Die Vorbereitung der Proben umfasst die Schritte Trennen, Einbetten, Planparallelschleifen und abschließend Polieren. Die Mikrohärtmessungen nach Vickers werden durch eine instrumentierte Eindringprüfung gemäß DIN EN ISO 14577 [173] auf einem Fischerscope HM2000 der Firma Helmut Fischer GmbH durchgeführt. Die verwendete Prüfkraft beträgt 300 mN und eine Haltezeit von 12 s.

### **4.4.3 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen**

#### **Konduktiver einachsiger Warmzugversuch**

Analog zu den einachsigen Zugversuchen bei Raumtemperatur werden die Versuche bei erhöhten Temperaturen in Anlehnung an die DIN EN ISO 6892-1 [163] mit Probengeometrien nach [164] durchgeführt, um die mechanischen Kennwerte zu bestimmen. Der thermomechanische Prozesssimulator Gleeble 3500 der Firma Dynamic Systems Inc. ermöglicht die Prüfung der Proben bei konstanten Temperaturen oder vorgegebenen Temperatur-Zeit-Verläufen. Die Prüfkörper werden konduktiv erwärmt, wobei die Temperaturregelung über mittig angeschweißte Thermoelemente des Typs K (NiCr-Ni) erfolgt. Die Aufheizrate beträgt 12 K/s und die Haltezeit 30 s. Die Prüfung findet mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von 5 mm/s statt. Um die Oxidation des Werkstoffs auf ein Minimum zu begrenzen, werden die Versuche bei einem Vakuum von  $10^2$  Pa durchgeführt. Während des Versuchs wird der Prüfbereich der Probe durch das optische Dehnungsmesssystem Aramis der Firma Carl Zeiss GOM Metrology GmbH aufgenommen und anschließend ausgewertet. Die Aufnahmefrequenz beträgt 10 Hz, die Facettengröße 19 Pixel und der Facettenabstand 16 Pixel.

## **4.5 Methoden zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften**

Neben den mechanischen werden auch die geometrischen Eigenschaften der Bauteile gemessen. Die Analyse der Hybridbauteilgeometrie sowie deren Blechdickenverteilung erfolgt mithilfe des Prinzips der Streifenlichtprojektion. Die Geometrie der Stauchproben wird durch Fokusvariation digitalisiert.

### **4.5.1 Bauteilgeometrieerfassung mittels Streifenlichtprojektion**

Die Geometrie der Hybridbauteile wird für den Abgleich der Experimente mit der numerischen Simulation erfasst. Dabei werden die Bauteile mittels Streifenlichtprojektion digitalisiert, um die Geometrie und im Speziellen die Blechdickenverteilung zu messen. Das dafür verwendete topometrische 3D-Messsystem ATOS Core 300 der Firma Carl Zeiss GOM Metrology GmbH kombiniert zwei Sensoreinheiten mit einem Projektor und besitzt eine Messgenauigkeit von  $\pm 0,02$  mm [174]. Mittels Triangulation wird das auf die Bauteiloberfläche projizierte Streifenlichtmuster erfasst und in ein koordinatenbasiertes digitales Abbild überführt. Das Programm GOM Inspect der Firma Carl Zeiss GOM Metrology GmbH ermöglicht die Messung der Bauteilgeometrie sowie das Ausleiten von Konturen entlang von zuvor erstellten Schnitten.

### **4.5.2 Bauteilgeometrieerfassung mittels Fokusvariation**

Das gleiche Programm wird zur Auswertung der Bauteilaufnahmen genutzt, die mittels Fokusvariation erzeugt werden. Das Prinzip der Fokusvariation basiert auf der Berechnung der Bildschärfe für jede Abtastposition [175]. Die Bildschärfe wiederum wird mittels Intensität der einzelnen Pixel ermittelt. Ist die Standardabweichung von Pixeln innerhalb eines Bildfeldes gering, ist auch die Bildschärfe gering. Bei einer hohen Standardabweichung liegt eine hohe Bildschärfe vor. Die Aufnahmen werden mit dem optischen Koordinatenmessgerät InfiniteFocus XL200 G5 der Firma Bruker alicon durchgeföhrt und zusammengesetzt. Mit dem verwendeten 10-fach-Objektiv liegt die vertikale Auflösung bei 100 nm und ermöglicht so eine präzise Erfassung von kleinen Bauteilen. In Kombination mit Objektiven höherer Vergrößerung reduziert sich die vertikale Auflösung

auf bis zu 10 nm. Damit ist die optische Messung von Oberflächenrauheiten möglich.

## 4.6 Umformtechnische Formgebung durch Tiefziehen mit halbkugelförmigem Stempel

Der Werkzeugaufbau zum Tiefziehen, siehe Abbildung 6, ermöglicht durch die integrierten Heizelemente sowohl Kalt- als auch Warmumformungen bis zu 600 °C. Die Temperaturregelung erfolgt über innenliegende Thermoelemente und erlaubt die separate Variation der Temperaturen jedes Aktivteils. Zusätzlich sind die Aktivteile gehärtet und mit einer AlCrN-Hartstoffbeschichtung versehen, um die Verschleißbeständigkeit und Gleiteigenschaften für die genutzten Temperaturbereiche zu garantieren. Durch die halbkugelförmige Geometrie des Stempels werden, anders als beim Tiefziehen mit zylindrischem Stempel, der Bereich und der Betrag der biaxialen Spannungen vergrößert. Eine zusätzliche Steigerung ist durch das Klemmen des Flanschbereichs möglich, womit ein Streckziehen realisiert wird.

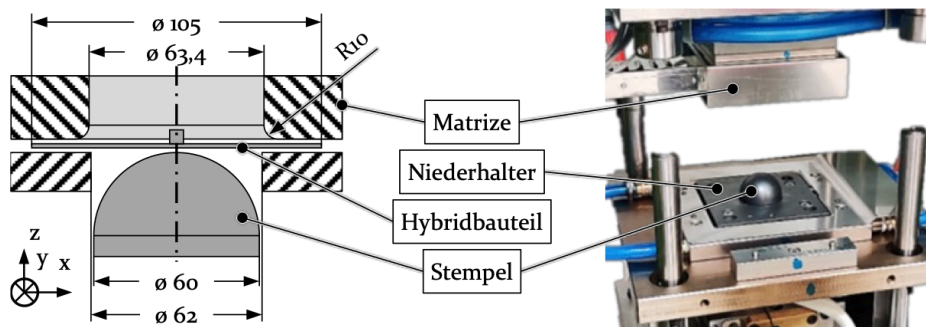


Abbildung 6: Werkzeugaufbau zum Tiefziehen bei Temperaturen bis zu 600 °C und Abmaße der Aktivteile

Das Werkzeug ermöglicht somit die Untersuchung verschiedener Spannungszustände. Demzufolge lässt sich mit einer Bauteilgeometrie durch eine gezielte Platzierung der additiv gefertigten Funktionselemente deren Einfluss in verschiedenen Spannungskonstellationen untersuchen. Das gezeigte Werkzeug ist auf einer TSP 100 So der Firma Lasco GmbH verbaut, die über eine Nennkraft des Stößels von 1.000 kN und des Ziehkissens von 300 kN verfügt. Die Matrize wird stößelseitig installiert und verdrängt beim Verfahren den ziehkissenseitig verbauten Niederhalter. Dabei wird das auf dem Niederhalter befindliche Blech über den Stempel gezogen. Die

Stempelkraft wird mit einer Kraftmessdose unterhalb des Stempels und somit unabhängig von der Niederhalterkraft gemessen. Die Niederhalterkraft wird anhand des Ziehkissendrucks erfasst. Die Aufnahme der Stößelbewegung erfolgt über einen externen Wegaufnehmer. Folglich können Kraft-Weg-Kurven für Stempel und Niederhalter abgeleitet werden.

## 4.7 Finite-Elemente-Simulation

Die Verwendung einer Finite-Elemente-Simulation ermöglicht in Kombination mit den experimentellen Untersuchungen eine Vertiefung des Prozessverständnisses. Auf Basis einer validierten Simulation können außerdem Vorhersagen bezüglich des Prozesses erfolgen und somit der experimentelle Aufwand reduziert werden. Die Identifikation von Einflüssen und Wechselwirkungen wird auf diese Weise verbessert.

Bei der Finiten-Elemente-Methode (FEM) handelt es sich um ein numerisches Verfahren [176], um physische Problemstellungen zu abstrahieren und in idealisierte mathematische Modelle zu überführen [177]. Innerhalb des mathematischen Modells wird eine Lösung berechnet, die auf das reale Problem angewendet wird [177]. Die mathematische Beschreibung erfolgt anhand von Differentialgleichungen, die oftmals nicht auf analytischem Wege gelöst werden können [178]. Deshalb werden kontinuierliche Feldprobleme anhand von endlichdimensionalen Ersatzproblemen beschrieben (Diskretisierung) und näherungsweise gelöst [178]. Diese Unterteilung in endliche kleine Bereiche (finite Elemente) [179] erfolgt für die räumliche und zeitliche Diskretisierung [180]. Der Ablauf der FEM wird üblicherweise in Pre-Processor, Solver und Post-Processor unterteilt [181]. Im Pre-Processor erfolgt die Abstrahierung (Vernetzung) der Bauteil- und Werkzeuggeometrien, sowie die Definition der Prozess- und Randbedingungen [7]. Mithilfe des Solvers werden die Gleichungssysteme, die den Prozess beschreiben, durch numerische Algorithmen näherungsweise gelöst [7]. Dabei wird zwischen dem expliziten und impliziten Verfahren unterschieden [42]. Das explizite Verfahren ist besonders für Blechziehopoperationen geeignet und weist eine höhere Berechnungsstabilität auf [42]. Jedoch sind die Berechnungen nur dann stabil, wenn ein Zeitschritt eine kritische Größe nicht übersteigt [7]. Weil die Größe des kritischen Zeitschritts von der Dichte des Bauteils abhängt, kann durch eine künstliche Dichtesteigerung (mass scaling) die Schrittweite vergrößert und damit die Berechnungsdauer verkürzt werden [7].

Zur numerischen Abbildung des Tiefziehprozesses von Hybridbauteilen wird das kommerzielle FE-Programm LS-Dyna der Firma ANSYS verwendet. Innerhalb des Programms LS-PrePost (Version 4.7) erfolgt der Aufbau der Simulation (Pre-Processor) und die Auswertung (Post-Processor) der berechneten Ergebnisse. Die Berechnung selbst wird mit dem Solver der Version mpp\_d\_R11\_1 durchgeführt. Die Modellierung der Hybridbauteile und Werkzeugwirkflächen wird in dem CAD-Programm Creo Parametric 5 der Firma PTC realisiert, wobei die Maße analog zum zuvor vorgestellten Werkzeug gewählt werden. Die erstellten Geometrien werden im iges-Format exportiert und anschließend in LS-PrePost importiert und vernetzt.

Die Wirkflächen der Werkzeuge werden mit Schalenelementen des Typs Belytschko-Tsay modelliert und verfügen über das Materialmodell „020-RIGID“, weil diese als ideal starr angesehen werden. Für die Matrize werden alle translatorischen und rotatorischen Bewegungen unterbunden, Stempel und Niederhalter können sich lediglich translatorisch in z-Richtung bewegen. Die Bewegung von Stempel und Niederhalter erfolgen über definierter geglättete Kurven (CURVE\_SMOOTH), wobei der Stempel wegeregelt und der Niederhalter krafteregelt verfahren. Für die Kontakte zwischen Blech und Werkzeugen wird die Formulierung FOMING\_SURFACE\_TO\_SURFACE genutzt. Das Hybridbauteil wird aus zwei Bestandteilen aufgebaut, damit die numerische Abbildung näher an den Realbauteilen ist. Einerseits wird das Blech mit Schalenelementen des Typs Belytschko-Tsay mit neun Integrationspunkten modelliert. Als Materialmodell wird 133-BARLAT\_YLD2000 genutzt, welches auf den Charakterisierungsversuchen des Blechgrundwerkstoffs basiert. Weiterhin werden die additiv gefertigten Funktionselemente mit Volumenelementen des Typs „constant stress solid element“ und dem Materialmodell 024-PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY abgebildet. Die hinterlegte Fließkurve für den Fließbeginn und die Verfestigung des additiv gefertigten Werkstoffs basiert ebenfalls auf den Ergebnissen der Charakterisierungsversuche. Die Verbindung zwischen additiv gefertigten Funktionselementen und dem Blechgrundkörper erfolgt über geteilte Knoten. Die Referenzebene der Schalenelemente, mit denen das Blech abgebildet wird, wird verschoben (SECTION>SHELL>NLOC=1), um ein ineinander gleiten der beiden Komponenten zu vermeiden. Außerdem wird aufgrund der Symmetrie des Prozessaufbaus und der Bauteile nur ein Viertel des Prozesses abgebildet, um Rechenzeit zu sparen. Folglich werden Randbedingungen auf die Knoten der Schnittkanten von Blech und Funktionselementen angewendet. Die translatorische Bewegung senkrecht zur Schnittkante sowie die rotatorische Bewegung entlang der Schnittkante und z-Achse werden gesperrt, um das Verhalten eines ganzen Bauteils zu simulieren. Die Reibung wird über

das Keyword „CONTACT\_FORMING\_SURFACE\_TO\_SURFACE“ mit einer Reibzahl  $\mu = 0,1$  angeben.

## 5 Erarbeitung einer Prozessführungsstrategie zur Fertigung von Hybridbauteilen

Die in dieser Arbeit untersuchten Hybridbauteile werden durch die Kombination aus PBF-LB/M und Tiefziehen hergestellt. Anders als beim konventionellen PBF-LB/M-Prozess werden die Geometrien auf Blechen aufgebaut, die eine Komponente des Bauteils darstellen. Weil der vorgelagerte Additivprozess und die dabei aufgebauten Strukturen einen Einfluss auf das Blech und den Umformprozess haben, wird dieser im Folgenden untersucht. Beim Aufbau auf Substratblechen zeigt sich im Vergleich zu massiven Substratplatten oder Stützstrukturen eine reduzierte Wärmeleitung, die zu einem Wärmestau führen kann [182]. Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, zielt die folgende Untersuchung deshalb darauf ab, dichte Hybridbauteile mit hohen mechanischen Eigenschaften herzustellen. Dafür werden die Laserleistung, die Scangeschwindigkeit und die Fokusslage variiert. Als Ausgangspunkt dienen Herstellerparameter, die aber aufgrund deren Ausrichtung für ein breites Anwendungsspektrum noch an den spezifischen Prozess angepasst werden können [183]. Das gängige Vorgehen umfasst dabei die in Abbildung 7 abgebildeten Schritte.

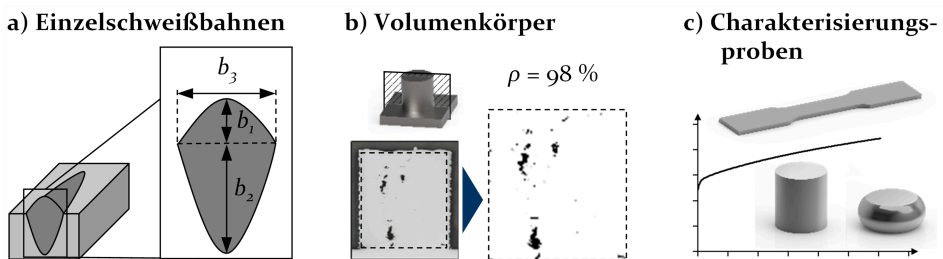


Abbildung 7: Vorgehen für die additive Fertigung von Hybridbauteilen: a) Einzelschweißbahnen, b) volumenhafte Probekörper, c) Charakterisierungsproben

Zuerst erfolgt die Fertigung und Analyse von Einzelschweißbahnen (ESB) (Abbildung 7 a). Auf den Ergebnissen der Untersuchung werden die Parameter für die Fertigung von volumenhaften Proben auf Blechgrundkörpern (Abbildung 7 b) angepasst. Diese werden hinsichtlich deren relative Dichte und Härte ausgewertet und dienen als Ausgangspunkt für die Auswahl der Parameter, die für die Herstellung von Charakterisierungsproben (Abbildung 7 c) genutzt werden. Die Analyse der mechanischen Eigenschaften erfolgt unter Zug- und Druckbelastung, weshalb Rohlinge für Flachzugproben und zylindrische Stauchproben hergestellt werden.

## 5.1 Untersuchung von Einzelschweißbahnen als Grundlage für Additivkörper

Additiv gefertigte Bauteile entstehen durch die iterative stoffschlüssige Verbindung des Pulvermaterials. Die Aneinanderreihung von einzelnen Bahnen ergeben Schichten, die wiederum miteinander verbunden zu Volumen werden. Deshalb gelten die Einzelschweißbahnen als Grundlage für einen stabilen Prozess zur Herstellung volumenhafter Bauteilen.

### Fertigung der Einzelschweißbahnen

Für die Parameterwahl der Einzelschweißbahnen (ESB) wird ein vollfaktorieller Versuchsplan auf Basis von Screening-Experimenten genutzt. Die Stufen der Laserleistung  $P_L$  betragen 200 W, 350 W und 500 W, die Scangeschwindigkeiten 500 mm/s, 800 mm/s und 1100 mm/s, und die Fokusslage wird zwischen -0,2 mm, -0,35 mm und -0,5 mm in Relation zur Bauebene variiert. Die sich daraus ergebenden 27 Parameter werden in vier Blöcken auf dem Substratblech verteilt. Die Faktorstufen und die Platzierung der ESB sind in Abbildung 8 dargestellt.

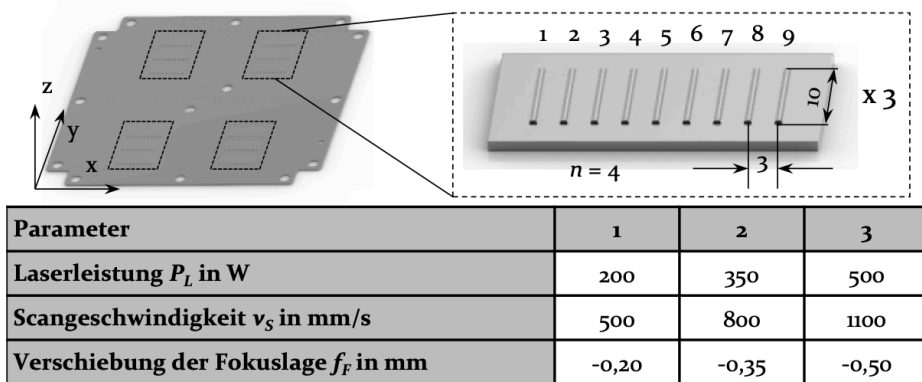


Abbildung 8: Planung der Einzelschweißbahnuntersuchung auf Blechsubstrat

Die Länge der ESB beträgt 10 mm und für den Abstand zwischen den Bahnen werden 3 mm gewählt, um eine thermische Beeinflussung untereinander zu vermeiden. Die Platzierung innerhalb der Baukammer wird auf diese Weise so variiert, dass auch der Einfluss des Abstandes zum Mittelpunkt und damit einhergehende Ungleichmäßigkeiten des Laserfokus innerhalb der Bearbeitungsebene ausgeglichen werden. Die Belichtung erfolgt entgegen des Gasstroms, um eine Kontamination der Schmelze zu vermeiden [158].

## Analyse der Einzelschweißbahnen

Die Geometrie der Bahnquerschnittsfläche gibt Auskunft über die Schmelzbaddynamik während des Prozesses [184]. Beispielsweise lassen sich die Erstarrungsrichtung, die Temperaturgradienten und auch das Aspektverhältnis  $AR$  (Verhältnis aus Bahntiefe zu Bahnbreite) erkennen [185]. Demzufolge werden wie in Abbildung 9 dargestellt. Die Bahnhöhe  $b_1$ , Bahntiefe  $b_2$  und Bahnbreite  $b_3$  für die untersuchten Parameter gemessen, um Rückschlüsse auf einen stabilen Prozessbereich für dichte Bauteile zu schließen. Auf Basis der Messwerte wird zusätzlich das Aspektverhältnis ermittelt.

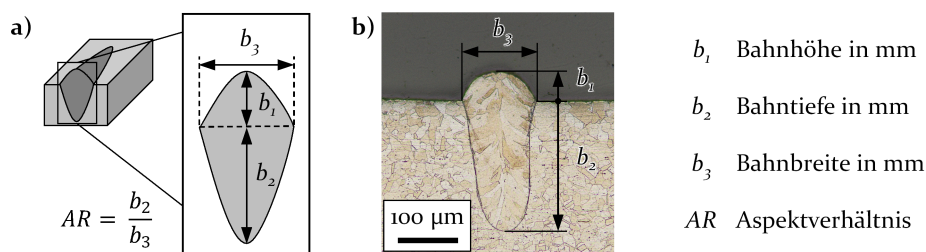


Abbildung 9: a) Schematische Darstellung der ermittelten Einzelschweißbahngeometrien, b) beispielhaftes metallographisches Schlibbild mit eingezeichneten Messgrößen

Allgemein lässt sich aufgrund der komplizierten thermischen Prozesse kein lineares Verhalten zwischen Faktoren und Messgrößen herstellen [186]. Die Bahnhöhe  $b_1$  (Abbildung 10) ergibt sich größtenteils durch die verwendete Schichtdicke ( $50 \mu\text{m}$ ) und wird durch die Substratrauheit, die Nivellierung des Substrats und die Pulvermorphologie beeinflusst [160]. Weil jedoch auch die Laserleistung, die Scangeschwindigkeit und die Fokusslage sich auf die Bahnhöhe auswirken, wird deren Einfluss im Folgenden analysiert.

Abgeleitet aus Abbildung 10 a) zeigt sich, dass von den untersuchten Parametern die Scangeschwindigkeit den größten Einfluss auf die Bahnhöhe hat, gefolgt von der Laserleistung und deren Wechselwirkung. Den geringsten, aber immer noch signifikanten Einfluss hat die Fokusslage. Die übrigen Zweifach- und Dreifachwechselwirkungen besitzen keine Signifikanz. Anhand der Haupteffekte (Abbildung 10 b) ist erkennbar, dass eine Steigerung der Leistung in einer Zunahme der Höhe resultiert. Nimmt dagegen die Geschwindigkeit zu, wird die resultierende Bahnhöhe geringer. Bezüglich der Fokusslage lässt sich eine tendenziell abnehmende Bahnhöhe für eine Verschiebung der Fokusslage in die Blechebene und eine damit einhergehende Defokussierung ableiten. Trotz der maßgeblichen Einschränkung durch die Schichthöhe [160] wird die Höhe der ESB durch die Wech-

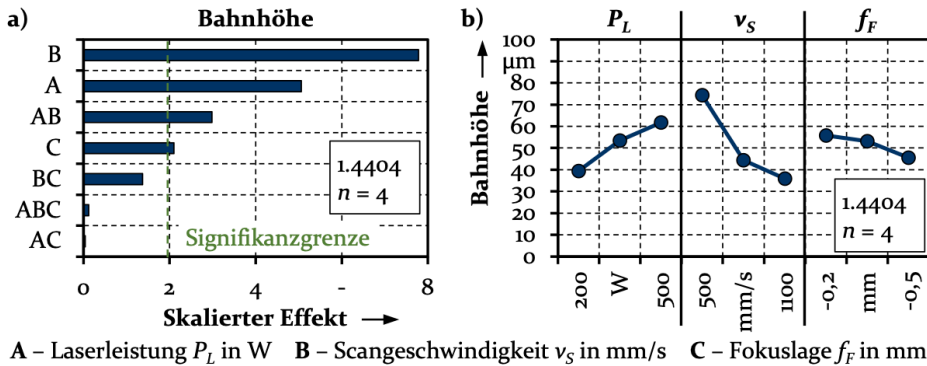


Abbildung 10: a) Einflussuntersuchung und b) Haupteffektdiagramm bezüglich der Bahnhöhe

selwirkung zwischen Laserstrahlung und Pulvermaterial ebenfalls beeinflusst. Über die Leistung wird die Menge an Energie eingestellt, die ins Pulvermaterial trifft. Wie groß die Fläche ist, auf der die Energie auftrifft, wird durch die Fokusslage bestimmt. Anhand der Scangeschwindigkeit wird die Wechselwirkungszeit der Energie mit dem Werkstoff vorgegeben. Diese grundsätzlichen Zusammenhänge lassen sich auch auf die anderen Bahnabmessungen übertragen, wobei sich die Ausprägungen der Effekte unterscheiden. In Abbildung 11 sind die Ergebnisse hinsichtlich der Bahntiefe  $b_2$  aufgezeigt. Anhand der Bahntiefe lässt sich schließen, wie groß der Wiederaufschmelzbereich jeder Bahn entgegen der Aufbaurichtung ist. Eine ausreichend hohe Tiefe ist erforderlich, um die Schichten mit den darunterliegenden zu verbinden [187] und kann durch Wiederaufschmelzen zu einer reduzierten Porosität führen [188]. Jedoch wird durch die abweichenden Temperaturgradienten auch die Kornstruktur beeinflusst [189].

Die Bahntiefe wird deutlich durch alle drei Faktoren sowie die Wechselwirkung aus Leistung und Scangeschwindigkeit beeinflusst. Die übrigen Zweifachwechselwirkungen sind ebenfalls signifikant, aber weniger stark. Lediglich der Effekt der Dreifachwechselwirkung liegt unterhalb der Signifikanzgrenze. Auf Basis der im vorherigen Abschnitt erklärten Zusammenhänge lassen sich auch die Effekte bezüglich der Bahntiefe erläutern. Eine höhere Leistung bedeutet mehr Energie, die eingebracht wird, eine gesteigerte Scangeschwindigkeit wiederum reduziert die Wechselwirkungszeit und somit die Wärmeleitung und eine Verschiebung der Fokusslage in die Blechebene (Defokussierung) bewirkt eine Verteilung der Energie auf eine größere Fläche. Bei der Kombination aus hoher Leistung, niedriger Geschwindigkeit und geringem Fokussdurchmesser tritt der Effekt des Tief-

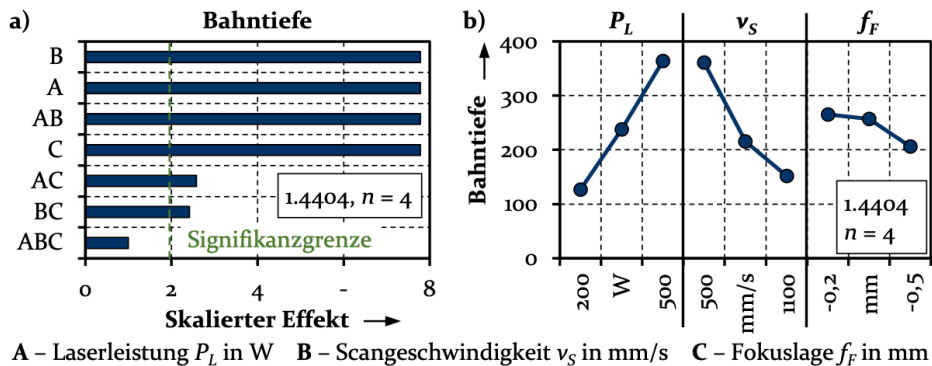


Abbildung 11: a) Einflussuntersuchung und b) Haupteffektdiagramm bezüglich der Bahntiefe

schweißen auf. Die hohe Energiemenge führt zum Verdampfen des Materials [190], der Bildung einer Dampfkapillare [185] und damit zu einer deutlich gesteigerten Absorption der Strahlung [191]. Die Folge ist eine Schweißbahn, deren Tiefe deutlich größer als die Breite ist. Die Einflüsse der untersuchten Faktoren auf die Breite  $b_3$  der ESB sind in Abbildung 12 zu sehen.

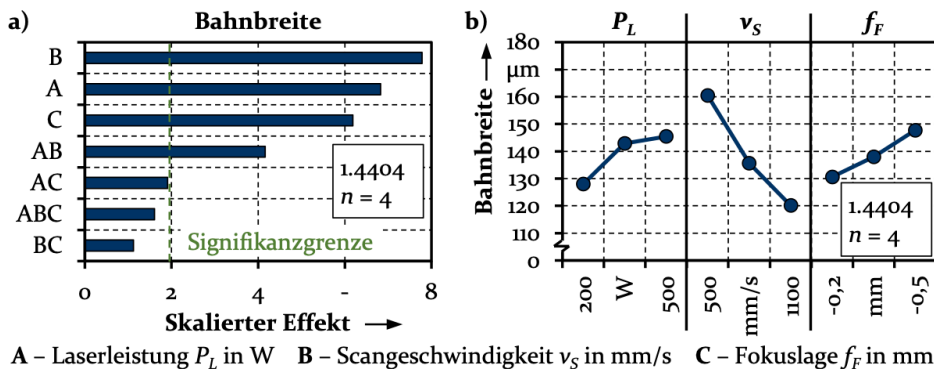


Abbildung 12: a) Einflussuntersuchung und b) Haupteffektdiagramm bezüglich der Bahnbreite

Abgeleitet aus Abbildung 12 a) haben die Einzelfaktoren sowie die Wechselwirkung aus Leistung und Geschwindigkeit einen signifikanten Einfluss auf die Breite der Schweißbahn. Den größten Einfluss hat die Geschwindigkeit, gefolgt von Leistung, Fokusslage und der Wechselwirkung aus Leistung und Geschwindigkeit. Ähnlich wie bei der Bahntiefe steigt die Bahnbreite mit zunehmender Leistung und abnehmender Geschwindigkeit. Jedoch vergrößert sich die Breite, anders als die Bahntiefe, mit der Verschiebung

der Fokusslage in die Blechebene. Durch die damit einhergehende Defokussierung wird der aufgeschmolzene Bereich vergrößert und somit die Bahntiefe gesteigert. Das Verhältnis aus Bahntiefe  $b_2$  zu Bahnbreite  $b_3$  ergibt das Aspektverhältnis  $AR$ , welches Aufschluss über den Schweißregime (Wärmeleitung, Einschweißen oder Tiefschweißen) gibt [185]. Wie das Aspektverhältnis durch Leistung, Scangeschwindigkeit und Fokusslage beeinflusst werden, ist in Abbildung 13 dargestellt.

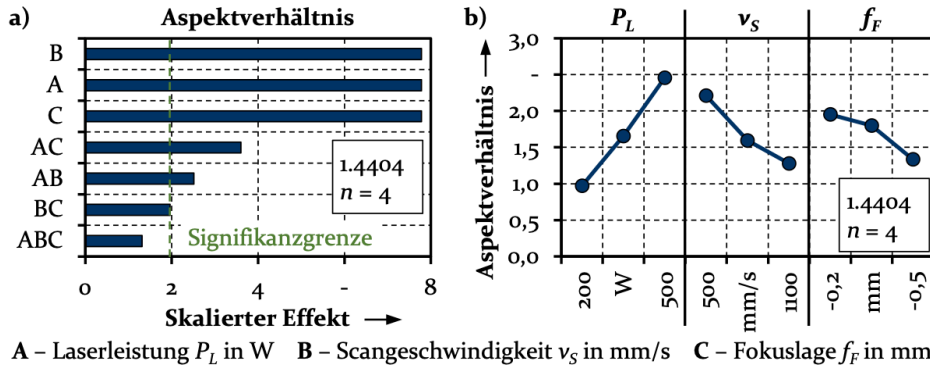


Abbildung 13: a) Einflussuntersuchung und b) Haupteffektendiagramm bezüglich des Aspektverhältnisses

Abgesehen von der Dreifachwechselwirkung und der Wechselwirkung aus Scangeschwindigkeit und Fokusslage weisen die übrigen Faktoren und Wechselwirkungen einen signifikanten Einfluss auf. Die Einzelfaktoren sind dabei maßgeblich für das resultierende Aspektverhältnis verantwortlich. Analog zu den Erkenntnissen für Bahntiefe und Bahnbreite führen eine Steigerung der Leistung und eine Reduzierung der Scangeschwindigkeit zu höheren Aspektverhältnissen. Ein Aspektverhältnis größer als 0,5 deutet auf die Ausbildung einer Dampfkapillare hin, wobei bis zu einem Verhältnis von 2 der Bereich des „Einschweißens“ und erst darüber das „Tiefschweißen“ zu finden sind [185]. Für das PBF-LB/M wird ein Aspektverhältnis zwischen 1,15 [192] und 2,0 [193] empfohlen, um defektfreie Bauteile herzustellen.

### Schlussfolgerungen für die Fertigung von volumenhaften Prüfkörpern

Poren stellen eine der häufigsten Fehler im Bereich von AM-Bauteilen dar und beeinflussen die relative Dichte  $\rho$  der Bauteile. Weil diese wiederum maßgeblich für die mechanischen Eigenschaften verantwortlich ist [159], ist der Bereich zu identifizieren, der durch Instabilitäten des Schmelzbades und daraus resultierenden Prozessfehlern limitiert ist. Vereinfacht gespro-

chen, wird der Prozessbereich dichter Bauteile durch die Prozessfehler der ungenügenden Verschmelzung, dem Balling-Effekt und dem Tiefschweißeffekt begrenzt [183], siehe Abbildung 14.

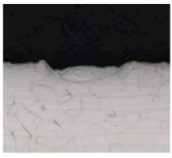


	a) 	b) 	c) 
<b>Bereich</b>	Ungenügende Verschmelzung	Balling-Effekt	Tiefschweißen
<b>Aspektverhältnis</b> $AR = b_2/b_3$	-	-	$AR > 2$
<b>Leistung <math>P_L</math></b>	Niedrig	Hoch	Hoch
<b>Scangeschwindigkeit <math>v_s</math></b>	Hoch	Hoch	Niedrig
<b>Laserfokus</b>	Defokussiert	Fokussiert	Fokussiert

Abbildung 14: Beispielhafte Prozessfehler bei der Fertigung von Einzelschweißbahnen

Bei zu geringem Energieeintrag wird das Pulver nicht vollständig aufgeschmolzen und es entsteht keine Schweißnaht (Abbildung 14 a) [183]. Die Wechselwirkungszeit zwischen der Energie des Laserstrahls und dem Pulver wird durch eine steigende Geschwindigkeit reduziert, was durch eine Steigerung der Leistung kompensiert werden kann [162]. Der Balling Effekt (Abbildung 14 b) tritt bei einer Kombination aus hoher Leistung und Geschwindigkeit auf. Die eingebrachte Energie schmilzt die Partikel in einem Bereich [194], der sich wiederum zu einem Schmelzbad verbindet [162]. Übersteigt die Kohäsion der Schmelze die Adhäsion zwischen Substrat und Schmelze [160] schwindet die Benetzung und es kommt zum Balling Effekt [190]. Die Folge sind Tröpfchen ohne Haftung zum Substrat [195]. Bei konstant hoher Leistung, aber sinkender Geschwindigkeit tritt der Effekt des Tiefschweißens (Abbildung 14 c) auf. Die hohe Energiemenge führt zum Verdampfen des Materials [190], der Bildung einer Dampfkapillare [185] und damit zu einer deutlich gesteigerten Absorption der Strahlung [191]. Gleichzeitig wird die Schmelzbadynamik gravierend beeinflusst [196] und es kommt zum Abtrag von Pulverpartikeln [185] und sogar Teilen der Schmelze [196]. Die Folge sind Pulvermangel [197] und im erstarrten Material eingeschlossene Poren [193]. Dieser Effekt tritt unab-

hängig von den gewählten Hatch- und Schichtdickeneinstellungen auf und resultiert lediglich aus der Schmelzbaddynamik [183]. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen, lassen sich die Zusammenhänge bei der Untersuchung von volumenhaften Prüfkörpern erklären.

## 5.2 Analyse volumenhafter Prüfkörper

### Fertigung der volumenhaften Prüfkörper

Die volumenhaften Probekörper werden mit der späteren Verwendung als Funktionselemente im Sinn als Zylinder mit einem Durchmesser und einer Höhe von 5 mm auf Blechsubstraten hergestellt. Die Zylinder werden wie auch die ESB im Bauraum verteilt und durch vier Proben statistisch abgesichert. Für Vergleichszwecke wird die Volumenenergiedichte  $E_v$  genutzt, die nach [198] mit der Gleichung (9) berechnet wird.

$$E_v = \frac{P_L}{v_S * h * t} \quad (9)$$

Für die Berechnung der Volumenenergiedichte wird die Leistung durch das Produkt aus Scangeschwindigkeit, Spurbabstand  $h$  (konstant 110  $\mu\text{m}$ ) und Schichtdicke  $t$  (konstant 50  $\mu\text{m}$ ) geteilt. Die Fertigungsparameter umfassen dabei einen vollfaktoriellen Versuchsplan mit drei Stufen der Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Fokuslage, siehe Tabelle 6 im Anhang. Der Versuchsraum ist in Abbildung 15 dargestellt.

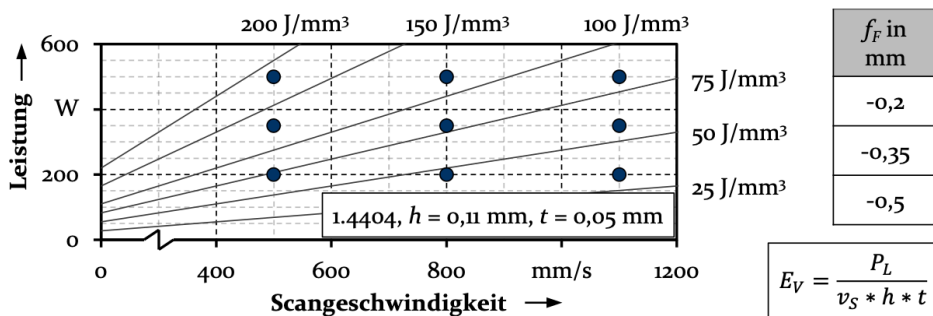


Abbildung 15: Untersuchter Versuchsraum für die Fertigung von volumenhaften Prüfkörpern auf Blechsubstrat

Die Belichtungsstrategie ist mäanderförmig und wird mit jeder Schicht um  $67^\circ$  gedreht, wobei Belichtungen  $\pm 30^\circ$  in Gasstromrichtung ausgelassen werden. Die hergestellte Prüfkörper werden metallographisch aufbereitet und hinsichtlich relativer Dichte und Härte analysiert.

### Dichtemessung der volumenhaften Prüfkörper

Die Zylinder auf Blechsubstrat werden wie in Abschnitt 4.3 beschrieben aufbereitet. Der Ablauf der Dichtemessung ist in Abbildung 16 dargestellt. Darin ist auch die Berechnung der relativen Dichte  $\rho$  abgebildet.

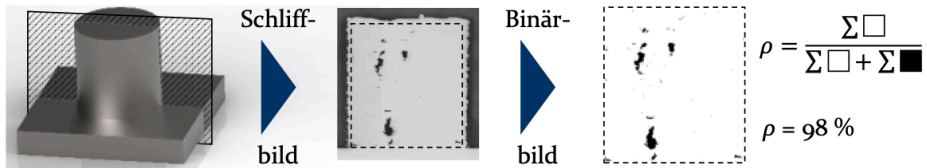


Abbildung 16: Vorgehen zur Messung der relativen Dichte  $\rho$  der Volumenkörper

Der in Abbildung 16 markierte Bereich wird mittels Matlab-Skript unter der Nutzung eines Schwellwertes von 0,5 in ein Binärbild überführt. Das Verhältnis aus weißen Pixeln und der Gesamtanzahl der Pixel ergibt die relative Dichte  $\rho$ .

### Auswertung der Dichtemessung volumenhafter Prüfkörper

Die Ergebnisse der Dichtemessungen der untersuchten Parameter für eine Wiederholungsanzahl von  $n = 4$  sind in Abbildung 17 dargestellt.

$f_F$	-0,2			-0,35			-0,5		
$P_L$	200	350	500	200	350	500	200	350	500
$v_S$	200	350	500	200	350	500	200	350	500
500	99,98 $\pm 0,01$	99,99 $\pm 0,01$	99,99 $\pm 0,01$	99,98 $\pm 0,01$	99,99 $\pm 0,01$	99,68 $\pm 0,09$	99,98 $\pm 0,01$	100,0 $\pm 0,00$	99,99 $\pm 0,01$
800	93,83 $\pm 2,82$	99,96 $\pm 0,02$	99,97 $\pm 0,02$	93,19 $\pm 2,93$	99,98 $\pm 0,02$	99,99 $\pm 0,01$	97,12 $\pm 1,55$	99,98 $\pm 0,01$	99,99 $\pm 0,01$
1100	83,89 $\pm 3,74$	97,83 $\pm 0,62$	99,95 $\pm 0,03$	97,07 $\pm 0,73$	97,79 $\pm 2,37$	99,89 $\pm 0,10$	83,26 $\pm 2,48$	99,86 $\pm 0,23$	99,98 $\pm 0,01$
$\rho < 99,5\%$			$99,5\% \leq \rho < 99,9\%$				$\rho \geq 99,9\%$		
1.4404, $P_L$ in W, $v_S$ in mm/s, $f_F$ in mm, $n = 4$									

Abbildung 17: Ergebnisse der Dichtemessung volumenhafter Prüfkörper auf Blechsubstrat innerhalb des untersuchten Versuchsraumes

Unabhängig von der Fokuslage lassen sich unterschiedliche Bereiche identifizieren. Die Kombination aus mittlerer Leistung und Geschwindigkeit resultiert in einer relativen Dichte über 99,9 %. Bei gleichzeitiger Steigerung wie auch Verringerung von Leistung und Geschwindigkeit bleibt eine hohe Dichte bestehen. Ausgehend vom Mittelpunkt des Versuchsraums erweist sich eine Reduktion der Geschwindigkeit bei konstanter Leistung sowie eine Steigerung der Leistung bei konstanter Geschwindigkeit als sinnvoll. Eine entgegengesetzte Anpassung (Reduktion der Leistung bei konstanter Geschwindigkeit; Steigerung der Geschwindigkeit bei konstanter Leistung) resultiert in einer Reduktion der relativen Dichte. Die Extremfälle bestehend aus hoher Geschwindigkeit und geringer Leistung befinden sich bereits außerhalb des stabilen Prozessbereichs. In Abbildung 18 sind für drei verschiedene Volumenenergiedichten dazugehörige Schlibilder dargestellt.

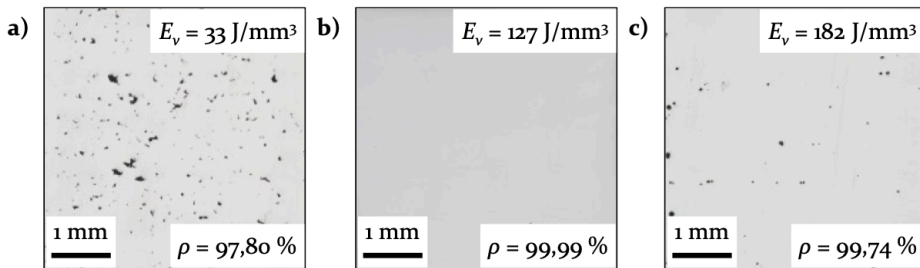


Abbildung 18: Schlibilder volumenhafter Additivkörper mit a) zu geringem Energieeintrag – Anbindungsfehler, b) ausreichendem Energieeintrag – keine Poren, c) zu hohem Energieeintrag – Gasporenbildung

Die Kombination aus geringer Leistung und hoher Geschwindigkeit entspricht einer niedriger Energiedichte, siehe Abbildung 18 a). Als Folge dessen wird das Material nicht vollständig aufgeschmolzen und es kommt zu Anbindungsfehler. Die auftretenden Poren haben eine unregelmäßige Form und sind hinsichtlich mechanischer Eigenschaften besonders kritisch [188]. Mit ausreichend hoher Energiedichte (Abbildung 18 b) werden alle Partikel aufgeschmolzen und es existiert eine Anbindung zwischen den ESB und den einzelnen Schichten. Wird die Energiedichte weiter gesteigert (Abbildung 18 c), bilden sich aufgrund der Entstehung einer Dampfkapillare Gaseinschlüsse in der erstarrten Schmelze, die sich in runden Poren äußern [193]. Wegen der durchschnittlich höchsten relativen Dichte werden die Parameterkombination bei einer Fokuslage von -0,5 mm, insbesondere die Kombination mit einer Leistung von 350 W und einer Geschwindigkeit von 500 mm/s genauer hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften untersucht. Ein entscheidender Kennwert für Hybridbauteile stellt die

Anbindungsfestigkeit dar, die unter anderem mittels Scherversuchen geprüft werden kann [136].

### Scherversuche der Hybridproben

In Anlehnung an die Korrelation zwischen relativer Dichte und mechanischen Eigenschaften bei additiv gefertigten Bauteilen werden Scherversuche für alle untersuchten Parameterkombinationen bei einer Fokuslage von -0,5 mm durchgeführt. Diese Parametersätze werden genutzt, um analog zu den Dichtemessungen Zylinder mit einem Durchmesser von 5 mm und einer Höhe von 5 mm auf 1,5 mm starkem Substratblech aufzubauen. Aus diesem werden die quadratischen Probekörper mit einer Kantenlänge von 20 mm mittels Laser ausgeschnitten, die den additiv gefertigten Zylinder im Mittelpunkt haben. Die auf diese Weise entstandenen Scherproben werden mit dem in Abschnitt 4.4.2 beschriebenen angepassten Werkzeugaufbau bei Raumtemperatur geprüft, um eine Aussage über die Anbindungsfestigkeit in Abhängigkeit der Fertigungsparameter treffen zu können. Die Prüfung erfolgt analog zu [134] mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/min bis zum Versagen der Probe. Die Anbindungsfestigkeit wird wie in [138] mithilfe des Quotienten aus maximaler Kraft und Grundfläche des additiv gefertigten Zylinders berechnet.

### Auswertung der Scherversuche

Je Parametersatz werden  $n = 3$  Wiederholversuche genutzt, um die Ergebnisse statistisch abzusichern. Die Entwicklung der relativen Dichte und der Scherfestigkeit in Abhängigkeit der Volumenenergie sind in Abbildung 19 für die neun Parameterkombinationen abgebildet.

Analog zur relativen Dichte zeigt sich bei der Scherfestigkeit ein vergleichbarer Verlauf, was auf die Korrelation zwischen relativer Dichte und mechanischen Eigenschaften zurückzuführen ist [159]. Mit zunehmender Volumenenergie steigen die Dichte sowie die Scherfestigkeit, bis ein Plateau erreicht wird. Weil die durch die fehlende Verschmelzung entstehenden Poren als Ausgangspunkt für Risse fungieren, wird durch eine Steigerung der Dichte auch die Festigkeit erhöht [136]. Mit einer Volumenenergie zwischen  $73 \text{ J/mm}^3$  und  $127 \text{ J/mm}^3$  entstehen Bauteile, die eine relative Dichte von mindestens 99,9 % aufweisen und folglich Scherfestigkeiten von ca. 500 MPa ertragen können. Eine weitere Steigerung der eingebrachten Energie resultiert in der Formation von Gasporen. Demzufolge wird die Scherfestigkeit bereits geringer, bevor eine sichtbare Reduktion der relativen Dichte entsteht. Für die nachfolgenden Härtemessungen wird daher der Bereich zwischen  $73 \text{ J/mm}^3$  und  $127 \text{ J/mm}^3$  in Betracht gezogen.

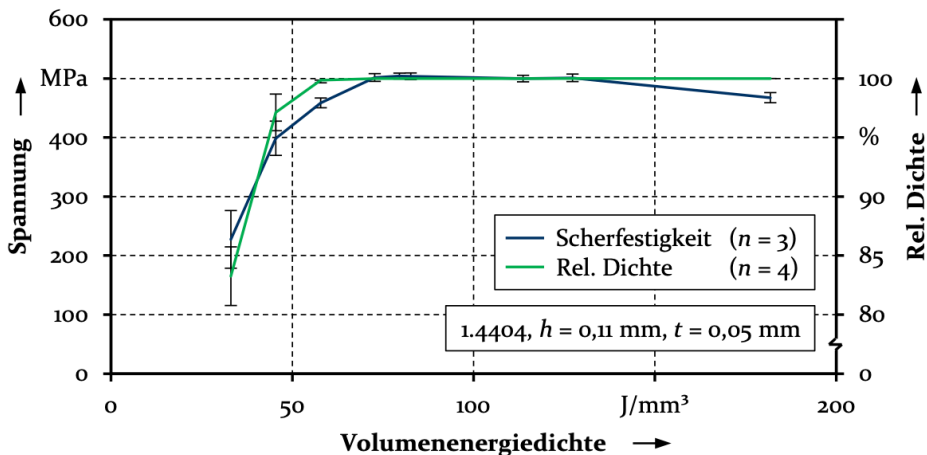


Abbildung 19: a) Relative Dichte und b) Scherfestigkeit additiv gefertigter Elemente in Abhängigkeit der Volumenenergiedichte für die Fokusslage -0,5 mm

### Härtemessung der volumenhaften Prüfkörper

Die metallographische Aufbereitung der Proben für die Härtemessung wird, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, durchgeführt. Anschließend erfolgt die Härtemessung nach Vickers wie in Abbildung 20 dargestellt.

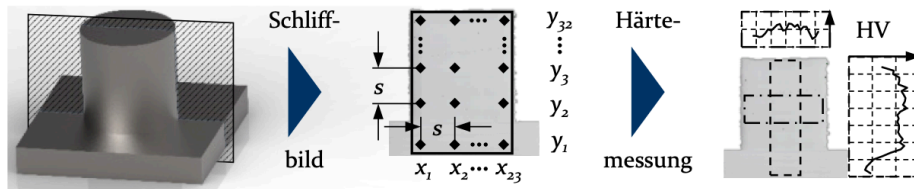


Abbildung 20: Vorgehen zur Härtemessung der volumenhaften Prüfkörper auf Blechsubstrat inklusive Verteilung der Messpunkte und Auswertungsbereiche

Die Härte wird im Bereich des additiv gefertigten Zylinders und des darunterliegenden Bleches gemessen, wobei ein Randabstand von mindestens 100  $\mu\text{m}$  eingehalten wird. Der Abstand zwischen Messpunkten beträgt 200  $\mu\text{m}$ . Zur Auswertung werden jeweils die fünf Messpunkte gemittelt, um den Festigkeitsverlauf in Aufbaurichtung und senkrecht dazu zu bestimmen.

## Auswertung der Härtemessung volumenhafter Prüfkörper

Die Ergebnisse der Härtemessungen weisen für die fünf untersuchten Parameterkombinationen keine signifikanten Unterschiede auf. Um die Verläufe der Härtemessungen zu verdeutlichen, ist beispielhaft der Parametersatz 24 in Abbildung 21 dargestellt. Die restlichen vier Härteverläufe finden sich im Anhang in Abbildung 75 bis Abbildung 78. Die Messung erfolgt in radialer und axialer Richtung. Die fehlende Phasenumwandlung des Stahls 1.4404 legt nahe, dass diffusionsbasierte Vorgänge wie Ausscheidungs- oder Mischkristallhärtung, wie sie im PBF-LB/M-Prozess typisch sind [199], nicht auftreten [9]. Wegen der Umwandlungsfreiheit werden die mechanischen Eigenschaften maßgeblich durch die Korngröße beeinflusst [200]. Folglich entstehen Unterschiede in der Härte durch die Veränderung der Abkühlbedingung und dessen Auswirkung auf die Korngröße [199]. Die Abkühlung des belichteten Bereichs erfolgt dabei größtenteils durch Wärmeleitung in den Festkörper und das umliegende Pulver [201].

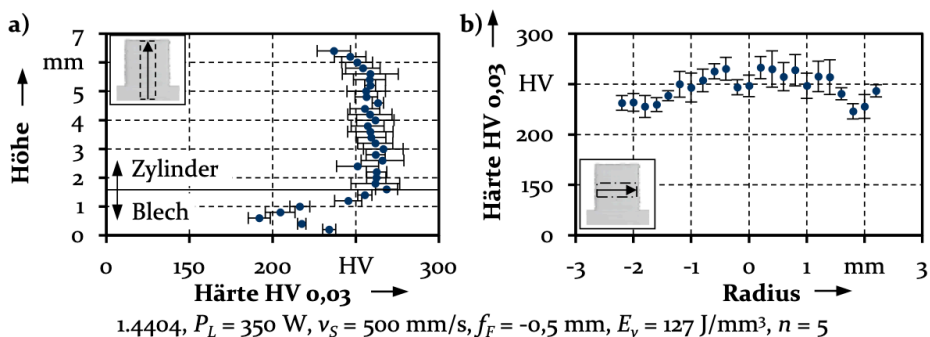


Abbildung 21: Härteverteilung der volumenhaften Probekörper a) in Baurichtung (axial) und b) senkrecht (radial) dazu für Parametersatz 24

Anhand der Härtemessung in axialer Richtung (Abbildung 21 a) lässt sich der Unterschied der Festigkeiten zwischen Blech (180-200 HV) und Additivkörper (250-270 HV) erkennen. Zwischen Blech und Zylinder findet sich ein Übergangsbereich, in dem ein Gradient der Härtewerte zu sehen ist. Durch Aufschmelzung und Wärmeeinfluss des Additivprozesses wird das Blechsubstrat lokal beeinflusst. Bis zu einer Höhe von ca. 5,8 mm bleiben die Härtewerte im Bereich des Zylinders konstant. Oberhalb dessen wird die Härte wieder geringer, weil das Wiederaufschmelzen und der thermische Einfluss durch darüber liegende Belichtungsvorgänge ausbleibt. Gleichzeitig wird die Abkühlzeit nicht durch Beschichtungsvorgänge verkürzt und somit bleibt mehr Zeit für Kornwachstum.

Die Auswertung der Härtewerte in radialer Richtung (Abbildung 21 b) zeigt, dass die höchste Härte im Zentrum des Zylinders zu finden ist. Zum Rand hin nimmt die Härte ab, steigt jedoch an der Randkontur erneut an. Wie zuvor beschrieben, wirkt sich die Abkühlbedingung auf die resultierende Korngröße aus, was wiederum die Härte beeinflusst. Im Bereich des Abstandes von 1 mm bis 2 mm zum Mittelpunkt entsteht aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit des Pulvers ein Wärmestau [202], der wiederum die Zeit bis zur Erstarrung der Schmelze verlängert [199]. Das hat eine Kornvergrößerung und Reduktion der Härte zur Folge [9]. Die gesteigerte Härte im Bereich der Zylindermantelfläche ist auf die Belichtungsstrategie zurückzuführen. Die Belichtung der Kontur erfolgt nach dem Belichten der einzelnen Kernflächen. Somit wird lediglich ein kleiner Bereich erneut aufgeschmolzen, was zu einer hohen Abkühlrate und geringen Korngröße führt [9].

### **Schlussfolgerungen für die Fertigung der Charakterisierungsproben**

Innerhalb des Bereichs von  $73 - 127 \text{ J/mm}^3$  ergibt sich für den Aufbau auf Blechsubstraten eine relative Dichte oberhalb von 99,9 %. Die Scherfestigkeit der Zylinder beträgt in diesem Bereich  $502 \pm 6 \text{ MPa}$  und auch die Ergebnisse der Härtemessungen weisen keine signifikanten Unterschiede zwischen den untersuchten Parametern auf. Daher wird für die Fertigung von Hybridbauteilen eine Energiedichte von mindestens  $73 \text{ J/mm}^3$  empfohlen. Wegen der Korrelation zwischen relativer Dichte und mechanischen Eigenschaften [159], wird für die Parameterwahl zur Fertigung der Charakterisierungsproben der Fokus auf die relative Dichte der Bauteile gelegt. Darüber hinaus wird für eine gleichzeitige Steigerung von Festigkeit und Duktilität der Übergangsbereich zwischen Einschweißen und Tief-schweißen empfohlen [203]. Deshalb wird für die Fertigung der Charakterisierungsproben der Parametersatz mit der höchsten Volumenenergiedichte des erwähnten Bereichs genutzt.

## **5.3 Additive Fertigung von Charakterisierungsproben**

In Abbildung 22 sind die additiv gefertigten Rohlinge dargestellt, aus denen die Charakterisierungsproben hergestellt werden. Diese umfassen Quader für Flachzugproben und Stangen für Zylinderstauchproben.

Der genutzte Parametersatz 24 umfasst eine Laserleistung von 350 W, eine Scangeschwindigkeit von 500 mm/s und eine Fokuslage von -0,5 mm. Die resultierende Volumenenergiedichte beträgt  $127 \text{ J/mm}^3$ . Diese Einstellungen werden in Kombination mit einem Hatch von 0,11 mm und einer

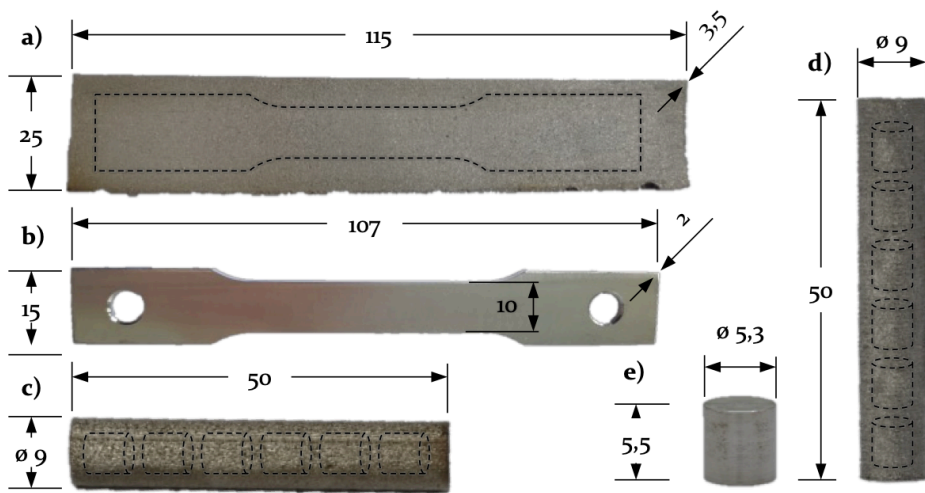


Abbildung 22: Im PBF-LB/M hergestellt: a) Rohling für Flachzugprobe, b) Flachzugprobe nach der spanenden Bearbeitung, c) horizontal gefertigter Rohling für Stauchproben, d) vertikal gefertigter Rohling für Stauchproben, e) Zylinderstauchprobe nach der spanenden Bearbeitung

Schichtdicke von 0,05 mm genutzt. Die Charakterisierungsproben werden mittels spanender Fertigung aus den Rohlingen hergestellt. Die Abmaße orientieren sich an der DIN 50125 [164] und der DIN 50106 [171]. Mit  $R_{p0,2} = 516 \pm 1 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_m = 659 \pm 4 \text{ N/mm}^2$  und  $A = 31 \pm 2 \%$  liegen die Ergebnisse der Zugversuche im Bereich der Herstellerangaben [155] und der Literatur [50]. Die genauen Ergebnisse der Prüfung werden im Abschnitt 6.1 dargestellt.

## 5.4 Abgeleitete Prozessführungsstrategie zur Fertigung von Hybridbauteilen

Aufgrund der veränderten Wärmeleitung beim Aufbau auf Blechen im Vergleich zu massiven Substratplatten oder Stützstrukturen ist es entscheidend, die Prozessführungsstrategie anzupassen. Basierend auf den zuvor beschriebenen Erkenntnissen lassen sich für den Werkstoff 1.4404 folgende Empfehlungen ableiten: Bei der Fertigung der Einzelschweißbahnen ist darauf zu achten, dass den Prozessfehlern, die den stabilen Prozessbereich begrenzen, durch eine geeignete Parameterwahl entgegengewirkt werden. Eine geeignete Möglichkeit stellt hier die Messung der Schweißbahnquerschnitte dar, sowie das daraus abgeleitete Aspektverhältnis. Hohe Schweißbahntiefen sind ein Anzeichen für die Entstehung einer Dampfkapillare,

was durch eine Steigerung der Scangeschwindigkeit oder eine Verringerung der Leistung kompensiert werden kann. Schwankende Schweißbahnhöhen und teils kreisförmige Nähte deuten auf den sogenannten Balling-Effekt hin, der bei einer Kombination aus hoher Leistung und Geschwindigkeit entsteht. Durch eine Reduktion der beiden Größen lässt sich das Ergebnis in den Bereich einer geeigneten Schweißbahngeometrie zurückführen. Der Prozessfehler der ungenügenden Verschweißung ist durch eine nicht vorhandene oder zu geringe Einschweißtiefe zu erkennen und lässt sich durch die Steigerung der Laserleistung oder Reduktion der Scangeschwindigkeit vermeiden. Bei der Fertigung mehrlagiger Bauteile dient die relative Dichte als geeigneter Richtwert für die mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Die Volumenenergie als Kombination der Fertigungsparameter Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Hatch und Schichtdicke bietet einen Vergleichswert, um verschiedene Bereiche der relativen Dichte einzustufen. Ein Minimum an Energie ( $E_v > 33 \text{ J/mm}^3$ ) wird benötigt, damit die Pulverpartikel vollständig aufgeschmolzen werden. Eine ausreichend hohe relative Dichte von über 99,9 % wird erst für eine Volumenenergie-dichte oberhalb von  $58 \text{ J/mm}^3$  möglich. Die höchste Scherfestigkeit von ca. 500 MPa wird jedoch erst ab  $73 \text{ J/mm}^3$  erreicht. Bei zu hoher Energie nimmt die relative Dichte aufgrund von Gaseinschlüssen wieder ab. Dies äußert sich auch in der Anbindungsfestigkeit zwischen Blechgrundkörper und Additivkomponente, die bei Werten oberhalb von  $127 \text{ J/mm}^3$  wieder geringer wird. Mithilfe von Härtemessungen kann eine zusätzliche Aussage über die mechanischen Eigenschaften der Hybridbauteile getroffen werden. Der Wärmeeintrag des Lasers erzeugt mikrostrukturelle Veränderungen im Grundblech und beeinflusst somit dessen Härte. Folglich ist ein Übergangsbereich zu erkennen. Doch auch die additiv gefertigten Zylinder selbst weisen anisotrope Eigenschaften auf. Bedingt durch die fehlende Wiederaufschmelzung ist die Härte der obersten Schichten geringer als die der darunterliegenden. Knapp unterhalb der Randschicht ist die Härte der Additivbauteile ebenfalls reduziert, was unter anderem auf den dort vorhandenen Wärmestau zurückzuführen ist. Die zuvor beschriebenen Strategien tragen dazu bei, dichte Hybridbauteile herzustellen, die reproduzierbare mechanische Eigenschaften besitzen. Das umformtechnische Verhalten der additiv erzeugten Komponenten wird im nächsten Abschnitt untersucht.

## 6 Analyse der mechanischen Werkstoffeigenschaften

Die beiden Herstellungsverfahren Walzen und additive Fertigung des untersuchten Werkstoffs resultieren in unterschiedlichen Gefügen und dementsprechend mechanischen Eigenschaften. Deshalb ist es wichtig, diese Zustände genauer zu untersuchen, um ein Verständnis bezüglich des Verhaltens während des Umformprozesses zu erarbeiten. Im ersten Abschnitt werden daher für die Umformtechnik relevante Kennwerte experimentell ermittelt. Im zweiten Abschnitt wird die numerische Modellierung des Werkstoffverhaltens abgeleitet. Dazu zählen Fließbeginn, die Verfestigung und das Versagen des Werkstoffs. Zuletzt werden die Unterschiede zwischen additiv und konventionell gefertigtem Material am Beispiel des Werkstoffs 1.4404 aufgezeigt und die Bedeutung für die Umformung von Hybridbauteilen herausgearbeitet.

### 6.1 Ermittlung der mechanischen Kennwerte unter Temperatureinfluss

Im Folgenden werden die mechanischen Eigenschaften bei Raumtemperatur ermittelt, um das Umformverhalten des Werkstoffs zu untersuchen. Danach erfolgt die Bestimmung der Kennwerte bei erhöhten Temperaturen, damit der Einfluss der Temperatur auf das Werkstoffverhalten verglichen werden kann. Zeitgleich dienen die Kennwerte als Richtwerte für einen Einsatz bei erhöhten Temperaturen, die bei austenitischen rostfreien Edeltählen bis 450 °C [204] betragen können. Zuletzt werden die Größen, die für die numerische Materialmodellierung benötigt werden, experimentell ermittelt. Die Herstellung der additiven Prüfkörper erfolgt, wie in 5.3 beschrieben, mit einer Volumenenergiedichte von  $E_v = 127 \text{ J/mm}^3$ .

#### 6.1.1 Ermittlung der Kennwerte bei Raumtemperatur

##### Einachsiger Stauchversuch bei Raumtemperatur

Mithilfe des einachsigen Stauchversuchs lassen sich der Fließbeginn ( $k_{f0,SV}$ ) und die Fließkurve unter einachsiger Druckbelastung bestimmen. Konventionelles und additiv gefertigtes Material wird bei Raumtemperatur mit einer Universalprüfmaschine des Typs LFEM 300 der Firma Walter&Bai wie in Abschnitt 4.4.2 beschrieben analog zu DIN 50106 [171] geprüft.

Die Probenkörper werden einerseits aus Stangenmaterial und andererseits auch aus additiv gefertigten Rohlingen in zylindrischer Form spanend mit einem Soll-Durchmesser von 5,3 mm und einer Soll-Höhe 5,5 mm hergestellt. Die additiv gefertigten Rohlinge werden in zwei Ausrichtungen (vertikal, horizontal) aufgebaut. Durchmesser und Höhe der Proben werden vor und nach der Prüfung gemessen. Der Stauchversuch erfolgt zwischen zwei Hartmetallstauchbahnen mit Teflonfolie zwischen den Stauchbahnen und der Probe, um die Reibung zu minimieren.

Die Anfangsfließspannung  $k_{f0,SV}$  wird bei einer plastischen Dehnung von 0,2 % bestimmt. Diese sowie die maximal ertragbare Fließspannung  $k_{fmax}$  und der dabei erreichte Umformgrad  $\varphi_{max}$  sind für die Stauchversuche bei Raumtemperatur in Abbildung 23 a) dargestellt. Zusätzlich sind die dazugehörigen Fließkurven in Abbildung 23 b) abgebildet.

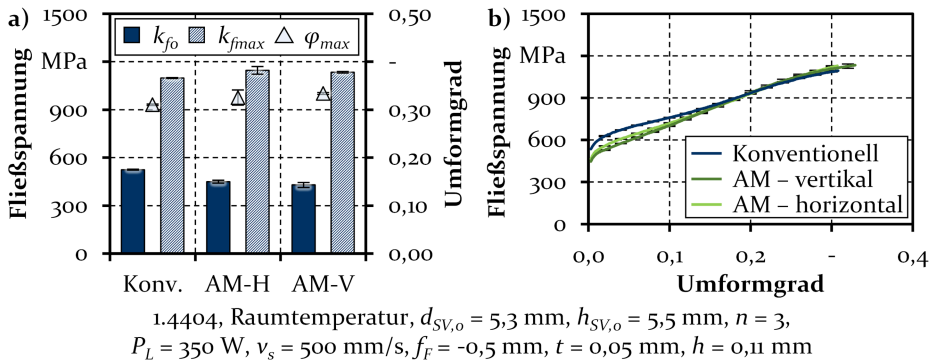


Abbildung 23: Im Stauchversuch bei Raumtemperatur ermittelten a) Kennwerte und b) Fließkurven für konventionell und additiv gefertigten Werkstoff 1.4404

Das konventionell gefertigte Material weist im Gegensatz zum additiv verarbeiteten Werkstoff einen höheren Fließbeginn und eine niedrigere maximale Fließspannung auf. Der Fließbeginn der konventionell hergestellten Probe liegt 17 % und 22 % höher als der der additiv gefertigten Proben in horizontaler beziehungsweise vertikaler Aufbaurichtung. Die Unterschiede der maximalen Fließspannungen betragen weniger als 5 %, wobei das konventionelle Material tendenziell am niedrigsten liegt.

Anhand der Fließkurven in Abbildung 23 b) ist zusätzlich die Veränderung der Fließspannung über die Umformung hinweg zu sehen. Der Fließbeginn des konventionell hergestellten Materials ist zwar höher, jedoch ist die Verfestigung bis zu einem Umformgrad von 0,15 niedriger als bei den additiv erzeugten Varianten. Für höhere Umformgrade weisen die Fließkurven einen vergleichbaren Verlauf auf. Aus umformtechnischer Perspektive

bietet das additiv verarbeitete Material damit geeignetere Voraussetzungen für die Verarbeitung als das konventionelle Gegenstück. Jedoch weisen die additiv gefertigten Proben nach der Umformung Unebenheiten auf, die weder bei den Proben im Ausgangszustand noch bei den konventionellen Proben vor oder nach der Prüfung im gleichen Ausmaß zu sehen sind. Exemplarische Proben der Stauchprüfung sind in Abbildung 24 dargestellt. Zusätzlich werden die dazugehörigen optischen Geometriemessungen gezeigt, damit der Effekt besser zu sehen ist.

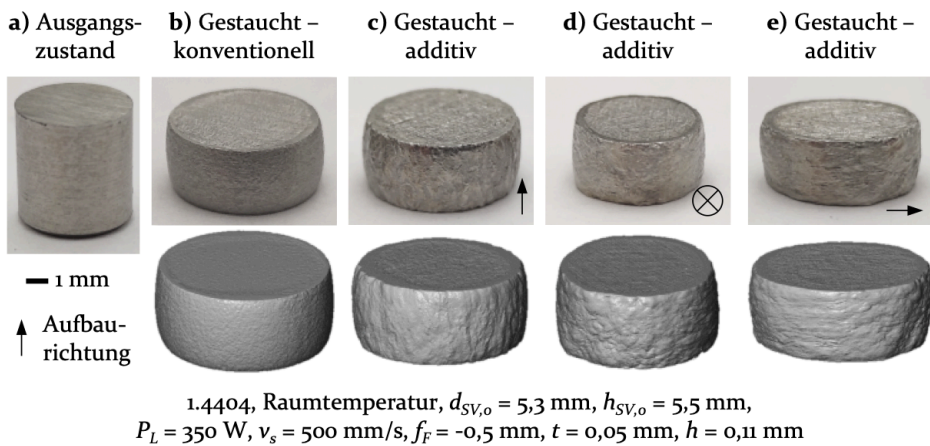


Abbildung 24: Stauchproben vor (a) und nach der Prüfung: b) konventionell, c) additiv vertikal gebaut, d + e) additiv horizontal gebaut

Abgeleitet aus den optischen Messungen in Abbildung 24 wird ersichtlich, dass die Unebenheiten eine Richtungsabhängigkeit aufweisen. Durch die Umformung entsteht eine Ausprägung, deren Richtung parallel zur Aufbaurichtung vorliegt. Weil sich bedingt durch den gerichteten Wärmeintrag des Additivprozesses Dendriten entlang der Aufbaurichtung ausbilden [97], werden diese als Ursache für das Entstehen der Unebenheiten identifiziert. Genauer liegt der Zusammenhang nahe, dass während der Umformung Versetzungsbewegungen an den Grenzen der Dendriten entstehen, die sich bis zur Oberfläche der Probe fortsetzen. Auf den Stirnseiten der Proben ist dieser Effekt ebenfalls zu sehen, jedoch aufgrund des Werkzeugkontakts weniger stark ausgeprägt. Die konventionell gefertigten Stauchproben weisen eine andere Kornstruktur auf und zeigen nach der Umformoperation folglich eine andere Oberflächenstruktur. Dieser Effekt tritt auch bei Stauchversuchen mittels PBF-LB/M gefertigter Proben der Autoren in [205] auf, wird jedoch nicht weiter thematisiert. Bei den durch WAAM gefertigten Flachzugproben in [132] wird ein ähnliches Phänomen beschrieben. Die Autoren führen die Unebenheiten auf stabile Einschnü-

rungen zurück, die sich an mehreren Stellen zwischen den Haupt-Dendriten bilden [132]. Trotz der unterschiedlichen Kornstruktur, bedingt durch die höheren Abkühlraten des in dieser Arbeit verwendeten PBF-LB/M-Verfahrens, kann dieser Effekt identifiziert werden. Die aufgebrachte Spannung führt zum Abgleiten des Materials an den Dendriten, was sich wiederum in den Unebenheiten äußert. Abbildung 25 stellt diesen Vorgang zur Verdeutlichung schematisch dar.

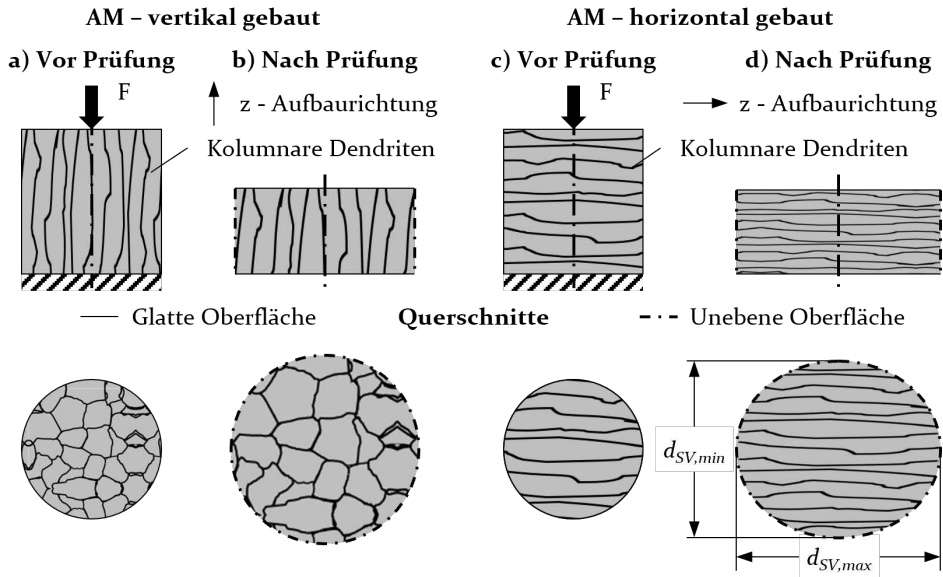


Abbildung 25: Schematische Darstellung der Ausrichtung der Dendriten additiv gefertigter Stauchproben mit unterschiedlichen Aufbaurichtungen

Je nach Relation von Aufbaurichtung und Belastungsrichtung ergibt sich damit ein eigenes Materialverhalten. Das anisotrope Materialverhalten [206] ist innerhalb der Stauchversuche anhand des Materialflusses zu sehen. Während bei einer Belastung, die parallel zur Aufbau- und damit auch Wachstumsrichtung der Dendriten erfolgt (Abbildung 25 a), werden diese entlang der Zylinderachse gestaucht. Bei einer Belastung senkrecht zur Aufbaurichtung (Abbildung 25 b) werden die Dendriten gelängt, was wiederum zu einer anisotropen Verformung führt. Dagegen ist der Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften innerhalb der durchgeführten Experimente nicht erkennbar. Um die anisotrope Verformung nachzuvollziehen, sind in Abbildung 26 Schlifffelder von horizontal aufgebauten Stauchproben vor und nach der Prüfung dargestellt. Die Belastung erfolgte somit senkrecht zur Aufbaurichtung und damit auch zur Wachstumsrichtung der Dendriten.

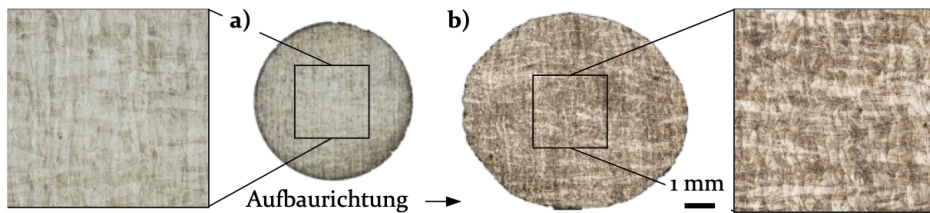


Abbildung 26: Querschnitt von additiv gefertigten Stauchproben a) vor der Umformung und b) nach der Umformung

Die Wachstumsrichtung der Dendriten verläuft parallel zur Aufbaurichtung. Zusätzlich zeigt sich der zuvor beschriebene Effekt. Die Längenänderung der Dendriten infolge der aufgebrachten Prüfkraft ist parallel zur Aufbaurichtung deutlich größer als senkrecht dazu. Dennoch tritt auch senkrecht zur Aufbaurichtung eine Breitenänderung auf, weshalb die Breite der Dendriten vergleichbar zu denen vor der Prüfung ist.

Ein Abgleiten innerhalb der Schichten bei vertikal gebauten Proben, wie es in [205] beschrieben ist, tritt innerhalb der Untersuchungen dieser Arbeit nicht im sichtbaren Maße auf. Die radiale Ausdehnung der Proben erfolgt gleichmäßig ( $d_{SV,min} \approx d_{SV,max}$ ). Dagegen führt die Stauchung der horizontal gefertigten Proben zu einer anisotropen Formänderung, Abbildung 25 d). Der Durchmesser nach der Prüfung ist in Aufbaurichtung größer als senkrecht dazu ( $d_{SV,min} < d_{SV,max}$ ). Die aufgebrachte Kraft wird stärker durch eine Längung der Dendriten kompensiert als durch deren Verbreiterung. In Aufbaurichtung weisen PBF-LB/M-Bauteile in der Regel die geringste Festigkeit unter Zugbelastung auf [28]. Dies gilt auch für den Edelstahl 1.4404, bei dem die Dendriten entlang der Aufbaurichtung wachsen [206]. Demzufolge resultiert die Druckbelastung der horizontal gebauten Proben in einer Dehnung entlang der Dendriten (Aufbaurichtung). Aufgrund der geringeren Festigkeit ist diese Formänderung größer als die, die senkrecht dazu erfolgt. Bei der Nutzung additiv gefertigter Halbzeuge gilt es, diesen Effekt zu beachten. Bereiche, die während der Umformung keinen Kontakt zu Werkzeugflächen haben, weisen nach der Operation potenziell unebene Oberflächen auf. Der gleiche Effekt ist, wie im nächsten Abschnitt beschrieben, auch bei additiv gefertigten Proben unter Zugbelastung zu sehen.

### Einachsiger Flachzugversuch bei Raumtemperatur

Der einachsige Zugversuch ermöglicht die Bestimmung der Fließkurve inklusive des Fließbeginns  $k_{fo}$ , der maximalen Fließspannung  $k_{fmax}$ , des maximalen Umformgrades  $\varphi_{max}$  unter Zugbelastung. Zusätzlich können

darauf aufbauend der Verfestigungsexponenten  $n_v$  und die senkrechten Anisotropie  $r$  berechnet werden. Mithilfe dieser Kennwerte können die Proben hinsichtlich ihrer Eignung für Umformverfahren verglichen werden. Diese Kennwerte werden für den rostfreien Stahl 1.4404 als Blechwerkstoff und additiv gefertigt bei Raumtemperatur, wie in 4.4.2 beschrieben, ermittelt. Dafür werden die Kraft-Weg-Verläufe der Universalprüfmaschine mit den Daten des optischen Dehnungsmesssystems verknüpft und ausgewertet. Die zuvor beschriebenen Kennwerte sind in Abbildung 27 für den Blechwerkstoff und die additiv gefertigten Charakterisierungsproben abgebildet. In Abbildung 27 a) ist ein Vergleich der beiden Werkstoffe hinsichtlich der Fließspannungen  $k_{fo}$  und  $k_{fmax}$  sowie des maximal erreichbaren Umformgrades  $\varphi_{max}$  dargestellt. In Abbildung 27 b) sind der Verfestigungsexponent  $n_v$  und die senkrechte Anisotropie  $r$  zum Vergleich aufgetragen.

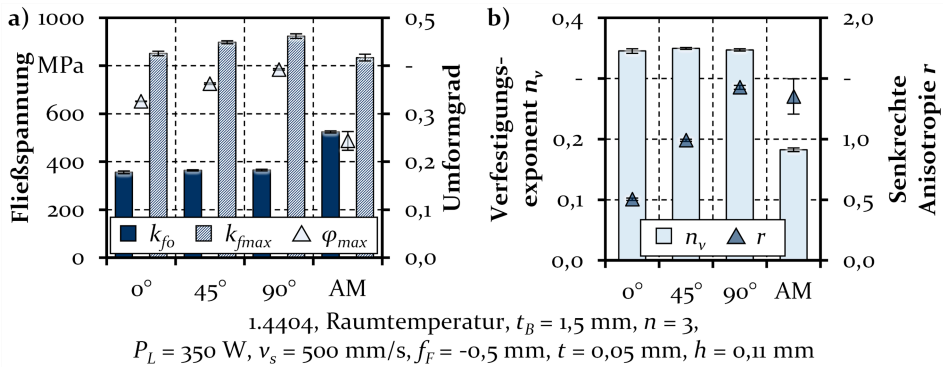


Abbildung 27: Im einachsigen Zugversuch bei Raumtemperatur ermittelte mechanische Kennwerte für konventionell und additiv gefertigten Werkstoff 1.4404

Anhand des Vergleichs des Fließbeginns sind geringe Unterschiede zwischen den drei Ausrichtungen des Blechwerkstoffs zu sehen. Die Werte des Fließbeginns sind parallel zur Walzrichtung ( $356 \pm 6$  MPa) am geringsten und senkrecht dazu bei  $90^\circ$  ( $365 \pm 4$  MPa) am höchsten. Im Gegensatz zum konventionell hergestelltem Werkstoff, ist der Fließbeginn des additiv gefertigten Materials ca. 40 % höher ( $524 \pm 4$  MPa), was auf die geringe Korngröße [200], die hohe Versetzungsdichte [207] und Eigenspannungen [13] zurückzuführen ist. Innerhalb eines Umformprozesses erfordert dieser Werkstoff folglich eine höhere Kraft und resultiert in höheren Belastungen für die Werkzeuge. Auf der anderen Seite wird durch den höheren Fließbeginn im Einsatz eine höhere Last ertragen, bevor der Werkstoff plastische Verformungen zulässt. Die maximale Fließspannung ( $834 \pm 14$  MPa) ist knapp unter der des Blechwerkstoffs in  $0^\circ$ -Walzrichtung ( $851 \pm 9$  MPa), was mit einem Beginn des instabilen Bereichs bei einer

geringeren Spannung einhergeht. Die höchste maximale Fließspannung ist erneut bei  $90^\circ$ -Walzrichtung und beträgt  $924 \pm 9$  MPa und ist damit ca. 8 % höher als bei  $0^\circ$  Walzrichtung. Die erreichbaren Umformgrade sind für das Additivmaterial ca. 30 % geringer ( $0,24 \pm 0,02$ ) verglichen mit dem Blechwerkstoff mit einer Belastung parallel zur Walzrichtung ( $0,33$ ). Von den drei Orientierungen weist diese den geringsten erreichbaren Umformgrad auf. Das Maximum liegt für  $90^\circ$  Walzrichtung bei  $0,39$ . Damit lassen sich für Belastungen senkrecht zur Walzrichtung die höchsten Umformgrade realisieren. Die bei der Kaltumformung auftretende Verfestigung, die zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften beiträgt [7], ist beim Blechwerkstoff ( $n_v = 0,35$ ) nahezu doppelt so hoch wie beim additiv hergestellten Gegenstück ( $n_v = 0,18$ ). Die für austenitische Edelstähle typische hohe Festigkeit und Duktilität [208] sowie das damit einhergehende Energieabsorptionsvermögen [209] lässt sich auf die Zwillingsbildung und Umwandlung in Martensit zurückführen, die während der Umformung erfolgt. Durch die ins Kristallgitter eingebrachten Schubspannungen findet ein Umklappen in eine spiegelbildliche Orientierung entlang von Zwillingsebenen statt [6]. Bei Werkstoffen mit geringer Stapelfehlerenergie, wie es bei austenitischen Stählen der Fall ist [210], sind Gleitvorgänge erschwert und somit werden Schubspannungen durch die energetisch aufwändigere Zwillingsbildung kompensiert [6]. Die dabei entstehenden Zwillingsebenen stellen Behinderungen für Versetzungsbewegungen dar und tragen somit maßgeblich zur Verfestigung des Werkstoffs bei [211]. Der geringere Verfestigungsexponent des Additivmaterials bezeugt, dass diese Vorgänge nicht oder nur im geringeren Maße stattfinden. Einen vergleichbaren Einfluss zeigen auch die Autoren in [212] und verweisen auf die ausbleibende Martensitumwandlung unter Last. Im Hinblick auf einen Umformprozess ist die senkrechte Anisotropie des Additivmaterials mit einem Wert von  $1,35 \pm 0,15$  als unkritisch einzustufen. Damit wird die Längung des Werkstoffs in Belastungsrichtung stärker durch eine Reduktion der Breite als der Materialstärke kompensiert [33]. Im Bereich der Blechumformung ist eine Kompensation durch die Reduktion der Materialstärke (Blechausdünnung) kritischer im Hinblick auf Materialversagen durch Rissbildung. Demzufolge weist das untersuchte 1.4404-Blech in Walzrichtung ( $r = 0,50 \pm 0,01$ ) für eine Umformung weniger günstige Anisotropieeigenschaften auf als senkrecht zur Walzrichtung ( $r = 1,43 \pm 0,02$ ) oder das additiv gefertigte Material.

Zusätzlich zeigen sich bei den additiv gefertigten Proben, wie auch bei den Stauchversuchen, Unebenheiten an den Oberflächen. Diese sind für eine Zugprobe nach der Prüfung in Abbildung 28 dargestellt.

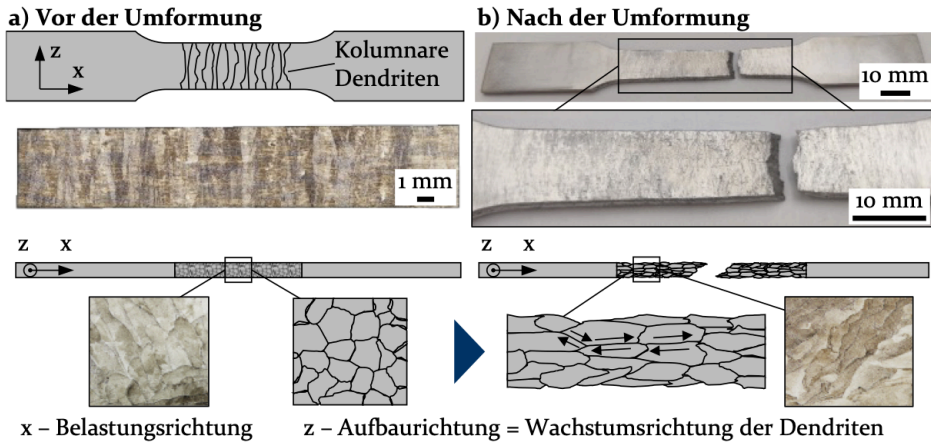


Abbildung 28: a) Additiv gefertigte Zugprobe a) vor der Prüfung und b) nach der Prüfung mit schematischer Darstellung der Kornstruktur und Schlibbildern

Erneut bilden sich Unebenheiten an Flächen der Probe, die keinen Werkzeugkontakt aufweisen. Im Fall der Zugproben, werden diese wie in Abbildung 28 beschrieben gefertigt, was zu einer Ausrichtung der Dendriten wie in Abbildung 28 a) führt. Eine Zugbelastung senkrecht dazu erzeugt ein Abgleiten der kolumnaren Dendriten an deren Grenzen. Es treten stabile Einschnürungen auf [132], die auch mit bloßen Auge sichtbar sind. Bei ausreichend hoher Belastung tritt das Versagen in Form der Rissausbreitung entlang der Dendriten ein. Die Ausbildung der Unebenheiten verhindert die Verwendung von Flächen additiv gefertigter Halbzeuge, die bei der Umformung keinen Werkzeugkontakt haben, für Anwendungen im Sichtbereich oder mit hohen Oberflächentoleranzen.

Zusammenfassend äußern sich die verfahrensbedingten Unterschiede, die sich unter anderem in Kornstruktur, Eigenspannungen und Versetzungen gründen, in den Kennwerten und dem Umformverhalten der untersuchten Bauteile. Der geringste Unterschied zwischen additiv und konventionell gefertigtem Material ist unter Druckbelastung zu finden. Der Fließbeginn der Additivproben liegt circa 15 % unterhalb der des Stangenmaterials. Die maximal erreichten Fließspannungen für eine Stauchung von 50 % unterscheiden sich sogar um weniger als 5 %. Dabei ist die Aufbaurichtung innerhalb der untersuchten Umfangs nicht entscheidend. Hinsichtlich einer Druckbelastung ist Additivmaterial für eine Nutzung innerhalb eines Umformprozesses oder als Bauteil mit konventionellem Stangenmaterial vergleichbar. Bei den Ergebnissen der Zugversuche zeigen sich deutlichere Unterschiede zwischen Kennwerten. Der Fließbeginn liegt ca. 40 % ober-

halb derer des Blechmaterials, wohingegen der maximal erreichbare Umformgrad 40 % unter dem konventionellem Material liegt. Die erreichbaren maximalen Fließspannungen wiederum unterscheiden sich um lediglich 10 %, was auf die unterschiedlichen Verfestigungsverhalten zurückzuführen ist. Der Verfestigungsexponent des Additivmaterials ist in etwa ein Drittel geringer als der des Blechmaterials. Beim Vergleich der Anisotropie weist das additiv gefertigte Material ein ähnliches Verhalten wie der Blechwerkstoff bei einer Belastung senkrecht zur Walzrichtung auf. Bei beiden wird eine Längung des Materials eher durch eine Reduktion der Breite als durch eine Reduktion der Dicke kompensiert. Für die Verwendung als flächiges Bauteil eignet sich das additiv gefertigte Material hinsichtlich des höheren Fließbeginns besser als das Blechmaterial. Für eine Verwendung als Halbzeug einer Umformoperation besitzt das Blechmaterial aufgrund der niedrigeren Fließgrenze und des höheren Umformvermögens die besser geeigneten Eigenschaften. Hinzu kommen die Unebenheiten die bei Umformungen von additiv gefertigten Halbzeugen auftreten und damit eine Nachbearbeitung erfordern, um funktionalen und optischen Anforderungen zu genügen. Hybridbauteile, die Komponenten beider Herstellungsverfahren kombinieren, verfügen über lokal unterschiedliche Eigenschaften, was sich auch auf deren Umformverhalten auswirkt. Der Einfluss der Temperatur auf die unterschiedlich hergestellten Halbzeuge wird im nächsten Abschnitt untersucht.

### 6.1.2 Ermittlung der Kennwerte bei erhöhten Temperaturen

Analog zum einachsigen Zugversuch bei Raumtemperatur werden die Kennwerte für Blechwerkstoff und Additivmaterial bei erhöhten Temperaturen ermittelt. Auf diese Weise soll der Temperatureinfluss auf die unterschiedlich hergestellten Werkstoffe analysiert werden. Trotz der verschiedenen Verfahren resultieren zwar beide Werkstoffe in einem austenitischen Gefüge, weisen jedoch unterschiedliche Kornstrukturen auf. Die Versuche werden mit einer Gleeble 3500 der Firma Dynamic Systems Inc. wie in Abschnitt 4.4.3 durchgeführt. Die entstehenden Dehnungen werden optisch mit dem System Aramis der Firma Carl Zeiss GOM Metrology GmbH gemessen und mit den Anlagendaten gekoppelt. Die Berechnung der Kennwerte erfolgt mit den Gleichungen aus dem vorhergehenden Abschnitt. Im Sinne der Übersicht werden für die Darstellung des Temperatureinflusses nur die Kennwerte für den Blechwerkstoff parallel zur Walzrichtung in Abbildung 29 dargestellt. Weil mit dem Temperatureinfluss ein Verlust an Festigkeit zu erwarten ist, ist besonders die Belastung parallel

zur Walzrichtung relevant, da hier die geringste Festigkeit des Werkstoffs liegt.

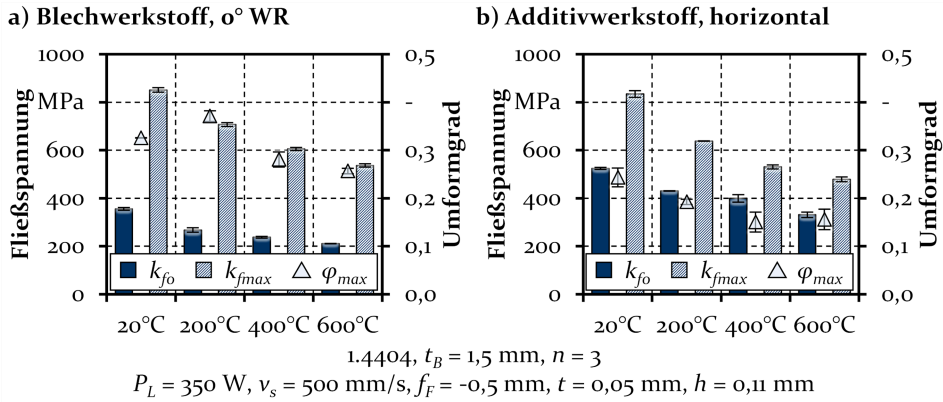


Abbildung 29: Mechanische Kennwerte von 1.4404 a) Blechwerkstoff und b) Additivwerkstoff für untersuchte Temperaturen

Der Fließbeginn  $k_{fo}$  des Blechwerkstoffs nimmt bei der Erwärmung auf 200 °C bereits um ca. 25 % von  $356 \pm 6 \text{ MPa}$  auf  $268 \pm 9 \text{ MPa}$  ab. Mit zunehmender Temperatur verkleinert sich das Ausmaß dieses Effektes. Bei 400 °C liegt der Fließbeginn bei  $237 \pm 4 \text{ MPa}$  und bei 600 °C bei  $211 \pm 1 \text{ MPa}$ , was einer Reduktion um 33 % bzw. 41 % im Vergleich zur Fließspannungen bei Raumtemperatur entspricht. Für den additiv gefertigten Werkstoff zeigt sich ebenfalls eine thermisch bedingte Verringerung der Anfangsfließspannung. Bei 200 °C liegt diese bei  $430 \pm 1 \text{ MPa}$ , bei 400 °C bei  $399 \pm 16 \text{ MPa}$  und bei 600 °C bei  $331 \pm 11 \text{ MPa}$ . Das entspricht einer Reduktion im Vergleich zur Anfangsfließspannung von 18 % (200 °C), 24 % (400 °C) und 37 % (600 °C). Insgesamt ist der Temperatureinfluss beim additiv gefertigten Material weniger stark ausgeprägt als beim Blechwerkstoff. Die Reduktion der Fließspannung lässt sich durch die Aktivierung zusätzlicher Gleichsysteme begründen, die eine Erwärmung des Materials mit sich bringt [32]. Die Beweglichkeit von Versetzungsbewegungen steigt mit der Temperatur [213] und es wird weniger Kraft benötigt, um den Werkstoff plastisch zu verformen [6]. Der geringere Einfluss der Temperatur auf die Anfangsfließspannung des Additivwerkstoffs ist auf die grundsätzlich höhere Behinderung von Versetzungsbewegungen zurückzuführen. Ein Grund dafür stellt die hohe Anzahl an Korngrenzen bedingt durch das feinkörnige Gefüge dar. Zusätzlich bleibt innerhalb des untersuchten Temperaturbereichs die Anfangsfließspannung des additiv gefertigten Werkstoffs oberhalb der des Blechwerkstoffs. Folglich wäre, wie auch bei Raumtemperatur, das additiv gefertigte Material für einen Einsatz bei

erhöhten Temperaturen besser geeignet, da höhere Lasten ertragen werden könnten, bevor die plastische Verformung eintritt. Bezogen auf die umformtechnische Verarbeitung der beiden Werkstoffe bedeutet eine Umformtemperatur von 200 °C aufgrund der verringerten Anfangsfließspannung bereits eine reduzierte Umformkraft. Eine weitere Steigerung der Umformtemperatur erscheint aufgrund des verringerten Effekts weniger sinnvoll. Vor allem in Bezug auf den Additivwerkstoff zeigt sich für eine Temperatur von 400 °C im Vergleich zu 200 °C lediglich eine Reduktion der Fließspannung von 6 %. Verstärkt wird diese Einschätzung durch die Entwicklung der erreichbaren Umformgrade über die Temperatur. Die für den Blechwerkstoff erreichbaren Umformgrade bei 200 °C liegen oberhalb derer bei Raumtemperatur. Höhere Temperaturen bewirken das Gegenteil und resultieren in maximalen Umformgrade unterhalb der 0,33 bei Raumtemperatur. Die für den Additivwerkstoff erreichbaren maximalen Umformgrade werden bei 200 °C und 400 °C geringer und erreichen dann bei 600 °C ein Plateau. Wie bei Raumtemperatur liegen die maximalen Umformgrade des Blechwerkstoffs für alle anderen untersuchten Temperaturen oberhalb der Kennwerte des Additivwerkstoffs. Eine Abnahme der Duktilität mit steigender Temperatur bei dem austenitischen Edelstahl 1.4404 ist auch in [214] beschrieben. Die maximale Fließspannung  $k_{fmax}$  nimmt für beide Werkstoffe mit ansteigender Temperatur ab. Der Effekt wird ungeachtet des Herstellungsverfahrens ebenfalls mit der Temperatur geringer. Somit ist die größte Reduktion bei einer Temperatur von 200 °C vorhanden und resultiert in den maximalen Fließspannungen  $707 \pm 8$  MPa (Blechwerkstoff) und  $638 \pm 1$  MPa (Additivwerkstoff). Auch hier gibt es Untersuchungen, die einen vergleichbaren Effekt aufzeigen [215]. In Bezug auf einen Umformprozess bei erhöhten Temperaturen bedeutet das, dass die instabile Verformung des Werkstoffs bereits ab einer geringeren Spannung eintritt. In Kombination mit den geringeren erreichbaren Umformgraden und den höheren Fließspannungen kann dem Additivwerkstoff eine reduzierte Eignung für eine Umformung bei erhöhten Temperaturen zugeschrieben werden.

In Abwägung der zuvor genannten Effekte stellt für den Werkstoff 1.4404 eine Temperatur von 200 °C eine Alternative für Umformprozesse dar, deren Werkzeugbelastung oder Kraftbedarf bei Raumtemperatur zu hoch sind. Höhere Temperaturen reduzieren zwar die Anfangsfließspannung noch weiter, jedoch ist der Effekt geringer und muss gegenüber dem dafür notwendigen Energiebedarf abgewogen werden. Außerdem sind bei Temperaturen über 200 °C die erreichbaren Umformgrade geringer als bei 200 °C oder Raumtemperatur. Da die Reduktion der Anfangsfließspannung mit steigender Temperatur beim Additivwerkstoff geringer ist als beim

Blechwerkstoff, nimmt der Unterschied zwischen den beiden Komponenten zu. Für Hybridbauteile wäre die Folge, dass die Umformung verstärkt im alleinstehenden Blechgrundkörper stattfindet. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit die Kaltumformung der Hybridbauteile untersucht. Somit erfolgt auch die numerische Modellierung des Werkstoffverhaltens für eine Umformoperation bei Raumtemperatur.

### 6.1.3 Kennwertermittlung für die numerische Werkstoffmodellierung

Damit das Werkstoffverhalten in der numerischen Prozesssimulation realitätsnah abgebildet wird, werden die Fließkurven aus den einachsigen Zugversuchen genutzt, um den Fließbeginn und das Verfestigungsverhalten abzubilden. Weiterhin bedarf es zusätzlicher Charakterisierungsversuche zur Berechnung der Fließortkurve und der Beschreibung der Versagensgrenzen des Materials. Der Schichtstauchversuch wird genutzt, um einerseits den Fließbeginn unter biaxialer Zugspannung und außerdem die senkrechte Anisotropie unter der gleichen Belastung zu bestimmen. Mithilfe des mechanischen Tiefungsversuchs nach Nakajima wird die Grenzformänderungskurve ermittelt, die die Basis für die Versagensvorhersage bildet. Der hydraulische Tiefungsversuch (HTV) erweitert die Grenzformänderungskurve um den Punkt im biaxialen Zugspannungsbereich und wird darüber hinaus zur Extrapolation der Fließkurve herangezogen.

#### Schichtstauchversuch

Auf Basis der Kraft-Weg-Daten und der Daten des Dehnungsmesssystems werden der Fließbeginn unter biaxialer Zugbelastung und der dazugehörige Anisotropiekoeffizient berechnet. Die Ergebnisse sowie exemplarische Proben vor und nach der Prüfung sind in Abbildung 30 aufgeführt.

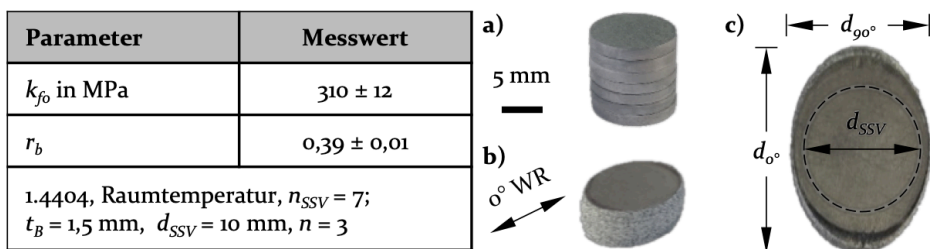


Abbildung 30: Im Schichtstauchversuch ermittelte Kennwerte für den untersuchten Werkstoff 1.4404; a) Probenstapel vor der Umformung, b) Probenstapel nach der Umformung und c) zur Kennwertberechnung gemessene Probendurchmesser

Mit  $310 \pm 12$  MPa liegt der Fließbeginn unter biaxialer Zugbelastung für den untersuchten Werkstoff 1.4404 ca. 13 % unter dem für eine uniaxiale Zugbelastung. Daher führt eine geringere Spannung bereits zu einer plastischen Verformung des Materials. Im Hinblick auf den Einsatz des Werkstoffs bedeutet das eine frühere bleibende Verformung, was meist mit einem Versagen des Bauteils gleichgestellt wird. Aus umformtechnischer Sicht wiederum steht eine geringere Fließgrenze für weniger Kraft, die benötigt wird. Der Kennwert  $r_b$  von  $0,39 \pm 0,01$  zeigt die ausgeprägte Anisotropie unter biaxialer Zugbelastung auf. Bei einem Wert von 1 würde das Material sich gleichmäßig in  $0^\circ$  und  $90^\circ$  zur Walzrichtung dehnen [34]. Für Werte kleiner 1 wird die anliegende Spannung stärker durch eine Dehnung in  $0^\circ$ -Walzrichtung kompensiert, wie es auch an dem Probenstapel nach der Umformung in Abbildung 30 b) zu sehen ist. Durch die höhere Fließspannung in  $90^\circ$ -Walzrichtung ist der Widerstand gegen die plastische Verformung in dieser Richtung größer und die resultierende Dehnung folglich kleiner. Für eine realitätsnahe Abbildung des Materialverhaltens in der Simulation fließt dieser Einfluss in die Materialmodellierung der Fließortkurve ein.

### Mechanischer Tiefungsversuch

Der mechanische Tiefungsversuch erfolgt, wie in Abschnitt 4.4.2 beschrieben, nach ISO 12004-1 [169]. Die kritischen Umformgrade werden auf Basis der Daten des Dehnungsmesssystems ermittelt und sind in Abbildung 31 für die untersuchten Varianten aufgelistet. Zusätzlich sind Aufnahmen der Proben vor der Umformung in Abbildung 31 dargestellt.

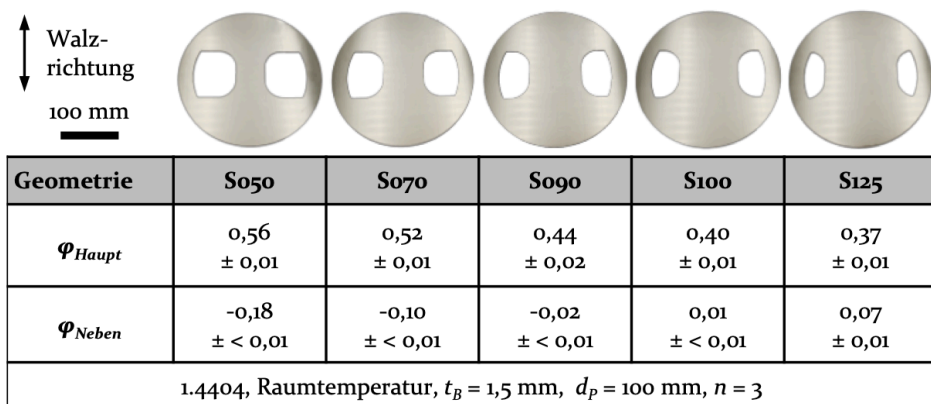


Abbildung 31: Haupt- und Nebenumformgrade des untersuchten Werkstoffs 1.4404 im mechanischen Tiefungsversuch

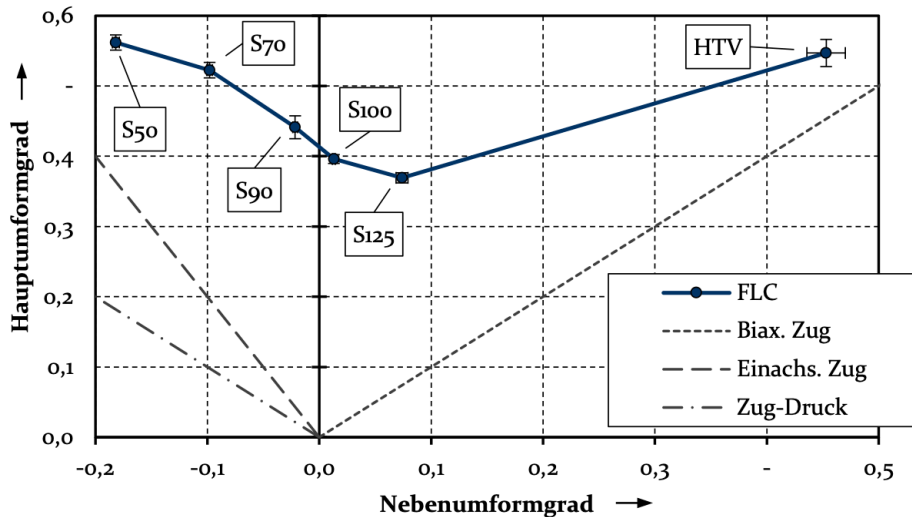
Der höchste erreichbare Hauptumformgrad findet sich für die Probengeometrie S050. Die aus der Zugspannung in Hauptumformrichtung entstehenden Dehnungen ( $\varphi_1$ ) werden aufgrund der Volumenkonstanz [6] und des in Gleichung (1) beschriebenen Zusammenhangs durch Längenänderungen in Nebenumform- ( $\varphi_2$ ) und Blechdickenrichtung ( $\varphi_3$ ) kompensiert. Für die Probengeometrie S050 liegen Zugspannungen in Hauptumformrichtung und Druckspannungen in Nebenumformrichtung vor. Daraus folgt, dass die Dehnung in Belastungsrichtung nicht nur durch die Reduktion der Blechdicke, sondern auch durch eine Stauchung in Breitenrichtung kompensiert wird. Mit größer werdender Stegbreite verkleinert sich dieser Effekt, was an den kleiner werdenden Nebenumformgraden zu erkennen ist. Besonders kritisch ist der Bereich für Nebenumformgrade nahe 0. Hier wird die Dehnung in Belastungsrichtung nur durch die Reduktion der Blechdicke kompensiert, was in einem früheren Einschnüren und Versagen der Probe resultiert. Daher sind die erreichbaren Hauptumformgrade mit steigender Stegbreite (S050  $\rightarrow$  S125) reduziert und erreichen das Minimum von  $0,369 \pm 0,007$ . Diese Spannungskonstellation ist im Hinblick auf das Materialversagen am kritischsten einzustufen.

Wird in einem Diagramm der Hauptumformgrad über den Nebenumformgrad aufgetragen, so ergibt die Verbindung dieser Punkte die Grenzformänderungskurve (FLC aus dem Englischen forming limit curve) des Blechwerkstoffs. Diese Kurve wird genutzt, um innerhalb der FE-Simulation vorherzusagen, welche Bereiche in Abhängigkeit der Umformgrade kritisch sind oder gar versagen würden. Dabei werden der Haupt- und Nebenumformgrad der jeweiligen Elemente bestimmt und in dem Diagramm aufgetragen. Befinden sich die Umformgrade der Elemente des Bauteils unterhalb der Kurve, gilt die plastische Verformung als unkritisch. Werden höhere Umformgrade erreicht und die Punkte der Elemente überschreiten die FLC, so resultieren diese in Abhängigkeit der Kurve in einem Einschnüren oder bereits in einem Versagen durch Rissbildung. Auf diese Weise lassen sich Versagensgrenzen in einem Bereich von Zug-Druck-Spannungen bis zu biaxialen Zugspannungen bestimmen. Die Grenzformänderung unter biaxialer Zugbelastung wird über den hydraulischen Tiefungsversuch ermittelt.

### **Hydraulischer Tiefungsversuch**

Der hydraulische Tiefungsversuch wird unter den in Kapitel 4.4.2 genannten Randbedingungen durchgeführt. Die Berechnung der erreichbaren Haupt- und Nebenumformgrade erfolgt anhand der ermittelten Dehnungen auf der Probenoberseite. Diese werden zusammen mit den Werten aus Abbildung 31 in Abbildung 32 aufgetragen. Zusätzlich erfolgt die Berech-

nung der Fließkurve unter biaxialer Zugspannung analog zu [168], welche später zur Extrapolation der Fließkurve unter Zugbelastung genutzt wird.



	$d_M$ in mm	$r_M$ in mm	$d_S$ in mm	$r_S$ in mm	Prüfung
HTV	200	10	-	-	0,004 s <sup>-1</sup>
Nakajima	110	10	100	50	90 mm/min
1.4404, Raumtemperatur, $t_B = 1,5$ mm, $n = 3$					

Abbildung 32: Grenzformänderungskurve (FLC) aus den im mechanischen (Nakajima) und hydraulischen Tiefungsversuch (HTV) ermittelten Umformgrade für den Stahl 1.4404

Innerhalb des HTV erreichen die Proben eine Kombination aus  $\varphi_1 = 0,547 \pm 0,019$  und  $\varphi_2 = 0,453 \pm 0,017$ . In Bezug auf die FLC liegt dieser Punkt im Bereich der biaxialen Zugspannung, welcher besonders für das Streckziehen von Relevanz ist. Verglichen den mit den restlichen Punkten deutet das auf ein hohes Grenzformänderungsvermögen unter diese Spannungs-konstellation hin. Damit ergibt sich in Kombination mit den Ergebnissen der mechanischen Tiefungsversuche eine Grenzformänderungskurve für Nebenumformgrade von -0,182 bis 0,453. Innerhalb dieses Bereichs können Ergebnisse der simulativen Berechnung dahingehend unterteilt werden, ob die entstandenen Umformgrade unkritisch sind oder sich eine Einschnürung bildet.

## 6.2 Numerische Werkstoffmodellierung in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens

Der Werkstoffmodellierung wird mit der stetig ansteigenden Rechenleistung immer mehr Bedeutung zugeschrieben [42]. Im Bereich der Blechumformung werden hauptsächlich elastisch-plastische Modellierungsansätze genutzt, um elastische Effekte wie beispielsweise die Rückfederung der Bauteile simulieren zu können. [7]. Diese erfordern Materialeigenschaften zur Beschreibung des Verfestigungsverhaltens, der Anisotropie und des Versagens [42]. Die Verfestigung lässt sich über Fließkurven [33] und der Fließbeginn und die Anisotropie über Fließortkurven [34] in die numerische Werkstoffmodellierung übertragen. Eine Möglichkeit die Versagensgrenzen des Werkstoffs abzubilden stellt die FLC dar [34].

### Fließortkurve

Um den Fließbeginn in Abhängigkeit des anliegenden Spannungszustandes mathematisch zu beschreiben, wird eine Fließortkurve genutzt. Bedingt durch den Herstellungsprozess des Walzens und die daraus resultierende Längung der Körner verfügen Bleche meist über anisotrope mechanische Eigenschaften [34]. Damit geht eine Richtungsabhängigkeit des Fließbeginns einher, die aufgrund der Volumenkonstanz in einer zweidimensionalen Fließortkurve abgebildet werden kann [6].

Beim additiven Aufbau von Bauteilen entsteht durch den schichtweisen Aufbau und die gerichtet Abkühlung ebenfalls eine Anisotropie [9]. Ähnlich wie beim gewalzten Blech sind die Körner gelängt, jedoch in Aufbau-Richtung. [216] Wegen der geringen Anwendung von additiv gefertigten Bauteilen in Umformsimulationen existieren aktuell keine Modellierungsansätze zur Beschreibung des richtungsabhängigen Fließbeginns für Additivbauteile. Um das Materialverhalten dennoch realitätsnah abzubilden, werden die Ergebnisse der Zugversuche genutzt, um den Fließbeginn und die Verfestigung zu beschreiben, weil das additiv gefertigte Funktionselement während der Umformoperation hauptsächlich mit Zugspannungen belastet wird. Durch zusätzliche Stützstellen wird das Materialverhalten präziser abgebildet, jedoch steigt auch der Aufwand zur Ermittlung der dafür benötigten Kennwerte [42].

Für die Modellierung der Fließortkurve des Blechwerkstoffs werden die Fließbeginne aus den Zugversuchen in drei Walzrichtungen ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$  zur Walzrichtung), dem Schichtstauchversuch sowie die dazugehörigen Anisotropiekennwerte nach dem Ansatz von Barlat et al. [38] kombiniert. Die Modellierung der Fließortkurve des additiv gefertigten Materi-

als erfolgt aufgrund der fehlenden mathematischen Ansätze anhand einer Fließspannung. Wegen der zu erwartenden Zugbelastung, der die Funktionselemente im Tiefziehprozess unterliegen, wird die im einachsigen Zugversuch ermittelte Fließspannung gewählt. Diese gilt, unabhängig von der Belastungsrichtung, als Grenzwert, ab dem plastisches Fließen eintritt. Die auf diese Weise erarbeiteten Fließortkurven beider Materialien sind in Abbildung 33 dargestellt.

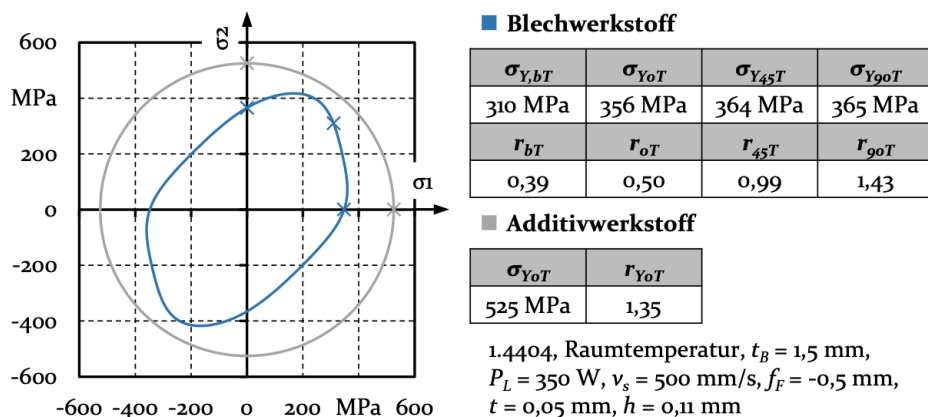


Abbildung 33: Modellierte Fließortkurven des additiv gefertigten und des Blechwerkstoffs für die numerische Simulation

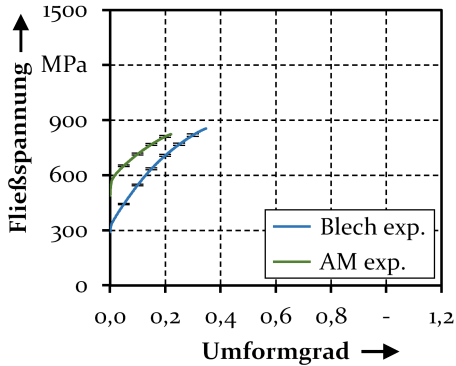
Wegen der höheren Festigkeit des additiv gefertigten Materials ergibt sich ein späterer Fließbeginn, ungeachtet des anliegenden Spannungszustandes. Die Fließortkurve des Additivmaterials liegt in allen Quadranten außerhalb der des Blechwerkstoffs. Aufgrund der fehlenden Modellierungsansätze und der daraus resultierenden mathematischen Beschreibung anhand eines Kennwertes, weist die Fließortkurve des additiv gefertigten Materials eine Rotationssymmetrie auf. Abgeleitet von der Fließortkurve des Blechmaterials ist zu sehen, dass die Anisotropie durch den Modellierungsansatz abgebildet wird. Im Einzelnen unterscheiden sich die Fließbeginne in Abhängigkeit der Belastungsrichtung. Innerhalb der Fließortkurven wird das jeweilige Material lediglich elastisch verformt. Mit dem Überschreiten setzt die plastische Formänderung ein. Damit geht auch die Verfestigung des Materials einher, dessen Verhalten durch die Fließkurven abgebildet wird.

### Fließkurve

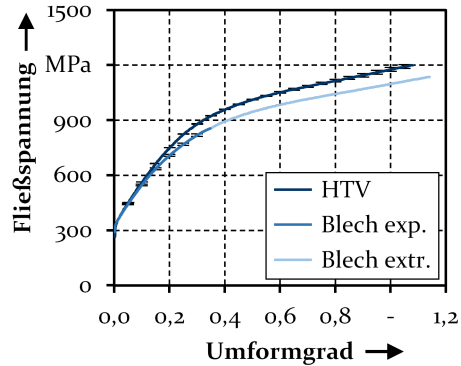
Die Fließkurven dienen zur Beschreibung des Materialverhalten ab dem Beginn der plastischen Verformung. Deren Berechnung und Extrapolation ist in Abschnitt 4.4.2 beschrieben. In Abbildung 34 a) sind die experimen-

tell ermittelten Fließkurven für Blech- und Additivwerkstoff bei Raumtemperatur aufgetragen. Für den Blechwerkstoff wird die Extrapolation mithilfe der Fließkurve aus dem hydraulischen Tiefungsversuch genutzt (Abbildung 34 b). Weil dies für den Additivwerkstoff nicht möglich ist, werden gängige Extrapolationsansätze hinsichtlich der höchsten Übereinstimmung (geringstes Fehlerquadrat) untersucht – Abbildung 34 c).

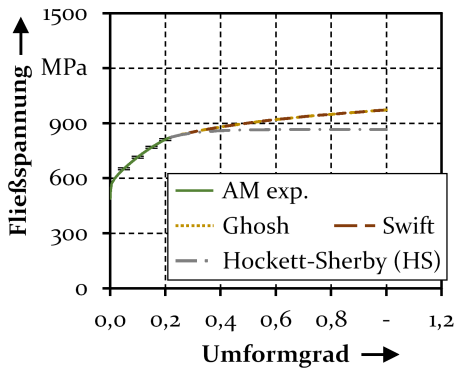
a) Zugversuch Blech und AM



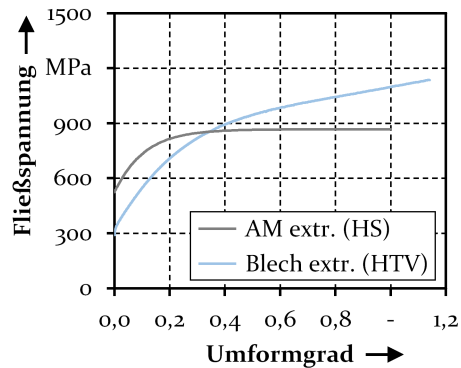
b) Blech: Zugversuch und HTV



c) AM: Extrapolation Fließkurve



d) Extr. Fließkurve Blech und AM



1.4404, Raumtemperatur,  $t_B = 1,5 \text{ mm}$ ,  $n = 3$

Abbildung 34: a) Experimentell ermittelte Fließkurven, b) Fließkurven zur Extrapolation nach DIN EN ISO 16808 [168], c) experimentell ermittelte Fließkurve des Additivwerkstoffs mit Extrapolationsansätzen nach Ghosh [48], Swift [46] und Hockett-Sherby [47], d) Extrapolierte Fließkurven für die numerische Prozesssimulation

Der Vergleich der im Zugversuch ermittelten Fließkurven (Abbildung 34 a) zeigt erneut die in Abschnitt 6.1.1 erarbeiteten Unterschiede auf. Dazu zählen der frühere Fließbeginn, die ausgeprägtere Verfestigung und die höheren erreichbaren Umformgrade des Blechwerkstoffs im Vergleich zum Additivwerkstoff. Abgeleitet aus Abbildung 34 b) wird ersichtlich, dass

im Zugversuch geringere Umformgrade erreicht werden als im HTV. Dennoch weisen beide Fließkurven einen ähnlichen Verlauf auf. Zuerst verfestigt das Material stärker und geht dann in einen Bereich geringerer Verfestigung über. Mithilfe des Ansatzes in [168] wird eine Vergleichsfließkurve berechnet, anhand derer die des Zugversuches extrapoliert werden kann. Auf diese Weise lässt sich die Fließkurve auf Basis von Materialdaten für Bereiche bis  $\varphi = 1$  und darüber hinaus extrapolieren. Für den Additivwerkstoff erfolgt die Approximation und Extrapolation anhand gängiger Ansätze, wobei in Abbildung 34 c) nur die Ansätze dargestellt sind, die die geringsten Abweichungen zur experimentell ermittelten Fließkurve ergeben. Dabei erzielt eine Extrapolation mit dem Ansatz von Hockett und Sherby [47] die geringste Abweichung und bildet den Verlauf am besten ab. Die in der Simulation genutzten Fließkurven werden in Abbildung 34 d) abgebildet. Der Vergleich der in der Simulation verwendeten Fließkurven stellt den Unterschied der Werkstoffe deutlich heraus. Die geringere Verfestigung des additiv verarbeiteten Materials führt dazu, dass trotz des höheren Fließbeginns die Fließspannung des Blechwerkstoffs ab einem Umformgrad von ca. 0,35 die der Additivproben übersteigt. Diese Besonderheit kommt bei der Umformung zum Tragen, da die Hybridbauteile aus einer stoffschlüssigen Verbindung der beiden Komponenten bestehen. Aufgebrachte Lasten werden von den einzelnen Bestandteilen unterschiedlich kompensiert. Die Verformung und die damit einhergehende Verfestigung erfolgt nur bis zu materialspezifischen Grenzen. Oberhalb dieser Grenzen tritt Versagen auf, dessen Modellierung innerhalb der Simulation wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

### Versagensgrenzen

Innerhalb der numerischen Simulation wird zwischen der direkten und der indirekten Methode zur Versagensbeschreibung unterschieden [42]. Bei der direkten Methode werden Elemente, die eine materialspezifische kritische Dehnung oder Spannung überschreiten gelöscht und das Versagen direkt modelliert [42]. Wegen der geringen Präzision der Abbildung ohne konkrete Kenntnisse der kritischen Kennwerte [42], wird das Grenzformänderungsschaubild nach Keeler [217] verwendet. Das Versagen wird somit indirekt modelliert, in dem die Elemente anhand ihrer Lage relativ zur Grenzformänderungskurve in die Bereiche „stabil“, „kritisch“ und „rissgefährdet“ eingeteilt [42], aber nicht gelöscht werden. Zur Unterscheidung wird die in Abschnitt 6.1.3 ermittelte FLC auf Basis des HTV und der Nakajima-Versuche verwendet. Eine exemplarische Einteilung der Elemente ist in Abbildung 35 dargestellt. Die in Abbildung 35 gezeigte FLC beschreibt die Versagensgrenzen des Blechwerkstoffs innerhalb der nume-

rischen Simulation. Jeder Punkt im Diagramm stellt ein Element der Blechkomponente des Hybridbauteils und die dazugehörigen Umformgrade dar.

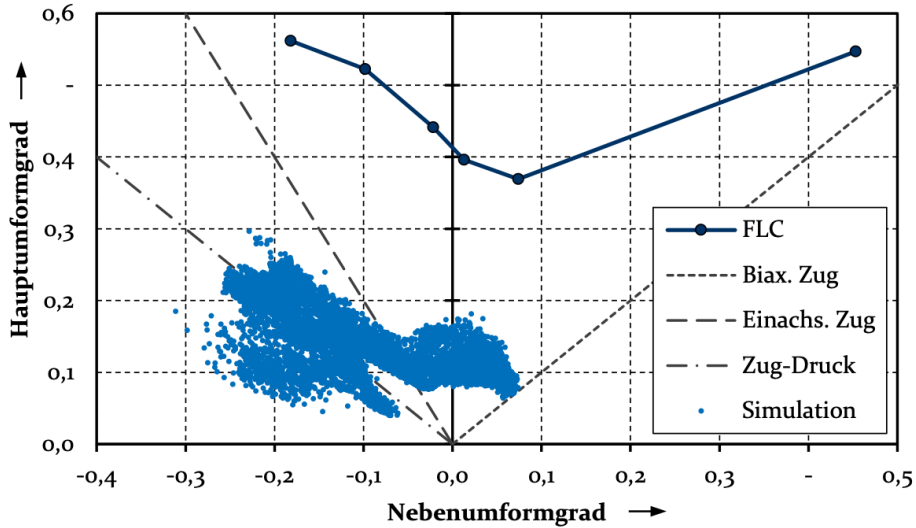


Abbildung 35: Beispielhaftes FLC-Diagramm für die numerische Abbildung eines Blechumformprozesses

Die Elemente unterhalb der FLC sind als stabil einzuordnen. Mit dem Überschreiten der Linie liegen die Elemente in einem kritischen Bereich, wobei sich mit zunehmendem Abstand zur FLC die Risswahrscheinlichkeit steigert. Der kritischste Bereich findet sich für Nebenumformgrade  $\varphi_2 \approx 0$ . Hier wird aufgrund der Volumenkonstanz eine Dehnung in Hauptumformrichtung nur durch die Reduktion der Blechdicke ( $\varphi_3$ ) kompensiert. Weniger kritisch dagegen sind die Bereiche der biaxialen Zugspannung ( $\varphi_1 = \varphi_2$ ) und des Tiefziehens ( $\varphi_1 = -\varphi_2$ ).

Auf eine Modellierung des Versagens des Additivwerkstoffs wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, weil das Versagen bei Hybridbauteilen in der Regel im Blechwerkstoff auftritt. Beispiele hierfür finden sich für Zugprüfung [147], Scherprüfung [139], Biegen [143] und Streckziehen [150]. Diese Tatsache ist auf den Wärmeeinfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Blechs [134], geometrische Steifigkeitsunterschiede [149] und Gradienten mechanischer Eigenschaften zwischen den Komponenten zurückzuführen [151]. Ein zusammenfassender Vergleich der mechanischen Eigenschaften der Hybridbauteilkomponenten Blech- und Additivwerkstoff erfolgt daher im nächsten Abschnitt.

## 6.3 Vergleich der mechanischen Eigenschaften von konventionell und additiv gefertigtem Material

Die Unterschiede zwischen Blech- und Additivwerkstoff begründen sich auf die Herstellungsverfahren und damit einhergehenden Mikrostrukturen. Während die Bleche durch den Walzvorgang bei erhöhten Temperaturen ein feinkörniges Gefüge erhalten, wird dies im Additivprozess durch die hohen Abkühlraten bewirkt. Beide Werkstoffe weisen anisotrope Eigenschaften auf. Einerseits erzeugt das Walzen eine Längung der Körner, andererseits wird beim Aufbau und der dabei zyklisch eingebrachten Wärme des Additivprozesses ein Temperaturgradient in Aufbaurichtung erzeugt, entlang dessen sich Dendriten bilden. Obwohl beide Werkstoffe ein austenitisches Gefüge aufweisen, führen die unterschiedlichen Kornstrukturen zu abweichenden mechanischen Eigenschaften. Eine Übersicht der erarbeiteten Erkenntnisse ist in Abbildung 36 dargestellt.

Unter Zugbelastung weisen Blech- und Additivwerkstoff deutliche Unterschiede auf. Beispielsweise liegt die Fließspannung des additiv gefertigten Werkstoffs circa 40 % höher als die des Blechwerkstoffs. Vor dem Hintergrund des gleichartigen Gefüges stellen sich die in den Additivproben vorhandenen Eigenspannungen und die geringere Korngröße als Ursachen heraus. Aufgrund der geringeren Kaltverfestigung und Duktilität weist der Additivwerkstoff eine maximale Fließspannung auf, die mit der des Blechs parallel zur Walzrichtung vergleichbar ist und liegt damit unterhalb derer des Blechs senkrecht zur Walzrichtung. Bezüglich der Anisotropie variieren die  $r$ -Werte des Blechs mit der Walzrichtung zwischen 0,5 ( $0^\circ$  Walzrichtung) und 1,4 ( $90^\circ$  Walzrichtung). Der  $r$ -Wert des additiv gefertigten Gegenstücks beträgt ungefähr 1,35 und deutet dementsprechend bei einer Zugbelastung auf eine Kompensation hin, die mehr durch eine Reduktion der Breite als durch die Materialstärke erfolgt. Vergleichbar mit der Längung der Körner im Blechmaterial durch die Walzoperation existieren im Additivmaterial richtungsabhängige Dendriten. Die Ausrichtung der Dendriten bewirkt das richtungsabhängige Verhalten des Additivmaterials. Bei Zugbelastungen senkrecht zur Ausrichtung der Dendriten wird der Materialfluss aus der Breite durch eine Stauchung der Dendriten begünstigt. Werden das konventionell und additiv hergestellte Material hingegen mit Druckspannung belastet, unterscheiden sich die resultierenden Materialkennwerte weniger deutlich als unter Zugbelastung. Der Fließbeginn des Additivwerkstoffs liegt etwa 20 % unter dem des konventionellen Stangenmaterials. Mit beiden Werkstoffen lässt sich eine Stauchung von 50 % realisieren, ohne dass ein Materialversagen auftritt. Als maximale Fließ-

spannung ergeben sich für die beiden Materialien vergleichbare Werte von 1100 MPa (konventionell) und 1150 MPa (additiv).

		Konventionell	Additiv gefertigt		
<b>Zugbelastung</b>					
	Fließbeginn	●	+		
	Verfestigung	+	-		
	Anisotropie	0° - 45° ● 90° +	+		
	Max. Fließspannung	+	+		
	Max. Umformgrad	+	-		
<b>Druckbelastung</b>					
	Fließbeginn	+	●		
	Verfestigung	●	●		
	Max. Fließspannung	●	+		
	Max. Umformgrad	●	●		
<b>Temperatureinfluss</b>					
	Festigkeit	▼	▼▼		
	Duktilität	▼	▼		
<b>Oberflächenqualität</b>					
	Vor Umformung	+	- -		
	Nach Umformung	+	-		
<b>Möglichkeiten zur Werkstoffmodellierung</b>		+	-		
▼▼					
<b>Nutzung des Materials</b>					
	Halbzeug Kaltumformung	+	●		
	Halbzeug Warmumformung	●	▼		
	Bauteil - Raumtemperatur	●	+		
	Bauteil - erh. Temperaturen	+	●		
		+	●	-	▼

Abbildung 36: Vergleich der Eigenschaften konventionell und additiv gefertigten Materials hinsichtlich ausgewählter Kriterien

Findet die Umformung bei erhöhten Temperaturen statt, so nimmt für beide Materialien die Anfangsfließspannung ab. Der Effekt ist für das additiv gefertigte Material innerhalb des untersuchten Temperaturbereichs von 20 °C - 600 °C größer und bewirkt somit eine höhere Reduktion. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die zusätzliche Energie der Temperaturerhö-

hung in einem Abbau der Eigenspannungen und damit in einer Reduktion der Festigkeit einhergeht. Zeitgleich werden die erreichbaren Umformgrade mit ansteigender Temperatur geringer, wobei sich bei 200 °C für das konventionelle Material eine Steigerung im Vergleich zur Raumtemperatur zeigt. Bei dem additiv gefertigten Werkstoff wird bei 400 °C ein Plateau erreicht und die Duktilität nimmt bei 600 ° nicht weiter ab.

Nach der Umformung finden sich bei den additiv hergestellten Proben deutliche Unebenheiten, die auf die dendritische Struktur und deren Abgleiten während der Umformung zurückzuführen sind. Somit besitzen Additivbauteile nicht nur im wie-gebaut-Zustand, sondern auch nach der Umformung eine unebene beziehungsweise raue Oberfläche. Nach der Herstellung ist diese durch angesinterte Pulverpartikel bedingt, die während der Herstellung der Charakterisierungsproben jedoch spanend entfernt wurden. Die konventionellen Gegenstücke besitzen sowohl vor als auch nach der Umformung eine glatte Oberfläche.

Eine weitere Herausforderung des Additivmaterials ist die fehlende Möglichkeit zur Abbildung des Materialverhaltens innerhalb einer numerischen Simulation. Wegen des vergleichsweise jungen Bestehens der Nutzung additiv hergestellter Halbzeuge in der Umformtechnik existieren zum aktuellen Zeitpunkt nur eingeschränkte Möglichkeiten zur Modellierung des Werkstoffs. Zwar lassen sich konventionelle Ansätze nutzen, diese bilden jedoch nicht die Anisotropie oder Unterschiede zwischen Zug und Druckbelastung additiv hergestellter Werkstoffe ab.

Folglich ist die Eignung konventioneller Werkstoffe für die Umformtechnik aktuell noch höher. Der untersuchte Edelstahl 1.4404 eignet sich aufgrund der erreichbaren Umformgrade und der Kaltverfestigung vor allem für die Kaltumformung. Trotz der Einschränkungen bieten additiv hergestellte Bauteile oder Komponenten Vorteile, die es wert sind, die damit einhergehenden Herausforderungen anzugehen. Neben der Flexibilität und Geometriefreiheit, die die additive Fertigung auszeichnen, besitzen die Bauteile meist eine erhöhte Festigkeit, die ebenfalls vorteilhaft sein kann. Bei der Kombination der Werkstoffe, wie es bei Hybridbauteilen der Fall ist, sind diese Unterschiede entscheidend für das Verhalten im Umformprozess und in einer Anwendung. Daher werden die Wechselwirkungen zwischen den Prozessen im nachfolgenden Abschnitt untersucht, um das volle Potenzial von Hybridbauteilen nutzen zu können.



## **7 Erarbeitung der Einflussmechanismen bei der Herstellung von Hybridbauteilen durch einen kombinierten experimentellen und numerischen Ansatz**

Mit den steigenden Forderungen nach Individualisierung und Flexibilität geraten konventionelle Fertigungsverfahren wie die Umformtechnik an ihre Grenzen. Hybridbauteile, bestehend aus Blechgrundkörpern und personalisierbaren Funktionselementen, ermöglichen es, diese Grenzen zu überwinden und die Flexibilität von massenfertigungstauglichen Verfahren der Blechumformung zu steigern. Damit das Potential dieser Kombination vollends ausgeschöpft wird, ist es notwendig, die Mechanismen bei der Umformung von Hybridbauteilen ganzheitlich zu verstehen. In diesem Zug werden im Folgenden gängige Blechumformverfahren hinsichtlich ihrer Spannungszustände und Eignung für die Verwendung von Hybridbauteilen untersucht. Anschließend erfolgt die Analyse der Wirkmechanismen bei der Umformung von Hybridbauteilen mit einem angepassten Werkzeugaufbau auf Basis einer numerisch-experimentellen Vorgehensweise. Die erarbeiteten Erkenntnisse werden dann auf gängige Blechumformverfahren angewendet, um Rückschlüsse auf die Herstellung von Hybridbauteilen durch die Blechumformung treffen zu können.

### **7.1 Spannungszustände in der Blechumformung**

Um die Zusammenhänge der Umformung von Hybridbauteilen zu untersuchen, dient das Prozessverständnis bezüglich gängiger Blechumformverfahren als Grundlage. Anhand des anliegenden Spannungszustandes, der zur Formgebung des Halbzeugs genutzt wird, wird das breite Spektrum der Verfahren entsprechend der Einteilung in DIN 8582 [218] differenziert. Im Folgenden werden die Verfahren Tiefziehen (Zug-Druck-Spannung [219]), Streckziehen (Zugspannung [220]) und Biegen (Biegespannung [221]) vor dem Hintergrund der Umformung von Hybridbauteilen auf Basis der Spannungszustände verglichen und bewertet.

#### **Spannungszustände des Tiefziehens**

Beim Tiefziehen handelt es sich um eines der am meisten genutzten Verfahren der Blechumformung [7]. Charakteristisch sind dabei die entstehenden Zug-Druck-Spannungen, aufgrund derer das Tiefziehen der Grup-

pen der Zug-Druck-Umformverfahren [219] zugeordnet wird. Eine Reduktion der Blechdicke ist dabei nicht beabsichtigt [222]. Die Krafteinleitung erfolgt über den späteren Boden des Napfes, setzt sich in der Zarge fort und bewirkt einen Einzug des Flansches, der die Hauptumformzone des Prozesses darstellt [33]. Bei der Formgebung entstehen die in Abbildung 37 dargestellten Bereiche.



Abbildung 37: a) Blechrunde als Halbzeug für das Tiefziehen, b) tiefgezogener Napf, c) charakteristische Bereiche und Spannungszustände beim Tiefziehen nach [7]

Der Boden des Napfes (Bereich 1) bildet die Krafteinleitungszone [42]. Der Stempelkontakt führt zu Stauchbelastung [32] und gleichzeitig entsteht eine biaxiale Zugbelastung [33], deren Anteil an der Umformung minimal ist, solange die Niederhalterkraft nicht zu groß ist [222]. Im Bereich 2 wird das Blech mit einer doppelten Biegung um den Ziehstempelradius belastet [222]. Dabei entsteht eine radiale Zugbelastung mit linear ansteigender Biegespannung [33]. Die Zarge (Bereich 3) ist durch die radialen Zugspannungen und tangentialen Druckspannungen, die mit zunehmendem Radius ansteigen, gekennzeichnet [222]. Am Matrizenradius (Bereich 4) erfolgt eine zweite Biegebelastung des Materials [42]. Die doppelte Biegebelastung wird durch einen Zug-Druck-Spannungszustand überlagert [33]. Im Flansch (Bereich 5) liegt die Hauptumformzone [33]. Radiale Zugspannungen und tangentialen Druckspannungen sind das Resultat des kleiner werdenden Platinendurchmessers und bewirken eine Steigerung der Blechdicke [32]. Zusätzlich bewirkt der Niederhalter Druckspannungen in Normalenrichtung, die einer Faltenbildung entgegenwirken sollen [14].

Da eine sinnvolle Platzierung von additiv gefertigten Funktionselementen nur im Bereich ohne Werkzeugkontakt möglich ist, ergibt sich im Falle des Tiefziehens lediglich der Boden als nutzbarer Bereich. Material an dieser Stelle erfährt eine biaxiale Zugbelastung, die betragsmäßig jedoch unterhalb der restlichen Bereiche liegt. Eine Platzierung im Bereich der Zarge ist möglich [152], jedoch an die Werkzeuggeometrie gebunden. Folglich wird das Potential der additiven Fertigung zur flexiblen Herstellung von variierenden Funktionselementen verhindert. Zusätzlich zeigt sich aufgrund der Belastung ein erhöhtes Versagenspotential [111].

## Spannungszustände des Streckziehens

Anders als beim Tiefziehen ist eine Reduktion der Blechdicke und damit die Vergrößerung der Werkstückoberfläche ist beim Streckziehen beabsichtigt [33]. Die Formgebung wird durch Zugspannungen realisiert, die ein-, aber auch zweiachsig sein können [33]. Folglich wird das Streckziehen den Zugumformverfahren [220] zugeordnet. Als Folge der höheren hydrostatischen Spannung sind die erreichbaren Ziehtiefen geringer als beispielsweise beim Tiefziehen [6]. Die beim Prozess entstehenden Bereiche sind in Abbildung 38 dargestellt.



Abbildung 38: a) Blechrolle als Halbzeug für das Streckziehen, b) streckgezogener, halbkugelförmiger Napf, c) charakteristische Bereiche und dazugehörige Spannungszustände beim Streckziehen nach [7]

Je nach Werkzeuggeometrie liegen in der Umformzone (Bereich 1) einachsige oder biaxiale Zugspannungen vor [33]. Durch den dort vorliegenden Kontakt und die resultierende Reibung zwischen Stempel und Blech wird der Materialfluss gehindert und beschränkt sich dadurch vorwiegend auf den Bereich 2 ohne Kontakt [7]. Mit der Annäherung zum eingespannten Flansch geht der Spannungszustand in den Bereich der ebenen Dehnung über. In Abhängigkeit der Verfestigung des Werkstoffs erfolgt die plastische Verformung lokal nahe der Einspannung des Bereichs des Kontaktverlustes (geringe Verfestigung) oder global außerhalb des reibungsbehafteten Bereichs (hohe Verfestigung) [42]. Durch die Einspannung des Flansches existieren dort hohe Spannungen in Blechdickenrichtung.

Die Platzierung von Additivkomponenten beschränkt sich auf die Bereiche 1 und 2, wobei in Abhängigkeit der entstehenden Kippung und Höhe der Funktionselemente ein Kontakt zu Werkzeugflächen ausgeschlossen werden muss. Die Stempelgeometrie gibt den anliegenden Spannungszustand, in dem sich die Funktionselemente befinden, vor. In jedem Fall liegt dort eine Zugspannung an, die entweder einachsige oder biaxial ist. Anders als beim Boden des Tiefziehens ist hier mit größeren Spannungen zu rechnen.

## Spannungszustände des Biegens

Beim Biegen wird die plastische Formgebung nach DIN 8586 [221] durch eine Biegebeanspruchung realisiert. Die Beschreibung des Materialverhaltens und der Spannungszustände geht auf die elementare Biegetheorie nach Ludwik [223] zurück. Die Unterteilung der einzelnen Bereiche ist in Abbildung 39 c) dargestellt.

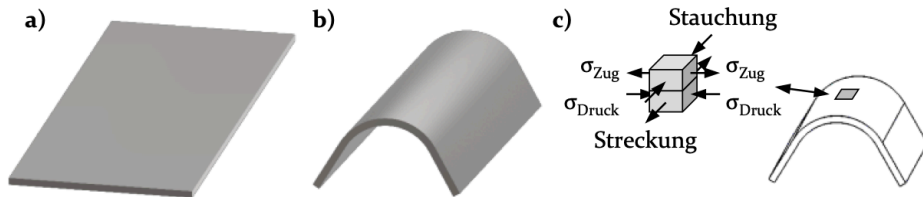


Abbildung 39: a) Platine als Halbzeug für den Biegeprozess, b) gebogenes Bauteil, c) charakteristische Bereiche und Spannungszustände beim Biegen nach [7]

In Abhängigkeit des Abstandes zum Biegestempel wird eine neutrale Faser definiert, die weder Zug- noch Druckspannung erlebt [29]. Diese befindet sich mittig im Bauteil, jedoch zum Biegestempel verschoben [7]. Mit größerem Abstand zum Biegestempel unterliegt das Material Zugspannungen und wird folglich in tangentialer Richtung gestreckt [33]. Das Material zwischen der neutralen Faser und dem Biegestempel wird durch Druckspannungen belastet und dementsprechend gestaucht [33]. Als Reaktion auf die anliegenden Spannungen wird die äußere Faser in Richtung der Biegeachse gestaucht und die innere Faser respektive gedehnt [29], was einen trapezförmigen Querschnitt bewirkt [7].

Unter der Prämisse, dass bei Hybridbauteilen ein Kontakt zwischen Werkzeugflächen und additiv gefertigten Funktionselementen vermieden werden sollte, bleibt für den Aufbau lediglich die zugbelastete Seite der Biegebauteile. Eine Platzierung der Funktionselemente in der druckbelasteten Bauteilseite ist nur durch eine maßgeschneiderte Anpassung des Biegestempels möglich, wie es in [148] der Fall ist. Je nach Seite der Platzierung erfährt die Additivkomponente eine Zugbelastung mit geringfügiger Stauchung entlang der Biegelinie oder eine Druckbelastung mit senkrecht dazu gelegener Dehnung. In beiden Fällen ist die Belastung entlang der Biegelinie im Vergleich zur eigentlichen Belastung vernachlässigbar gering. Weit- aus relevanter sind dagegen die Belastungen entlang der Blechdicke. Durch die Anwesenheit eines additiv gefertigten Funktionselementes weicht das Materialverhalten gegenüber dem eines konventionellen Bleches ab [148].

## Vergleich ausgewählter Blechumformverfahren hinsichtlich der charakteristischen Spannungszustände

Aufbauend auf den zuvor genannten Punkten ist eine Verwendung von Hybridbauteilen prinzipiell in allen drei Verfahren möglich. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass die nutzbaren Bereiche durch den Werkzeugkontakt eingeschränkt werden. Angepasste Lösungen ermöglichen sogar die Platzierung von Additivkomponenten im Bereich der Werkzeugkontaktflächen, schränken jedoch die Flexibilität ein. In Abbildung 40 sind die nutzbaren Bereiche ohne Werkzeuganpassungen farblich hervorgehoben und die darin anliegenden Spannungszustände zusammengefasst.

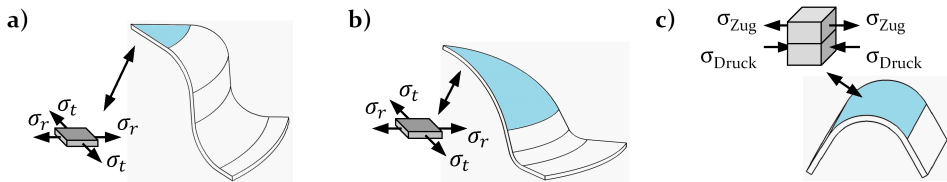


Abbildung 40: Zusammenfassung der für Additivkomponenten nutzbaren Flächen (farblich hervorgehoben) und dort anliegenden Spannungszustände für die Verfahren a) Tiefziehen, b) Streckziehen und c) Biegen

Wie in der Blechumformung üblich, finden sich in den unterschiedlichen Bereichen der Bauteile größtenteils Zugspannungen. Beim Tiefziehen lässt sich lediglich der Boden des Bauteils nutzen, wo jedoch vergleichsweise geringe biaxiale Zugspannungen anliegen. Beim Streckziehen ist ebenfalls der Boden der Bereich, der nutzbar und durch biaxiale Zugspannungen gekennzeichnet ist. Aufgrund gezielter Blechausdünnung werden wegen des fixierten Flansches geringere Umformgrade erreicht. Auch die nutzbare Fläche des Biegebauteils ist durch Zugspannungen belastet, weist aber zusätzlich eine Krümmung auf.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Werkzeugaufbau genutzt, der die Stempelgeometrie, wie sie typischerweise beim Streckziehen Anwendung findet, in einem Tiefziehprozess verwendet. Die Dimensionen der Werkzeugaktivteile sind in Abschnitt 4.6 bereits beschrieben. Neben dem Stempel werden ein Niederhalter und eine Matrize genutzt, um die Hybridbauteile umzuformen. Auf diese Weise ist es möglich, die additiv gefertigten Funktionselemente in einem Bereich von biaxialer Zugspannung bis hin zur ebenen Dehnung zu platzieren, siehe Abbildung 41. Gleichzeitig lässt sich in Abhängigkeit der Niederhalterkraft das Niveau der Spannungen und folglich auch der realisierbare Umformgrad variieren.

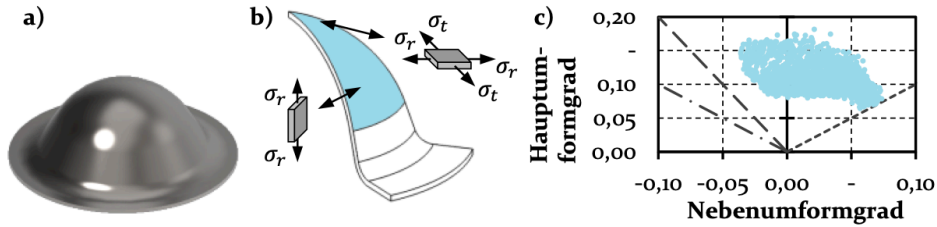


Abbildung 41: a) Tiefgezogenes Bauteil, b) Spannungszustände im Bauteil und farblich hervorgehobene, für Additivkomponenten nutzbare Fläche, c) Haupt- und Nebenumformgrad der Elemente in der nutzbaren Fläche aus der numerischen Simulation

Durch die halbkugelförmige Geometrie entsteht im Zentrum des Bauteils eine biaxiale Zugbelastung. Verglichen mit einem zylindrischen Stempel ist die Belastung größer. Zum Matrizenradius hin verschiebt sich der Spannungszustand in den Bereich der ebenen Dehnung. Mit größer werdendem Abstand zur Mitte liegt im Bereich des Flansches, wie für das Tiefziehen üblich, eine Zug-Druck-Belastung vor. Wegen der stark eingeschränkten Möglichkeit, Funktionselemente dort zu platzieren, wird jener Bereich im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht. Für die restlichen Zonen erfolgt die Analyse auf Basis eines Ansatzes, bestehend aus der Kombination von numerischer Simulation und experimenteller Vorgehensweise.

## 7.2 Untersuchung des Tiefziehprozesses von Hybridbauteilen mithilfe eines kombinierten numerisch experimentellen Ansatzes

Damit die Zusammenhänge bei der Umformung von Hybridbauteilen ganzheitlich untersucht werden können, werden die physikalischen Experimente um die numerische Prozesssimulation erweitert. Auf diese Weise ist es möglich, detaillierte Einblicke in den Prozess zu erlangen. Zuerst werden Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, die die Validierung des numerischen Modells, den Vergleich zwischen Blech- und Hybridbauteil im Tiefziehprozess sowie die daraus abgeleitete erste Forschungshypothese umfassen. Es wird geprüft, ob der Einfluss des Funktionselements auf das Materialverhalten während der Umformung auf dessen geometrische Eigenschaften zurückgeführt werden kann. Darauf aufbauend werden die Einflüsse hinsichtlich postulierter Hypothesen bezogen auf die Steifigkeit, Position und Anzahl der Funktionselemente untersucht. Zuletzt werden die erarbeiteten Erkenntnisse zusammengefasst.

## 7.2.1 Grundlagenuntersuchungen

### Validierung der numerischen Simulation

Das numerische Prozessabbild dient zur Unterstützung der Untersuchungen. Der Aufbau der FEM-Simulation ist in Abschnitt 4.7 beschrieben. Um die Gültigkeit der daraus abgeleiteten Aussagen zu gewährleisten, muss zuerst eine Validierung erfolgen. Ein analoger Aufbau der numerischen Simulation ist in [149] für Titanbauteile und in [224] für Edelstahlbauteile validiert. Im Rahmen dieser Arbeit wird im Vergleich zu [224] eine detailliertere Materialmodellierung genutzt. Um dessen Aussagekraft zu bestätigen, werden Kraft-Weg-Verläufe und Geometriedaten genutzt. Weil der Ansatz zur Beschreibung von Hybridbauteilen verwendet wird, wird neben einem Blech auch ein Hybridbauteil zum Vergleich herangezogen. Bei dem Hybridbauteil handelt es sich um eine Blechrunde, auf der ein Funktionselement ( $Num = 1$ ) mit Durchmesser  $D = 5$  mm und einem Übergangsradius von  $Rad = 0,5$  mm aufgebaut ist. In Abbildung 42 sind die Kraft-Weg-Verläufe der Tiefziehversuche für beide Bauteile abgebildet. Darin finden sich die Ergebnisse der physikalischen Experimente und des numerisch berechneten Gegenstücks. In beiden Fällen wird eine Niederhalterkraft  $F_{NH} = 25$  kN verwendet und die Bauteile werden bis zu einer Ziehtiefe  $s_Z = 30$  mm umgeformt.

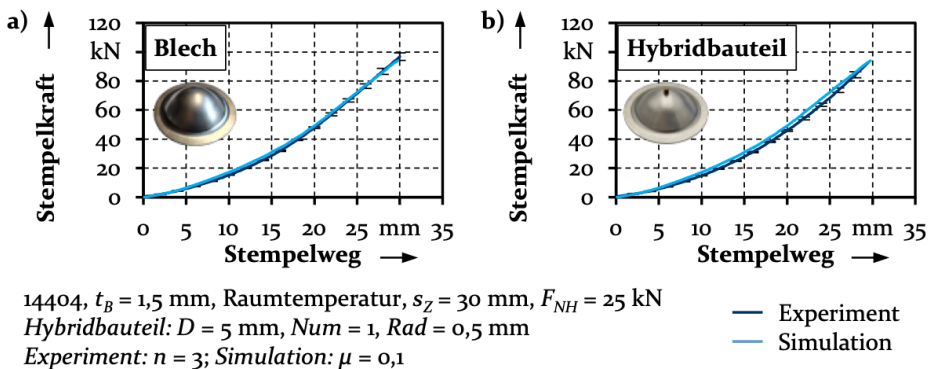


Abbildung 42: Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe aus numerischer Simulation und durchgeführten Experimenten für a) einfaches Blech und b) Hybridbauteil

Ein Vergleich der Verläufe für jedes Bauteil zeigt, dass der Unterschied zwischen Simulation und Experiment lediglich marginal ist. Die Verläufe weisen die gleiche Entwicklung auf und auch die erreichten Maxima unterscheiden sich nur geringfügig. Für das Blech ohne Funktionselement werden Kräfte von 94 kN (Simulation) und  $93 \pm 3$  kN (Experiment) erreicht. Der Unterschied ist damit geringer als 2 %. Am Beispiel des Hybridbauteils

liegt der Unterschied unter 4 %. Genauer liegt das Kraftmaximum der Simulation bei 96 kN und beim Experiment bei  $93 \pm 3$  kN. Auf Basis dieser Ergebnisse lässt sich bereits eine erste Aussage über die Gültigkeit und Genauigkeit der simulativen Abbildung treffen. Ein zweiter Vergleich erfolgt anhand der Geometrien tiefgezogener Bauteile. Erneut wird neben einem Blech als Halbzeug auch ein Hybridbauteil verwendet. Beide Bauteile werden bis zu einer Ziehtiefe von 30 mm gezogen und anschließend anhand von Schnitten entlang der Walzrichtung gegenübergestellt. Die abgeleiteten Schnitte aus Experiment und Simulation sind in Abbildung 43 dargestellt.

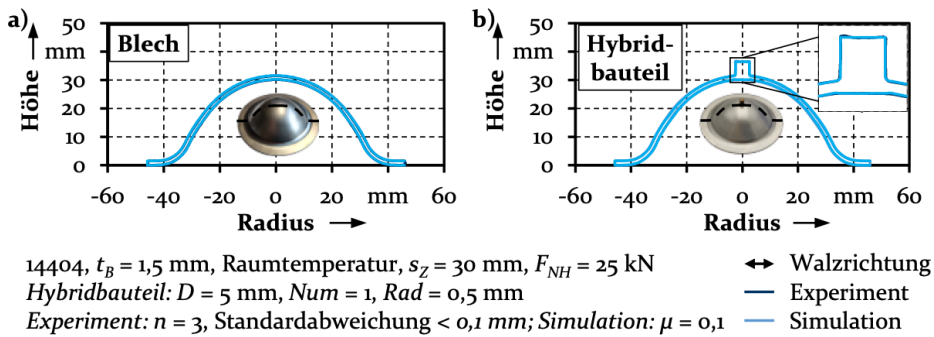


Abbildung 43: Vergleich der Geometrieschnitte entlang der Walzrichtung aus numerischer Simulation und durchgeführten Experimenten für a) einfaches Blech und b) Hybridbauteil

Auch hier zeigt sich die hohe Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation, sowohl für das einfache Blech als auch für das Hybridbauteil. Die berechneten Schnitte liegen innerhalb der gemessenen Oberflächen der experimentell hergestellten Bauteile. Hinsichtlich der Hybridbauteile werden die Besonderheiten auch in der Simulation abgebildet. Auf der gegenüberliegenden Blechseite der additiv gefertigten Funktionselemente findet sich nach der Umformung eine konvexe Auswölbung. Diese ist auch in den numerisch berechneten Geometrien zu sehen. Demzufolge bekräftigen die Geometriedaten die Abbildungsgenauigkeit der simulativen Prozessabbildung. Ein letzter Abgleich erfolgt anhand der Blechdickenverteilung entlang eines Schnittes für Blech- und Hybridbauteil. Diese ist entscheidend, weil anhand der Blechsausdünnung kritische Stellen identifiziert werden und eine Tendenz hinsichtlich des Versagens eines Bauteils getroffen werden kann. In Abbildung 44 ist der Abgleich für Bauteile parallel zur Walzrichtung dargestellt.

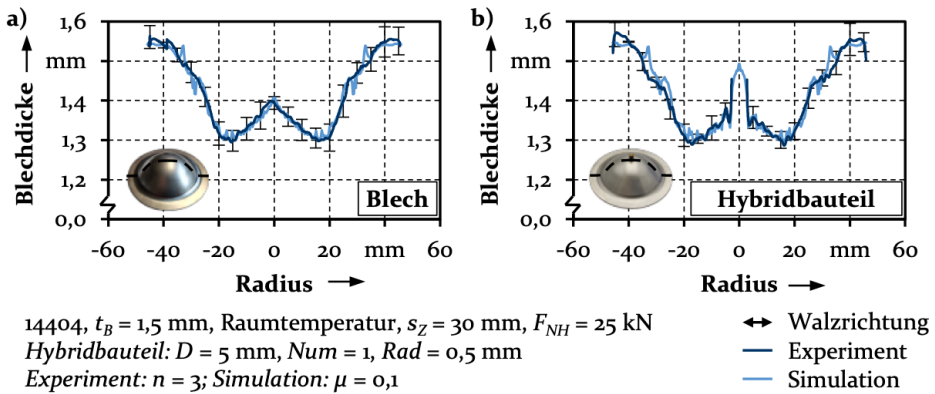


Abbildung 44: Vergleich der Blechdickenverteilung entlang der Walzrichtung aus numerischer Simulation und durchgeführten Experimenten für a) einfaches Blech und b) Hybridbauteil

Wie bei den Vergleichen zuvor ist auch bei der Gegenüberstellung der Blechdickenverläufe eine hohe Übereinstimmung zwischen numerischer Simulation und physikalischen Experimenten zu sehen. Das gilt einerseits für das konventionelle Blech, aber auch für das Hybridbauteil. In beiden Fällen sind die Stellen mit der niedrigsten Blechdicke im gleichen Abstand zum Mittelpunkt zu finden und sind auch vom Betrag her vergleichbar. Im Falle des Hybridbauteils wird zusätzlich die reduzierte Blechdicke im Übergangsbereich zwischen Blech und Funktionselement passend abgebildet.

Zusammenfassend ist davon auszugehen, dass die numerische Abbildung des Tiefziehprozesses mit Blechen und Hybridbauteilen über eine ausreichend hohe Gültigkeit und Genauigkeit verfügt, um die Untersuchungen zu unterstützen. Auf Basis der Simulationsergebnisse können somit tiefere Prozesseinsichten erlangt werden. Beispielsweise werden anhand von Spannungsverteilungen Bereiche hinsichtlich ihrer Belastung verglichen. Zusätzlich ermöglicht es die Simulation, dass Varianten ohne experimentelle Versuche getestet werden. Auf diese Weise können vorab bereits Eingrenzungen hinsichtlich der Varianten getroffen werden. Im folgenden Absatz werden die zuvor dargestellten Bauteile verglichen, um den Einfluss der Anwesenheit eines additiv gefertigten Funktionselementes auf den Tiefziehprozess zu analysieren.

## Einfluss der Anwesenheit eines Funktionselementes bei der Umformung im Vergleich zu Blechhalbzeugen

Damit der Einfluss variierender und mehrerer Funktionselemente auf das Materialverhalten des Hybridbauteils im Tiefziehprozess abgeleitet werden kann, ist es entscheidend, den grundsätzlichen Einfluss zu analysieren. Deshalb werden im Folgenden die Unterschiede bei der Umformung eines konventionellen Blechs und eines Hybridbauteils als Basis für die weitergehenden Untersuchungen erarbeitet. Der Vergleich zwischen Blech und Hybridbauteil erfolgt anhand von drei Bereichen. Zuerst werden die Kraft-Weg-Verläufe der beiden Bauteile gegenübergestellt, anschließend werden auftretende Spannungen verglichen. Zuletzt werden die resultierende Blechausdünnung und die entstandenen Dehnungen im Hinblick auf eine Versagenswahrscheinlichkeit zum Abgleich genutzt. Die Kraft-Weg-Verläufe der Experimente beider Bauteile sind in Abbildung 45 dargestellt.

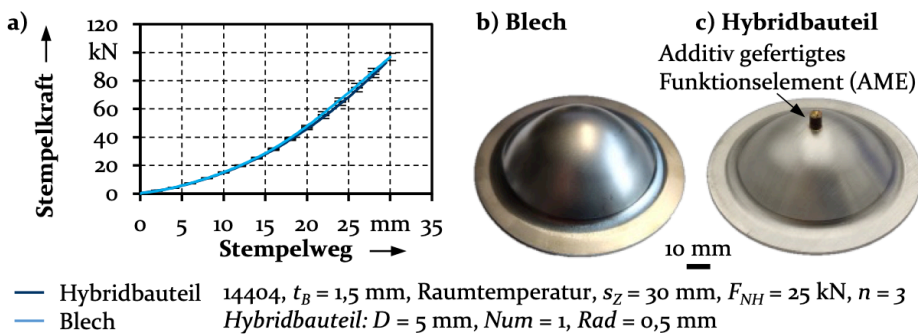


Abbildung 45: a) Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe von Blech und Hybridbauteil, beispielhaftes tiefgezogenes b) Blechbauteil und c) Hybridbauteil

Die Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Verläufe weist keine nennenswerten Unterschiede auf. Die Veränderung der Stempelkraft über die Ziehtiefe hinweg verhält sich für beide Bauteile analog. Mehr noch, sind die Werte der beiden Verläufe nahezu identisch. Folglich ist bezüglich der benötigten Umformkraft kein Einfluss des additiv gefertigten Funktionskörpers zu erkennen. Vergleichbare Erkenntnisse sind in früheren Untersuchungen des Autors für Titanbauteile zu finden [150]. Jedoch tritt im Rahmen von [150] ein verfrühtes Versagen bedingt durch das Funktionselement auf. Einerseits bilden sich Risse im Bereich des Kontaktverlustes zwischen Blech und Stempel, andererseits im Übergangsbereich zwischen Blech und Additivkomponente [150]. Weil die Rissbildung auf entstehende Spannungsspitzen zurückzuführen sind, werden die auftretenden Spannungen für die in dieser Arbeit untersuchten Bauteile innerhalb der Simulation

ermittelt und verglichen. Die Verteilung der Vergleichsspannung nach von Mises ist in Abbildung 46 zu sehen.

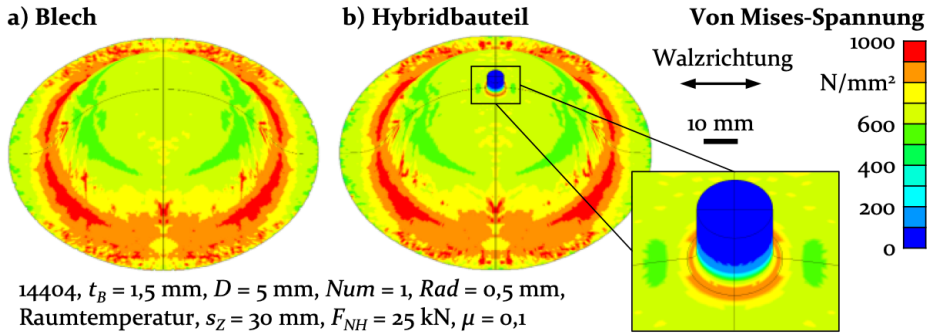


Abbildung 46: Spannungsverteilung aus der numerischen Simulation für a) Blechhalbzeug und b) Hybridbauteil im Tiefziehprozess

Aufgrund der halbkugelförmigen Stempelgeometrie ergeben sich charakteristische Spannungsbereiche. Im Flansch finden sich Zug-Druck-Spannungen, die am Radius der Matrize in eine Doppelbiegung übergehen. An dieser Stelle sind die größten Spannungen zu finden, ungeachtet des genutzten Halbzeugs. Zur Mitte des Bauteils hin geht der Spannungszustand in den Bereich der ebenen Dehnung und final in den biaxialen Zugbereich über. Durch die Platzierung des Funktionselementes in eben diesem letzten Bereich, unterliegt es der gleichen Belastung. Beim Vergleich des Blechs mit dem Hybridbauteil ist ein zusätzlicher Bereich mit erhöhten Spannungen zu erkennen. Dieser liegt am Rand des Übergangsradius zwischen Funktionselement und Blechgrundkörper. Wie in [151] beschrieben, entstehen dort Spannungskonzentrationen. Als Resultat der Spannungsspitzen wird die Materialstärke an den hoch beanspruchten Stellen stärker reduziert, was die Gefahr eines Versagens durch Rissbildung birgt. Daher wird in Abbildung 47 die Verteilung der Blechdicke beider Bauteile verglichen.

Das tiefgezogene Blech mit (Hybridbauteil) und ohne Funktionselement weisen die gleichen Tendenzen in der Blechdickenverteilung auf. Im Bereich des Flanschs wird das Material aufgedickt, am Matrizenradius nimmt die Blechdicke ab und wird zur Mitte des Bauteils geringer. Das Minimum findet sich für beide Varianten nicht im Zentrum, sondern bei einem Radius von ungefähr 15-20 mm. Zusätzlich sind die anisotropen Eigenschaften des Werkstoffs sichtbar. Senkrecht zur Walzrichtung ist die Blechaufdickung im Flansch größer und die restliche Blechausdünnung geringer als parallel zur Walzrichtung, in welcher Richtung sich auch die minimale Blechdicke findet. Bedingt durch die höhere Festigkeit senkrecht

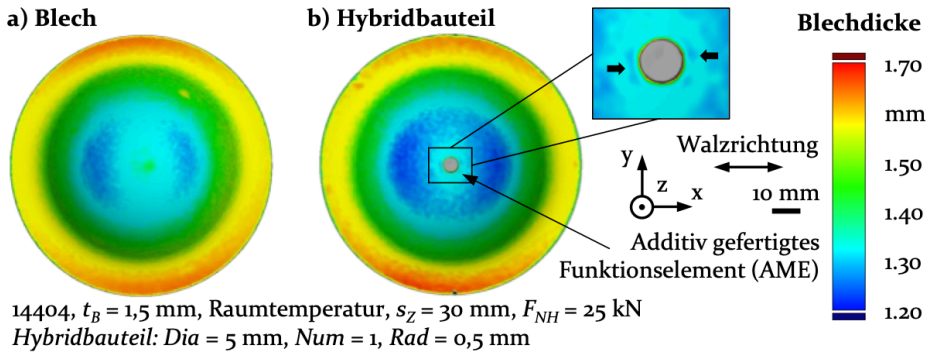


Abbildung 47: Vergleich der gemessenen Blechdickenverteilung von a) Blech und b) Hybridbauteil

zur Walzrichtung ist der Widerstand gegenüber einer plastischen Verformung größer. Die aufgebrauchte Stempelkraft und -bewegung senkrecht zur Walzrichtung werden zu einem größeren Anteil durch den Einzug des Flansches und weniger durch eine Reduktion der Dicke kompensiert. Daraus resultiert auch die höhere Blechaufdickung im Flanschbereich. Beim Vergleich zwischen Blech- und Hybridbauteil zeigt sich die niedrigere Blechdicke im Bereich der Bauteilmitte bis zu einem Radius von circa 25 mm. Die Anwesenheit des additiv gefertigten Funktionselements stellt eine Fließbehinderung dar und bewirkt folglich eine größere Blechdickenreduktion, die über den Übergangsbereich zwischen Funktionselement und Blech hinausgeht. Die verstärkte Blechausdünnung im Übergangsbereich, wie sie bereits in anderen Untersuchungen [151] beschrieben ist, tritt auch bei diesem Prozess auf. Eine Einschätzung darüber, wie kritisch die Blechdickenreduktion in Bezug auf ein Versagen durch Rissbildung ist, liefert die Analyse der Umformgrade in Bezug auf die Grenzformänderungskurve innerhalb der numerischen Simulation, siehe Abbildung 48.

Anhand der Abbildung 48 wird ersichtlich, dass der Einfluss des einzelnen Funktionselementes in diesem Bereich vorhanden, wenn auch nicht kritisch ist. Die Punkte im FLC-Diagramm sind für beide Bauteile bis auf zwei Bereiche ähnlich. Es treten Beanspruchungen vom Zug-Druck-Bereich (Flansch) bis hin zum biaxialen Zugbereich (Zentrum) auf. Für das Hybridbauteil findet sich jedoch einerseits ein Bereich nahe des Diagrammursprungs. Vereinzelt Elemente der numerischen Simulation, welche sich im Zentrum des Bauteils unterhalb des additiv gefertigten Elements befinden, werden mit geringen biaxialen Dehnungen beaufschlagt (Bereich 2). Durch das zusätzliche Material mit erhöhter Festigkeit wird das Blech unterhalb der Funktionselemente weniger stark belastet. Die auftretende

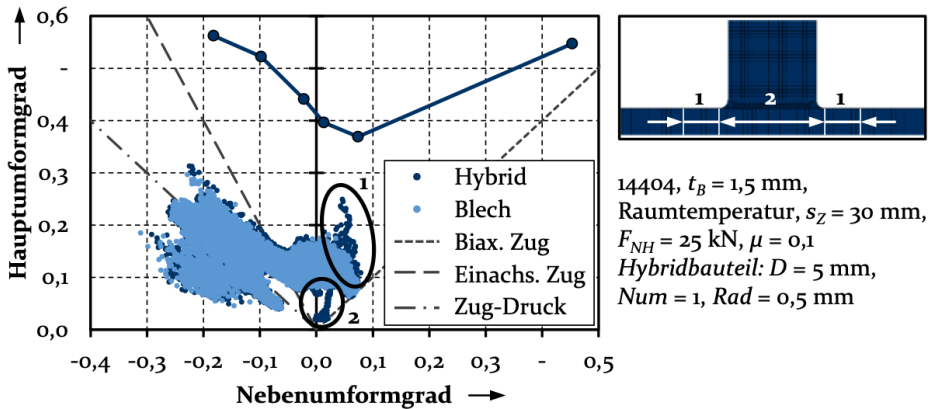


Abbildung 48: Maximale Umformgrade aus der numerischen Simulation eines Blechs ohne und mit Funktionselement (Hybrid)

Dehnung vergrößert sich mit ansteigendem Radius bis zu dem Bereich am Ende des Übergangsradius (Bereich 1). Anders als bei den Spannungsspitzen im Bereich des Matrizenradius kommt es hier zu einer gesteigerten Blechausdünnung, die nicht durch eine Druckbelastung und damit einhergehende Stauchung in Nebenspannungsrichtung abgeschwächt wird. Folglich ist die Versagenswahrscheinlichkeit an dieser Stelle erhöht. In vorhergehenden Untersuchungen [150] tritt bei Hybridbauteilen aus Titan das Versagen an diesen Stellen bereits bei geringeren Ziehtiefen auf als bei einfachen Titanronden. Der Einfluss des additiv gefertigten Elements ist damit eindeutig sichtbar, weshalb die zugrundeliegenden Effekte Bestandteil aktueller Forschungsarbeiten sind.

Die dem Einfluss der Funktionselemente auf das Materialverhalten zugrundeliegenden Faktoren lassen sich auf die Einzelprozesse und deren Wechselwirkungen zurückführen. Die Prozessabfolge zur Herstellung der Hybridbauteile umfasst den Additivprozess und das anschließende Umformen der mit Funktionselementen versehenen Bleche. Innerhalb der Literatur werden Einflüsse auf das Materialverhalten während des Umformprozesses anhand verschiedener Punkte untersucht. Während des Additivprozesses entstehen als Nebeneffekt thermischer bedingter Verzug [140] und Eigenspannungen [138]. Zusätzlich bietet die raue Oberfläche einen Ausgangspunkt für Rissentstehung [134]. In Abhängigkeit der genutzten Parameter entsteht in der Additivkomponente eine andere Mikrostruktur als im Blechgrundkörper [145], die sich unter anderem hinsichtlich Festigkeit und Duktilität davon unterscheidet [134]. Innerhalb der Umformoperation können die Prozessparameter angepasst werden [147], sowie die Werkzeug-

geometrien und die damit einhergehenden Spannungszustände im Bauteil [143]. In Abbildung 49 sind diese Einflussbereiche zusammengefasst.

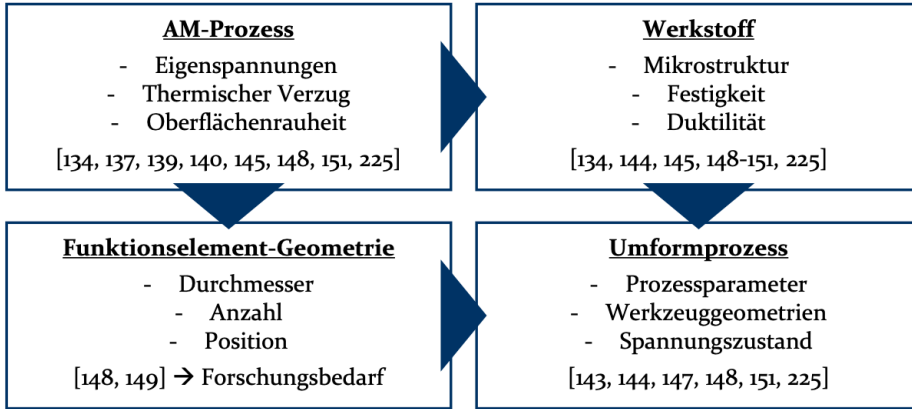


Abbildung 49: Übersicht identifizierter Einflussfaktoren bei der Umformung von Hybridbauteilen

Ein bisher kaum untersuchter Aspekt ist die Variation geometrischer Eigenschaften der Funktionselemente, die den Durchmesser, deren Anzahl und Position umfassen. Hierfür existieren vielversprechende Ergebnisse [149], die das Materialverhalten von Titanbauteilen numerisch abbilden. Zusätzlich deuten Untersuchungen hinsichtlich der Dimensionen eines einzelnen additiv gefertigten Funktionselements ebenfalls auf einen vorhandenen Einfluss hin [148], sind aber auf ein einzelnes Element beschränkt und vernachlässigen die Frage nach werkstofflichen Einflüssen. Um dies zu überprüfen, wird im folgenden Abschnitt der Anteil des geometrischen Einflusses von dem des werkstofflichen Einflusses differenziert.

Abgeleitet von dem Einfluss eines einzelnen Funktionselementes ist dessen Effekt deutlich erkennbar. Auf Basis von eigenen Untersuchungen sowie anderen Forschungsarbeiten sind bereits erste Einflüsse variiert geometrischer Eigenschaften belegt. Zu welchem Anteil diese Einflüsse auf die herstellungsbedingten, werkstofflichen mechanischen Eigenschaften oder auf die geometrischen Eigenschaften zurückgeführt werden können, ist bisher nicht untersucht. Daher wird in diesem Abschnitt die folgende Hypothese geprüft:

**Hypothese 1: „Der geometrisch bedingte Einfluss der Funktionselemente ist größer als der durch werkstofflich bedingte Unterschied mechanischer Eigenschaften.“**

Werden die beiden Komponenten Blech und Additivkörper eines Hybridbauteils hinsichtlich deren Umformverhalten verglichen, so ergeben sich werkstoffliche Unterschiede, unter anderem hinsichtlich der Mikrostruktur, und geometrische Unterschiede, wie beispielsweise Abmessungen und resultierende Steifigkeit. Um den Einfluss der geometrischen Aspekte zu quantifizieren, wird die numerische Prozesssimulation genutzt. Es werden zwei geometrisch identische Bauteile unter gleichen Prozessbedingungen simuliert. Einerseits werden unterschiedliche Fließkurven für Blech und Additivkomponente verwendet, andererseits besitzen beide Komponenten die gleichen Fließkurven. Der geometrisch bedingte Einfluss ist bei beiden Bauteilen gleich. Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Simulation lassen sich somit auf den Unterschied mechanischer Eigenschaften der beiden Komponenten zurückführen. Je höher dieser Unterschied ist, desto größer ist auch der werkstofflich bedingte Einfluss. Zum Vergleich werden die Grenzformänderungsdiagramme beider Simulationen genutzt, sowie die Blechdickenverteilung entlang der Walzrichtung, weil diese als kritischer hinsichtlich eines Versagens durch Rissbildung ist. In Abbildung 50 sind die besagten Diagramme aufgetragen.

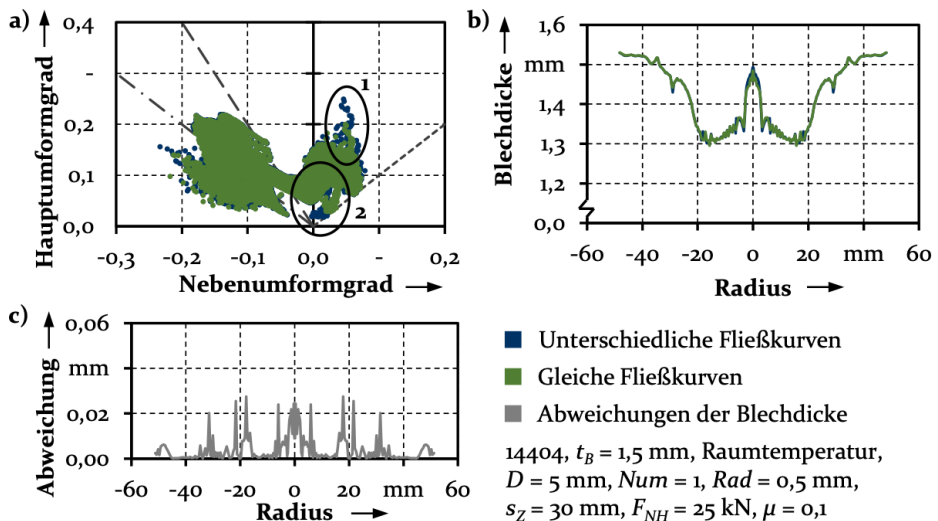


Abbildung 50: a) Maximale Umformgrade, b) Blechdickenverteilung entlang der Walzrichtung und c) Abweichungen für Simulationen mit gleichen und unterschiedlichen Fließkurven

Beim Vergleich der Grenzformänderungsdiagramme der beiden Bauteile (Abbildung 50 a) zeigen sich nur geringe Unterschiede. Werden die Fließkurven genutzt, wie sie im Realbauteil vorkommen, besitzt das additiv gefertigte Funktionselement eine höhere Festigkeit als der Blechwerkstoff. Dementsprechend ist der Widerstand gegen eine Umformung größer, was wiederum zu einer stärkeren Verformung des Blechs führt. Der Bereich des Blechs unterhalb des Funktionselements erfährt geringere Umformgrade ( $a_1$ ), wohingegen der Bereich neben dem Funktionselement stärker plastifiziert wird ( $a_2$ ). Die Folge sind unterschiedliche Blechstärken am Ende des Umformprozesses (Abbildung 50 b). Aus dem Diagramm in Abbildung 50 b) ist ersichtlich, dass die Unterschiede minimal sind, weshalb diese als absolute Differenz in Abbildung 50 c) separat aufgetragen sind. Die Abweichungen der Blechdicke liegen unterhalb von 0,04 mm, was bezogen auf die Ausgangsblechdicke von 1,5 mm etwa 3 % entspricht. Das bedeutet, dass der werkstofflich bedingte Unterschied mechanischer Eigenschaften lediglich in einem Unterschied von maximal 0,04 mm hinsichtlich der Blechdicke resultiert. Da beim vorherigen Vergleich zwischen Blech- und Hybridbauteil Unterschiede aufgezeigt wurden, die diese überschreiten, lässt sich dem werkstofflich bedingten Einfluss eine untergeordnete Rolle zuschreiben. Es ist zu erwarten, dass der Anteil vom Festigkeitsgradienten zwischen Blech- und Additivkomponente abhängt. So ist in Untersuchungen des Autors [150] am Beispiel von Hybridbauteilen aus Ti-6Al-4V ein größerer Einfluss beschrieben, der unter anderem auf den ebenfalls größeren Gradienten der mechanischen Eigenschaften zurückzuführen ist. Um auch diese vergleichsweise kleinen werkstofflichen Unterschiede zu beachten, wird die lokale Werkstoffmodellierung genutzt. Zusammenfassend lässt sich der Einfluss der geometrischen Eigenschaften der Funktionselemente als Haupteinflussfaktor identifizieren, was die Hypothese 1 bestätigt. Daher werden die geometrischen Parameter der additiv gefertigten Funktionselemente untersucht, die im nachfolgenden Abschnitt aufgezeigt sind.

### **7.2.2 Ganzheitliche Untersuchung der geometrischen Einflussfaktoren additiv gefertigter Funktionselemente auf das Materialverhalten von Hybridbauteilen im Tiefziehprozess**

Aufbauend auf den zuvor gezeigten Erkenntnissen und den Ergebnissen aus der Literatur ist ein deutlicher Einfluss der Funktionselemente zu sehen, der vor allem in den geometrischen Eigenschaften seinen Ursprung

hat. Um die Zusammenhänge ganzheitlich zu analysieren, werden die in Abbildung 51 gezeigten Faktoren und Faktorstufen untersucht.

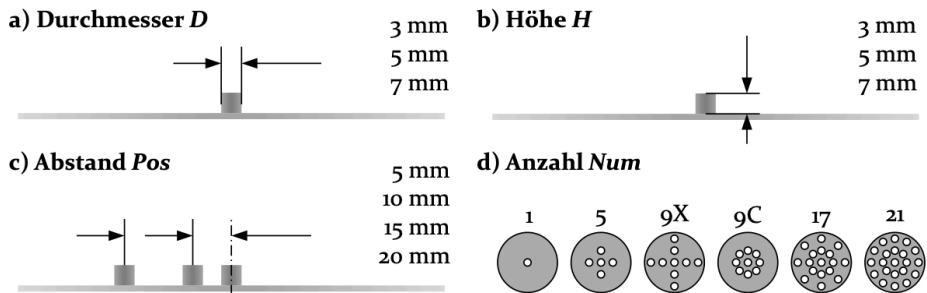


Abbildung 51: Übersicht über die untersuchten Parameter der additiv gefertigten Elemente

Der Durchmesser  $D$  und die Höhe  $H$  werden für drei Stufen untersucht. Bezüglich des Abstands zur Mitte wird die Position  $Pos$  in vier Stufen variiert. Um den Einfluss der Anzahl an Funktionselementen  $Num$  zu analysieren, werden die in Abbildung 51 d) gezeigten Varianten genutzt. Damit systematische Zusammenhänge erarbeitet werden können, wird die Untersuchung in drei Hypothesen gegliedert. Die Experimente und die numerische Simulation werden für eine konstante Ziehtiefe von 25 mm durchgeführt, weil auf Basis vorheriger Untersuchungen ein Materialversagen für alle Varianten ausgeschlossen werden kann. Somit ist ein stabiles Materialverhalten garantiert und die Ergebnisse sind vergleichbar. Es werden die nachfolgenden drei Hypothesen bezüglich der Funktionselemente geprüft:

- **Hypothese 2:** „Das Materialverhalten der Hybridbauteile wird durch die Steifigkeit der Funktionselemente beeinflusst, welche wiederum von den geometrischen Eigenschaften abhängt.“
- **Hypothese 3:** „Der spannungskonzentrierende Effekt der Funktionselemente hängt maßgeblich von deren Platzierung auf dem Bauteil und den dort vorhandenen Spannungen und Spannungszuständen ab.“
- **Hypothese 4:** „Wichtiger als die Anzahl der Funktionselemente ist deren Anordnung und Verteilung, wobei eine gleichmäßige Verteilung vorteilhaft ist.“

Zur Überprüfung dieser Hypothesen werden die Geometrie und die Größe der Funktionselemente, deren flächiger Anteil sowie der vorliegende Spannungszustand und der Abstand zur Umformzone untersucht. Darüber hinaus sollen die Wechselwirkungen zwischen den geometrischen Faktoren

Durchmesser, Anzahl, und Position untersucht werden. Im nachfolgenden Abschnitt wird der Einfluss der Steifigkeit überprüft.

### Hypothese 2: Steifigkeit der Funktionselemente

Im Folgenden soll geprüft werden, ob der Einfluss der Additivkomponente auf das Hybridbauteil im Umformprozess abhängig von dessen Steifigkeit ist. Mit zunehmender Versteifung konzentrieren sich während des Umformprozesses die Belastungen in der Blechkomponente, was wiederum zu einem verfrühten Versagen führen kann. Die Steifigkeit hängt von den geometrischen Eigenschaften, in diesem Fall der Höhe  $H$  und dem Durchmesser  $D$  des additiv gefertigten Elementes, ab. Die beiden Parameter werden, wie in Abbildung 52 dargestellt, in den drei Stufen 3 mm, 5 mm und 7 mm kombiniert.

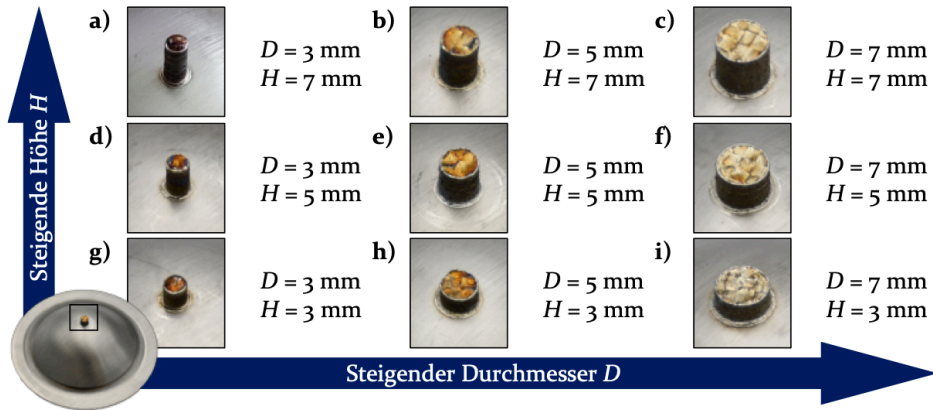


Abbildung 52: Untersuchte Varianten der Höhe und des Durchmessers des additiv gefertigten Funktionselements

Die Untersuchung des Einflusses erfolgt anhand der Blechdurchdünnung und der anliegenden Spannungen. In Abbildung 53 ist die Blechdickenreduktion eines Hybridbauteils in Abhängigkeit einer variierenden Höhe (a) und eines variierenden Durchmessers (b) für einen halben Schnitt entlang der Walzrichtung aufgetragen. Der Übersicht halber sind in Abbildung 53 a) nur die Graphen für  $D = 5$  mm und in Abbildung 53 b) nur die Graphen für  $H = 5$  mm dargestellt.

Abgeleitet aus Abbildung 53 a) ist für eine Variation der Höhe kein deutlicher Unterschied zu sehen. Für die übrigen Durchmesser ergibt sich ein ähnliches Verhalten. Analog zu den Erkenntnissen aus Biegeversuchen mit Hybridbauteilen [148] ist für Höhen oberhalb von 3 mm kein Einfluss durch eine Steigerung zu sehen. Im Gegensatz dazu, zeigt sich bei der

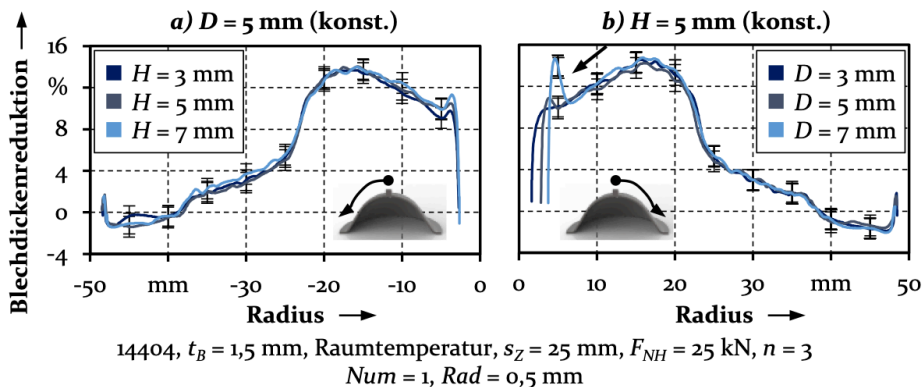


Abbildung 53: Gemessene Blechdickenreduktion der umgeformten Hybridbauteile mit einem Funktionselement für variierende a) Höhe und b) Durchmesser

Vergrößerung des Durchmessers ein deutlicher Effekt. Die Blechdickenreduktion unterhalb des Funktionselementes wird geringer, das Maximum am Übergangsradius wird in radialer Richtung verschoben und steigt. Für  $D = 7$  mm stellt die Ausdünnung an dieser Stelle sogar das globale Maximum dar. Da sowohl die Höhe als auch der Durchmesser in die Formel zur Berechnung des Widerstandsmoments gegen Biegung eingehen, ist davon auszugehen, dass die Biegebelastung aufgrund des vergleichsweise großen Radius nicht signifikant ist. Vielmehr wird der Effekt des Aufspanns [150], bedingt durch die höhere Steifigkeit, des Blechs unterhalb des Funktionselementes in Erwägung gezogen. Dieser führt zu einer höheren Blechdickenreduktion am Übergangsbereich [224], deren Ursache in einer gesteigerten Zugspannung liegt. Daher werden die Zugspannungen in radialer Richtung für die untersuchten Bauteilvarianten in Abbildung 54 dargestellt.

Unabhängig von den Abmessungen des additiv gefertigten Funktionselementes findet sich eine Spannungsspitze im Übergangsbereich zwischen Additivkomponente und Blechgrundkörper. Diese stellt die Ursache für die gesteigerten Blechdickenreduktionen dar. Die Höhe des Funktionselementes (Abbildung 54 a) zeigt, wie schon für die Blechdickenreduktion, keinen Einfluss. Analog dazu verschiebt sich mit zunehmendem Durchmesser der Additivkomponente (Abbildung 54 b) das Maximum der radialen Spannungen nach außen und dessen Betrag steigt. Anders als bei den Ergebnissen der Blechdickenreduktion zeigt sich beim Vergleich der Durchmesser 3 mm und 5 mm ein größerer Einfluss auf die vorhandenen Spannungen als beim Vergleich der Durchmesser 5 mm und 7 mm. Dennoch treten aufgrund der Spannungen die zuvor beschriebenen höheren Blechdickenreduktionen auf. Für eine Einschätzung der Kombination aus gesteigert-

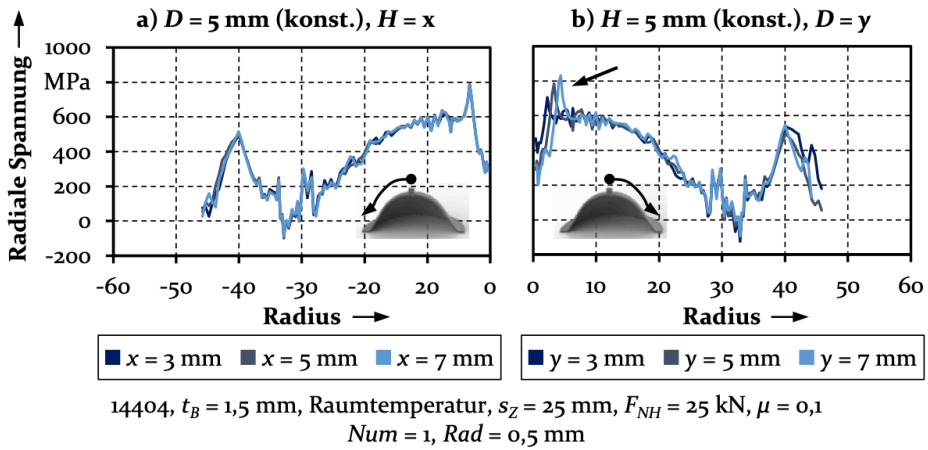


Abbildung 54: Spannungen in x-Richtung aus der numerischen Simulation eines Hybridbauteils mit einem Funktionselement mit variierender a) Höhe und b) Durchmesser

ter Spannung und reduzierter Blechdicke hinsichtlich der Belastung werden die Grenzformänderungsdiagramme der Bauteile in Abbildung 55 dargestellt.

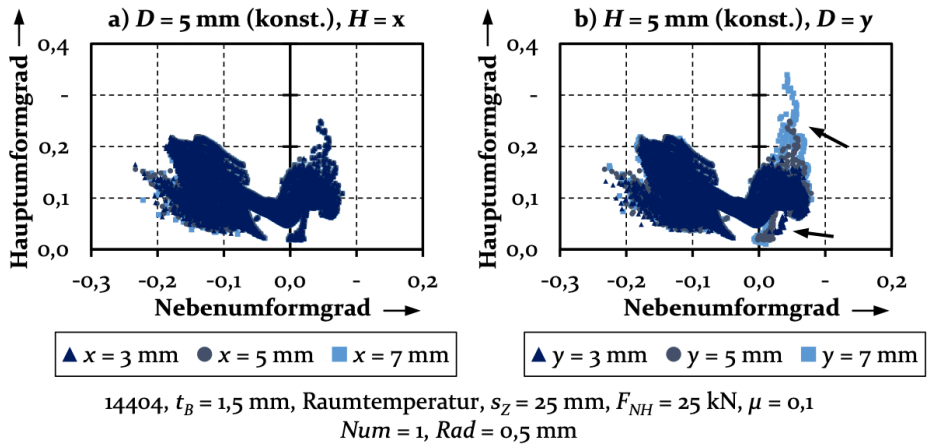


Abbildung 55: Maximale Umformgrade aus der numerischen Simulation eines Hybridbauteils mit einem Funktionselement für variierende a) Höhe und b) Durchmesser

Auch bei der Verteilung der Umformgrade zeigt sich kein Einfluss der Elementhöhe (Abbildung 55 a). Die Punkte der Elemente aus der numerischen Simulation liegen alle nahezu an den gleichen Positionen. Beim Elementdurchmesser (Abbildung 55 b) ist jedoch, wie bei den zuvor untersuchten Größen auch, zu sehen, dass der Materialfluss durch das

Funktionselement gehindert ist. Genauer lassen sich zwei Bereich innerhalb des Grenzformänderungsdiagramms identifizieren, an denen Unterschiede zu finden sind. Einerseits steigt der Anteil nahe des Ursprungs und verschiebt sich in Richtung des Bereichs ebener Dehnung mit größer werdendem Durchmesser. Ein größerer Durchmesser führt zu einer größeren Fläche unterhalb der Funktionselemente, die nicht oder nur eingeschränkt an der Umformung teilnimmt. Außerdem geht die Belastung mit zunehmendem Abstand zum Mittelpunkt von der biaxialen Zugbelastung zur ebenen Dehnung über. Diese Tendenz ist auch für den Bereich am Rand des Funktionselements zu sehen. Weitaus deutlicher ist aber der Anstieg der Hauptumformgrade für größer werdende Durchmesser. Die aus dem Aufspannen der Probe entstehenden Zugspannungen resultieren in erhöhten Belastungen, die innerhalb der untersuchten Varianten noch unkritisch sind. Dennoch ist die Entwicklung bei der Auslegung der Hybridbauteile zu beachten, vor allem dann, wenn mehrere Funktionselemente genutzt werden oder der Durchmesser noch weiter vergrößert werden würde. Da neben dem Blech auch die Additivkomponente im späteren Bauteil eine Funktion übernimmt, wird in Abbildung 56 die anliegende Belastung in Abhängigkeit von Elementhöhe und Elementdurchmesser aufgezeigt. Genauer werden die Spannungen entlang der Zylinderachse (z-Spannungen) und in radialer Richtung (x-Spannungen) vergleichend gegenübergestellt.

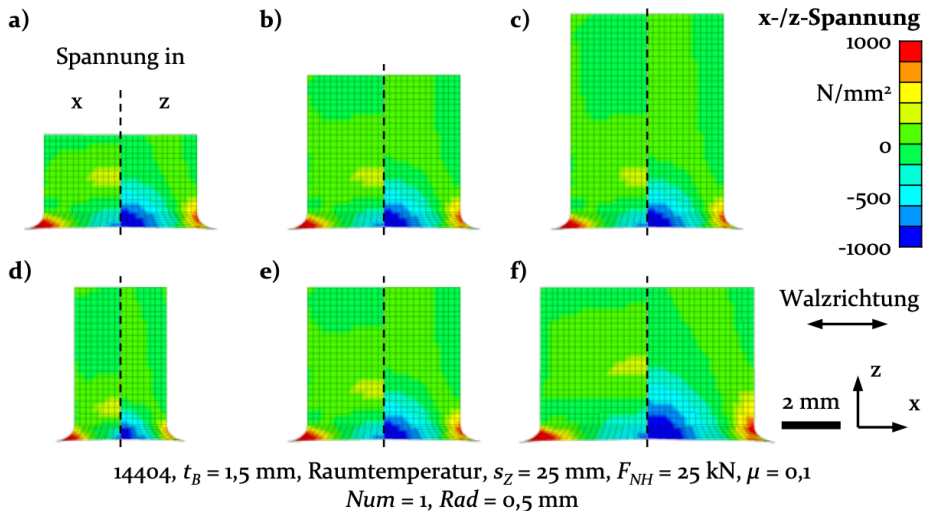


Abbildung 56: Spannungen in radialer und axialer Richtung aus der numerischen Simulation im Funktionselement für unterschiedliche Elementhöhen (a-c) und Elementdurchmesser (d-f)

Grundsätzlich lassen sich im Funktionselement drei Zonen identifizieren. Oberhalb einer Höhe von ca. 1 mm existieren lediglich Spannungen, die unterhalb der Fließgrenze des Werkstoffs (Zug: 524 MPa, Druck vertikal: 429 MPa) liegen und somit nur in elastischen Verformungen resultieren. Darunter befinden sich die zwei Bereiche, die eine Plastifizierung erleben. Einerseits besteht in der Mitte des Zylinders bis zu einem Radius von ca. 1,6 mm eine hohe Druckspannung in axialer Richtung, die durch die Krafteinleitung des Stempels verursacht wird. Andererseits sind im Bereich des Übergangsradius Zugspannungen in radialer und axialer Richtung zu finden, bedingt durch die vorherrschende Zugbelastung und die überlagerte Biegung um den Stempel. Die entstehenden Spannungen sind für die untersuchten Elementhöhen (Abbildung 56 a-c) vergleichbar, was beweist, dass der Einfluss der Höhe geringer ist als der des Durchmessers. Denn mit steigendem Durchmesser (Abbildung 56 d-f) zeigt sich auch beim Funktionselement eine Erhöhung der Spannungen. In axialer aber stärker noch in radialer Richtung vergrößert sich der Bereich, in dem die Spannungen die Fließgrenze des Werkstoffs überschreiten, mit zunehmendem Durchmesser. Weil die Druckspannungen im Funktionselement nicht kritisch sind und sich die Zugspannungen auf den Bereich des Übergangsradius beschränken, ist davon auszugehen, dass die Umformung im Wesentlichen durch den Blechgrundkörper realisiert wird. Um zu verdeutlichen, was das für die Umformung von Hybridbauteilen bedeutet, ist dieser Einfluss in Abbildung 57 schematisch aufgezeigt.

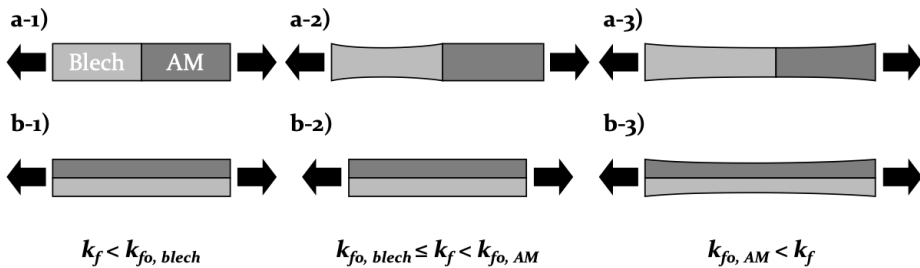


Abbildung 57: Schematische Darstellung des Materialverhaltens von Hybridbauteilen mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften für Belastungen a) in Reihe und b) in paralleler Anordnung.

Sind die zwei Komponenten in Reihe angeordnet (Abbildung 57 a), so führt der niedrigere Fließbeginn des Blechwerkstoffs dazu, dass dieser sich bereits plastisch verformt und verfestigt, bis die anliegende Kraft groß genug ist, damit die Anfangsfließspannung der Additivkomponente erreicht wird. Weil sich zeitgleich der Querschnitt des Blechs aufgrund der Längung verringert, steigt die anliegende Spannung dort stärker an als in

der Additivkomponente ohne plastische Verformung. Als Konsequenz wird der Blechwerkstoff plastifiziert, bis der maximale Umformgrad erreicht wird und sich eine Einschnürung bildet, die final im Versagen des Bauteils resultiert. Ist die anliegende Kraft beim Erreichen der maximalen Fließspannung des Blechwerkstoffs so groß, dass die resultierende Spannung im Additivwerkstoff unterhalb der Anfangsfließspannung liegt, dann wird dieser nicht plastifiziert. Die aufgebrachte Last wird nur durch den Blechwerkstoff kompensiert. Übersteigt dagegen die resultierende Spannung die Anfangsfließspannung des Additivmaterials, beginnt dieses ebenfalls zu plastifizieren und zu verfestigen. In Abhängigkeit des Verfestigungsverhaltens der beiden Komponenten werden diese fortlaufend umgeformt, bis eine der beiden den maximalen Umformgrad erreicht und in das instabile Materialverhalten übergeht.

Eine parallele Anordnung der Komponenten (Abbildung 57 b) verhindert die Verformung des Blechwerkstoffs, solange die anliegende Spannung niedriger als die Anfangsfließspannung des festeren Additivwerkstoffs ist. Die anschließende gemeinsame Verformung hängt von der Verfestigung der Komponenten ab, bis der kleinere der maximalen Umformgrade erreicht wird und sich eine Einschnürung bildet.

Im Falle der untersuchten Hybridbauteile ergeben sich beide der beschriebenen Konstellationen. Die Bereiche, in denen Blech und Additivkomponente „parallel“ liegen, sind an den Übergangsstellen der Funktionselemente zu finden. Weil diese aufgrund der höheren Festigkeit des additiv gefertigten Materials und des größeren Querschnitts erst bei deutlich größeren Zugkräften beginnen sich zu verformen, ist das Verhalten analog zu dem „in Reihe“ liegender Komponenten. Folglich wird der Blechwerkstoff stärker beansprucht. Auf Basis dieses Zusammenhangs sind die ermittelten maximalen Blechausdünnung im Bereich der Funktionselemente in Abbildung 58 zusammengefasst. Dabei wird die Blechausdünnung in einem Radius von 5 mm um das Zentrum des Funktionselementes ermittelt. Als Referenz ist die maximale Blechausdünnung eines konventionellen Bauteils über das gesamte Bauteil dargestellt.

Zusammenfassend ist der Einfluss der Funktionselementsteifigkeit deutlich zu sehen, was die anfangs aufgestellte Hypothese 2 bestätigt. Wie in Abschnitt 7.2.1 erläutert, lässt sich der Unterschied zwischen den mechanischen Eigenschaften der Komponenten am Beispiel des Edelstahl 1.4404 vernachlässigen. Demzufolge ist die Geometrie von größerer Bedeutung. Dazu zählt auch die Geometrie jedes einzelnen Funktionselementes und die resultierende Steifigkeit. Es zeigt sich, dass bereits eine Höhe von 3 mm ausreicht, damit das Funktionselement selbst nur in geringem Maße an der

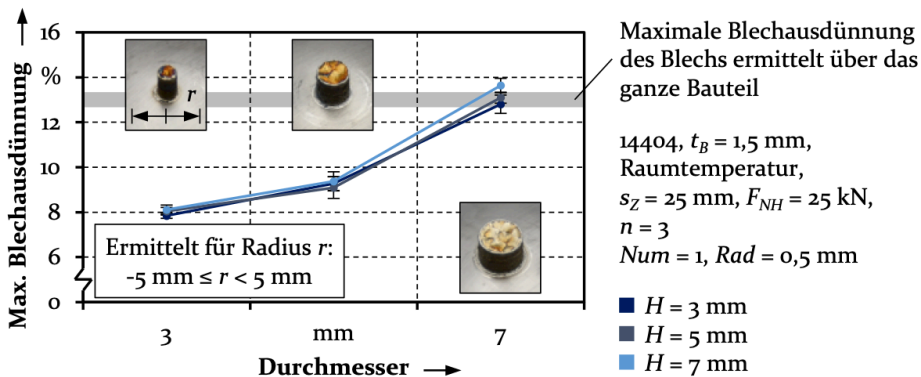


Abbildung 58: Im Übergangsbereich der Hybridbauteile gemessene maximale Blechausdünnung für variierte Durchmesser und Höhen

Umformung teilnimmt und der Großteil durch die Blechkomponente realisiert wird. Die dabei entstehenden Zugspannungen am Rand des Übergangsbereichs bleiben für eine steigende Elementhöhe vergleichbar. Ein größerer Durchmesser wiederum führt auch zu stärkeren Zugspannungen und folglich Blechausdünnungen in diesem Bereich. Für einen Durchmesser von 7 mm übersteigt die lokal maximale Blechausdünnung im Übergangsbereich die global maximale Blechausdünnung des konventionellen Blechbauteils und erzeugt somit ein neues globales Maximum. Damit geht auch eine erhöhte Versagenswahrscheinlichkeit einher, die im Rahmen der untersuchten Bauteilvarianten jedoch nicht als kritisch einzustufen ist. Im nächsten Abschnitt soll überprüft werden, wie sich die Position der Funktionselemente auf den Umformprozess auswirken.

### Hypothese 3: Position der Funktionselemente

Die Platzierung der additiv gefertigten Elemente ist lediglich durch einen möglichen Kontakt zu den Werkzeugen beschränkt. Je nach Position wird das Blech durch eine andere Spannungsconstellation belastet, die im Falle der Hybridbleche durch die Anwesenheit eines additiv gefertigten Elements verstärkt wird. Daher wird analysiert, ob die Position der Funktionselemente, wie schon die Steifigkeit zuvor, einen entscheidenden Beitrag zum Verhalten der Blechkomponente während des Umformprozesses leistet. Untersuchungen bezüglich unterschiedlicher Stempelgeometrien deuten darauf hin, dass der Einfluss der Funktionselemente umso stärker ist, je höher die Belastung in dem Bereich der Platzierung ist [224]. Bei der Platzierung wird zur besseren Orientierung der Abstand zum Mittelpunkt genutzt, um verschiedene Bereiche in der Umformzone zu unter-

suchen. Folglich ergeben sich unterschiedliche Spannungszustände und Spannungsniveaus, sowie Positionen in Relation zur Walzrichtung. Bedingt durch das Herstellungsverfahren, weist der Blechwerkstoff anisotrope Eigenschaften auf, die in Abschnitt 6.1.1 gezeigt werden. Diese Richtungsabhängigkeit gilt es bei der nachfolgenden Untersuchung zu beachten, weshalb neben der Position (*Pos*) auch die Ausrichtung zur Walzrichtung untersucht wird. Genauer werden die Abstände 0-20 mm zum Mittelpunkt in Schritten von 5 mm für eine Positionierung in und senkrecht zur Walzrichtung analysiert. Zur Veranschaulichung sind die Varianten mit einer Positionierung entlang der Walzrichtung in Abbildung 59 dargestellt.

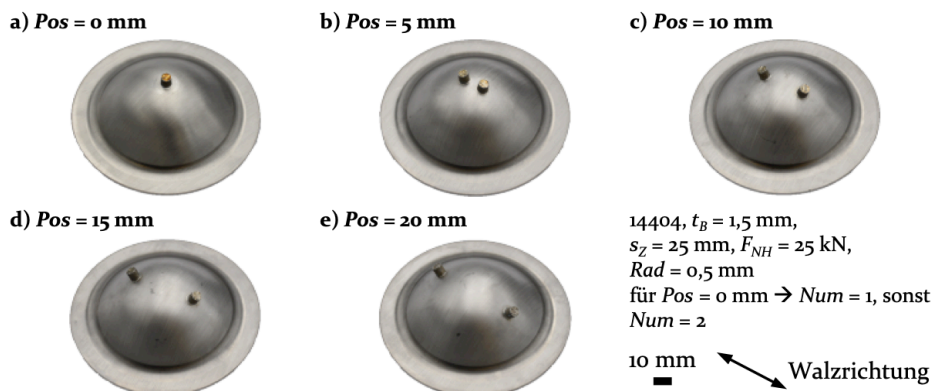
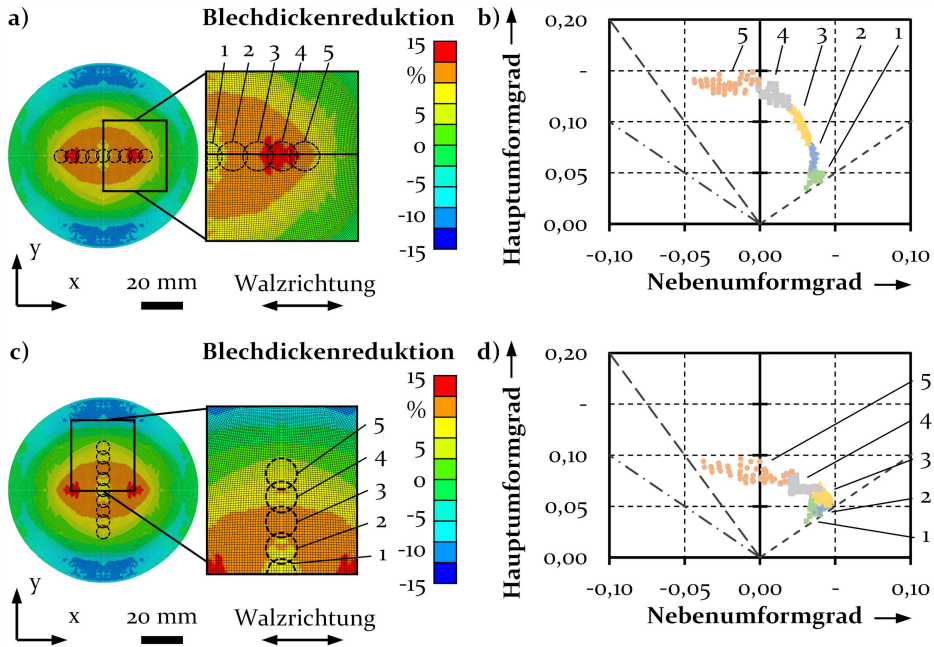


Abbildung 59: Umgeformte Hybridbauteile mit Funktionselementen an den untersuchten Positionen entlang der Walzrichtung des Blechgrundkörpers

Im Sinne einer gleichmäßigen Belastung wird die Variante *Pos* = 0 mm mit einem Funktionselement und die restlichen Varianten mit zwei symmetrischen Funktionselementen erzeugt. In Abbildung 60 werden die untersuchten Positionen mit den dazugehörigen Spannungszuständen gezeigt.

Anhand der Blechdickenreduktion lässt sich bereits abschätzen, wie groß die Belastung des Blechs an der jeweiligen Position ist. Zusätzlich wird die Blechdünnung als Anhaltspunkt für eine Versagenswahrscheinlichkeit genutzt. Die Richtungsabhängigkeit der Festigkeit bewirkt parallel zur Walzrichtung größere Ausdünnungen als senkrecht dazu. In Abhängigkeit des Abstands zum Mittelpunkt würden platzierte Funktionselemente in unterschiedlichen Abständen zur Umformzone liegen, was auch aus den abgebildeten Umformgraden der jeweiligen Positionen abzuleiten ist. Beginnend mit der Position 1 (*Pos* = 0 mm) liegt ein additiv gefertigter Körper im Bereich biaxialer Zugspannungen und mittlerer Blechdünnungen. Unabhängig von der Walzrichtung wird die Belastung vom biaxialen Zugbereich hin zur ebenen Dehnung und teilweise bis zum



14404,  $t_B = 1,5$  mm, Raumtemperatur,  $s_Z = 25$  mm,  $F_{NH} = 25$  kN,  $\mu = 0,1$

Abbildung 60: Blechdickenreduktion eines Blechs ohne Funktionselemente aus der numerischen Simulation mit Positionen a) in Walzrichtung und c) senkrecht zur Walzrichtung mit den dazugehörigen Umformgraden (b und respektive d)

Bereich der einachsigen Dehnung verschoben. Dabei steigt die Blechdünnung an den jeweiligen Positionen in Walzrichtung bis zur vierten Stelle ( $Pos = 15$  mm) und nimmt dann für den größten Abstand erneut ab. Senkrecht zur Walzrichtung ist das Verhalten ähnlich, jedoch liegt das Maximum in diesem Fall bei der Position 3 ( $Pos = 10$  mm). Es wird folglich erwartet, dass die Platzierung der Funktionselemente an den Stellen 3 und 4 den größten Einfluss haben und folglich ein Versagen am wahrscheinlichsten ist. In Abbildung 61 wird die maximale Blechdünnung aus den optischen Messungen der umgeformten Hybridbauteile mit Funktionskörpern an den untersuchten Positionen dargestellt. Die Bestimmung der maximalen Blechdünnung erfolgt analog zur Platzierung entlang der jeweiligen Walzrichtung.

Wie zuvor geäußert, liegen die maximalen Blechdünnungen für Platzierungen parallel zur Walzrichtung oberhalb derer von Platzierungen senkrecht zur Walzrichtung. Bei beiden Ausrichtungen ist jedoch der gleiche Trend, wenn auch mit unterschiedlich starken Ausprägungen, zu sehen.

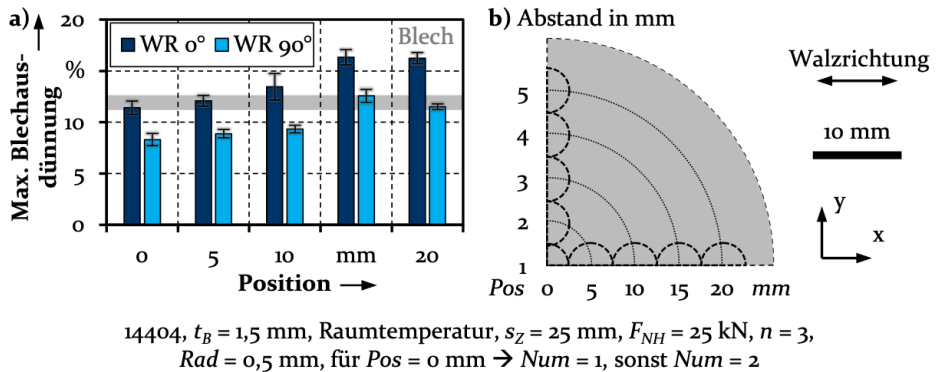


Abbildung 61: a) Maximale lokale Blechausdünnung für die Hybridbauteile mit Funktionselementen an den untersuchten Positionen, b) untersuchte Positionen in Relation zur Walzrichtung

Mit wachsendem Abstand des Funktionselementes zum Mittelpunkt steigt auch die maximale Blechausdünnung bis zu einem Abstand von 15 mm und nimmt danach wieder ab. Senkrecht zur Walzrichtung ist dieser Effekt weniger stark ausgeprägt, weil die Blechausdünnung bedingt durch die höhere Festigkeit in dieser Orientierung geringer ist. Vom Flansch abgesehen, erfolgt die Umformung hauptsächlich an den Bereichen des Bleches, die keinen Kontakt zum Stempel aufweisen [7]. Mit zunehmender Stempelbewegung vergrößert sich der Bereich mit Werkzeugkontakt vom Mittelpunkt aus nach außen [7]. Demzufolge werden die Bereiche mit größerem Abstand zum Mittelpunkt länger plastifiziert. In Abhängigkeit der Verfestigung des Materials wird entweder der Bereich am Kontaktverlust zum Stempel lokal (geringe Verfestigung) oder der gesamte kontaktlose Bereich gleichmäßig ausgedünnt (hohe Verfestigung) [42]. Überlagert wird dieses Verhalten durch die anliegenden Spannungszustände, die sich ebenfalls mit zunehmendem Abstand verändern. Bei einer Platzierung in der Mitte des Bauteils ( $Pos = 0$  mm) sind die vorhandenen biaxialen Zugspannungen vergleichsweise gering, weshalb der belastungsteigernde Einfluss der Additivkomponente weniger deutlich hervortritt. Dennoch ist auch in diesem Fall bereits ein Unterschied zum Blech ohne Funktionselemente vorhanden. Wird der Abstand größer, nehmen die Spannungen in Nebenformrichtung anteilig ab, jedoch steigt die absolute Belastung. Daher entstehen bei additiv gefertigten Elementen für  $Pos = 5$  mm bereits höhere maximale Blechausdünnungen, die bei  $Pos = 10$  mm noch weiter steigen. Bei  $Pos = 15$  mm liegt das Funktionselement in einem Bereich, der durch die ebene Dehnung gekennzeichnet ist. Folglich werden die vorhandenen Dehnungen in radialer Richtung (Hauptspannung) nahezu ausschließlich

durch eine Stauchung in Blechnormalenrichtung kompensiert, was einer Blechdickenreduktion gleichzusetzen ist. Daher ist die maximale Blechdurchdünnung an dieser Stelle unabhängig von der Ausrichtung am höchsten. Für  $Pos = 20$  mm sind in dem Bereich des Funktionselementes bereits tangentielle Druckspannungen (Nebenspannung) vorhanden, die dazu beitragen, dass die Hauptspannungen nicht ausschließlich durch eine Blechdickenreduzierung kompensiert werden. Zusätzlich nehmen die absoluten Spannungen zum Flansch hin wieder ab.

Als Resultat der beiden Einflüsse findet sich bei einem Abstand von 15 mm die größte maximale Blechdurchdünnung, weshalb hier auch die Versagenswahrscheinlichkeit am größten ist. Um dies zu überprüfen, werden die Grenzformänderungsschaubilder für die Abstände 5-20 mm in Abbildung 62 dargestellt. Auf das Grenzformänderungsschaubild des Hybridbauteils mit einem Funktionselement bei  $Pos = 0$  mm wird an dieser Stelle verzichtet, da dieses bereits in den vorherigen Abschnitten diskutiert wurde und die Versagenswahrscheinlichkeit am geringsten ist. Zusätzlich ist aufgrund der Positionierung im Zentrum des Bauteils der Einfluss der Walzrichtung nicht analysierbar.

Die Grenzformänderungsdiagramme bestätigen, dass bei  $Pos = 15$  mm die Versagenswahrscheinlichkeit am höchsten ist. Bei diesem Abstand (Abbildung 62 c) finden sich Elemente für eine Platzierung in Walzrichtung, die die Grenzformänderungskurve überschreiten und damit eine Einschnürung vorhersagen. Innerhalb der experimentellen Untersuchung ist zwar eine deutliche Reduktion der Blechdicke zu sehen, jedoch keine Rissbildung. Eine Platzierung der Funktionselemente entlang der Achse senkrecht zur Walzrichtung ist für alle Abstände weniger kritisch einzustufen als die Platzierung parallel zur Walzrichtung. Doch auch bei der Platzierung senkrecht zur Walzrichtung sind die Einflüsse des Abstands zu erkennen. Die Annäherung der Umformgrade an den kritischen Bereich steigt bis zu einem Abstand von 15 mm, bleibt jedoch auch dort auf einem Niveau, das einem Abstand von 5 mm bei einer Platzierung entlang der Walzrichtung entspricht. Grundsätzlich ist der Einfluss, der durch die Anwesenheit eines additiv gefertigten Funktionselementes entsteht, besonders bei Platzierungen parallel zur Walzrichtung zu sehen. Wegen des zuvor erwähnten Materialverhaltens sind vor allem die Bereiche kritisch, die der ebenen Dehnung unterliegen. Daher treten eben diese Bereiche in Form von gesteigerten Hauptumformgraden in den FLC-Diagrammen hervor. Außerdem wird, analog zu den Spannungs-konstellationen der Bereiche, in denen die Additivkomponenten platziert werden, die Ver-

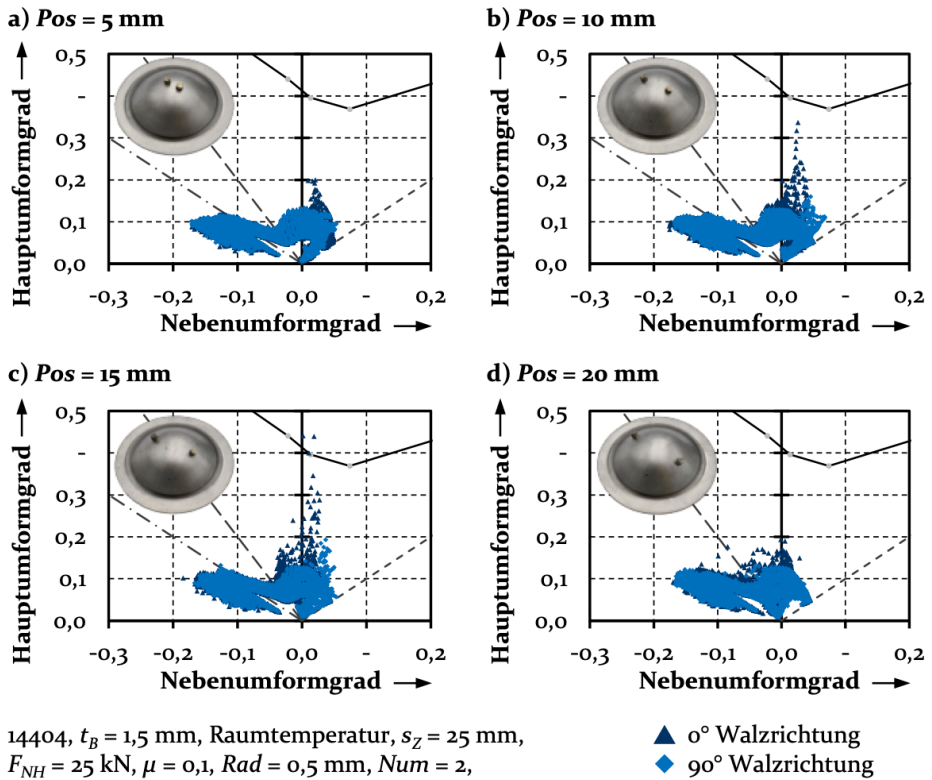


Abbildung 62: Grenzformänderungsdiagramme aus der numerischen Simulation für Hybridbauteile mit zwei Funktionselementen mit Abständen 5-20 mm zum Zentrum, jeweils mit Orientierung in Walzrichtung und senkrecht zur Walzrichtung

schiebung der Punkte mit den größten Hauptumformgraden hin zu den negativen Nebenumformgraden sichtbar.

Unter der Beachtung der in diesem Abschnitt beschriebenen Erkenntnisse lässt sich der deutliche Einfluss der Positionierung additiv gefertigter Funktionselemente erkennen. Dabei ist neben dem vorhandenen Spannungszustand auch die Platzierung in Relation zur Walzrichtung von Bedeutung. Bedingt durch die versteifende Wirkung, erzeugt das Funktionselement Spannungsspitzen im Blechgrundkörper, die die vorhandenen Belastungen deutlich steigern. Daher ist es ratsam, diese in Bereichen mit geringerer Belastung oder höherer Festigkeit zu platzieren. Am Beispiel der untersuchten Hybridbauteile ergab sich eine Platzierung parallel zur Walzrichtung und ein Abstand von 15 mm zum Mittelpunkt als besonders kritisch. Die geringere Festigkeit parallel zur Walzrichtung verglichen mit den Eigenschaften senkrecht dazu, sorgen bei gleicher Belastung für eine grö-

ßere Verformung. Der Abstand von 15 mm ist durch einen ebenen Dehnungszustand gekennzeichnet, der hinsichtlich der Versagenswahrscheinlichkeit am kritischsten einzustufen ist. Weil die Relevanz der Positionierung eines Funktionselements deutlich vorhanden ist, wird im nächsten Abschnitt die Platzierung mehrerer Additivkomponenten untersucht, um das volle Potenzial von Hybridbauteilen zu nutzen.

#### Hypothese 4: Anordnung und Anzahl der Funktionselemente

Auf Basis der zuvor beschriebenen Erkenntnisse wird abgeleitet, dass eine höhere Anzahl an Funktionselementen generell in einer höheren Versagenswahrscheinlichkeit resultiert. Belastungen werden bei der Anwesenheit eines einzelnen Funktionskörpers aufgrund der versteifenden Wirkung konzentriert (Hypothese 2), was zwar positionsabhängig im Ausmaß variiert (Hypothese 3), jedoch immer auftritt. Die bedeckte Fläche, die nachgewiesenermaßen kaum an der Umformung teilnimmt, steigt mit der Anzahl und die verbleibende Fläche, die die Umformung trägt, nimmt ab. Bei einer konstanten Belastung resultiert das in einer gesteigerten Last für eben diese verbliebene Fläche. Die Untersuchungen des Autors in [149] deuten darauf jedoch hin, dass die Anzahl alleine nicht entscheidend ist. Daher wird im Folgenden geprüft, ob nicht die Anordnung einen größeren Einfluss besitzt als die bloße Anzahl. In diesem Sinne wird ein Vorgehen entwickelt und überprüft, das es erlauben soll, Aussagen über die Versagenswahrscheinlichkeit bei Hybridbauteilen in Abhängigkeit der Verteilung zu treffen. Dafür werden die in Abbildung 63 dargestellten Verhältnisse zum Vergleich der Varianten hergeleitet, um verschiedene Zusammenhänge zu testen.

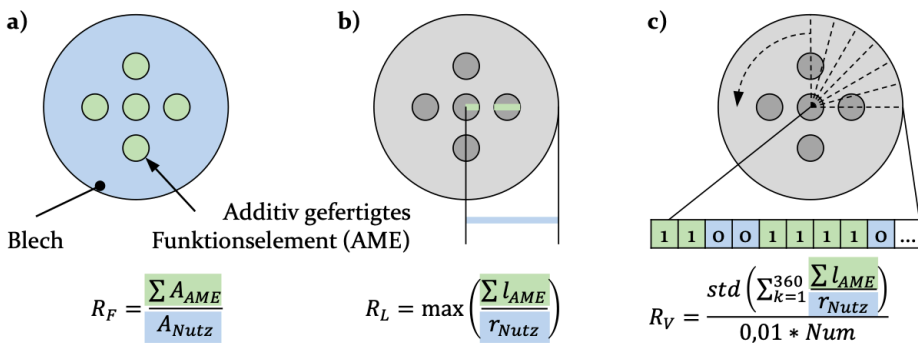


Abbildung 63: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Berechnung der Kennwerte a) Flächenverhältnis, b) maximales Linienverhältnis und c) Verteilungsverhältnis

Mithilfe des Flächenanteils  $R_F$  wird berechnet, wie groß der Anteil der durch Additivstrukturen eingenommen Fläche  $A_{AME}$  bezogen auf die nutzbare Fläche  $A_{Nutz}$  ist. Damit lässt sich die Anzahl der aufgetragenen Funktionselemente und damit auch der Anteil der versteiften Fläche zwischen den einzelnen Varianten quantitativ vergleichen. Der maximale Linienanteil  $R_L$  beschreibt das größte Verhältnis der durch Funktionselemente belegten Länge  $l_{AME}$  entlang des nutzbaren Radius  $r_{Nutz}$ . Je größer  $R_L$  ist, desto weniger Blech entlang eines Radius ist frei von Funktionselementen, was besonders im Hinblick auf die hauptsächlich auftretenden radialen Zugspannungen von Wichtigkeit ist. Der Kennwert  $R_V$  ermöglicht eine Aussage über die Abweichung der Gleichmäßigkeit der Verteilung der Funktionselemente über die nutzbare Fläche. Je kleiner dieser ist, desto gleichmäßiger ist die Verteilung der Funktionselemente. Analog zu  $R_L$  wird der Anteil des Radius bestimmt, der durch additiv gefertigte Elemente belegt ist. Dieser Anteil wird für eine definierte Anzahl an radialen Strecken bestimmt und die Standardabweichung dieser Anteile berechnet. Die Standardabweichung wird dann durch die Anzahl der Funktionselemente dividiert, um das Ergebnis zu normieren. Die Division durch 0,01 dient lediglich der Skalierung der Kennwerte für eine bessere Veranschaulichung. Die Berechnung des Kennwertes auf Basis der stp-Modelle erfolgt mithilfe eines erstellten Matlab-Skriptes. Zur Berechnung der Kennwerte wird eine nutzbare Fläche durch einen mittig liegenden Kreis mit Durchmesser 50 mm beschrieben. Außerdem werden zur Berechnung nur die Durchmesser der Funktionselemente ohne den Übergangsradius genutzt, weil dieser einen geringen Anteil beschreibt und bei allen Varianten enthalten ist. Der Übersicht halber werden zum Vergleich die in Abbildung 64 dargestellten Varianten mit einem Durchmesser  $D$  von 5 mm untersucht.

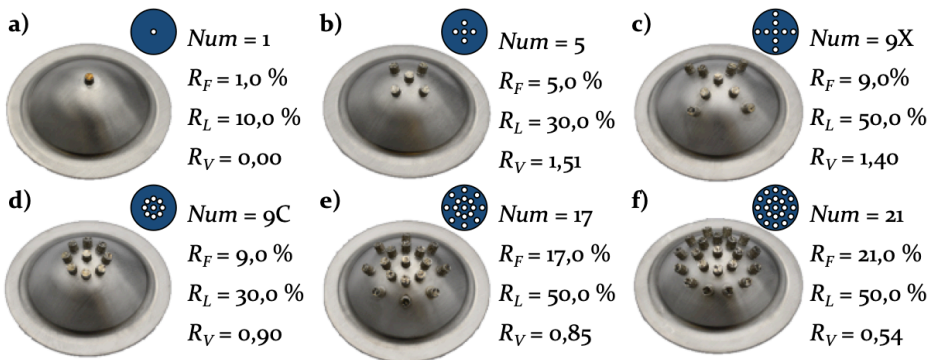


Abbildung 64: Darstellung der untersuchten Hybridbauteilvarianten mit dazugehörigen berechneten Kennwerten

Im Folgenden wird, wegen der sonst gleichen Parameter, die Bezeichnung durch Anzahl und Anordnung (*Num*) der Hybridbauteile verwendet. Die Variante *Num* = 1 (a) stellt den einfachsten Fall dar, was sich auch in den Kennwerten äußert. Der flächige Anteil der Bauteile steigt mit der Anzahl und ist für *Num* = 9X (c) und *Num* = 9C (d) gleich groß. Der maximale Linienanteil nimmt ebenfalls zu, jedoch ist für *Num* = 5 (b) und *Num* = 9C (d) trotz der unterschiedlichen Anzahl an Funktionselementen der gleiche Wert zu finden. Gleichzeitig besitzen *Num* = 9X (c), *Num* = 17 (e) und *Num* = 21 (f) den gleichen maximalen Linienanteil, jedoch unterschiedlichen Flächenanteile. Die Gleichmäßigkeit der Verteilung der Additivstrukturen ist für *Num* = 1 am höchsten und für *Num* = 9X (c) am geringsten. Auf Basis dieser Varianten werden die drei Kennwerte nachfolgend bezüglich deren Aussagekraft untersucht. Zuerst wird der Flächenanteil als Vergleichswert für die Bauteile geprüft. Dieser wird der maximalen Blechausdünnung als Richtwert für eine Versagenswahrscheinlichkeit gegenübergestellt, siehe Abbildung 65.

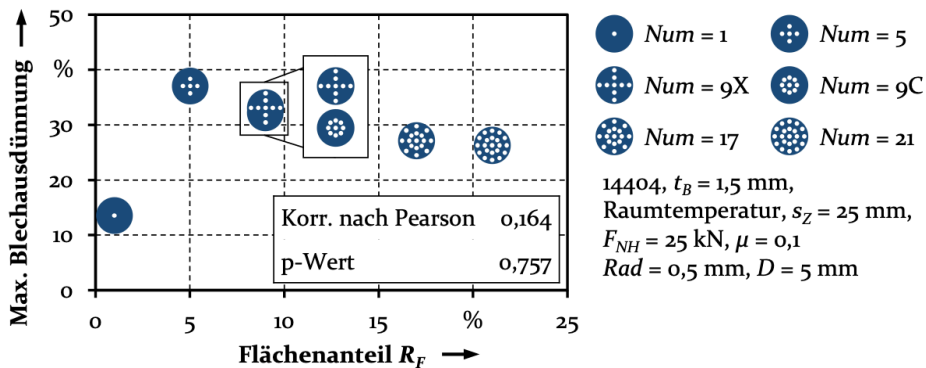


Abbildung 65: Maximale Blechausdünnung über den Flächenanteil  $R_F$  für die untersuchten Hybridbauteilvarianten

Abgeleitet von Abbildung 65 lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der maximalen Blechausdünnung und dem Flächenanteil identifizieren. Die geringste Ausdünnung ist bei *Num* = 1 zu finden, welches den geringsten Flächenanteil besitzt. Die höchste Ausdünnung ist für *Num* = 5 zu finden, wobei der Flächenanteil hier nur geringfügig größer ist. Die zweitgeringste Ausdünnung tritt bei *Num* = 21 auf, was dem größten  $R_F$  entspricht. Die Anordnung *Num* = 17 resultiert in einer Blechausdünnung die vergleichbar niedrig ist, besitzt jedoch einen geringeren Flächenanteil. Die beiden Möglichkeiten zur Verteilung von neun Funktionselementen befinden sich im mittleren Bereich hinsichtlich des Flächenanteils und unterscheiden sich nur geringfügig hinsichtlich der maximalen Blechaus-

dünnung. Dementsprechend lässt sich keine Korrelation zwischen dem Flächenanteil und der maximalen Blechausdünnung herstellen, was sich auch in der berechneten Korrelation und dem dazugehörigen p-Wert zeigt. Es ist festzuhalten, dass die geringste Ausdünnung für ein Funktionselement zu finden ist. Mehrere Körper resultieren in höheren Ausdünnungen, jedoch besteht keine Korrelation. Die gesteigerte Blechdickenreduktion ist auf zwei Aspekte zurückzuführen. Einerseits liegen bei der Platzierung zusätzlicher Additivkörper diese in kritischeren Bereichen als das in der Mitte liegende. Andererseits befinden sich entlang des Radius mehrere versteifte Bereiche, was einen reduzierten Anteil zur Folge hat, der den Großteil der Umformung trägt. Daher wird in Abbildung 66 das maximale Linienverhältnis  $R_L$  den maximalen Blechausdünnungen gegenübergestellt.

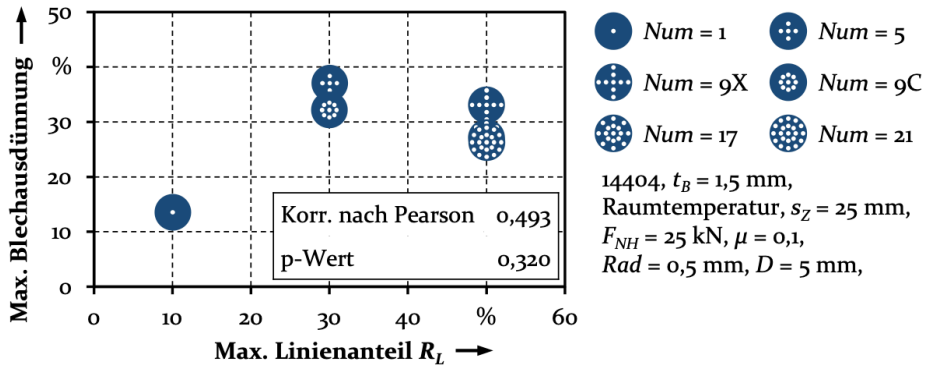


Abbildung 66: Maximale Blechausdünnung über den maximalen Linienanteil  $R_L$  für die untersuchten Hybridbauteilvarianten

Durch die hauptsächlich radial auftretenden Zugspannungen während der Umformung liegt der Rückschluss nahe, dass ein höherer maximaler Linienanteil  $R_L$  zu verstärkten Einschnürungen führt, weil der nicht versteifte Bereich reduziert ist. Daher wird die Richtung, entlang derer  $R_L$  am höchsten ist, als am stärksten belastet eingestuft und ist hinsichtlich eines Versagens durch Rissbildung am wahrscheinlichsten. Bei einem Vergleich der Bauteile  $Num = 1$ ,  $Num = 5$  und  $Num = 9X$  bestätigt sich dieser Zusammenhang. Durch die zusätzliche Platzierung von Funktionselementen in einem Abstand von 10 mm ( $Num = 5$ ) beziehungsweise 10 mm und 20 mm ( $Num = 9X$ ) steigt die entstandene maximale Blechausdünnung. Die Variante  $Num = 9C$  ist durch den gleichen maximalen Linienanteil gekennzeichnet wie  $Num = 5$ , weist aber trotz des eigentlich größeren Flächenanteils eine geringere Blechausdünnung auf. Der gleiche Effekt ist bei dem Vergleich der Varianten  $Num = 9X$ ,  $Num = 17$  und  $Num = 21$  zu sehen. Die

drei Varianten haben den gleichen maximalen Linienanteil und unterscheiden sich dennoch hinsichtlich der maximalen Blechausdünnung. In beiden Fällen liegen die Ergebnisse der Varianten mit einem größeren Flächenanteil unter denen der Varianten mit geringerem Anteil. Das bekräftigt die Behauptung, dass der flächige Anteil nicht grundsätzlich entscheidend ist. Doch auch der maximale Linienanteil ist nur bedingt geeignet, um Geometrien hinsichtlich ihrer Versagenswahrscheinlichkeit einzuschätzen, was ebenfalls in der berechneten Korrelation und dem dazugehörigen p-Wert zu sehen ist. Beim Vergleich der Varianten zeigt sich, dass  $Num = 9C$ ,  $Num = 17$  und  $Num = 21$  gegenüber den Varianten  $Num = 5$  und  $Num = 9X$  eine eher kreisförmige als kreuzförmige Anordnung besitzen. In ersten Untersuchungen des Autors für Titanbauteile [149] sind die kreisförmigen Anordnungen gegenüber kreuzförmigen Anordnungen ebenfalls vorteilhafter eingestuft, daher wird die Gleichmäßigkeit der Verteilung der Funktionselemente als Einflussfaktor identifiziert. Die kreisförmige Anordnung wird dahingehend als gleichmäßig und die kreuzförmige als ungleichmäßig angesehen. Der Faktor  $R_V$  dient als Anhaltspunkt für eine Bestimmung der Gleichmäßigkeitsabweichung der ausgewählten Geometrie, wobei 0 einer hohen Gleichmäßigkeit entspricht, welche für steigende Werte abnimmt. In Abbildung 67 sind die maximalen Blechausdünnungen der untersuchten Varianten über den Kennwert  $R_V$  aufgetragen und die Ergebnisse des Korrelationstests nach Pearson gezeigt.

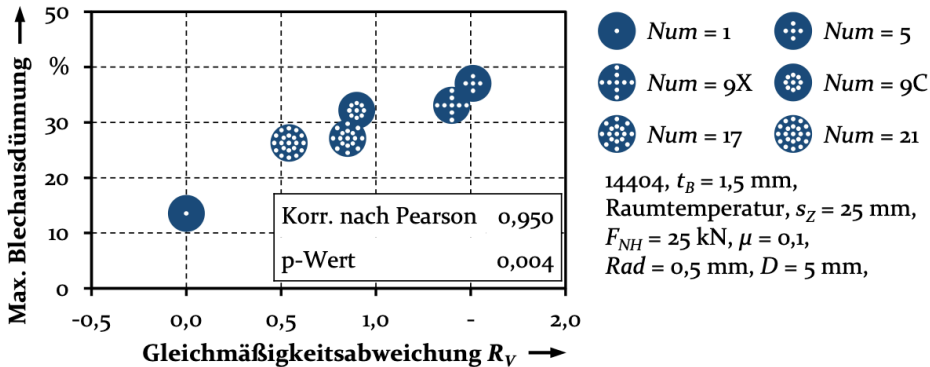


Abbildung 67: Maximale Blechausdünnung aus der numerischen Simulation über den Kennwert der Gleichmäßigkeitsabweichung  $R_V$  und die berechnete Korrelation

Auf den ersten Blick ist bereits erkennbar, dass die maximale Blechausdünnung mit dem Kennwert  $R_V$  steigt. Das Minimum beider Werte stellt die Variante  $Num = 1$  dar. Aufgrund der vollständigen Symmetrie des einzelnen Funktionskörpers liegt  $R_V$  für diese Variante bei 0. Die höchsten

maximalen Blechdurchdünnungen und Abweichungen der Gleichmäßigkeit sind für die Varianten  $Num = 5$  und  $Num = 9X$  zu sehen. Die kreuzförmige Anordnung der Funktionselemente resultiert einerseits in einer höheren Abweichung, aber auch in höheren Belastungen. Die kreisförmig angeordneten Varianten  $Num = 9C$ ,  $Num = 17$  und  $Num = 21$  liegen im Mittelfeld beider untersuchten Ergebnisgrößen, wobei die Variante  $Num = 21$  am niedrigsten liegt und damit die geringste Versagenswahrscheinlichkeit aufweist. Die Tatsache, dass eben diese Variante den größten flächigen Anteil besitzt, bestärkt erneut, dass die reine Anzahl nicht entscheidend ist. Die hohe Übereinstimmung zwischen der maximalen Blechdurchdünnung und der Gleichmäßigkeitsabweichung zeigt sich auch in der berechneten Korrelation von 0,950, deren Signifikanz im Rahmen des reduzierten Probenumfangs durch einen p-Wert von 0,004 bestätigt wird. Weil bisher die maximale Blechdurchdünnung nur als Richtwert zum Vergleich gedient hat, werden in Abbildung 68 die Grenzformänderungsdiagramme als Resultat der numerischen Simulation der untersuchten Varianten dargestellt.

Der Vergleich der Grenzformänderungsdiagramme der einzelnen Varianten bestätigt die vorhergehenden Einschätzungen. Die geringste Versagenswahrscheinlichkeit besteht für die Variante  $Num = 1$ . Bei den kreuzförmigen Varianten befinden sich Umformgrade einzelner Elemente bereits oberhalb der Grenzformänderungskurve, was andeutet, dass an den Stellen bereits Einschnürungen entstehen. Bei den Varianten  $Num = 9C$  und  $Num = 17$  werden Umformgrade nahe der Grenzformänderungskurve erreicht, die noch als sicher eingestuft werden können. Für die Variante  $Num = 21$  liegen die maximalen Hauptumformgrade unterhalb von 0,3 und sind damit nochmals niedriger, aber noch oberhalb der Variante  $Num = 1$ . Damit lässt sich abschließend bestätigen, dass die Anzahl zwar einen Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit hat, jedoch die Gleichmäßigkeit der Verteilung, die auch zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Belastung führt, wichtiger ist. Der berechnete Faktor  $R_V$  soll eine Einschätzung über die Eignung der Geometrie innerhalb der Tiefziehoperation liefern. Zusätzlich gilt es dabei zu beachten, an welchen Positionen die Funktionselemente platziert sind (Hypothese 3). So bleibt eine gleichmäßige Verteilung von Additivkörpern innerhalb der Umformzone weiterhin kritisch. Dagegen ist die Verteilung in unkritischen Bereichen weniger entscheidend. Daher wird im nachfolgenden Abschnitt die Übertragbarkeit der erarbeiteten Erkenntnisse auf weitere Varianten geprüft und hinsichtlich Wechselwirkungen untersucht.

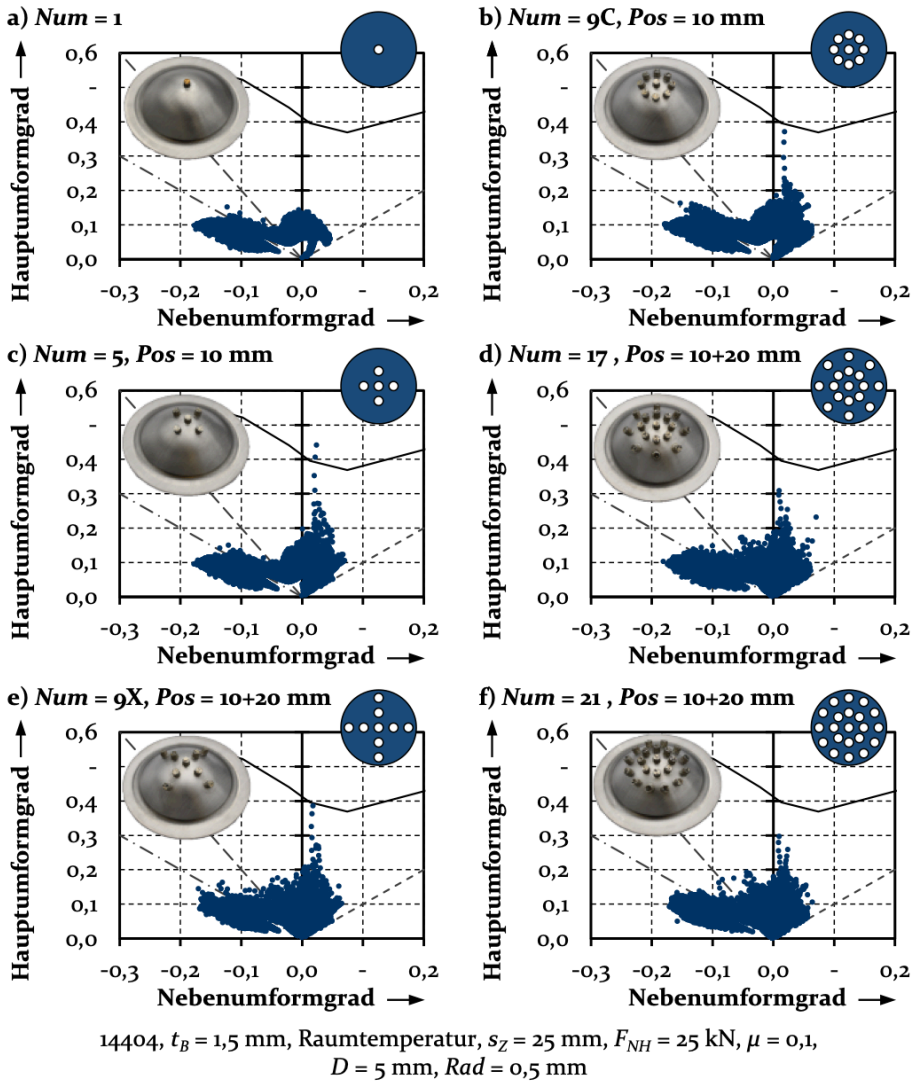


Abbildung 68: Grenzformänderungsdiagramme aus der numerischen Simulation für die untersuchten Varianten

## Wechselwirkungen zwischen den geometrischen Faktoren

Mit den nachfolgenden Untersuchungen sollen bisher erarbeitete Erkenntnisse anhand von weiteren Varianten geprüft werden. Auf diese Weise soll die Übertragbarkeit abgeleitet werden. Zusätzlich sollen Wechselwirkungen analysiert werden, die bisher nicht thematisiert wurden. In diesem Sinne werden die Faktoren  $D$ ,  $Num$  und  $Pos$  wie in Abbildung 69 dargestellt

variiert. Die Untersuchungen werden aufgrund der Vorhersagegenauigkeit der Simulation rein numerisch ausgeführt. Die Varianten  $Num = 8$  und  $Num = 9$  werden für  $D = 7$  mm nicht abgebildet, weil aufgrund der Anordnung die Funktionselemente bereits Kontakt zueinander haben.

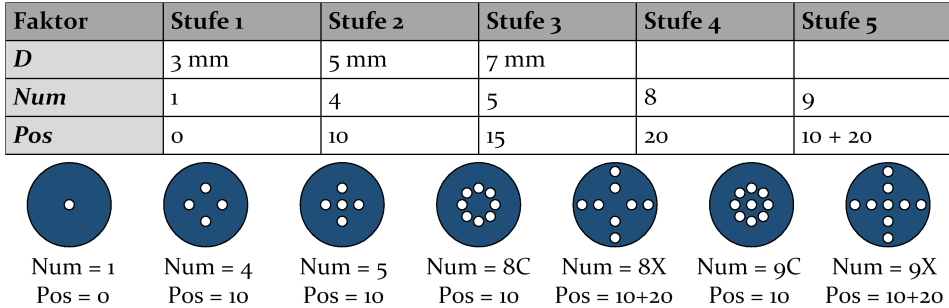
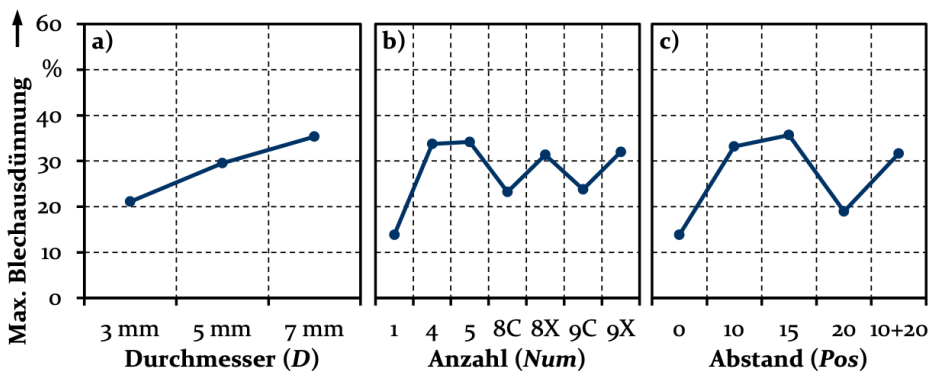


Abbildung 69: Zur Untersuchung der Wechselwirkungen genutzte Faktoren und Faktorstufen mit beispielhafter Darstellungen der Ausprägungen des Parameters  $Num$

Im ersten Schritt werden die Faktoren einzeln hinsichtlich deren Haupteinfluss untersucht. Dafür werden die Mittelwerte der Simulationen mit den jeweiligen Stufen gebildet, was vergleichsweise große Streuungen zur Folge hat. Dennoch ist es möglich, anhand der Ergebnisse die Einflussrichtungen der einzelnen Stufen zu bestimmen. Diese Erkenntnisse werden mit den zugrundeliegenden Mechanismen abgeglichen. Abbildung 70 zeigt den Einfluss der drei untersuchten Faktoren, gemittelt über die restlichen Faktoren. Damit wird ein qualitativer Vergleich der Faktorstufen ermöglicht.

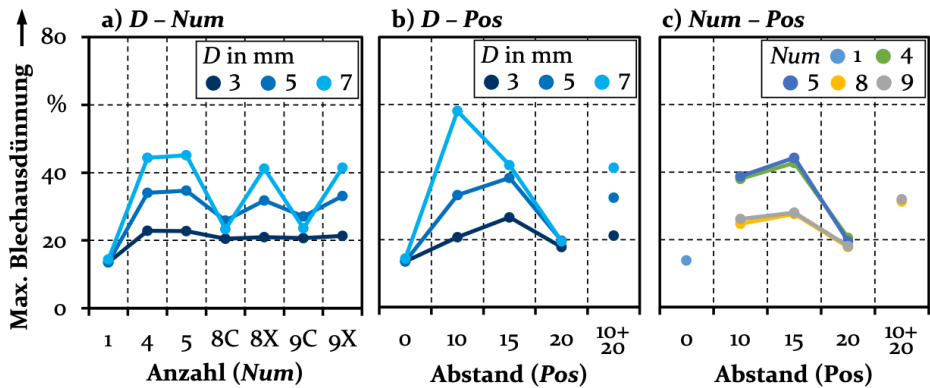


14404,  $t_B = 1,5$  mm, Raumtemperatur,  $s_Z = 25$  mm,  $F_{NH} = 25$  kN,  $\mu = 0,1$ ,  $Rad = 0,5$  mm  
 Gemittelt über untersuchte Varianten

Abbildung 70: Haupteinflüsse der Faktoren Durchmesser ( $D$ ), Anzahl ( $Num$ ) und Abstand ( $Pos$ ) der additiv gefertigten Funktionselemente auf die maximale Blechausdünnung

Aus Abbildung 70 a) lässt sich die gleiche Tendenz ableiten, die bereits in der ersten Hypothese untersucht wurde. Mit einem steigenden Durchmesser des Funktionselementes nimmt auch die maximale Blechausdünnung zu. Folglich ist auch ein Versagen durch Rissbildung wahrscheinlicher. Vor dem Hintergrund der verstärkenden Wirkung der Additivkomponente hinsichtlich Belastungen wird durch die Ergebnisse belegt, dass mit steigendem Durchmesser die Steigerung der Belastungen umso größer wird. Der Einfluss der Additivkomponente tritt für größere Durchmesser umso stärker hervor. Hinsichtlich der Anzahl (Abbildung 70 b) ergibt sich erneut, dass für  $Num > 1$  Blechausdünnungen entstehen, die deutlich höher sind als für Hybridbauteile mit genau einem Funktionselement. Ebenfalls wird auch für die untersuchten weiteren Varianten deutlich, dass die reine Anzahl nicht entscheidend ist. Die Varianten mit  $Num = 4$  und  $Num = 5$  resultieren in höheren Blechausdünnungen als  $Num = 8C$  und  $Num = 9C$  (Hypothese 4). Auch im Falle der zusätzlichen Parameterstufen, wie sie in diesem Abschnitt untersucht werden, ergeben sich für die kreisförmig angeordneten Varianten (8C, 9C) niedrigere Blechausdünnungen als für die kreuzförmigen Anordnungen (8X, 9X). Ein vergleichbares Bild kann Abbildung 70 c) für den Einfluss des Abstands zur Mitte entnommen werden. Die Varianten mit  $Pos = 0$  mm (entspricht  $Num = 1$ ) führen zu den geringsten Blechausdünnungen innerhalb der untersuchten Parameter. Analog zu den Ergebnissen der Hypothese 3 (Spannungszustand und Walzrichtung) zeigen die Untersuchungen für weitere Varianten den Trend, dass bei einem Abstand von 15 mm die größten Blechausdünnungen erzielt werden. Die resultierenden Ausdünnungen von  $Pos = 10$  mm und  $Pos = 20$  mm liegen darunter, wobei der Abstand von 20 mm das lokale Minimum hinsichtlich der Blechausdünnung bildet.  $Pos = 10 + 20$  mm repräsentiert die kreuzförmige Anordnung der Varianten  $Num = 8X$  und  $Num = 9X$ . Aus den Ergebnissen lässt sich auch für die in diesem Abschnitt untersuchten Varianten die versagensfördernde Wirkung dieser Anordnung ableiten. Zum tieferen Verständnis der Zusammenhänge sind auch die Wechselwirkungen zwischen den Faktoren entscheidend. Deshalb werden in Abbildung 71 die Einzelwechselwirkungen dargestellt.

Anhand der Gegenüberstellungen wird ersichtlich, dass zwischen allen drei Faktoren Wechselwirkungen bestehen. Wird beispielsweise die Anzahl gesteigert, ist der Einfluss für den kleinsten Durchmesser von 3 mm geringer, als für die größeren Durchmesser, siehe Abbildung 71 a). Besonders deutlich wird dieser Effekt für  $Num = 4$  und  $Num = 5$ . Die Blechausdünnung steigt nicht nur aufgrund der zusätzlichen Funktionselemente, sondern umso mehr durch eine Vergrößerung deren Durchmesser. Das deutet auf die positive Wechselwirkung der beiden Faktoren hin. Bei  $Num = 8X$

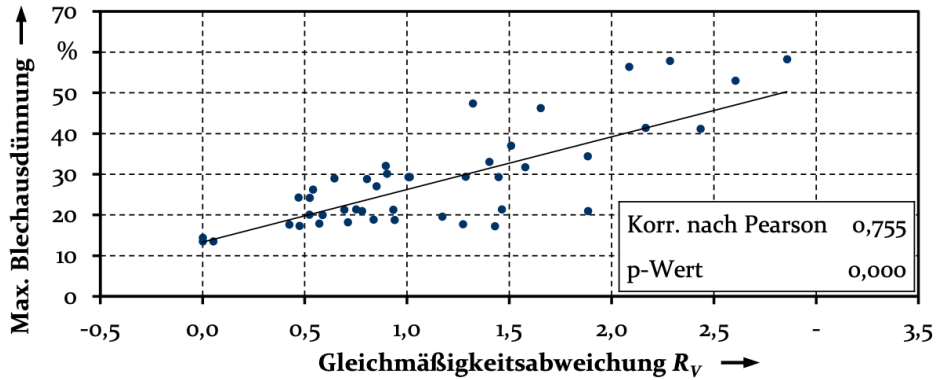


14404,  $t_B = 1,5$  mm, Raumtemperatur,  $s_Z = 25$  mm,  $F_{NH} = 25$  kN,  $\mu = 0,1$ ,  $Rad = 0,5$  mm  
Gemittelt über untersuchte Varianten

Abbildung 71: Einfachwechselwirkungen zwischen den Faktoren Durchmesser ( $D$ ), Anzahl ( $Num$ ) und Abstand ( $Pos$ ) der additiv gefertigten Funktionselemente

und  $Num = 9X$  ist dieser Effekt weniger stark ausgeprägt. Hier besteht der Unterschied darin, dass zwar für Durchmesser größer als 3 mm höhere Blechausdünnungen entstehen, jedoch die Ergebnisse für 5 mm und 7 mm vergleichbar sind. Das Verhalten zwischen den Faktoren  $D$  und  $Pos$  (Abbildung 71 b) ist ähnlich. Für  $Pos = 10$  mm bewirkt eine Veränderung des Durchmessers die größte Veränderung, wobei grundsätzlich mit steigendem Durchmesser auch die maximale Blechausdünnung steigt. Mit größer werdendem Abstand sinkt der Einfluss des Durchmessers. Für den Abstand  $Pos = 10 + 20$  mm wiederum bewirken die Durchmesser  $D > 3$  mm ebenfalls eine Steigerung der Blechausdünnung, wobei erneut die Ergebnisse von  $D = 5$  mm und  $D = 7$  mm divergieren. Die Kurven in Abbildung 71 c) deuten mit ihrer Parallelität darauf hin, dass keine Wechselwirkungen zwischen den Faktoren  $Num$  und  $Pos$  besteht. Zwar haben die beiden Faktoren für sich einen Einfluss auf das Materialverhalten während der Umformung, die sich aber nicht gegenseitig beeinflussen. Zusammenfassend zeigt sich, dass der Durchmesser mit den Faktoren Anzahl und Position wechselwirkt. Einer Vergrößerung des Durchmessers, die alleine bereits eine Steigerung der maximalen Blechausdünnung bewirkt, resultiert in Kombination mit Faktorstufen der anderen Parameter in umso höheren Ausdünnungen. Weil diese Ergebnisse im Einklang mit den zuvor beschriebenen Hypothesen stehen, kann davon ausgegangen werden, dass die erarbeiteten Zusammenhänge auch auf weitere Varianten übertragbar sind. Dementsprechend wird auch die Übertragbarkeit des berechneten Kennwertes  $R_V$  auf die untersuchten Varianten geprüft. In Abbildung 72 sind die maximalen

Blechausdünnungen der in diesem Abschnitt untersuchten Varianten den dazugehörigen  $R_V$ -Werten gegenübergestellt.



14404,  $t_B = 1,5$  mm, Raumtemperatur,  $s_z = 25$  mm,  $F_{NH} = 25$  kN,  $\mu = 0,1$ ,  $Rad = 0,5$  mm

Abbildung 72: Numerisch berechnete maximale Blechausdünnungen über die Verteilungsabweichungen  $R_V$  mit dazugehöriger Korrelation nach Pearson

Werden die maximalen Blechausdünnungen über den Kennwert  $R_V$  aufgetragen, lässt sich der Zusammenhang der beiden Größen identifizieren. Mit steigender Gleichmäßigkeitsabweichung nimmt auch die maximale Blechausdünnung zu. Insbesondere ist der Zusammenhang für  $R_V < 1$  zu erkennen. Aber auch bei größeren Abweichungen besteht noch eine positive Korrelation. Wird diese nach Pearson berechnet, so ergibt sich eine Korrelation von 0,755, was einer starken positiven Korrelation entspricht. Die Signifikanz des Tests wird durch den p-Wert von 0,000 belegt. Folglich existiert auch für die zusätzlichen untersuchten Varianten der Zusammenhang zwischen Gleichmäßigkeitsabweichung und maximaler Blechausdünnung, was wiederum die Übertragbarkeit des Kennwertes belegt. Für die Herstellung von Hybridbauteilen bedeutet das, dass die in den Hypothesen beschriebenen Ansätze bei der Gestaltung der Funktionselemente Beachtung finden sollten, um die Umformbarkeit der Bauteile zu gewährleisten. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 73 graphisch zusammengefasst.

Innerhalb der Untersuchungen führten die verwendeten Funktionselementhöhen von 3 - 7 mm dazu, dass diese selbst kaum an der Umformung teilnehmen. Lediglich bis zu einer Höhe von circa 1 mm treten Spannungen auf, die eine plastische Verformung bewirken. Oberhalb dieser Höher können die Funktionselemente als starr angesehen werden, woraus sich die versteifende Wirkung ergibt. Größere Durchmesser bewirken aufgrund ihres versteifenden Einflusses höhere Belastungen. Innerhalb der untersuchten Varianten haben sich Durchmesser bis 5 mm als unkritisch und

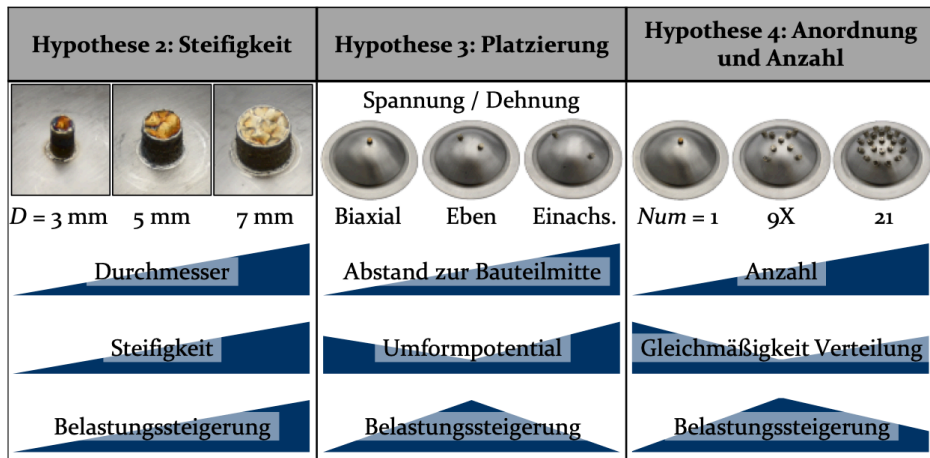


Abbildung 73: Graphische Darstellung der erarbeiteten Zusammenhänge bei der Gestaltung von Funktionselementen hinsichtlich der Umformung von Hybridbauteilen

ein Durchmesser von 7 mm als kritisch hinsichtlich der Versagenswahrscheinlichkeit gezeigt. Die Platzierung von Funktionselementen in stark belasteten Bereichen in oder nahe der Umformzone bewirkt eine Potenzierung eben dieser Belastung und muss daher prozessabhängig und folglich in Abhängigkeit der vorhandenen Spannungszustände gewählt werden. Für den untersuchten Tiefziehprozess mit angepasster Stempelgeometrie ist ein Abstand der Elemente zum Mittelpunkt von 15 mm als am kritischsten einzustufen, was auf den vorhanden ebenen Dehnungszustand zurückzuführen ist. Die Nutzung von Funktionselementen mit größerem Durchmesser in kritisch belasteten Bereichen vergrößert die Versagenswahrscheinlichkeit umso stärker. Bei der Nutzung mehrerer Funktionselemente ist deren gleichmäßige Verteilung entscheidend für die Umformbarkeit des Hybridbauteils. Der Faktor  $R_V$  kann berechnet werden, um vorab Varianten hinsichtlich ihrer Eignung für den Tiefziehprozess einzuschätzen. Die Verwendung von versagensfördernden kreuzförmigen Anordnungen mit  $R_V > 1$  ist zu vermeiden. Wegen der vorhandenen Wechselwirkungen sind Durchmesser  $> 7$  mm zu vermeiden.

### 7.3 Zusammenfassende Bewertung der Wirkzusammenhänge bei der Blechumformung von Hybridbauteilen

Bei der Kombination von additiver Fertigung und Blechumformung zur Herstellung von Hybridbauteilen entstehen Wechselwirkungen zwischen den Einzelprozessen. Um die gesamte Prozesskette zu verstehen, ist es wichtig, die einzelnen Prozesse sowie die zusammenhängenden Einflüsse zu ergründen. Wichtig sind dabei die Geometrie und Größe der Funktionselemente, der Anteil der durch diese belegten Fläche sowie deren Platzierung in Abhängigkeit der Umformzone und des Spannungszustands. Eine Übersicht der erarbeiteten Einflussfaktoren ist in Abbildung 74 dargestellt.

Grundsätzlich lassen sich die Einflüsse beim Umformen der Hybridbauteile in vier Bereiche aufteilen. Diese sind der verwendete Werkstoff, die additive Fertigung, die geometrischen Eigenschaften der Funktionselemente und der genutzte Umformprozess. Vorausgehende Untersuchungen zeigen deutlich, dass das Materialverhalten der Hybridbauteile deutlich durch die geometrischen Eigenschaften der additiv gefertigten Komponente beeinflusst wird, weshalb eben diese tiefgreifend untersucht wurden. Dafür wurde ein Ansatz verfolgt, der die numerische Simulation mit lokal anpassbaren Materialmodellen mit physikalischen Experimenten kombiniert. Trotz der Vorteile, die die Funktionselemente während der Nutzung der Bauteile bringen, bewirken diese während der Umformoperation Herausforderungen. Grundsätzlich wird das Material durch die Additivkomponente verstärkt und damit steigt auch die Steifigkeit in diesem Bereich. Die Funktionselemente wie auch das darunterliegende Blech nehmen kaum an der Umformung teil. Dadurch wird verhindert, dass sich das Blech an den Stempel anlegen kann und es kommt zu einem Kontaktverlust zwischen Blech und Stempel. In Kombination mit der Versteifung führt das zu Konzentrationen von Spannungen und Blechdünnungen am Übergangsbereich, die final in einem verfrühten Bauteilversagen resultieren können.

Die versteifende Wirkung der Funktionselemente hängt von deren Höhe und Durchmesser ab. Für Funktionselementhöhen von 3 mm und größer sind die Belastungen vergleichbar. Deshalb ist davon auszugehen, dass die kombinierte Materialstärke hoch genug ist, sodass ein Großteil des Funktionselementes und des darunterliegenden Blechs nicht mehr plastisch verformt werden. Als Folge stellt das Funktionselement eine Fließbehinderung dar und es treten am Übergangsbereich zwischen dem Funktionselement und dem Blechgrundkörper erhöhte Spannungen auf. Mit stei-

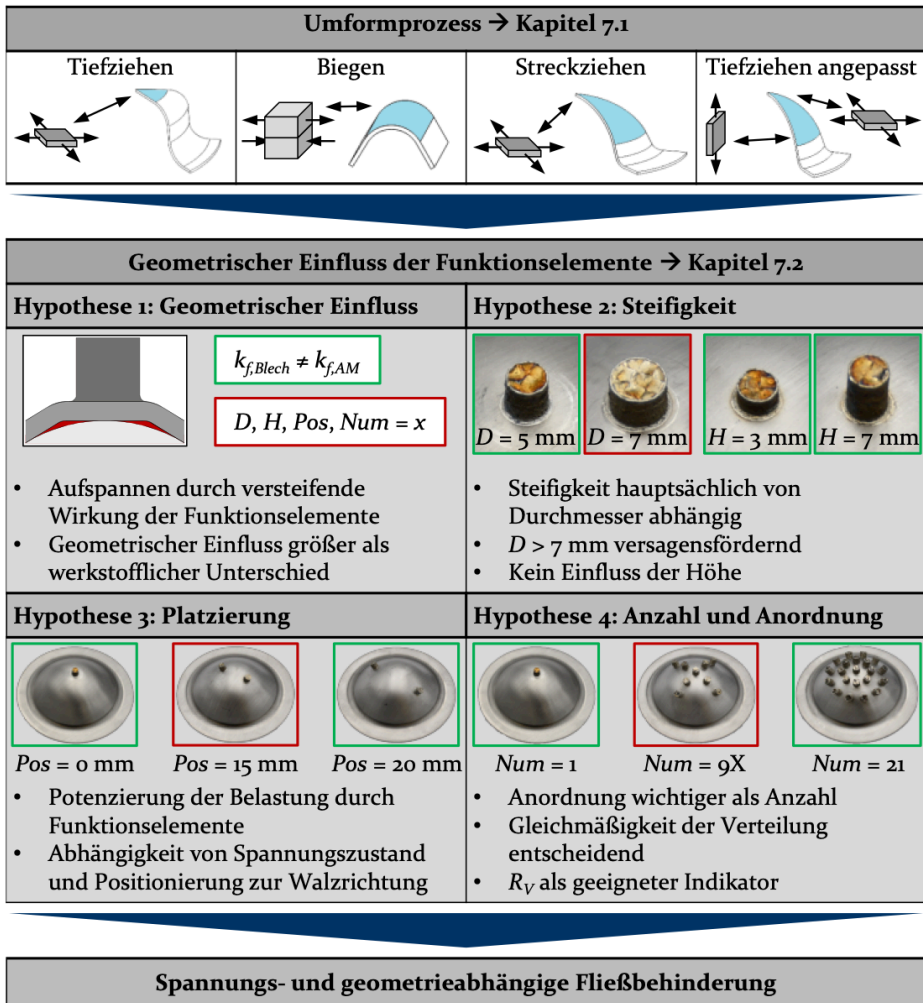


Abbildung 74: Zusammenfassung der Einflussfaktoren bei der Blechumformung von Hybridbauteilen

gendem Durchmesser werden diese Belastungen ebenfalls größer. Während Funktionselemente mit einem Durchmesser von 3 mm kaum einen Einfluss auf das Materialverhalten haben, bewirken Durchmesser von 7 mm Blechdurchdünnungen, die oberhalb derer eines konventionellen Blechs ohne Additivkomponente liegen. Der Ort der größten Ausdünnung, an dem das Versagen in Form von Rissbildung am wahrscheinlichsten ist, verschiebt sich somit zum Übergangsbereich zwischen Blech und Funktionselement.

Neben der Größe des additiv gefertigten Elementes ist auch dessen Platzierung entscheidend. Grundsätzlich bewirken die Additivstrukturen eine lokale Erhöhung der Spannung und Blechausdünnung, die bei einem konventionellen Blech zu finden wären. Das bedeutet, dass Spannungen und Dehnungen hochbelasteter Bereiche potenziert werden, während der Einfluss bei niedrigbelasteten Bereichen geringer ist. Dieser Effekt ist deutlich zu sehen, wenn Funktionselemente entweder parallel oder senkrecht zur Walzrichtung platziert werden. Wegen der Anisotropie des Blechsubstrats entstehen parallel zur Walzrichtung höhere Blechausdünnungen, die auf die geringere Festigkeit des Materials in dieser Belastungsrichtung zurückzuführen sind. Eine Platzierung von Funktionselementen senkrecht zur Walzrichtung bewirkt zwar eine Fließbehinderung in den Bereichen, jedoch bleiben die resultierenden Blechausdünnungen unterhalb derer parallel zur Walzrichtung ohne Funktionselemente. Werden wiederum Additivstrukturen entlang der Walzrichtung aufgebaut, entstehen während der Umformung Spannungsspitzen und Einschnürungen, die ein globales Maximum bilden. Zurückzuführen ist das auf die Belastungen der jeweiligen Bereiche beim konventionellen Blech. Während senkrecht zur Walzrichtung bedingt durch die höhere Festigkeit des Materials geringere Umformgrade erreicht werden, wird das Material parallel zur Walzrichtung stärker plastifiziert. Zusätzlich zeigt sich der Einfluss des  $r$ -Werts. Dieser ist für den untersuchten Werkstoff parallel zur Walzrichtung  $< 1$ , senkrecht zur Walzrichtung  $> 1$ . Demzufolge ist eine Blechausdünnung parallel zur Walzrichtung wahrscheinlicher, was durch die Fließbehinderung in Form des Funktionskörpers verstärkt wird. Analog dazu ist auch der Spannungszustand entscheidend. Am Beispiel des Tiefziehprozesses mit angepasster Werkzeuggeometrie ist dieser Effekt anhand des variierten Abstands zum Mittelpunkt aufgezeigt. In der Mitte des Bauteils sind für konventionelle Bleche niedrige biaxiale Spannungen und Dehnungen zu finden. Ein an dieser Stelle liegendes Funktionselement verstärkt zwar die vorhandene Belastung, bildet jedoch kein globales Maximum. Mit abnehmendem Abstand zur Umformzone steigt die Belastung und damit auch der Effekt eines vorhandenen Funktionselementes. Der Spannungszustand geht mit zunehmendem Abstand zum Mittelpunkt vom biaxialen Zugbereich in den Bereich der ebenen Dehnung über, der für Blechbauteile besonders kritisch hinsichtlich Versagen ist. Hier auftretende Dehnungen des Blechs werden nur über eine Reduktion der Materialstärke kompensiert. Additiv gefertigte Komponenten, die in diesem Bereich liegen, bewirken während der Umformung die größte Fließbehinderung und folglich Konzentration von Blechausdünnungen und begünstigen damit ein frühzeitiges Versagen der Bauteile. Mit weiter ansteigendem Abstand zum Mittelpunkt sinkt der Einfluss

der Funktionselemente für den Fall des Tiefziehens mit angepasster Werkzeuggeometrie. Die vorhandenen Spannungen gehen in den Bereich des einachsigen Zugs und mit noch größer werdendem Abstand in den Bereich der Zug-Druck-Spannung über. Mit den sinkenden Belastungen in konventionellen Blechen nimmt auch die verstärkende Wirkung der Additivkomponenten ab.

Weil mit ansteigender Anzahl an Funktionselementen die Platzierung außerhalb der verhältnismäßig gering belasteten Bauteilmitte erfolgen muss, steigt grundsätzlich auch die Versagenswahrscheinlich als Folge der konzentrierten Belastungen. Jedoch kann nachgewiesen werden, dass die Anzahl der Funktionselemente weniger entscheidend ist als deren Anordnung. Daher stellt die Berechnung des Anteils der durch Additivkomponenten bedeckten Bereiche keine geeignete Möglichkeit dar, um Hybridbauteile im Voraus hinsichtlich deren Versagenswahrscheinlich einzustufen. Beispielsweise wird für eine kreuzförmige Anordnung, bei der die additiv gefertigten Elemente entlang zweier senkrecht zueinander liegenden diametralen Linien liegen, eine durchschnittlich 25 % höhere maximale Blechdurchdünnung gemessen als bei einer kreisförmigen Anordnung der gleichen Anzahl an Funktionselementen. Wegen der hauptsächlich radialen Zugspannungen bietet die Berechnung der radial durch Additivstrukturen belegten Länge zwar eine bessere aber auch nicht ausreichende Möglichkeit, Hybridbauteilvarianten hinsichtlich ihrer Eignung für den Tiefziehprozess zu bewerten. Innerhalb der untersuchten Parameter eignet sich der Faktor zur Bestimmung der Verteilungsgleichmäßigkeit am besten. Grundsätzlich sind aber auch die zuvor beschriebenen Kausalzusammenhänge bezüglich der Größe und Position in Relation zur Umformzone sowie Walzrichtung zu beachten.

Zusammenfassend lässt sich die versteifende und fließbehindernde Wirkung der Funktionselemente während des Umformprozesses nachweisen. Um ein frühzeitiges Bauteilversagen zu vermeiden sind die geometrischen Eigenschaften der additiv gefertigten Funktionselemente, wenn möglich, wie folgt zu wählen. Die Durchmesser sollten so klein wie möglich sein, um deren versteifende Wirkung auf ein Minimum zu beschränken. Werden mehrere Additivstrukturen auf dem Blechsubstrat aufgebracht, so sind diese gleichmäßig zu verteilen. Eine Möglichkeit die Verteilung einzuschätzen stellt der vorgestellte Faktor  $R_V$  dar. Dabei ist außerdem in Abhängigkeit des verwendeten Umformprozesses auf die Platzierung zu achten. Bereiche mit niedrigen Belastungen wie Spannungen und Dehnungen sind stets zu bevorzugen. Hochbelastete Bereiche nahe und in der Umformzone, wie beispielsweise unter ebener Dehnung, sollten vermieden werden. Eine Ein-

*7 Erarbeitung der Einflussmechanismen bei der Herstellung von Hybridbauteilen durch einen kombinierten experimentellen und numerischen Ansatz*

ordnung der hergeleiteten Erkenntnisse im Gesamtkontext dieser Arbeit ist im nächsten Abschnitt zu finden.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen stellen die steigenden Forderungen nach Individualisierbarkeit und Nachhaltigkeit bei gleichbleibender Wirtschaftlichkeit konventionelle Fertigungsverfahren vor neue Herausforderungen. Eine Möglichkeit, die Prozessgrenzen im Bereich der Umformtechnik zu erweitern, stellen Hybridbauteile dar, die aus Blechsubstraten mit additiv gefertigten Strukturen bestehen. Bei der Herstellung und Umformung von Hybridbauteilen existieren aufgrund der Fertigungsreihenfolge Wechselwirkungen zwischen den Einzelprozessen. Um das volle Potenzial von Hybridbauteilen nutzen zu können, müssen diese Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge untersucht werden. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine ganzheitliche Analyse der Einflüsse am Beispiel des rostfreien austenitischen Edelstahl 1.4404 durchgeführt, die die verschiedenen Bereiche entlang der Prozesskette umfasst. Zu Beginn wurde eine Prozessführungsstrategie zur additiven Fertigung von Funktionselementen auf Blechgrundkörpern erarbeitet. Anschließend wurden die mechanischen Eigenschaften der Blech- und Additivkomponente in Abhängigkeit der Temperatur und Belastungsart vergleichend untersucht. Die zuvor ermittelten Zusammenhänge wurden dann in einer Analyse der Einflussmechanismen kombiniert, die die numerische Simulation des Tiefziehprozesses mit lokalem Materialmodell und physikalische Umformexperimente mit angepasster Werkzeuggeometrie umfassen. Anhand von vier Hypothesen wurde der Einfluss additiv gefertigter Funktionselemente auf den Materialfluss von Hybridbauteilen in Umformprozessen umfassend untersucht.

Der additive Fertigungsprozess wird durch eine Vielzahl an Einflussgrößen gekennzeichnet. Weil der Aufbau auf Blechsubstraten veränderte Ausgangsbedingungen gegenüber einer konventionellen additiven Fertigung bewirkt, wurden die Untersuchungen dahingehend ausgerichtet. Unter Variation der Faktoren Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Fokuslage wurde sukzessive eine Prozessführungsstrategie zum Aufbau auf Blechgrundkörpern ermittelt. Dafür wurden Einzelschweißbahnen, volumetrische Körper und final Charakterisierungsproben hergestellt. Bei der geometrischen Auswertung der Einzelschweißbahnquerschnitte erweisen sich die Laserleistung und Scangeschwindigkeit als größte Einflüsse und zusätzlich kann deren Wechselwirkung bestätigt werden. Die beiden Faktoren stehen im Gegensatz zueinander, da eine steigende Leistung die eingebrachte Energie erhöht, eine zunehmende Scangeschwindigkeit aber die Zeit der Einbringung pro Punkt reduziert. Dieser Einfluss wurde auch bei

der Analyse der volumetrischen Testkörper nachgewiesen, die die Messung der relativen Dichte anhand von Schliffbildern, Härtemessungen und Verbundfestigkeitsprüfungen unter Scherbelastung umfassen. Die relative Dichte kann, bedingt durch die Korrelation mit der Anbindungsfestigkeit, als Richtwert zur Einstufung der gewählten Parameter genutzt werden. Grundsätzlich sollte die Kombination aus Leistung, Geschwindigkeit und Fokusslage so gewählt werden, dass relative Dichten oberhalb von 99,5 % erreicht werden. Bei der Härtemessung der volumetrischen Prüfkörper zeigt sich die Anisotropie des Additivwerkstoffs, die auf thermischen Bedingungen während des Prozesses zurückzuführen sind. Die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der additiv hergestellten Charakterisierungsproben erfolgte im Vergleich zum Blechgrundwerkstoff.

Die Unterschiede zwischen Blech- und Additivwerkstoff begründen sich auf die Herstellungsverfahren und damit einhergehenden Mikrostrukturen. Während die Bleche durch den Walzvorgang bei erhöhten Temperaturen ein feinkörniges Gefüge erhalten, wird dies im Additivprozess durch die hohen Abkühlraten bewirkt. Beide Werkstoffe weisen anisotrope Eigenschaften auf. Einerseits erzeugt das Walzen eine Längung der Körner, andererseits wird beim Aufbau und der dabei zyklisch eingebrachten Wärme des Additivprozesses ein Temperaturgradient in Aufbaurichtung erzeugt, entlang dessen sich Dendriten bilden. Obwohl beide Werkstoffe ein austenitisches Gefüge aufweisen, führen die unterschiedlichen Kornstrukturen zu abweichenden mechanischen Eigenschaften unter Zugbelastung. Anhand des Vergleichs zeigt sich, dass der Blechwerkstoff einen geringeren Fließbeginn aufweist, stärker verfestigt und höhere Umformgrade erreicht werden können als beim Additivwerkstoff. Mit Blick auf Umformprozesse erweist sich deshalb der Blechwerkstoff als besser geeignet, wohingegen der Additivwerkstoff aufgrund der höheren Festigkeit und Temperaturstabilität für Anwendungen vorteilhaft zu sein scheint. Im Gegensatz dazu sind die Unterschiede unter Druckbelastung geringer. Lediglich für Umformgrade kleiner 0,15 liegt die Fließspannung der konventionell gefertigten Proben – anders als unter Zugbelastung – über der der additiv hergestellten Proben. Ungeachtet der Belastungsart, finden sich nach der Umformung Unebenheiten auf den Probenoberflächen der Additivkörper, die keinen Werkzeugkontakt haben. Diese sind auf ein Abgleiten an den thermisch bedingten Dendriten zurückzuführen und verhindern eine technische Verwendung der Oberflächen. Bei der Kombination der Werkstoffe, wie es bei Hybridbauteilen der Fall ist, sind diese Unterschiede entscheidend für das Verhalten im Umformprozess und in einer Anwendung. Für eine verlässliche numerische Abbildung ist daher eine präzise Modellierung der Werkstoffeigenschaften und ihrer Unterschiede entscheidend.

Durch die langjährige Nutzung von Blechwerkstoffen in der Umformtechnik und -simulation existieren zahlreiche Möglichkeiten zur Beschreibung des Materialverhaltens von Beginn der elastisch-plastischen Verformung bis hin zum Versagen. Dahingegen findet die Nutzung von additiv gefertigten Werkstoffen in der Umformtechnik erst seit vergleichsweise kurzer Zeit statt, was sich in fehlenden Möglichkeiten zur Materialmodellierung äußert. Folglich beschränkt sich die Abbildung des Materialverhaltens auf simple Ansätze. Zur Absicherung wurde daher eine Vorgehensweise genutzt, die Experiment und numerische Simulation kombiniert.

Trotz der erfolgsversprechenden Möglichkeiten von Hybridbauteilen bestehend aus Blechsubstraten und Additivkomponenten gibt es Einschränkungen bei deren Fertigung. Besonders mit Blick auf die Umformoperation finden sich mehrere Bereiche, die das Materialverhalten beeinflussen. Dazu zählen der Additivprozess mit den dabei genutzten Parametern, werkstoffliche Eigenschaften, die sich für die beiden Komponenten aufgrund des Herstellungsverfahrens ergeben, die Einstellungen während des Umformprozesses sowie die geometrischen Eigenschaften der aufgebrachten Funktionselemente. In Bezug auf die Flexibilität des Additivprozesses bezogen ist die geometrische Gestaltung und deren Einfluss ein wichtiger Aspekt bei der Umformung der Hybridbauteile. Dennoch kann mithilfe der lokal angepassten Werkstoffmodellierung ein präziseres Ergebnis erzielt werden. Gegenüber einem Blech ohne Funktionselemente bewirkt dessen Anwesenheit eine Störung des Materialflusses. Am Rand der Additivkomponente bilden sich Spannungsspitzen, die wiederum in gesteigerten Blechdurchdünnungen resultieren. Eine mögliche Folge ist das verfrüht eintretende Versagen durch Rissbildung. Die Konzentration dieser Belastungen ist auf die lokale Versteifung zurückzuführen. Als Folge dessen nimmt das Funktionselement sowie das darunterliegende Blech kaum an der Umformung teil. Zusätzlich wird aufgrund der Versteifung das Blech aufgespannt und legt sich nicht an der Stempeloberfläche an, was in einem Kontaktverlust resultiert. Auf Basis der untersuchten Varianten zeigt sich, dass die versteifende Wirkung von dem Durchmesser des Funktionselementes abhängt. Größere Durchmesser bewirken eine stärkere Versteifung und höhere Konzentration der Belastung. Bezüglich der Höhe der Funktionselemente konnte kein Einfluss nachgewiesen werden, was auf eine bereits ausreichende Wirkung bei einer Höhe von 3 mm zurückzuführen ist. Wegen des belastungskonzentrierenden Effekts der Funktionskörper wirkt sich eine Steigerung deren Anzahl negativ auf das Umformverhalten aus. Dass grundsätzlich mit einer steigenden Anzahl auch die Umformbarkeit abnimmt, kann widerlegt werden. Vielmehr sind die Platzierung und Anordnung der Additivkörper entscheidend. Eine Platzierung inner-

halb von Bereichen, die durch eine starke Belastung gekennzeichnet sind, bewirkt eine umso größere Belastung. Dagegen ist der Einfluss bei einer Platzierung in unkritischeren Bereiche umso geringer. Um eine Aussage für gängige Blechumformverfahren treffen zu können, wurden die Einflüsse am Beispiel eines Tiefziehprozesses mit angepasster Werkzeuggeometrie untersucht. Auf diese Weise konnte der Einfluss der Funktionselemente in verschiedenen Spannungszuständen analysiert werden. Die Platzierung in der Mitte des Bauteils, die durch eine biaxiale Zugbelastung gekennzeichnet ist, erwies sich als am wenigsten kritisch. Nahe dem Zug-Druck-Bereich ist die spannungskonzentrierende Wirkung ebenfalls geringer. Als besonders kritisch ergibt sich der Bereich der ebenen Dehnung. Diese Einstufungen sind in jedem Fall Abhängig von der Größe der jeweiligen Belastung. Dennoch lässt sich daraus für die Verwendung von Hybridbauteilen in anderen Blechumformverfahren eine grundsätzliche Tendenz ableiten.

Weitere Forschung im Bereich der Umformung additiv gefertigter Bauteile und Hybridbauteile mit Additivkomponenten finden sich unter anderem in der numerischen Simulation. So sind die Möglichkeiten zur Abbildung des Materialverhaltens von additiv gefertigten Werkstoffen bisher stark begrenzt. Im Hinblick auf die Modellierung der Anisotropie, die durch den Additivprozess entsteht, findet sich großes Potential. Weiterhin stellt auch die Modellierung der aus dem Additivprozess resultierenden Wärmeinflusszone im Blechsubstrat einen Forschungsschwerpunkt dar. Insbesondere vor dem Hintergrund der steigenden Nutzung additiv gefertigter oder hybriden Halbzeugen. Weiterhin können die in dieser Arbeit für abstrahierte vereinfachte Geometrien erarbeiteten Erkenntnisse auf konkrete Bauteile mit belastungsangepassten Funktionselementen übertragen werden. Weiterhin kann die Nutzung des Einflusses von Additivstrukturen zur gezielten Materialflusststeuerung untersucht werden.

## 9 Summary and outlook

Against the background of current developments, the increasing demands for individualization and sustainability while maintaining cost-effectiveness are confronting conventional manufacturing processes with new challenges. Hybrid components, which consist of sheet metal substrates and additively manufactured components, are one way of expanding the process limits in the field of forming technology. During the fabrication and forming of hybrid parts, interactions exist between the individual processes due to the production sequence. In order to exploit the full potential of hybrid parts, these cause-effect relationships must be investigated. For this reason, a comprehensive analysis of the influences was carried out in this work using the austenitic stainless steel 1.4404 as an example, covering the various sections along the process chain. To begin with, a process strategy for the additive manufacturing of functional elements on sheet metal substrates was developed. Subsequently, the mechanical properties of the sheet metal and additive components were compared in an investigative manner as a function of temperature and stress state. The previously determined relationships were then combined in an analysis of the influencing mechanisms, which included numerical simulation of the deep drawing process with local material model and physical forming experiments with adapted tool geometry. Based on three hypotheses, the influence of additively manufactured functional elements on the material flow of hybrid parts in forming processes was comprehensively investigated.

The additive manufacturing process is characterized by a large number of influencing factors. Since the buildup on sheet metal substrates changes the conditions compared to conventional additive manufacturing, the investigations were focused on this aspect. By varying the factors of laser power, scanning speed and focus position, successive process strategies for buildup on sheet metal substrates were determined. For this purpose, single weld tracks, volumetric specimens and finally characterization samples were produced. In the geometric evaluation of the single track cross-sections, the laser power and scanning speed proved to be the greatest influences and, in addition, their interaction can be confirmed. The two factors are opposed to each other, since increasing power increases the energy input, but increasing scan speed reduces the time of interaction for each point. This influence has also been demonstrated in the analysis of volumetric test specimens, which include measurement of relative density from micrographs, hardness measurements, and bond strength testing under shear. The relative density, due to its correlation with the joint strength,

can be used as a reference value for the evaluation of the selected parameters. In principle, the combination of power, speed and focus position should be selected in such a way that densities above 99.5 % are achieved. The hardness measurement of the volumetric test specimens shows the anisotropy of the additive material, which is attributed to thermal conditions during the process. The mechanical properties of the additively produced characterization specimens were determined in comparison with the sheet base material.

The differences between sheet and additive materials are based on the manufacturing processes and the resulting microstructures. While the rolling process at elevated temperatures gives the sheet a fine-grained microstructure, this is achieved in the additive process by the high cooling rates. Both materials exhibit anisotropic properties. On the one hand, rolling causes an elongation of the grains, on the other hand, the buildup and the cyclically input of heat from the additive process generate a temperature gradient in the buildup direction, along which dendrites are formed. Although both materials have an austenitic microstructure, the different grain structures lead to different mechanical properties under tensile load. The comparison shows that the sheet material has a lower yield strength, undergoes greater strain hardening and can achieve higher degrees of deformation than the additive material. With regard to forming processes, the sheet material therefore proves to be more suitable, whereas the additive material appears to be advantageous for applications due to its higher strength and temperature stability. In contrast, the differences under compressive stress are smaller. Only for degrees of deformation smaller than 0.15 is the yield strength of the conventionally produced specimens – in contrast to tensile loading – higher than that of the additively produced specimens. Regardless of the type of load, after forming there are irregularities on the specimen surfaces of the additive bodies that have no tool contact. These are due to slippage on the thermally induced dendrites and prevent technical use of the surfaces. When combining materials, as is the case with hybrid components, these differences are decisive for the behavior in the forming process and in an application. Therefore, a precise modeling of the material properties and their differences is crucial for a reliable numerical representation. Due to the long-term use of sheet metal materials in forming technology and simulation, there are numerous possibilities to model the material behavior from the beginning of elastic-plastic deformation up to failure. On the other hand, the use of additively manufactured materials in forming technology has only been taking place for a comparatively short time, which is reflected in the lack of possibilities for material modeling. Consequently, the representation of material behavior

is limited to basic methods. For this reason, an approach combining experiment and numerical simulation was used.

Despite the promising possibilities of hybrid parts consisting of sheet metal substrates and additively manufactured components, there are constraints in their production. Especially with regard to the forming operation, there are several areas that influence the material behavior. These include the additive process and the parameters used, the material properties of the two components resulting from the manufacturing process, the settings during the forming process and the geometric properties of the functional elements placed on the parts. In terms of the flexibility of the additive process, the geometric design and its influence is an important aspect in the forming of hybrid components. Nevertheless, a more precise result can be achieved with the use of locally adapted material modeling. Compared to a sheet without functional elements, their presence causes a disturbance of the material flow. Stress peaks form at the edge of the additive component, which in turn result in increased sheet thinning. A possible consequence is premature failure due to cracking. The concentration of these stresses is due to local stiffening. As a result, the functional element and the underlying sheet hardly participate in the deformation. In addition, due to the stiffening, the sheet is spread apart and loses contact with the punch surface. On the basis of the variants investigated, it can be seen that the stiffening effect depends on the diameter of the functional element. Larger diameters result in greater stiffening and higher concentration of the load. With regard to the height of the functional elements, no influence could be demonstrated, which can be attributed to an already sufficient effect at a height of 3 mm. Because of the load-concentrating effect of the functional elements, an increase in their number has a negative effect on the forming behavior. It can be proven wrong that the formability decreases with an increasing number of functional bodies. Rather, the placement and arrangement of the additive components are decisive. Placement within areas characterized by high stresses results in all the greater load. By contrast, the influence is all the less if they are placed in less critical areas. In order to be able to draw conclusions for common sheet metal forming processes, the influences were investigated using the example of a deep drawing process with adapted tool geometry. In this way, the influence of the functional elements in different stress states could be analyzed. Placement in the center of the component, which is characterized by a biaxial tensile load, proved to be the least critical. The stress-concentrating effect is also lower near the tensile-compressive range. The area of plane strain is particularly critical. These classifications are in any case dependent on the magnitude of the load in each case. Nevertheless, a basic tendency can be

derived from this for the use of hybrid components in other sheet metal forming processes.

Further research in the field of forming additively manufactured and hybrid parts with additive components can be found, among other things, in numerical simulation. For example, the possibilities for modeling the material behavior of additively manufactured materials have so far been severely limited. With regard to the modeling of the anisotropy, which results from the additive process, great potential may be found. Furthermore, the modeling of the heat-affected zone in the sheet substrate resulting from the additive process also represents a research focus. Especially against the background of the increasing use of additively manufactured or hybrid semi-finished products. Furthermore, the findings obtained in this work for abstracted simplified geometries can be transferred to specific components with load-adapted functional elements. Furthermore, the use of the influence of additive structures for targeted material flow control can be investigated.

# Anhang

Tabelle 6: Vollfaktorieller Versuchsplan zur Herstellung von volumenhaften additiv gefertigten Probekörpern

Parameter	$P_L$ in W	$v_S$ in mm/s	$f_F$ in mm	$E_V$ in J/mm <sup>3</sup>
1	200	1100	-0,2	33
2	200	1100	-0,35	33
3	200	1100	-0,5	33
4	200	800	-0,2	45
5	200	800	-0,35	45
6	200	800	-0,5	45
7	350	1100	-0,2	58
8	350	1100	-0,35	58
9	350	1100	-0,5	58
10	200	500	-0,2	73
11	200	500	-0,35	73
12	200	500	-0,5	73
13	350	800	-0,2	80
14	350	800	-0,35	80
15	350	800	-0,5	80
16	500	1100	-0,2	83
17	500	1100	-0,35	83
18	500	1100	-0,5	83
19	500	800	-0,2	114
20	500	800	-0,35	114
21	500	800	-0,5	114
22	350	500	-0,2	127
23	350	500	-0,35	127
24	350	500	-0,5	127
25	500	500	-0,2	182
26	500	500	-0,35	182
27	500	500	-0,5	182

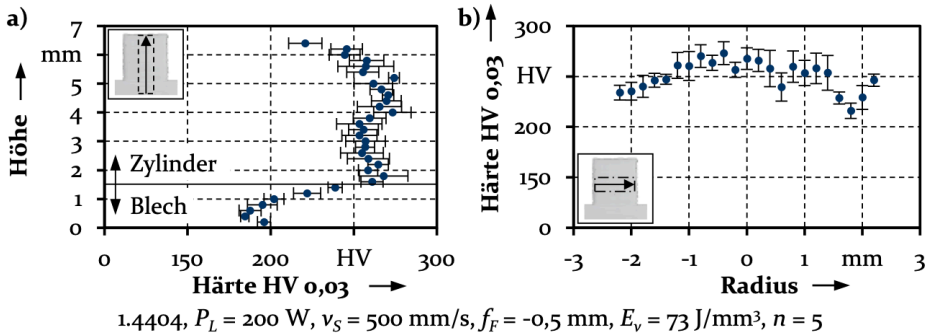


Abbildung 75: Härteverteilung der volumenhaften Probekörper a) in Baurichtung (axial) und b) senkrecht (radial) dazu für Parametersatz 12

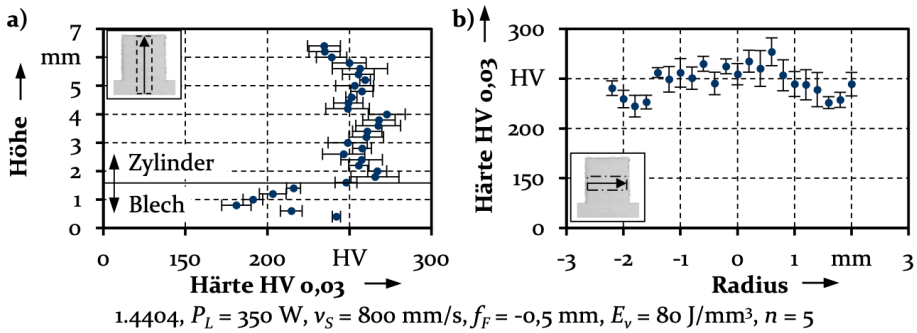


Abbildung 76: Härteverteilung der volumenhaften Probekörper a) in Baurichtung (axial) und b) senkrecht (radial) dazu für Parametersatz 15

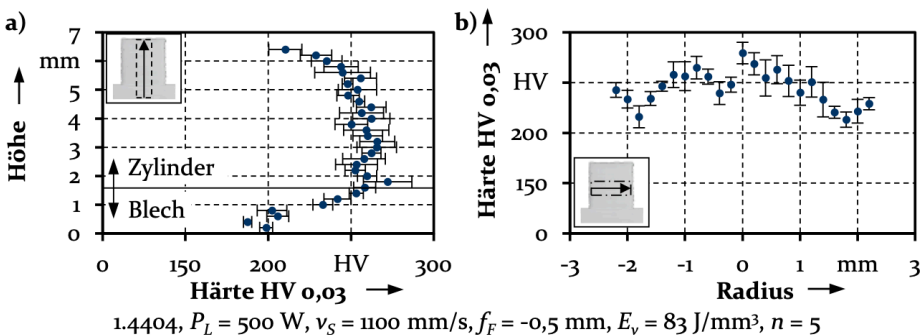


Abbildung 77: Härteverteilung der volumenhaften Probekörper a) in Baurichtung (axial) und b) senkrecht (radial) dazu für Parametersatz 18

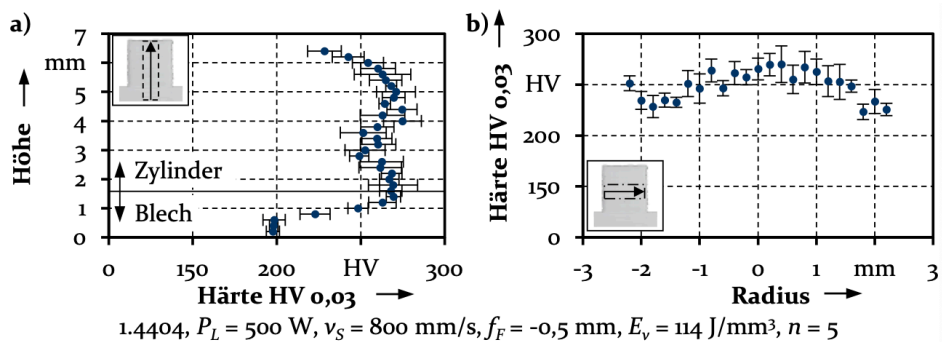


Abbildung 78: Härteverteilung der volumenhaften Probekörper a) in Baurichtung (axial) und b) senkrecht (radial) dazu für Parametersatz 21



## Literaturverzeichnis

- [1] Ford, H.; Crowther, S.; Woodrow Wilson Collection: My Life and Work. Garden City, N.Y.: Doubleday, Page & company, 1922
- [2] Kimes, B. R.: Standard catalog of american cars - 1805-1942. Iola: Krause Publications, 1996, 3th ed. Auflage
- [3] [https://www.focus.de/auto/news/aus-vielfalt-wird-unuebersichtlich-keit-zahl-der-pkw-varianten-waechst-weiter\\_id\\_2249807.html](https://www.focus.de/auto/news/aus-vielfalt-wird-unuebersichtlich-keit-zahl-der-pkw-varianten-waechst-weiter_id_2249807.html), (aufgerufen am 27.04.2022)
- [4] Merklein, M.; Junker, D.; Schaub, A.; Neubauer, F.: Hybrid Additive Manufacturing Technologies – An Analysis Regarding Potentials and Applications. Physics Procedia 83(2016), S. 549–559
- [5] Tseng, M. M.; Jiao, J.: Mass Customization. In: Salvendy, G. (Hrsg.): Handbook of Industrial Engineering. John Wiley & Sons, Inc, 2001, S. 684–709
- [6] Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft: Band 1: Grundlagen. Berlin, Heidelberg: Springer, 1984, 2., völlig neubearb. Aufl. Auflage
- [7] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 4 - Umformen: VDI-Buch, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, 5., neu bearbeitete Auflage Auflage
- [8] Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.: Additive manufacturing technologies - 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing. New York, Heidelberg, Dodrecht, London: Springer, 2015, Second Edition Auflage
- [9] Frazier, W. E.: Metal Additive Manufacturing: A Review. Journal of Materials Engineering and Performance 23(2014)6, S. 1917–1928
- [10] Pragma, J.P.M.; Sampaio, R.F.V.; Bragança, I.M.F.; Silva, C.M.A.; Martins, P.A.F.: Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. Advances in Industrial and Manufacturing Engineering 2(2021)5, S. 1–21
- [11] Lorenz, K. A.; Jones, J. B.; Wimpenny, D. I.; Jackson, M. R.: A Review on Hybrid Manufacturing: 2014 International Solid Freeform Fabrication Symposium, S. 96–108
- [12] Lachmayer, R.; Lippert, R. B.; Kaieler, S.: Additive Serienfertigung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018

- [13] Brückner, F.; Leyens, C.: Hybrid laser manufacturing. In: Brandt, M. (Hrsg.): Laser additive manufacturing - Materials, design, technologies, and applications. Elsevier, 2017
- [14] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 5. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015
- [15] Bambach, M. D.; Bambach, M.; Sviridov, A.; Weiss, S.: New process chains involving additive manufacturing and metal forming – a chance for saving energy? *Procedia Engineering* 207(2017), S. 1176–1181
- [16] DIN EN ISO/ASTM 52900:2017: Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie.
- [17] Vafadar, A.; Guzzomi, F.; Rassau, A.; Hayward, K.: Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges. *Applied Sciences* 11(2021)3, S. 1213
- [18] Brandt, M. (Hrsg.): Laser additive manufacturing - Materials, design, technologies, and applications. Amsterdam: Elsevier, 2017
- [19] Guo, N.; Leu, M. C.: Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering* 8(2013)3, S. 215–243
- [20] Ahn, D.-G.: Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 8(2021)2, S. 703–742
- [21] Vock, S.; Klöden, B.; Kirchner, A.; Weißgärber, T.; Kieback, B.: Powders for powder bed fusion: a review. *Progress in Additive Manufacturing* 4(2019)4, S. 383–397
- [22] Calignano, F.; Lorusso, M.; Pakkanen, J.; Trevisan, F.; Ambrosio, E. P.; Manfredi, D.; Fino, P.: Investigation of accuracy and dimensional limits of part produced in aluminum alloy by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88(2017)1-4, S. 451–458
- [23] Herzog, D.; Seyda, V.; Wycisk, E.; Emmelmann, C.: Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia* 117(2016)3, S. 371–392
- [24] Scipioni Bertoli, U.; Guss, G.; Wu, S.; Matthews, M. J.; Schoenung, J. M.: In-situ characterization of laser-powder interaction and cooling rates through high-speed imaging of powder bed fusion additive manufacturing. *Materials & Design* 135(2017)3, S. 385–396

- [25] Zheng, B.; Zhou, Y.; Smugeresky, J. E.; Schoenung, J. M.; Lavernia, E. J.: Thermal Behavior and Microstructural Evolution during Laser Deposition with Laser-Engineered Net Shaping: Part I. Numerical Calculations. *Metallurgical and Materials Transactions A* 39(2008)9, S. 2228–2236
- [26] Song, B.; Zhao, X.; Li, S.; Han, C.; Wei, Q.; Wen, S.; Liu, J.; Shi, Y.: Differences in microstructure and properties between selective laser melting and traditional manufacturing for fabrication of metal parts: A review. *Frontiers of Mechanical Engineering* 10(2015)2, S. 111–125
- [27] Bourell, D.; Kruth, J. P.; Leu, M.; Levy, G.; Rosen, D.; Beese, A. M.; Clare, A.: Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals* 66(2017)2, S. 659–681
- [28] Hitzler, L.; Merkel, M.; Hall, W.; Öchsner, A.: A Review of Metal Fabricated with Laser- and Powder-Bed Based Additive Manufacturing Techniques: Process, Nomenclature, Materials, Achievable Properties, and its Utilization in the Medical Sector. *Advanced Engineering Materials* 20(2018)5, S. 1700658
- [29] Dietrich, J.: *Praxis der Umformtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
- [30] Gottstein, G.: *Physikalische Grundlagen der Materialkunde: Springer-Lehrbuch*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, 3. Aufl. 2007 Auflage
- [31] Weißbach, W.: *Werkstoffkunde - Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*: Springer eBook Collection, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012, 18., überarbeitete Auflage Auflage
- [32] Doege, E.; Behrens, B.-A.: *Handbuch Umformtechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016
- [33] Lange, K. (Hrsg.): *Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft: Band 3: Blechbearbeitung*. Berlin: Springer, 1990, 2., völlig neubearb. und erw. Aufl. Auflage
- [34] Banabic, D.: *Sheet Metal Forming Processes*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010
- [35] Tresca, H.: Mémoire sur l'écoulement des corps solides soumis à de fortes pressions. *Comptes Rendus Academie des Sciences* 59(1864)

- [36] von Mises, R.: Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen 4(1913), S. 582–592
- [37] Hill, R.: A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences 193(1948)1033, S. 281–297
- [38] Barlat, F.; Brem, J. C.; Yoon, J. W.; Chung, K.; Dick, R. E.; Lege, D. J.; Pourboghrat, F.; Choi, S.-H.; Chu, E.: Plane stress yield function for aluminum alloy sheets—part 1: theory. International Journal of Plasticity 19(2003)9, S. 1297–1319
- [39] Cazacu, O.; Barlat, F.: A criterion for description of anisotropy and yield differential effects in pressure-insensitive metals. International Journal of Plasticity 20(2004)11, S. 2027–2045
- [40] Goodwin, G. M.: Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop 1968 Automotive Engineering Congress and Exposition SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1968
- [41] Keeler, S. P.: Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches. ASM Transactions Quarterly 56(1963)11
- [42] Siegert, K.: Blechumformung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015
- [43] Ludwik, P.: Elemente der Technologischen Mechanik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1909
- [44] Hollomon, J. H.: Tensile Deformation. Transactions of the Metallurgical Society of AIME 162(1945), S. 268–290
- [45] Voce, E.: The relationship between stress and strain for homogeneous deformation. Journal of the Institute of Metals 74(1948), S. 537–562
- [46] Swift, H. W.: Plastic instability under plane stress. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 1(1952)1, S. 1–18
- [47] Hockett, J. E.; Sherby, O. D.: Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 23(1975)2, S. 87–98
- [48] Ghosh, A.K.: Tensile instability and necking in materials with strain hardening and strain-rate hardening. Acta Metallurgica 25(1977)12, S. 1413–1424

- [49] Nemat-Nasser, S.; Guo, W.-G.; Nesterenko, V. F.; Indrakanti, S. S.; Gu, Y.-B.: Dynamic response of conventional and hot isostatically pressed Ti-6Al-4V alloys: experiments and modeling: *Mechanics of Materials*, 2001, S. 425-439
- [50] Bajaj, P.; Hariharan, A.; Kini, A.; Kürnsteiner, P.; Raabe, D.; Jäggle, E. A.: Steels in additive manufacturing: A review of their microstructure and properties. *Materials Science and Engineering: A* 772 (2020), 138633
- [51] Roos, E.; Maile, K.; Seidenfuß, M.: *Werkstoffkunde für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [52] Wang, Y. M.; Voisin, T.; McKeown, J. T.; Ye, J.; Calta, N. P.; Li, Z.; Zeng, Z.; Zhang, Y.; Chen, W.; Roehling, T. T.; Ott, R. T.; Santala, M. K.; Depond, P. J.; Matthews, M. J.; Hamza, A. V.; Zhu, T.: Additively manufactured hierarchical stainless steels with high strength and ductility. *Nature materials* 17(2018)1, S. 63-71
- [53] Röttger, A.; Boes, J.; Theisen, W.; Thiele, M.; Esen, C.; Edelmann, A.; Hellmann, R.: Microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel processed by different SLM devices. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 108(2020)3, S. 769-783
- [54] Yadroitsev, I.; Yadroitsava, I.; Smurov, I.: Strategy of fabrication of complex shape parts based on the stability of single laser melted track SPIE LASESPIE, 2011, 79210C
- [55] Spierings, A. B.; Herres, N.; Levy, G.: Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts. *Rapid Prototyping Journal* 17(2011)3, S. 195-202
- [56] Costa, L.; Vilar, R.: Laser powder deposition. *Rapid Prototyping Journal* 15(2009)4, S. 264-279
- [57] Yadollahi, A.; Shamsaei, N.; Thompson, S. M.; Seely, D. W.: Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering: A* 644(2015), S. 171-183
- [58] Guo, N.; Leu, M. C.: Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering* 8(2013)3, S. 215-243

- [59] Kruth, J.-P.; Mercelis, P.; van Vaerenbergh, J.; Froyen, L.; Rombouts, M.: Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* 11(2005)1, S. 26–36
- [60] Meier, H.; Haberland, C.: Experimental studies on selective laser melting of metallic parts. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 39(2008)9, S. 665–670
- [61] Tolosa, I.; Garciandía, F.; Zubiri, F.; Zapirain, F.; Esnaola, A.: Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by “selective laser melting”, following different manufacturing strategies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 51(2010)5-8, S. 639–647
- [62] Merkt, S. J.: Qualifizierung von generativ gefertigten Gitterstrukturen für maßgeschneiderte Bauteilfunktionen. Dissertation, RWTH Aachen, 2012
- [63] Zhang, B.; Dembinski, L.; Coddet, C.: The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder. *Materials Science and Engineering: A* 584(2013), S. 21–31
- [64] Leuders, S.; Lieneke, T.; Lammers, S.; Tröster, T.; Niendorf, T.: On the fatigue properties of metals manufactured by selective laser melting – The role of ductility. *Journal of Materials Research* 29(2014)17, S. 1911–1919
- [65] Haase, C.; Bültmann, J.; Hof, J.; Ziegler, S.; Bremen, S.; Hinke, C.; Schwedt, A.; Prah, U.; Bleck, W.: Exploiting Process-Related Advantages of Selective Laser Melting for the Production of High-Manganese Steel. *Materials (Basel, Switzerland)* 10(2017)1
- [66] Saeidi, K.; Kevetkova, L.; Lofaj, F.; Shen, Z.: Novel ferritic stainless steel formed by laser melting from duplex stainless steel powder with advanced mechanical properties and high ductility. *Materials Science and Engineering: A* 665(2016), S. 59–65
- [67] Davidson, K.; Singamneni, S.: Selective Laser Melting of Duplex Stainless Steel Powders: An Investigation. *Materials and Manufacturing Processes* 31(2016)12, S. 1543–1555
- [68] Rafi, H. K.; Starr, T. L.; Stucker, B. E.: A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti–6Al–4V and 15–5 PH stainless steel parts made by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69(2013)5-8, S. 1299–1309

- [69] Murr, L. E.; Martinez, E.; Hernandez, J.; Collins, S.; Amato, K. N.; Gaytan, S. M.; Shindo, P. W.: Microstructures and Properties of 17-4 PH Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting. *Journal of Materials Research and Technology* 1(2012)3, S. 167–177
- [70] <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/dmls-metal-materials>, (aufgerufen am 18.03.2021)
- [71] Spierings, A. B.; Starr, T. L.; Wegener, K.: Fatigue performance of additive manufactured metallic parts. *Rapid Prototyping Journal* 19(2013)2, S. 88–94
- [72] DIN EN 10088-3:2014: Nichtrostende Stähle - Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung.
- [73] Leyens, C.; Peters, M.: Titanium and titanium alloys - Fundamentals and applications. Weinheim, Chichester: Wiley-VCH, 2003
- [74] Peters, M.; Clemens, H.: Titan, Titanlegierungen und Titanaluminide – Basis für innovative Anwendungen. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 155(2010)9, S. 402–408
- [75] Gorse, S.; Hutchinson, C.; Gouné, M.; Banerjee, R.: Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys. *Science and technology of advanced materials* 18(2017)1, S. 584–610
- [76] Lütjering, G.; Williams, J. C.: Titanium: Engineering materials and processes, Berlin, New York: Springer, 2007, 2nd ed. Auflage
- [77] Dumontet, N.; Connétable, D.; Malard, B.; Viguier, B.: Elastic properties of the  $\alpha'$  martensitic phase in the Ti-6Al-4V alloy obtained by additive manufacturing. *Scripta Materialia* 167(2019), S. 115–119
- [78] Vrancken, B.; Thijs, L.; Kruth, J.-P.; Van Humbeeck, J.: Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds* 541(2012), S. 177–185
- [79] Barbas, A.; Bonnet, A.-S.; Lipinski, P.; Pesci, R.; Dubois, G.: Development and mechanical characterization of porous titanium bone substitutes. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 9(2012), S. 34–44

- [80] Chu, W.-S.; Kim, C.-S.; Lee, H.-T.; Choi, J.-O.; Park, J.-I.; Song, J.-H.; Jang, K.-H.; Ahn, S.-H.: Hybrid manufacturing in micro/nano scale: A Review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 1(2014)1, S. 75–92
- [81] Schuh, G.; Kreysa, J.; Orilski, S.: Roadmap „Hybride Produktion“. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104(2009)5, S. 385–391
- [82] Zhu, Z.; Dhokia, V. G.; Nassehi, A.; Newman, S. T.: A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 26(2013)7, S. 596–615
- [83] Klocke, F.; Roderburg, A.; Zeppenfeld, C.: Design methodology for hybrid production processes. *Procedia Engineering* 9(2011), S. 417–430
- [84] Lauwers, B.; Klocke, F.; Klink, A.; Tekkaya, A. E.; Neugebauer, R.; Mcintosh, D.: Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals* 63(2014)2, S. 561–583
- [85] Lian, H.; Guo, Z.; Huang, Z.; Tang, Y.; Song, J.: Experimental Research of Al6061 on Ultrasonic Vibration Assisted Micro-Milling. *Procedia CIRP* 6(2013)05, S. 561–564
- [86] Rosen, C.-J.: *Laserunterstützte Fräsbearbeitung hochfester Werkstoffe*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2011: Ergebnisse aus der Produktionstechnik Produktmaschinen, Bd. 2012,1, Aachen: Apprimus-Verl., 2012, 1. Aufl. Auflage
- [87] Klaus, A.; Becker, D.; Kleiner, M.: Three-Dimensional Curved Profile Extrusion – First Results on the Influence of Gravity. *Advanced Materials Research* 10(2006), S. 5–12
- [88] Sealy, M. P.; Madireddy, G.; Williams, R. E.; Rao, P.; Toursangsaraki, M.: Hybrid Processes in Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 140(2018)6, S. 79
- [89] Schneider, J.; Seidel, A.; Gumpinger, J.; Riede, M.; López, E.; Brueckner, F.; Leyens, C.: Advanced manufacturing approach via the combination of selective laser melting and laser metal deposition. *Journal of Laser Applications* 31(2019)2, 22317
- [90] Hafenecker, J.; Kuball, C.-M.; Rothfelder, R.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Surface modification of additively manufactured parts by forming. *ESAFORM 2021*, (2021)

- [91] Kickelbick, G. (Hrsg.): Hybrid Materials. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006
- [92] Ashby, M. F.; Bréchet, Y.J.M.: Designing hybrid materials. *Acta Materialia* 51(2003)19, S. 5801–5821
- [93] Ashby, M.: Hybrid Materials to Expand the Boundaries of Material-Property Space. *Journal of the American Ceramic Society* 94(2011), S. 3–14
- [94] Behrens, B.-A.; Kosch, K.-G.: Development of the heating and forming strategy in compound forging of hybrid steel-aluminum parts. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 42(2011)11, S. 973–978
- [95] Leary, M.: Surface roughness optimisation for selective laser melting (SLM): accommodating relevant and irrelevant surfaces. In: Brandt, M. (Hrsg.): *Laser additive manufacturing - Materials, design, technologies, and applications*. Elsevier, 2017
- [96] Cao, J.; Brinksmeier, E.; Fu, M.; Gao, R. X.; Liang, B.; Merklein, M.; Schmidt, M.; Yanagimoto, J.: Manufacturing of advanced smart tooling for metal forming. *CIRP Annals* 68(2019)2, S. 605–628
- [97] Edwards, P.; Ramulu, M.: Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A* 598(2014), S. 327–337
- [98] Mower, T. M.; Long, M. J.: Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Materials Science and Engineering: A* 651(2016), S. 198–213
- [99] Brandl, E.; Schoberth, A.; Leyens, C.: Morphology, microstructure, and hardness of titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by wire-feed additive layer manufacturing (ALM). *Materials Science and Engineering: A* 532(2012), S. 295–307
- [100] Alrbaey, K.; Wimpenny, D.; Tosi, R.; Manning, W.; Moroz, A.: On Optimization of Surface Roughness of Selective Laser Melted Stainless Steel Parts: A Statistical Study. *Journal of Materials Engineering and Performance* 23(2014)6, S. 2139–2148
- [101] dos Santos Solheid, J.; Jürgen Seifert, H.; Pfleging, W.: Laser surface modification and polishing of additive manufactured metallic parts. *Procedia CIRP* 74(2018), S. 280–284

- [102] Ünsal, I.; Hama-Saleh, R.; Sviridov, A.; Bambach, M.; Weisheit, A.; Schleifenbaum, J. H.: Mechanical properties of sheet metal components with local reinforcement produced by additive manufacturing. In: Fratini, L.; Di Lorenzo, R.; Buffa, G.; Ingarao, G. (Hrsg.): AIP Publishing, 2018, 160028
- [103] Krefß, M., Bartels, D., Schmidt, M., & Merklein, M. (2022). Material Characterization of Hybrid Components Manufactured by Laser-Based Directed Energy Deposition on Sheet Metal Substrates. In Proceedings of the The 25th International Conference on Material Forming (ESAFORM 2022). Braga, PT.
- [104] Hama-Saleh, R.; Weisheit, A.; Schleifenbaum, J. H.; Ünsal, I.; Sviridov, A.; Bambach, M.: Formability Analysis of Micro-Alloyed Sheet Metals Reinforced by Additive Manufacturing. *Procedia Manufacturing* 47(2020)2, S. 1023–1028
- [105] Kruse, J.; Mildebrath, M.; Behrens, B.-A.; Stonis, M.; Hassel, T.: Cross-wedge rolling of PTA-welded hybrid steel billets with rolling bearing steel and hard material coatings Proceedings of the 22nd International Esaform Conference on Material Forming: Esaform 2019 AIP Publishing, 2019, 40019
- [106] Behrens, B.-A.; Chugreev, A.; Matthias, T.; Poll, G.; Pape, F.; Coors, T.; Hassel, T.; Maier, H.; Mildebrath, M.: Manufacturing and Evaluation of Multi-Material Axial-Bearing Washers by Tailored Forming. *Metals* 9(2019)2, 232
- [107] Behrens, B.-A.; Diefenbach, J.; Chugreeva, A.; Kahra, C.; Herbst, S.; Nürnberger, F.: Tailored Forming of Hybrid Bevel Gears with Integrated Heat Treatment. *Procedia Manufacturing* 47(2020)4, S. 301–308
- [108] Bambach, M.; Sviridov, A.; Weisheit, A.: Stiffness management of sheet metal parts using laser metal deposition. In: Brabazon, D.; Naher, S.; Ahad, I. U. (Hrsg.): Proceedings of the 20th International ESAFORM Conference on Material Forming - ESAFORM 2017 : Dublin, Ireland, 26-28 April 2017. AIP Publishing, 2017, 080014
- [109] Bambach, M.; Sviridov, A.; Weisheit, A.; Schleifenbaum, J.: Case Studies on Local Reinforcement of Sheet Metal Components by Laser Additive Manufacturing. *Metals* 7(2017)4, 113

- [110] Ambrogio, G.; Gagliardi, F.; Muzzupappa, M.; Filice, L.: Additive-incremental forming hybrid manufacturing technique to improve customised part performance. *Journal of Manufacturing Processes* 37(2019), S. 386–391
- [111] Schulte, R.; Papke, T.; Lechner, M.; Merklein, M.: Additive Manufacturing of Tailored Blank for Sheet-Bulk Metal Forming Processes. In: Myoung-Gyu Lee; Daeyong Kim; Jung Han Song; Ji Hoon Kim (Hrsg.): *IOP Conference Series*, 2020, 12034
- [112] Semiatin, S. L.; Kobryn, P. A.; Roush, E. D.; Furrer, D. J.; Howson, T. E.; Boyer, R. R.; Chellman, D. J.: Plastic flow and microstructure evolution during thermomechanical processing of laser-deposited Ti-6Al-4V preforms. *Metallurgical and Materials Transactions A* 32(2001)7, S. 1801–1811
- [113] Bambach, M.; Sizova, I.; Silze, F.; Schnick, M.: Hot workability and microstructure evolution of the nickel-based superalloy Inconel 718 produced by laser metal deposition. *Journal of Alloys and Compounds* 740(2018), S. 278–287
- [114] Silva, C. M. A.; Bragança, I. M. F.; Cabrita, A.; Quintino, L.; Martins, P. A. F.: Formability of a wire arc deposited aluminium alloy. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 39(2017)10, S. 4059–4068
- [115] Sizova, I.; Bambach, M.: Hot workability and microstructure evolution of preforms for forgings produced by additive manufacturing. *Procedia Engineering* 207(2017), S. 1170–1175
- [116] Zhang, Q.; Liang, Z.-l.; Cao, M.; Liu, Z.-f.; Zhang, A.-f.; Lu, B.-h.: Microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy prepared by selective laser melting combined with precision forging. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 27(2017)5, S. 1036–1042
- [117] Bambach, M.; Sizova, I.; Geisen, O.; Fergani, O.: Comparison of the Hot Working Behavior of Wrought, Selective Laser Melted and Electron Beam Melted Ti-6Al-4V. *Materials Science Forum* 941(2018), S. 2030–2036
- [118] Habibiyan, A.; Hanzaki, A. Z.; Abedi, H. R.: An investigation into microstructure and high-temperature mechanical properties of selective laser-melted 316L stainless steel toward the development of hybrid Ampliforge process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 110(2020)1-2, S. 383–394

- [119] Jiang, J.; Hooper, P.; Li, N.; Luan, Q.; Hopper, C.; Ganapathy, M.; Lin, J.: An integrated method for net-shape manufacturing components combining 3D additive manufacturing and compressive forming processes. *Procedia Engineering* 207(2017), S. 1182–1187
- [120] Pruncu, C. I.; Hopper, C.; Hooper, P. A.; Tan, Z.; Zhu, H.; Lin, J.; Jiang, J.: Study of the Effects of Hot Forging on the Additively Manufactured Stainless Steel Preforms. *Journal of Manufacturing Processes* 57(2020), S. 668–676
- [121] Petrousek, P.; Kvackaj, T.; Kocisko, R.; Bidulska, J.; Luptak, M.; Manfredi, D.; Actis Grande, M.; Bidulsky, R.: Influence of cryorolling on properties of L-PBF 316l stainless steel tested at 298K and 77K. *Acta Metallurgica Slovaca* 25(2019)4, S. 283–290
- [122] Colegrove, P. A.; Coules, H. E.; Fairman, J.; Martina, F.; Kashoob, T.; Mamash, H.; Cozzolino, L. D.: Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling. *Journal of Materials Processing Technology* 213(2013)10, S. 1782–1791
- [123] Martina, F.; Colegrove, P. A.; Williams, S. W.; Meyer, J.: Microstructure of Interpass Rolled Wire + Arc Additive Manufacturing Ti-6Al-4V Components. *Metallurgical and Materials Transactions A* 46(2015)12, S. 6103–6118
- [124] Zhang, H.; Wang, X.; Wang, G.; Zhang, Y.: Hybrid direct manufacturing method of metallic parts using deposition and micro continuous rolling. *Rapid Prototyping Journal* 19(2013)6, S. 387–394
- [125] Duarte, V. R.; Rodrigues, T. A.; Schell, N.; Miranda, R. M.; Oliveira, J. P.; Santos, T. G.: Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM). *Additive Manufacturing* 35(2020), 101193
- [126] Hirtler, M.; Jedynek, A.; Sydow, B.; Sviridov, A.; Bambach, M.: Investigation of microstructure and hardness of a rib geometry produced by metal forming and wire-arc additive manufacturing. *MATEC Web of Conferences* 190(2018), 2005
- [127] Hirtler, M.; Jedynek, A.; Sydow, B.; Sviridov, A.; Bambach, M.: A Study On The Mechanical Properties Of Hybrid Parts Manufactured By Forging And Wire Arc Additive Manufacturing. *Procedia Manufacturing* 47(2020)7, S. 1141–1148

- [128] Bambach, M.; Sizova, I.; Emdadi, A.: Development of a processing route for Ti-6Al-4V forgings based on preforms made by selective laser melting. *Journal of Manufacturing Processes* 37(2019), S. 150–158
- [129] Sizova, I.; Hirtler, M.; Günther, M.; Bambach, M.: Wire-arc additive manufacturing of pre-forms for forging of a Ti-6Al-4V turbine blade. In: Galdos, L.; Arrazola, P.; Saenz de Argandona, E.; Otegi, N.; Mendiguren, J.; Madariaga, A.; Saez de Buruaga, M. (Hrsg.) *Proceedings of the 22nd international Esaform Conference on Material Forming: ESAFORM 2019* American Institute of Physics, 2019, 150017
- [130] Pragana, J. P. M.; Rosenthal, S.; Bragança, I. M. F.; Silva, C. M. A.; Tekkaya, A. E.; Martins, P. A. F.: Hybrid Additive Manufacturing of Collector Coils. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 4(2020)4, S. 115
- [131] López, C.; Elías-Zúñiga, A.; Jiménez, I.; Martínez-Romero, O.; Siller, H. R.; Diabb, J. M.: Experimental Determination of Residual Stresses Generated by Single Point Incremental Forming of AlSi10Mg Sheets Produced Using SLM Additive Manufacturing Process. *Materials* (Basel, Switzerland) 11(2018)12
- [132] Pragana, J. P. M.; Cristino, V. A. M.; Bragança, I. M. F.; Silva, C. M. A.; Martins, P. A. F.: Integration of Forming Operations on Hybrid Additive Manufacturing Systems Based on Fusion Welding. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 7(2020)3, S. 595–607
- [133] Rosenthal, S.; Hahn, M.; Tekkaya, A. E.; Platt, S.; Kleszczynski, S.; Witt, G.: Speeding up Additive Manufacturing by Means of Forming for Sheet Components with Core Structures. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 9(2022)4, S. 1021–1034
- [134] Schaub, A.; Juechter, V.; Singer, R. F.; Merklein, M.: Characterization of Hybrid Components Consisting of SEBM Additive Structures and Sheet Metal of Alloy Ti-6Al-4V. *Key Engineering Materials* 611-612(2014), S. 609–614
- [135] Gruber, S.; Grunert, C.; Riede, M.; López, E.; Marquardt, A.; Brueckner, F.; Leyens, C.: Comparison of dimensional accuracy and tolerances of powder bed based and nozzle based additive manufacturing processes. *Journal of Laser Applications* 32(2020)3, 32016

- [136] Schaub, A.; Ahuja, B.; Karg, M.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Fabrication and Characterization of Laser Beam Melted Ti-6Al-4V Geometries on Sheet Metal. In: Demmer, A. (Hrsg.): Proceedings DDMC 2014 Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference, March 12-13, 2014, Berlin. DE
- [137] Ahuja, B.; Schaub, A.; Karg, M.; Schmidt, R.; Merklein, M.; Schmidt, M.: High power laser beam melting of Ti-6Al-4V on formed sheet metal to achieve hybrid structures. In: Helvajian, H. (Hrsg.) SPIE LASESPIE, 2015, 93530X
- [138] Schaub, A.; Ahuja, B.; Butzhammer, L.; Osterziel, J.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Additive Manufacturing of Functional Elements on Sheet Metal. *Physics Procedia* 83(2016), S. 797–807
- [139] Schaub, A.: Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung, 2019
- [140] Papke, T.; Merklein, M.: Processing of 316L hybrid parts consisting of sheet metal and additively manufactured element by Powder Bed Fusion using a laser beam. *Procedia CIRP* 94(2020), S. 35–40
- [141] Vollertsen, F.: Laserstrahlumformen, lasergestützte Formgebung - Verfahren, Mechanismen, Modellierung. Bamberg: Meisenbach, 1996
- [142] Merklein, M.; Dubjella, P.; Schaub, A.; Butzhammer, L.; Schmidt, M.: Interaction of Additive Manufacturing and Forming. In: Drstvenšek, I.; Drummer, D.; Schmidt, M. (Hrsg.): 6th International Conference on Additive Technologies - iCAT 2016 - Proceedings: Nürnberg, Germany, 29.-30. November 2016 : DAAAM Specialized Conference. Interesansa - zavod, 2016, S. 309–316
- [143] Papke, T.; Dubjella, P.; Butzhammer, L.; Huber, F.; Petrunenko, O.; Klose, D.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Influence of a bending operation on the bonding strength for hybrid parts made of Ti-6Al-4V. *Procedia CIRP* 74(2018), S. 290–294
- [144] Butzhammer, L.; Dubjella, P.; Huber, F.; Schaub, A.; Aumüller, M.; Baum, A.; Petrunenko, O.; Merklein, M.; Schmidt, M.: Experimental investigation of a process chain combining sheet metal bending and laser beam melting of Ti-6Al-4V. In: Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik e.V. (Hrsg.): Proceedings of the Lasers in Manufacturing LIM, 2017

- [145] Huber, F.; Papke, T.; Kerkien, M.; Tost, F.; Geyer, G.; Merklein, M.; Schmidt, M.: Customized exposure strategies for manufacturing hybrid parts by combining laser beam melting and sheet metal forming. *Journal of Laser Applications* 31(2019) 2
- [146] Dubjella, P.; Merklein, M.: Influence of Warm Bending on the Surface Topography of Titanium Alloy Ti-6Al-4V. *Procedia Engineering* 183(2017), S. 23–30
- [147] Papke, T.; Huber, F.; Geyer, G.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Characterisation of the Tensile Bonding Strength of Ti-6Al-4V Hybrid Parts Made by Sheet Metal Forming and Laser Beam Melting. In: Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.): *Advances in Production Research - Proceedings of the 8th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), Aachen, 19.-20. November, 2018*. Springer International Publishing, 2019, S. 361–370
- [148] Papke, T.: *Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur*. FAU University Press, 2022
- [149] Hafenecker, J.; Papke, T.; Huber, F.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Modelling of Hybrid Parts Made of Ti-6Al-4V Sheets and Additive Manufactured Structures. In: Behrens, B.-A.; Brosius, A.; Hintze, W.; Ihlenfeldt, S.; Wulfsberg, J. P. (Hrsg.): *Production at the leading edge of technology*. Springer Berlin Heidelberg, 2020, S. 13–22
- [150] Hafenecker, J.; Rothfelder, R.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Stretch Forming of Ti-6Al-4V Hybrid Parts at Elevated Temperatures. In: Merklein, M.; Duflou, J.; Fratini, L.; Hagenah, H.; Martins, P.; Meschut, G.; Micari, F. (Hrsg.): *Sheet Metal 2021*. Trans Tech Publications, Limited, 2021, S. 135–142
- [151] Hafenecker, J.; Papke, T.; Merklein, M.: Influence of Stress States on Forming Hybrid Parts with Sheet Metal and Additively Manufactured Element. *Journal of Materials Engineering and Performance* 207(2021)6, 1176
- [152] Merklein, M.; Schulte, R.; Papke, T.: An innovative process combination of additive manufacturing and sheet bulk metal forming for manufacturing a functional hybrid part. *Journal of Materials Processing Technology* 291(2021)2, 117032
- [153] Ilschner, B.; Singer, R. F.: *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005

- [154] ASTM A276:2006: Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes.
- [155] [https://www.heraeus.com/media/media/group/doc\\_group/products\\_1/additivemanufacturing/datasheets\\_en/Stainless\\_Steel\\_1.4404\\_316L.pdf](https://www.heraeus.com/media/media/group/doc_group/products_1/additivemanufacturing/datasheets_en/Stainless_Steel_1.4404_316L.pdf), (aufgerufen am 10.02.2022)
- [156] Wycisk, E.: Ermüdungseigenschaften der laseradditiv gefertigten Titanlegierung TiAl6V4. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [157] Cui, L.; Jiang, S.; Xu, J.; Peng, R. L.; Mousavian, R. T.; Moverare, J.: Revealing relationships between microstructure and hardening nature of additively manufactured 316L stainless steel. *Materials & Design* 198(2021), 109385
- [158] Ferrar, B.; Mullen, L.; Jones, E.; Stamp, R.; Sutcliffe, C. J.: Gas flow effects on selective laser melting (SLM) manufacturing performance. *Journal of Materials Processing Technology* 212(2012)2, S. 355–364
- [159] Cherry, J. A.; Davies, H. M.; Mehmood, S.; Lavery, N. P.; Brown, S. G. R.; Sienz, J.: Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 76(2015)5-8, S. 869–879
- [160] Yadroitsev, I.; Krakhmalev, P.; Yadroitsava, I.; Johansson, S.; Smurov, I.: Energy input effect on morphology and microstructure of selective laser melting single track from metallic powder. *Journal of Materials Processing Technology* 213(2013)4, S. 606–613
- [161] Childs, T.H.C.; Hauser, C.; Badrossamay, M.: Mapping and Modelling Single Scan Track Formation in Direct Metal Selective Laser Melting. *CIRP Annals* 53(2004)1, S. 191–194
- [162] Khairallah, S. A.; Anderson, A.: Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel powder. *Journal of Materials Processing Technology* 214(2014)11, S. 2627–2636
- [163] DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur.
- [164] DIN 50125:2021-08: Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben.

- [165] DIN EN ISO 7500-1:2018-06: Metallische Werkstoffe - Kalibrierung und Überprüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen - Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen - Kalibrierung und Überprüfung der Kraftmesseinrichtung.
- [166] Ludwigsen, D. C.: Modified stress-strain relation for FCC metals and alloys. Metallurgical Transactions 2(1971)10, S. 2825–2828
- [167] Sigvant, M.; Mattiasson, K.; Vegter, H.; Thilderkvist, P.: A viscous pressure bulge test for the determination of a plastic hardening curve and equibiaxial material data. International Journal of Material Forming 2(2009)4, S. 235–242
- [168] DIN EN ISO 16808:2022-02:2022: Metallische Werkstoffe - Blech und Band - Bestimmung der biaxialen Spannung/Dehnung-Kurve durch einen hydraulischen Tiefungsversuch mit optischen Messsystemen.
- [169] DIN EN ISO 12004-1:2021: Metallische Werkstoffe – Bestimmung der Grenzformänderungskurven für Bleche und Bänder – Teil 1: Messung und Anwendung von Grenzformänderungsdiagrammen in Presswerken.
- [170] DIN EN ISO 12004-2:2021-07: Metallische Werkstoffe - Bestimmung der Grenzformänderungskurve für Bleche und Bänder - Teil 2: Bestimmung von Grenzformänderungskurven im Labor.
- [171] DIN 50106:2016-11: Prüfung metallischer Werkstoffe - Druckversuch bei Raumtemperatur.
- [172] Merklein, M.; Kuppert, A.: A method for the layer compression test considering the anisotropic material behavior. International Journal of Material Forming 2(2009)S1, S. 483–486
- [173] DIN EN ISO 14577-1:2015: Metallische Werkstoffe - Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter - Teil 1: Prüfverfahren.
- [174] Sun, J.; Zhang, Y.; Cheng, X.: A high precision 3D reconstruction method for bend tube axis based on binocular stereo vision. Optics express 27(2019)3, S. 2292–2304
- [175] DIN EN ISO 25178-1:2016: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 1: Angabe von Oberflächenbeschaffenheit.
- [176] Steinke, P.: Finite-Elemente-Methode. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015

- [177] Bathe, K.-J.: Finite element procedures. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 2014, Second edition Auflage
- [178] Jung, M.; Langer, U.: Methode der finiten Elemente für Ingenieure. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013
- [179] Fröhlich, P.: FEM-Anwendungspraxis. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2005
- [180] Wagner, M.: Lineare und nichtlineare FEM - Eine Einführung mit Anwendungen in der Umformsimulation mit LS-DYNA®: Springer-Link Bücher, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017
- [181] Knothe, K.; Wessels, H.: Finite Elemente. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [182] Papke, T.; Huber, F.; Hagenah, H.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Potentiale der Kombination von Umformtechnik und additiver Fertigung in hybriden Prozessketten. In: Drummer, D. (Hrsg.): Additive Fertigung - individuell, innovativ, interdisziplinär - 6. Industriekolloquium des Sonderforschungsbereichs 814 - Additive Fertigung. Sonderforschungsbereich 814 - Additive Fertigung, 2018, S. 59-76
- [183] Oliveira, J. P.; LaLonde, A. D.; Ma, J.: Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing. *Materials & Design* 193(2020), 108762
- [184] Zhang, J.; Gu, D.; Yang, Y.; Zhang, H.; Chen, H.; Dai, D.; Lin, K.: Influence of Particle Size on Laser Absorption and Scanning Track Formation Mechanisms of Pure Tungsten Powder During Selective Laser Melting. *Engineering* 5(2019)4, S. 736-745
- [185] Schniedenharn, M.: Einfluss von Fokusshift und Prozessnebenprodukten auf den Laser Powder Bed Fusion Prozess. Dissertation, RWTH Aachen; Apprimus Verlag
- [186] Hu, Z.; Nagarajan, B.; Song, X.; Huang, R.; Zhai, W.; Wei, J.: Formation of SS316L Single Tracks in Micro Selective Laser Melting: Surface, Geometry, and Defects. *Advances in Materials Science and Engineering* 2019(2019), S. 1-9
- [187] Mukherjee, T.; DebRoy, T.: Printability of 316 stainless steel. *Science and Technology of Welding and Joining* 24(2019)5, S. 412-419

- [188] Du Plessis, A.; Yadroitsava, I.; Yadroitsev, I.: Effects of defects on mechanical properties in metal additive manufacturing: A review focusing on X-ray tomography insights. *Materials & Design* 187(2020), 108385
- [189] Leicht, A.; Rashidi, M.; Klement, U.; Hryha, E.: Effect of process parameters on the microstructure, tensile strength and productivity of 316L parts produced by laser powder bed fusion. *Materials Characterization* 159(2020), 110016
- [190] Kruth, J. P.; Froyen, L.; van Vaerenbergh, J.; Mercelis, P.; Rombouts, M.; Lauwers, B.: Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of Materials Processing Technology* 149(2004)1-3, S. 616–622
- [191] Steen, W.; Mazumder, J.; Mazumder, J.: *Laser Material Processing*. London: Springer London, 2010
- [192] Karthik, G. M.; Kim, H. S.: Heterogeneous Aspects of Additive Manufactured Metallic Parts: A Review. *Metals and Materials International* 27(2021)1, S. 1–39
- [193] Khairallah, S. A.; Anderson, A. T.; Rubenchik, A.; King, W. E.: Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Materialia* 108(2016)16, S. 36–45
- [194] Geenen, K.: *Werkstofftechnische Charakterisierung austenitischer und martensitischer Stähle nach dem selektiven Laserschmelzen*. Dissertation, Ruhr Universität Bochum
- [195] Scipioni Bertoli, U.; Wolfer, A. J.; Matthews, M. J.; Delplanque, J.-P. R.; Schoenung, J. M.: On the limitations of Volumetric Energy Density as a design parameter for Selective Laser Melting. *Materials & Design* 113(2017)1, S. 331–340
- [196] Zheng, H.; Li, H.; Lang, L.; Gong, S.; Ge, Y.: Effects of scan speed on vapor plume behavior and spatter generation in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes* 36(2018)1, S. 60–67
- [197] Matthews, M. J.; Guss, G.; Khairallah, S. A.; Rubenchik, A. M.; Depond, P. J.; King, W. E.: Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes. *Acta Materialia* 114(2016), S. 33–42

- [198] Carter, L. N.; Wang, X.; Read, N.; Khan, R.; Aristizabal, M.; Essa, K.; Attallah, M. M.: Process optimisation of selective laser melting using energy density model for nickel based superalloys. *Materials Science and Technology* 32(2016)7, S. 657–661
- [199] Scharowsky, T.: Grundlagenuntersuchungen zum selektiven Elektronenstrahlschmelzen von TiAl6V4. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg; FAU University Press ein Imprint der Universität Erlangen-Nürnberg
- [200] Ma, M.; Wang, Z.; Zeng, X.: A comparison on metallurgical behaviors of 316L stainless steel by selective laser melting and laser cladding deposition. *Materials Science and Engineering: A* 685(2017), S. 265–273
- [201] Sander, J.: Selektives Laserschmelzen hochfester Werkzeugstähle. Dresden: Saechsische Landesbibliothek- Staats- und Universitaetsbibliothek Dresden; Technische Universität Dresden, 2018
- [202] Spears, T. G.; Gold, S. A.: In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation* 5(2016)1, S. 16–40
- [203] Sun, Z.; Tan, X.; Tor, S. B.; Chua, C. K.: Simultaneously enhanced strength and ductility for 3D-printed stainless steel 316L by selective laser melting. *NPG Asia Materials* 10(2018)4, S. 127–136
- [204] Cardarelli, F.: *Materials Handbook*. London: Springer London, 2008
- [205] Papke, T.; Junker, D.; Schmidt, M.; Kolb, T.; Merklein, M.: Bulk Metal Forming of Additively Manufactured Elements. *MATEC Web of Conferences* 190(2018), 3002
- [206] Hitzler, L.; Hirsch, J.; Heine, B.; Merkel, M.; Hall, W.; Öchsner, A.: On the Anisotropic Mechanical Properties of Selective Laser-Melted Stainless Steel. *Materials (Basel, Switzerland)* 10(2017)10
- [207] Elangeswaran, C.; Cutolo, A.; Muralidharan, G. K.; Vanmeensel, K.; van Hooreweder, B.: Microstructural analysis and fatigue crack initiation modelling of additively manufactured 316L after different heat treatments. *Materials & Design* 194(2020), 108962
- [208] Hoff, C.: Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5. Meisenbach, 2019

- [209] Weiß, A.; Gutte, H.; Jahn, A.; Scheller, P. R.: Nichtrostende Stähle mit TRIP/TWIP/SBIP-Effekt. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 40(2009)8, S. 606–611
- [210] Sinha, S.; Szpunar, J. A.; Kiran Kumar, N.A.P.; Gurao, N. P.: Tensile deformation of 316L austenitic stainless steel using in-situ electron backscatter diffraction and crystal plasticity simulations. *Materials Science and Engineering: A* 637(2015), S. 48–55
- [211] Sevillano, J. G.: An alternative model for the strain hardening of FCC alloys that twin, validated for twinning-induced plasticity steel. *Scripta Materialia* 60(2009)5, S. 336–339
- [212] Suryawanshi, J.; Prashanth, K. G.; Ramamurty, U.: Mechanical behavior of selective laser melted 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering: A* 696(2017)2, S. 113–121
- [213] Larour, P.: Strain rate sensitivity of automotive sheet steels: influence of plastic strain, strain rate, temperature, microstructure, bake hardening and pre-strain. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2010: Berichte aus dem Institut für Eisenhüttenkunde, Bd. Bd. 2010,1, Aachen: Shaker, 2010
- [214] Sønstabø, J. K.; Faksvåg, K. U.; Jakobsen, L. O.; Clausen, A. H.: Modelling of Stainless Steel AISI 316L in Finite Element Simulations. *ce/papers* 4(2021)2-4, S. 1589–1598
- [215] Desu, R. K.; Nitin Krishnamurthy, H.; Balu, A.; Gupta, A. K.; Singh, S. K.: Mechanical properties of Austenitic Stainless Steel 304L and 316L at elevated temperatures. *Journal of Materials Research and Technology* 5(2016)1, S. 13–20
- [216] Fischer, T.; Hitzler, L.; Werner, E.: Morphological and Crystallographic Effects in the Laser Powder-Bed Fused Stainless Steel Microstructure. *Crystals* 11(2021)6, 672
- [217] Keeler, S. P.: Determination of Forming Limits in Automotive Stampings Mid-Year MeetingSAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1965
- [218] DIN 8582:2003: Fertigungsverfahren Umformen - Einordnung; Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht.
- [219] DIN 8584-3:2003: Fertigungsverfahren Zugdruckumformen - Teil 3: Tiefziehen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe.

- [220] DIN 8585-4:2003: Fertigungsverfahren Zugumformen - Teil 4: Tiefen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- [221] DIN 8586:2003: Fertigungsverfahren Biegeumformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- [222] Kluge, S.: Prozesse der Blechumformung - Bauteil-, Werkzeug- und Fertigungsgestaltung im Karosseriebau: Hanser eLibrary, München: Hanser, 2020
- [223] Ludwik, P.: Technologische Studie über Blechbiegung - Ein Beitrag zur Mechanik der Formänderungen. Technische Blätter 35(1903), S. 133-159
- [224] Hafenecker, J.; Merklein, M.: Investigations on sheet metal forming of hybrid parts in different stress states. Production Engineering 38(2022), 684

## Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Papke, T.; Huber, F.; Hafenecker, J.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Hybride Bauteile, Werkzeuge und Prozessketten – Anwendungen der Kombination aus Additiver Fertigung und Umformtechnik. In: Dietmar Drummer (Hrsg.): 7. Industriekolloquium des Sonderforschungsbereichs 814 - Additive Fertigung (Nürnberg). Print Line, 2019, S. 51–70
- [P2] Hafenecker, J.; Papke, T.; Huber, F.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Modelling of Hybrid Parts Made of Ti-6Al-4V Sheets and Additive Manufactured Structures. In: Behrens, B.-A.; Brosius, A.; Hintze, W.; Ihlenfeldt, S.; Wulfsberg, J. P. (Hrsg.): Production at the leading edge of technology. Springer Berlin Heidelberg, 2020, S. 13–22
- [P3] Hafenecker, J.; Rothfelder, R.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Stretch Forming of Ti-6Al-4V Hybrid Parts at Elevated Temperatures. In: Merklein, M.; Duflou, J.; Fratini, L.; Hagenah, H.; Martins, P.; Meschut, G.; Micari, F. (Hrsg.): Sheet Metal 2021. Trans Tech Publications, Limited, 2021, S. 135–142
- [P4] Hafenecker, J.; Kuball, C.-M.; Rothfelder, R.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Surface modification of additively manufactured parts by forming. ESAFORM 2021, (2021)
- [P5] Hafenecker, J.; Papke, T.; Merklein, M.: Influence of Stress States on Forming Hybrid Parts with Sheet Metal and Additively Manufactured Element. J. of Materi Eng and Perform 207(2021)6, 1176
- [P6] Hafenecker, J.; Merklein, M.: Investigations on sheet metal forming of hybrid parts in different stress states. Prod. Eng. Res. Devel. 38(2022), 684
- [P7] März, R.; Hafenecker, J.; Bartels, D.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Numerical investigation on the deep drawing of sheet metals with an additively applied coating. In: Madej, L.; Sitko, M.; Perzynsk, K. (Hrsg.) Material Forming. Materials Research Forum LLC, 2023, S. 919–928
- [P8] Papke, T.; Hafenecker, J.; Römisch, D.; März, R.; Hentschel, O.; Bartels, D.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Alternating Additive Manufacturing and Forming—An Innovative Manufacturing Approach. JMMP 7(2023)3, 90

- [P9] Hafenecker, J.; Rigas, N.; Merklein, M.: Laser-based ultrasonic measurement of the influence of PBF-LB/M-typical thermal cycles on sheet metal components of hybrid parts. *Production Engineering* 63(2023)2
- [P10] Hafenecker, J.; Rothfelder, R.; Merklein, M.; Schmidt, M.: Additive und umformtechnische Fertigung hybrider Bauteile mit lokal angepassten Eigenschaften. (2023) Abschlusskolloquium des SFB 814, Fürth, Deutschland. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8081865>
- [P11] Setter, R.; Hafenecker, J.; Rothfelder, R.; Kopp, S.-P.; Roth, S.; Schmidt, M.; Merklein, M.; Wudy, K.: Innovative Process Strategies in Powder-Based Multi-Material Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 7(2023)4, 133
- [P12] Hafenecker, J.; Bartels, D.; Kuball, C.-M.; Kreß, M.; Rothfelder, R.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Hybrid process chains combining metal additive manufacturing and forming – A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 46(2023)1, S. 98–115

## Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] Mursak, J.: Experimentelle Untersuchung von Hybridbauteilen im Warmtiefziehprozess. Projektarbeit (2020), Erlangen
- [S2] Jung, R.: Erarbeitung eines Materialmodells für wärmebehandelte Ti-6Al-4V Hybridbauteile zur Nutzung innerhalb eines numerischen Tiefziehprozesses. Projektarbeit (2021), Erlangen
- [S3] Winterstein, M.: Untersuchung der Verbundfestigkeit von Hybridproben aus unterschiedlichen Titanlegierungen unter Scherbelastung. Projektarbeit (2021), Erlangen
- [S4] Bacelle, F.: Experimental investigations on hybrid parts made of 316L in stretch forming processes at different temperatures. Masterarbeit (2021), Erlangen
- [S5] Franke, L.: Parameteranalyse zur Charakterisierung des Pulverwerkstoffs 316L für die additive Fertigung von Hybridbauteilen. Projektarbeit (2021), Erlangen
- [S6] Hauser, D.: Experimentelle und numerische Untersuchung von Einflussfaktoren beim Umformen von Ti-6Al-4V Hybridbauteilen mit mehreren additiv gefertigten Funktionselementen. Masterarbeit (2021), Erlangen
- [S7] Winterstein, M.: Untersuchung hinsichtlich der Einflüsse umformtechnischer Oberflächennachbearbeitung additiv gefertigter Körper. Masterarbeit (2022), Erlangen
- [S8] Ank, D.: Numerische Untersuchung von Einflussfaktoren beim Streckziehen von 316L Hybridbauteilen mit additiv gefertigten Funktionselementen. Bachelorarbeit (2022), Erlangen
- [S9] Götz, T.: Grundlegende Evaluation des Potentials zur additiven Herstellung von Halbhohlstanznieten mit bionischen und belastungsangepassten Strukturen. Projektarbeit (2022), Erlangen
- [S10] Franke, L.: Werkzeugentwicklung zur Dauerfestigkeitsprüfung umformtechnisch nachbearbeiteter Additivbauteile. Masterarbeit (2022), Erlangen

- [S11] Schmelzer, P.: Systematische Untersuchung von Einflussfaktoren beim Streckziehen von 316L Hybridbauteilen mit additiv gefertigten Funktionselementen durch die numerische Simulation. Projektarbeit (2023), Erlangen
- [S12] Siebenwurst, K.: Charakterisierung additiv gefertigten Werkzeugstahls für den Formenbau unter Temperatureinfluss. Projektarbeit (2023), Erlangen

# Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2024):  
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, [www.mb.fau.de/diss/](http://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:

<b>FAPS</b>	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
<b>FMT</b>	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
<b>KTmfk</b>	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
<b>LFT</b>	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
<b>LGT</b>	Lehrstuhl für Gießereitechnik
<b>LPT</b>	Lehrstuhl für Photonische Technologien
<b>REP</b>	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**

Projektiertung 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 Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden  
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 Bruchverhaltens 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 Montagefeinplanung  
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 CO<sub>2</sub>-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 Biegeumformung 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**

CO<sub>2</sub>-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-Laserstrahlbearbeitung 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 Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten 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 CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage  
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

**Band 34: Uwe Günzel**

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens 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 Bearbeitungsabläufe 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 durchflußbestimmender 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 Steuerungssystemen 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 Zweistrahltechnik  
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.  
1996. ISBN 3-87525-074-5.

**Band 56: Uwe Schönherr**  
Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden 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 CO<sub>2</sub>-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 Spulnwickeln  
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 CO<sub>2</sub>-Laseranlagen  
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-095-8.

**Band 71: Michael Steber**  
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage  
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-096-6.

**Band 72: Markus Pfestorf**  
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik  
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-097-4.

**Band 73: Volker Franke**  
Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung  
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-098-2.

**Band 74: Herbert Scheller**  
Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen  
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

**Band 75: Arthur Meßner**  
Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung  
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.  
1998. ISBN 3-87525-100-8.

**Band 76: Mathias Glasmacher**  
Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen  
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.  
1998. ISBN 3-87525-101-6.

**Band 77: Michael Schwind**  
Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren  
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab.  
1998. ISBN 3-87525-102-4.

**Band 78: Manfred Gerhard**  
Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen  
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab.  
1998. ISBN 3-87525-103-2.

**Band 79: Elke Rauh**  
Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe  
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab.  
1998. ISBN 3-87525-104-0.

**Band 80: Sorin Niederkorn**

Mefseinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen  
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.  
1998. ISBN 3-87525-105-9.

**Band 81: Stefan Schubert**

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung  
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-122-9.

**Band 93: Adrianus L. P.**

**Coremans**  
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper  
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-124-5.

**Band 94: Hans-Martin Biehler**

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung  
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

**Band 95: Wolfgang Becker**

Oberflächen Ausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken  
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-127-X.

**Band 96: Philipp Hein**

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung  
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-128-8.

**Band 97: Gunter Beitinger**

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger  
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-129-6.

**Band 98: Jürgen Knoblach**

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden  
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-130-X.

**Band 99: Frank Breitenbach**

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente  
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.  
2000. ISBN 3-87525-131-8.

**Band 100: Bernd Falk**

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage 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 hergestoffbeschichteter 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 Planungs Werkzeug 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**  
Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse  
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-142-3.

**Band 107: Thomas Stöckel**  
Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks  
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

**Band 108: Frank Pitter**  
Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen  
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

**Band 109: Markus Korneli**  
Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund  
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

**Band 110: Burkhard Müller**  
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion  
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

**Band 111: Jürgen Göhringer**  
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen  
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

**Band 112: Robert Feuerstein**  
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration 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 Montagesystemen 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 Elektronikproduktion  
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 Anschlußkontakten 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 Einsatz 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 Nегendanck**

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 - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, 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 produktbezogener 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 Magnesiumlegierungen 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 Produktstrukturen 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 Diodenlaserstrahlung 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 - Entwicklung 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 Kleinstteile 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 trocken-schmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten 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 - Prozessanalyse 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 Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern  
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-228-4.

**Band 165: Gordana Michos**  
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen  
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-230-6.

**Band 166: Markus Stark**  
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays  
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-231-4.

**Band 167: Yurong Zhou**  
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion  
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-232-2.

**Band 168: Werner Enser**  
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen  
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-233-0.

**Band 169: Katrin Melzer**  
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle  
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-234-9.

**Band 170: Alexander Putz**  
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall  
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab.  
2006. ISBN 3-87525-237-3.

**Band 171: Martin Prechtel**  
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik  
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.  
2006. ISBN 3-87525-238-1.

**Band 172: Markus Meidert**  
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung  
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab.  
2006. ISBN 3-87525-239-X.

**Band 173: Bernd Müller**  
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile  
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab.  
2006. ISBN 3-87525-240-3.

**Band 174: Alexander Hofmann**  
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen  
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab.  
2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

**Band 175: Peter Wölflick**

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie 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 Mikrojustier-technik 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 Schal-tungsträger (3D-MID)

FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

**Band 181: Stefan Lang**

Durchgängige Mitarbeiterinforma-tion zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Pro-duktion

FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

**Band 182: Hans-Joachim Krauß**

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse prä-keramischer Polymere

LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

**Band 183: Stefan Junker**

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Be-stückung permanent erregter Läu-fer 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 Blechum-formprozesse

LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

**Band 185: Klaus Lamprecht**

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßge-schneiderter Halbzeuge

LFT, 135 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

**Band 186: Bernd Zolleiß**

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatroni-scherBaugruppen

FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

**Band 187: Michael Kerausch**

Simulationsgestützte Prozessausle-gung für das Umformen lokal wär-mebehandelter Aluminiumplatin-en

LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

**Band 188: Matthias Weber**

Unterstützung der Wandlungsfä-higkeit 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 prozessbestim-menden Strahl-Stoff-Wechselwir-kungen beim Laserstrahlschwei-ßen 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 wirk-medienbasierte Doppelblech-Um-formung von Magnesiumlegierun-gen

LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

**Band 191: Ralf Völkl**

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

**Band 192: Massimo Tolazzi**

Innenhochdruck-Umformen ver-stärkter Blech-Rahmenstrukturen

LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

**Band 193: Cornelia Hoff**

Untersuchung der Prozesseinfluss-größen 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 Löt-prozessen in der Elektronikpro-duktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

**Band 195: Andreas Kunze**

Automatisierte Montage von mak-romechatronischen 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 Fließ-ortkurven bei erhöhten Tempera-turen

LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

**Band 197: Thomas Bigl**

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen  
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab.  
2008.  
ISBN 978-3-87525-280-4.

**Band 198: Stephan Roth**

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen  
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab.  
2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

**Band 199: Artur Giera**

Prozesstechnische Untersuchungen zum 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 Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen 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 Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion  
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab.  
2009.  
ISBN 978-3-87525-290-3.

**Band 204: Simon Dietrich**

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahlfließschweißen  
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**

Rührreißschweißen 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 Laserdurchstrahlschweißen 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 Innenhochdruck-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 Laserstrahl-sintern 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 Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten

LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

**Band 226: Peter Sebastian Feuer**

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften:

Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation 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 Stahlblechwerkstoffen - 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 unter Berücksichtigung 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 Entwicklung 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 Laserstrahl-löten 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 Laserstrahl-schweißen 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 Development

LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

**Band 240: Stephan Busse**

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens

LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

**Band 241: Karl-Heinz Leitz**  
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung  
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab.  
2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

**Band 242: Markus Michl**  
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose  
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab.  
2013.  
ISBN 978-3-87525-356-6.

**Band 243: Vera Sturm**  
Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen  
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab.  
2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

**Band 244: Christian Neudel**  
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau  
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

**Band 245: Anja Neumann**  
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk  
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

**Band 246: Ulf-Hermann Quentin**  
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen  
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

**Band 247: Erik Lamprecht**  
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen  
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

**Band 248: Sebastian Rösel**  
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium  
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

**Band 249: Paul Hippchen**  
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung  
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

**Band 250: Martin Zubeil**  
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren  
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

**Band 251: Alexander Kühn**  
Flexible Automatisierung der Statormontage 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 Metalldampffackelposition  
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 aus-härtbarer Aluminiumlegierungen  
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

**Band 267: Andreas Kuppert**

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven  
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 Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten 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 Presshärteprozess 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 beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge  
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

**Band 271: Matthäus Brela**

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren  
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

**Band 272: Michael Wieland**

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten  
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

**Band 273: René Schramm**

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma  
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

**Band 274: Michael Lechner**

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen  
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

**Band 275: Kolja Andreas**

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen  
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

**Band 276: Marcus Baum**

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates  
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

**Band 277: Thomas Schneider**

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung  
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

**Band 278: Jochen Merhof**

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene  
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

**Band 279: Fabian Zöller**

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation  
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

**Band 280: Christian Hezler**

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen  
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

**Band 281: Jochen Bönig**

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation  
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.  
2016.  
ISBN 978-3-87525-405-1.

**Band 282: Johannes Kohl**

Automatisierte Datenerfassung für 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 Borschlegl**  
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 Unternehmenscontrollings 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 Hilderling**  
Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien  
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

**Band 296: Sasia Mareike Hertweck**  
Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung - Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen  
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

**Band 297: Paryanto**  
Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems  
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

**Band 298: Peer Stenzel**  
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe  
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab.  
2017.  
ISBN 978-3-87525-425-9.

**Band 299: Mario Lušić**  
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme 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 unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der härtesten 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) / Experimentelle 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 Magnesiumlegierung 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 Blechmassivumformprozessen 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 artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

**Band 310: Christopher Kästle**  
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen 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 Zöllner**  
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 Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

**Band 326: Tobias Gnibl**  
Modellbasierte Prozesskettenabildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge 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 Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge  
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-227-7.

**Band 329: Stefan Landkammer**  
Grundsatzuntersuchungen, mathematische 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 transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung  
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 Kontext 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 muskuloskelettalen 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 laserdirektstrukturierter 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 Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer 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 Herstellung 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 schrägverzahnten Zahnrädern  
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 Heißerimpprozesses  
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 Aluminiumblechbauteile 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 Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen 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 Bauelemente  
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 Geometrie-Modelle 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 ausschheidungshärtbaren 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 Gläsel**

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-Supported 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 Entwicklung einer Auswertemethode zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess 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 Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

**Band 365: Daniel Gross**

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung 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 Werkzeugbau 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-, Axial-schub- und Temperaturverhaltens 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 fokusbandsmodulierte 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 Oberflächenmikrotexturen 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 wissensbasierten 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-Laserpulsen  
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 abweichungs-behaftete 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 optomechatronische 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 mehrstufige 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 Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-523-0.

**Band 394: Robert Schulte**

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-525-4.

**Band 395: Philipp Frey**

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-534-6.

**Band 396: Thomas Johann Luft**

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme

KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-540-7.

**Band 397: Li Wang**

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-542-1.

**Band 398: Sebastian Reitelshöfer**

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-547-6.

**Band 399: Alexander Meyer**

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

**Band 400: Rong Zhao**

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-557-5.

**Band 401: Christian P. J.****Schwarzer**

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-566-7.

**Band 402: Alexander Horn**

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung

LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-568-1.

**Band 403: Artur Klos**

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-572-8.

**Band 404: Harald Schmid**

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehstücken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

**Band 405: Johannes Henneberg**

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-579-7.

**Band 406: Anton Schmailzl**

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen

LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-583-4.

**Band 407: Alexander Wolf**  
Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion  
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-585-8.

**Band 408: Tim Weikert**  
Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes  
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-589-6.

**Band 409: Stefan Götz**  
Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement  
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-593-3.

**Band 410: Markus Hubert**  
Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte  
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-603-9.

**Band 411: Manfred Vogel**  
Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses  
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-605-3.

**Band 412: Michael Weigelt**  
Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität  
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-607-7.

**Band 413: Frank Bodendorf**  
Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements  
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-609-1.

**Band 414: Maximilian Metzner**  
Planung und Simulation taktiler, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage  
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-611-4.

**Band 415: Tina Buker**  
Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt  
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-613-8.

**Band 416: Marlene Kuhn**  
Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs  
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-615-2.

**Band 417: Benjamin Lengenfelder**  
Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging  
LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-617-6.

**Band 418: Benjamin Pohrer**  
Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden  
KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-621-3.

**Band 419: Matthias Friedlein**  
Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte  
FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-625-1.

**Band 420: Thomas Stoll**  
Laser Powder Bed Fusion von Kupfer auf Aluminiumoxid-Keramiken  
FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bilder, 11 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-631-2.

**Band 421: Eric Eschner**  
Relation of Particle Motion and Process Zone Formation as a Basis for Sensing Approaches within PBF-LB/M  
LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder, 0 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-633-6.

**Band 422: Fanuel Mehari**  
Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) as a diagnostics tool for biological tissue analysis.  
LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-641-1.

**Band 423: Uwe Leicht**  
Ultraschallüberlagertes Umformen und Verstemmen von Stahlwerkstoffen  
LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-643-5.

**Band 424: Thomas Braun**  
Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau  
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder, 11 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-653-4.

**Band 425: Reinhardt Seidel**  
Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses  
FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder, 23 Tab. 2023.  
ISBN: 978-3-96147-651-0.

**Band 426: Matthias Lenzen**  
Maßgeschneiderte Werkstoffcharakterisierung für die numerische Auslegung von Blechumformprozessen  
LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13 Tab. 2023.  
ISBN: 978-3-96147-663-3.

**Band 427: Matthias Graser**  
Analyse lokaler Kurzzeitwärmebehandlungsmethoden zur Verbesserung des Umformverhaltens und der Bauteileigenschaften von Aluminiumstrangpresshohlprofilen  
LFT, xi u. 169 Seiten, 81 Bilder, 1 Tab. 2023.  
ISBN: 978-3-96147-666-4.

**Band 428: Markus Lieret**

Sicheres autonomes Flugroboter-system für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld  
FAPS, xix u. 198 Seiten, 54 Bilder, 7 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-668-8.

**Band 429: Petar Vukovic**

Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der Fertigungs-automatisierung  
FAPS, xiv u. 163 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-673-2.

**Band 430: Fabian Knieps**

Finite Elemente Simulation dünns-ter Verpackungsstähle: Entwick- lung einer geeigneten Charakteri- sierungs- und Validierungsstrate- gie  
LFT, xix, 189 Seiten, 122 Bilder, 17 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-689-3

**Band 431: Julian Seßner**

Multimodale Bildsegmentierung gering strukturierter Umgebungen für die Navigation am Beispiel eines Assistenzsystems für sehbe- einträchtige Personen  
FAPS, xxv, 203 Seiten, 57 Bilder, 25 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-697-8

**Band 432: Benjamin Samuel****Lutz**

Smart Manufacturing System for Process Optimization Regarding Deviations among Material Batches  
FAPS, xix, 208 Seiten, 77 Bilder, 14 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-703-6

**Band 433: Michael Jüttner**

Bewertung von Kantenpressungen auf Basis von Simulationen mehr- fach überrollter elasto-plastischer Kontakte  
KTmfk, xii, 162 Seiten, 59 Bilder, 7 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-713-5.

**Band 434: Sebastian****Wiesenmayer**

Untersuchungen zur Stofffluss- steuerung beim Fügen durch Um- formen von hochfesten Alumini- umlegierungen mittels lokaler Kurzzeitwärmebehandlung  
LFT, xii u. 197 Seiten, 81 Bilder, 19 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-715-9.

**Band 435: Clara-Maria Kuball**

Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstel- lung von Halbhohlstanzen aus hochverfestigenden Werkstoffen  
LFT, viii u. 180 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-717-3.

**Band 436: Martin Roth**

Sampling-based Tolerance-Cost Optimization: The Key to Optimal Tolerance Allocation  
KTmfk, xxxvii u. 337 Seiten, 97 Bilder, 56 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-719-7.

**Band 437: Stephan Schirdewahn**

Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im Presshärte- prozess durch Verwendung maß- geschneiderter laserimplantierter Werkzeuge  
LFT, viii u. 177 Seiten, 63 Bilder, 7 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-721-0.

**Band 438: Andreas Rohrmoser**

Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses zum Fließpressen betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der Materialpaa- rung Metall-Kunststoff  
LFT, x u. 166 Seiten, 94 Bilder, 6 Tab. 2024.  
ISBN: 978-3-96147-723-4.

**Band 439: Andreas Selmaier**

DMAICS-Zyklus zur Digitalisie- rung in produzierenden Unternehmen  
FAPS, xv u. 185 Seiten, 73 Bilder, 19 Tab. 2024.  
ISBN: 978-3-96147-733-3.

**Band 440: Thomas Kistner**

Entwicklung von Modellen der Oberflächenform für die Messunsi- cherheitsbestimmung von taktilen Koordinatenmessungen durch Si- mulation  
FMT, xiii u. 134 Seiten, 64 Bilder, 9 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-735-7.

**Band 441: Fabian Dworschak**

Selbstverstärkendes Lernen als Beitrag zur Automatisierung der Anpassungskonstruktion  
KTmfk, x, 205 Seiten, 87 Bilder, 16 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-739-5.

**Band 442: Martin Killmann**

Vorspannung und Ermüdung von Kaltmassivumformwerkzeugen für unrunde Bauteilgeometrien  
LFT, ix u. 160 Seiten, 85 Bilder, 6 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-741-8.

**Band 443: Ann-Kathrin Wiemann**

Beitrag zur Messunsicherheitser- mittlung für die Messung großer Zahnräder zur Erweiterung des vir- tuellen Koordinatenmessgerätes der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt  
FMT, xxiv u. 133 Seiten, 41 Bilder, 22 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-747-0.

**Band 444: Andreas Jobst**

Eigenspannungen beim Voll-Vor- wärts-Fließpressen – Entstehung, Einstellung und Stabilität  
LFT, ix u. 162 Seiten, 89 Bilder, 5 Tab. 2024.  
ISBN: 978-3-96147-749-4.

**Band 445: Martin Anton Kraus**

Grundlagenwissenschaftliche Un- tersuchungen zum Kaltfließpres- sen kleinster metallischer Pin- Strukturen aus der Blechebene  
LFT, x u. 191 Seiten, 64 Bilder, 10 Tab. 2024.  
ISBN: 978-3-96147-757-9.

**Band 446: Moritz Späth**

Assessment of microcirculation  
by shifted position-diffuse  
reflectance imaging (SP-DRI)  
LPT, xi u. 109 Seiten, 37 Bilder, 8  
Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-759-3

**Band 447: Benedikt Göddeke**

Methode zur Auswahl eines alter-  
nativen Blechwerkstoffes für flexi-  
bel gewalzte und direkt warmum-  
geformte Karosseriestrukturbau-  
teile

LFT, xvi u. 222 Seiten, 66 Bilder, 27  
Tab. 2024

ISBN 978-3-96147-762-3

**Band 448: Jan Hafenecker**

Systematische Untersuchung zur  
Blechumformung von Hybridbau-  
teilen

LFT, xxi u. 173 Seiten, 78 Bilder, 6  
Tab. 2024

ISBN 978-3-96147-764-7

## Abstract

The combination of forming technology and additive manufacturing facilitates the production of hybrid components that take advantage of both processes in order to cope with industrial trends that push conventional manufacturing approaches to their limits. The additively built functional elements on the sheets influence the material behavior during the forming operation and promote premature material failure in the form of cracking. In order to maximize the full potential of hybrid components consisting of sheet metal and additively manufactured functional elements, the mechanisms of action during deep drawing of hybrid components with up to 21 functional elements are investigated in this work. For this purpose, the manufacturing process is investigated comprehensively by developing a process strategy for the laser-based powder bed fusion process used, comparatively characterizing the mechanical properties of sheet metal and additive components, and finally verifying research hypotheses regarding the influencing mechanisms. The different manufacturing processes result in different microstructures and consequently mechanical properties, which must be taken into account in the modeling and forming of the hybrid components. When designing the hybrid components, it is important to ensure that the diameters of the functional elements are selected to be small and that they are placed in non-critical areas and evenly distributed.

Die Kombination von Umformtechnik und additiver Fertigung ermöglicht die Herstellung von Hybridbauteilen, die die Vorteile beider Verfahren nutzen, um somit industriellen Trends entgegenzuwirken, die konventionelle Fertigungsansätze an ihre Grenzen treiben. Die auf den Blechen additiv aufgebrachten Funktionselemente beeinflussen das Materialverhalten während der Umformoperation und begünstigen ein früheres Materialversagen in Form von Rissbildung. Um dennoch das volle Potential von Hybridbauteilen, bestehend aus Blechen und additiv gefertigten Funktionselementen, auszuschöpfen, werden im Rahmen dieser Arbeit die Wirkmechanismen beim Tiefziehen von Hybridbauteilen mit bis zu 21 Funktionskörpern erarbeitet. Dafür wird der Herstellungsprozess ganzheitlich untersucht, indem eine Prozessführungsstrategie des genutzten pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzens erarbeitet wird, die mechanischen Eigenschaften von Blech- und Additivkomponente vergleichend charakterisiert werden und abschließend Forschungshypothesen bezüglich der Einflussmechanismen geprüft werden. Die unterschiedlichen Herstellungsverfahren resultieren in unterschiedlichen Mikrostrukturen und demzufolge mechanischen Eigenschaften, die bei der Modellierung und Umformung der Hybridbauteile beachtet werden müssen. Bei der Gestaltung der Hybridbauteile ist darauf zu achten, dass die Durchmesser der Funktionselemente gering gewählt werden, die Platzierung in unkritischen Bereichen und gleichmäßig verteilt erfolgt.

