

FAU Studien aus dem Maschinenbau 465

**Andreas Hetzel**

Erarbeitung und Qualifizierung  
einer Wärmebehandlungsstrategie  
zur Stoffflusssteuerung in der  
Blechmassivumformung



Andreas Hetzel

Erarbeitung und Qualifizierung einer Wärmebehandlungsstrategie zur Stoffflusssteuerung in der Blechmassivumformung

# **FAU Studien aus dem Maschinenbau**

## **Band 465**

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack


Andreas Hetzel

# **Erarbeitung und Qualifizierung einer Wärmebehandlungsstrategie zur Stoffflusssteuerung in der Blechmassivumformung**

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

Erlangen  
FAU University Press  
2025

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: Andreas Hetzel, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-  
Nürnberg, ( <https://ror.org/oof7hpc57>), ORCID: 0000-0002-5309-1386  
Email: [andreas.hetzel@fau.de](mailto:andreas.hetzel@fau.de)

Bitte zitieren als

Hetzel, Andreas. 2025. *Erarbeitung und Qualifizierung einer Wärmebehandlungsstrategie zur Stoffflusssteuerung in der Blechmassivumformung*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 465. Erlangen: FAU University Press.  
DOI: 10.25593/978-3-96147-831-6

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: 978-3-96147-830-9 (Druckausgabe)  
eISBN: 978-3-96147-831-6 (Online-Ausgabe)  
ISSN: 2625-9974  
DOI: 10.25593/978-3-96147-831-6

**Erarbeitung und Qualifizierung einer  
Wärmebehandlungsstrategie zur Stoffflusssteuerung  
in der Blechmassivumformung**

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

zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Andreas Hetzel, M.Sc.

aus Erlangen

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

Tag der mündlichen

Prüfung: 08.04.2025

Gutachter/in: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein  
Prof. Dr.-Ing. Alexander Brosius, TU Dresden

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit wurden im Rahmen der beiden Transferprojekte To2 „Anwendung des Taumelns zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge für den industriellen Einsatz“ und T10 „Erarbeitung eines Umformverfahrens zur Herstellung endkonturnaher Funktionsbauteile mit Blechdickengradient“ erarbeitet. Diese wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Sonderforschungsbereich Transregio 73 (SFB/TR73) „Blechmassivumformung“ gefördert.

Mein besonderer Dank gilt der Ordinaria des Lehrstuhls Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein für die Möglichkeit zur Promotion, die Anleitung zur wissenschaftlichen Arbeit und das gegenübergebrachte Vertrauen während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl. Die Erfahrungen, die ich während dieser Zeit sammeln durfte und die angeeigneten Kenntnisse haben nicht nur zu meiner beruflichen Entwicklung beigetragen, sondern stellen auch einen wesentlichen Bestandteil meiner persönlichen Entwicklung dar.

Weiterhin gilt mein Dank allen wissenschaftlichen und technischen Kollegen und der Verwaltung am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie für die sehr gute und fruchtbare Zusammenarbeit in den letzten Jahren. Nicht zu vergessen sind dabei vor allem alle studentischen Hilfskräfte sowie Bachelor-, Projekt- und Masterarbeiter für die tatkräftige Unterstützung. Weiterhin möchte ich mich bei Jürgen Kaiser und Dr. Wolfgang Böhm für die gute Zusammenarbeit bedanken. In besonderem Maße möchte ich mich bei meinen Kollegen Dr. Robert Schulte, Dr. Manfred Vogel, Dr. Martin Kraus, Dr. Matthias Lenzen, Simon Wituschek, David Römisch, Peter Hetz, Arnold Harms und Henrik Zieroth bedanken, die über die fachlichen Themen hinaus auch durch den freundschaftlichen Rückhalt neben der Zeit am Lehrstuhl zum Erfolg meiner Arbeit beigetragen haben.

Mein größter Dank gilt aber meinen Eltern, die mir den akademischen Werdegang bis hin zur erfolgreichen Promotion überhaupt erst ermöglicht haben, meinen Geschwistern und meiner Freundin Jessica. Ohne ihren Rückhalt und ein offenes Ohr in schwierigeren Zeiten wäre dieser Erfolg nicht möglich gewesen.

Erlangen, im Mai 2025

Andreas Hetzel



# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik und Forschung .....</b>	<b>3</b>
2.1 Leichtbaupotential hochfester Aluminiumlegierungen .....	3
2.2 Grundlagen ausscheidungshärtbarer Aluminiumlegierungen .....	5
2.2.1 Festigkeitssteigernder Mechanismus .....	6
2.2.2 Legierungssystem der 6xxx-Serie .....	8
2.3 Methode der Kurzzeit-Wärmebehandlung zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen .....	9
2.3.1 Zugrundeliegende Wärmebehandlungsmechanismen .....	10
2.3.2 Anwendung von Tailor Heat Treated Blanks .....	16
2.4 Verfahrensklasse der Blechmassivumformung .....	17
2.4.1 Verfahrensdefinition und Grundlagen .....	18
2.4.2 Herausforderungen und Potentiale eines dreidimensionalen Stoffflusses .....	19
2.5 Taumeln von Funktionsbauteilen .....	21
2.5.1 Historische Entwicklung .....	21
2.5.2 Prozessgrundlagen .....	22
2.5.3 Einfluss der Taumelkinematik .....	24
2.5.4 Spannungs- und Formänderungszustände .....	25
2.5.5 Prozessgrenzen und Versagensfälle .....	27
2.5.6 Maßnahmen zur Stoffflusssteuerung im Taumelprozess .....	28
2.5.7 Anwendungsbeispiele und aktuelle Entwicklungen .....	29
2.6 Zusammenfassende Bewertung des Standes der Technik und Forschung .....	31
<b>3 Zielsetzung und methodische Vorgehensweise .....</b>	<b>33</b>
<b>4 Werkstoffe, Versuchsanlagen und Auswertemethoden .....</b>	<b>37</b>
4.1 Eingesetzte Werk- und Schmierstoffe .....	37
4.2 Methode zur lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung .....	38
4.3 Umformtechnische Anlagen und Werkzeuge .....	39
4.3.1 Hydraulische Tiefziehpresse mit Taumelfunktion .....	40
4.3.2 Taumelwerkzeug .....	41
4.4 Versuchsauswertung und Messmethoden .....	43
4.4.1 Geometriebasierte Auswertung .....	43

4.4.2	Werkstoffcharakterisierung der verschiedenen Werkstoffzustände bei Raumtemperatur .....	43
4.4.3	Stoffflussanalyse mittels optischer Dehnungsmessung .....	46
4.5	Finite-Elemente Simulation des Taumelprozesses .....	47
<b>5</b>	<b>Erarbeitung einer spannungs- und stoffflussbasierten Modellvorstellung des Taumelprozesses .....</b>	<b>49</b>
5.1	Numerisch-experimentelle Untersuchung zum Taumeln von Aluminium .....	50
5.2	Identifikation und Bewertung von festigkeitsabhängigen Prozessgrenzen .....	56
5.3	Spannungs- und stoffflussbasierte Modellvorstellung des Taumelprozesses .....	58
<b>6</b>	<b>Qualifizierung einer Wärmebehandlungsstrategie für die Blechmassivumformung .....</b>	<b>65</b>
6.1	Analyse der Wechselwirkung zwischen Wärmebehandlung, Umformprozess und Werkstoffeigenschaften .....	65
6.1.1	Einfluss einer Kurzzeit-Wärmebehandlung auf die mechanischen Eigenschaften .....	67
6.1.2	Wirkungsweise von hohen Umformgraden auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften .....	72
6.1.3	Überlagerung der Wärmebehandlung mit nachfolgend eingebrachten Umformgraden .....	78
6.1.4	Einfluss hoher Umformgrade auf das Auslagerungsverhalten nach einer Kurzzeit- Wärmebehandlung .....	83
6.1.5	Zusammenfassende Bewertung der Wirkungsweise entlang der gesamten Prozesskette .....	90
6.2	Qualifizierung der Kurzzeit-Wärmebehandlung für die lokale Eigenschaftsgradierung .....	92
6.3	Zusammenfassende Bewertung .....	103
<b>7</b>	<b>Einsatz einer Kurzzeit-Wärmebehandlung zur Stoffflusssteuerung im Taumelprozess .....</b>	<b>111</b>
7.1	Einsatz wärmebehandelter Platinen im Taumelprozess und Ableitung der Wirkmechanismen .....	113
7.2	Bewertung der Wirkmechanismen hinsichtlich einer gesteigerten Geometriekomplexität .....	125
7.2.1	Nachweis der Skalierbarkeit durch Vergrößerung des Bauteildurchmessers .....	126

7.2.2	Übertragbarkeit auf beidseitig angebrachte Funktionselemente .....	134
7.2.3	Einfluss einer variierenden radialen Position der Kavität auf den Spannungs- und Formänderungswiderstand .....	140
7.3	Ganzheitliche spannungs- und stoffflussbasierte Prozessbewertung .....	149
7.4	Ableitung einer Auslegungsmethode zur Stoffflusssteuerung in der Blechmassivumformung .....	153
<b>8</b>	<b>Erkenntnistransfer und Qualifizierung der Einsetzeigenschaften .....</b>	<b>159</b>
8.1	Übertragung der Erkenntnisse auf eine industrierelevante Demonstratorgeometrie .....	159
8.2	Qualifizierung der Einsetzeigenschaften .....	167
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>173</b>
<b>10</b>	<b>Summary and outlook.....</b>	<b>177</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>181</b>



## Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\alpha$	°	Anstellwinkel Taumelstempel
$\beta_{\max}$	-	Grenzziehverhältnis (Tiefziehen)
$\Delta s$	mm	Blechdickenänderung
$\varepsilon_W$	-	Abwalggrad
$\varepsilon_x$	%	Technische Dehnung in x-Richtung
$\varepsilon_y$	%	Technische Dehnung in y-Richtung
$\Theta$	°	Taumelwinkel
$\lambda_{\text{Laser}}$	nm	Wellenlänge Laserstrahlung
$\sigma_{\max}$	MPa	Maximal auftretende Spannung
$\sigma_{S_a}$	mm	Standardabweichung der mittleren Blechdicke in der Aufdickung (Maß für die Homogenität)
$\sigma_{x/y/z}$	MPa	Spannungskomponente in entsprechender Raumrichtung
$\phi$	-	Umformgrad
$\phi_1$	-	Hauptformänderung
$\phi_2$	-	Nebenformänderung
$\omega$	-	Umdrehungsrichtung (Taumeln)
$d_o$	mm	Ausgangsdurchmesser
$d_x$	mm	Radialer Stofffluss (Punktverschiebung in radialer Richtung)
$d_{x\max}$	mm	Maximaler radialer Stofffluss (Punktverschiebung in radialer Richtung)
$d_{x\min}$	mm	Minimaler radialer Stofffluss (Punktverschiebung in negativer radialer Richtung)
$d_y$	mm	Tangentialer Stofffluss (Punktverschiebung in tangentialer Richtung)
$d_{y\max}$	mm	Maximaler tangentialer Stofffluss (Punktverschiebung in tangentialer Richtung)
$h$	mm	Höhe (allgemein)
$k_{f_0}$	MPa	Anfangsfließspannung

Symbol	Einheit	Beschreibung
$l_o$	mm	Abstand zweier Punkte (Optische Dehnungsmessung)
$l_L$	mm	Kantenlänge (Laser)
$l_{max}$	mm	Maximale Spotlänge (Laser)
$l_{min}$	mm	Minimale Spotlänge (Laser)
$n$	-	Verfestigungsexponent
$p$	MPa	Flächenpressung
$r$	-	Senkrechte Anisotropie
$r_1$	mm	Radius 1 (Demonstratorgeometrie)
$r_2$	mm	Radius 2 (Demonstratorgeometrie)
$r_3$	mm	Radius 3 (Demonstratorgeometrie)
$r_4$	mm	Radius 4 (Demonstratorgeometrie)
$r_a$	mm	Außenradius
$r_i$	mm	Innenradius
$r_m$	mm	Mittlerer Radius (Beginn der Aufdickung ohne Einlaufschräge)
$r_{m1}$	mm	Mittlerer Radius 1 (Beginn der Aufdickung ohne Einlaufschräge bei Geometrie "Umlaufend innen")
$r_{m2}$	mm	Mittlerer Radius 2 (Ende der Aufdickung ohne Einlaufschräge bei Geometrie "Umlaufend innen")
$s$	mm	Blechdicke (allgemein)
$s_o$	mm	Ausgangsblechdicke
$s_1$	mm	Restblechdicke
$s_a$	mm	Mittlere Blechdicke in der Aufdickung
$s_i$	mm	Mittlere Blechdicke in der inneren Aufdickung (Demonstratorgeometrie)
$s_m$	mm	Mittlere Blechdicke im Bauteilzentrum (Demonstratorgeometrie)
$s_{max}$	mm	Maximale Blechdicke
$s_{min}$	mm	Minimale Blechdicke
$s_z$	mm	Mittlere Blechdicke im Zwischenbereich (Demonstratorgeometrie)

Symbol	Einheit	Beschreibung
$t$	h	Auslagerungszeit
$t_{AK}$	h	Abkühlzeit
$t_{KA}$	h	Kaltauslagerungszeit
$t_{WB}$	h	Wärmebehandlungsdauer
$v_{Laser}$	mm/s	Verfahrgeschwindigkeit der Laseroptik
$v_{max}$	1/s	Maximale Umdrehungsgeschwindigkeit (Taumeln)
$v_{min}$	1/s	Minimale Umdrehungsgeschwindigkeit (Taumeln)
$A$	mm <sup>2</sup>	Fläche (allgemein)
$A_g$	%	Gleichmaßdehnung
$D$	mm	Durchmesser (allgemein)
$D_a$	mm	Außendurchmesser
$D_L$	mm	Durchmesser Laserbahn
$E$	-	Emmissionskoeffizient
$F$	kN	Kraft (allgemein)
$F_{D120}$	kN	Skalierte ideale Umformkraft (bei gleich wirkender Flächenpressung)
$F_{max}$	kN	Maximale Pressenkraft
$F_{min}$	kN	Minimale Pressenkraft
$F_U$	kN	Umformkraft
$Ra$	µm	Mittenrauwert
$R_m$	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	Streckgrenze
$T$	°C	Temperatur (allgemein)
$T_h$	°C	Haltetemperatur
$T_{LG}$	°C	Lösungsglühtemperatur
$T_{max}$	°C	Maximaltemperatur
$T_s$	°C	Schmelztemperatur
$T_{WA}$	°C	Warmauslagerungstemperatur
$T_{WB}$	°C	Wärmebehandlungstemperatur
$U$	-	Anzahl Taumelrunden

Symbol	Einheit	Beschreibung
$U_h$	-	Anzahl Taumelrunden Hochfahrphase
$U_k$	-	Anzahl Taumelrunden Konstanthaltephase
$U_r$	-	Anzahl Taumelrunden Rückstellphase

Abkürzung	Beschreibung
3D	Dreidimensional
Al	Aluminium
ARB	Accumulative Roll Bonding
BMU	Blechmassivumformung
BU	Blechumformung
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge-Coupled Device
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
Cu	Kupfer
DIN	Deutsches Institut für Normung
DP	Dualphasenstahl
$d_{\text{radial}} \uparrow$	Wirkmechanismus 2 "Begünstigter Werkstofffluss aus der entfestigten primären Umformzone"
EN	Europäische Norm
F <sub>1</sub>	Forschungshypothese 1
F <sub>2</sub>	Forschungshypothese 2
$F_{\text{Reaktion}} \downarrow$	Wirkmechanismus 1 "Reduzierung des lokal wirkenden Fließwiderstandes"
GP	Guinier-Preston
HB	Härte Brinell
HV	Härte Vickers
ISO	International Organization for Standardization
IT	Toleranzklasse
KTL	Kathodische Tauchlackierung
max.	maximal
Mg	Magnesium
min.	minimal

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
Mn	Mangan
RT	Raumtemperatur
Si	Silizium
T <sub>4</sub>	Kaltausgelagerter Zustand
T <sub>6</sub>	Warmausgelagerter Zustand
THTB	Tailor Heat Treated Blank
TZP	Tiefziehpresse
var.	variierend (Untersuchungsvariable)
W	Lösungsgeglühter Zustand
W*	Quasi-lösungsgeglühter Zustand (Infolge der Kurzzeit-Wärmebehandlung)
WB	Wärmebehandlung
Zn	Zink



# 1 Einleitung

Mobilität ist seit jeher ein Grundbedürfnis der Menschheit und Treiber von Wohlstand und Fortschritt [1]. Aufgrund aktueller sozio-ökologischer Entwicklungen und anderer Randbedingungen wie globalen Lieferketten steht diese mehr denn je im Mittelpunkt des gesellschaftlichen Wandels [2]. Gerade mit Blick auf Ressourcenknappheit und Schadstoffausstoß werden dem Transportwesen und der Industrie ein großer Stellenwert der Verursachung, aber auch des möglichen Potentials zur Einsparung zugeschrieben. Mit einem Anteil von 21% und 18% sind diese beiden Sektoren neben der Energieerzeugung die größten Emittenten von Kohlenstoffdioxid [3]. Dieses besitzt den größten Anteil an den weltweiten schädlichen Treibhausgasen [4]. Nicht verwunderlich ist entsprechend die immer lauter werdende gesellschaftliche sowie politische Forderung nach dessen Reduktion und Regulation [5].

Downsizing, hybride Antriebsvarianten und Elektrifizierung sind nur ein Teil der betriebenen Maßnahmen, um die geforderten Grenzwerte an Kohlenstoffdioxid-Emissionsleistung neuer Personenkraftwagen einzuhalten [6]. Folglich erwächst speziell für Komponenten im Antriebsstrang die gegensätzliche Anforderung nach einem geringeren Gesamtgewicht und gleichzeitig nach einer höheren Belastbarkeit sowie gesteigerter Funktionalität [7]. Gerade diese gegensätzlichen Anforderungen bringen konventionelle Fertigungsverfahren aufgrund von langen, ineffizienten Prozessketten oder gesteigerter Geometriekomplexität an ihre Grenzen.

Als mögliche Antwort wurde in den letzten Jahren in diesem Zusammenhang die neuartige Verfahrensklasse der Blechmassivumformung (BMU) erforscht. Diese kombiniert die beiden Verfahren der Blech- und Massivumformung und ermöglicht so die Erweiterung der Prozessgrenzen der einzelnen Verfahren [8]. In diesem Rahmen fokussieren sich aktuelle Forschungsarbeiten auf die Herstellung von maßgeschneiderten Halbzeugen mit einem lokalen Blechdicken- oder Eigenschaftsprofil durch einen Taumelprozess, welche beispielsweise Anwendung im Antriebsstrang finden. Das Taumeln bietet entscheidende Vorteile gegenüber dem konventionellen Stauchen hinsichtlich erforderlicher Umformkraft und Formgebungsgrenzen. Als maßgebliche Herausforderungen konnte dabei die Stoffflusssteuerung während des Prozesses identifiziert werden. Gerade beim Einsatz von hochfesten Aluminiumlegierungen bedarf es festigkeitsbedingt geeigneter stoffflusssteuernder Maßnahmen, da diese zwar ein

hohes Leichtbaupotential, allerdings auch ein reduziertes Formänderungsvermögen gegenüber konventionellem Stahl aufweisen [9]. Eine Möglichkeit, welche bereits bei Blechumformprozessen angewendet wird, ist die lokale Kurzzeit-Wärmebehandlung von ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen, sogenannte Tailor Heat Treated Blanks (THTB) [10]. Eine ganzheitliche Untersuchung der Wirkzusammenhänge zwischen einer Wärmebehandlung und nachfolgend eingebrachten hohen plastischen Deformationen im dreidimensionalen Spannungs- und Formänderungszustand der Blechmassivumformung ist bisher jedoch nicht erfolgt.

Übergeordnetes Ziel der vorliegenden Arbeit ist deshalb die Erarbeitung und Qualifizierung einer Wärmebehandlungsstrategie zur Stoffflusssteuerung durch lokale Eigenschaftsgradierung ausscheidungshärtbarer Aluminiumlegierungen in der Blechmassivumformung. Auf Basis eines experimentell-numerischen Untersuchungsansatzes soll eine spannungs- und stoffflussbasierte Modellvorstellung des Taumelprozesses zur Bewertung der Stoffflusssteuerung erarbeitet werden. Aufbauend auf der Forschungslücke im Stand der Technik soll eine ganzheitliche Charakterisierung hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften in Folge einer Kurzzeit-Wärmebehandlung unter Einfluss hoher plastischer Deformation bei unterschiedlichen Auslagerungszeiten erfolgen. Im Folgenden soll die qualifizierte Wärmebehandlungsmethode zur Stoffflusssteuerung im Taumelprozess eingesetzt werden. Eine Bewertung hinsichtlich einer gesteigerten Geometriekomplexität stellt die Allgemeingültigkeit der erarbeiteten Ursache-Wirkbeziehungen in einer Auslegungsmethode zur Stoffflusssteuerung in der Blechmassivumformung sicher.

Diese Arbeit trägt damit übergeordnet zur Qualifizierung hochfester Aluminiumlegierungen als Werkstoffsubstitut für konventionelle Stahlwerkstoffe im Antriebsstrang zukünftiger Fahrzeugmodelle und bei der Drehmomentübertragung alternativer Antriebsarten bei. Durch den Einsatz von taumelnd hergestellten Halbzeugen oder Funktionsbauteilen aus hochfesten Aluminiumlegierungen kann zudem das resultierende Gesamtgewicht verringert oder die übertragbare Last erhöht werden. Hierdurch kann eine gesteigerte Ressourceneffizienz und ein verbesserter Schaltkomfort durch ein reduziertes Massenträgheitsmoment bewegter Massen umgesetzt werden. Damit wird den gestiegenen gesellschaftlichen Herausforderungen für eine individuelle und zukunftsorientierte Mobilität Rechnung getragen. Aufgrund einer ganzheitlichen Bewertung der Methode der Kurzzeit-Wärmebehandlung zur Stoffflusssteuerung wird prozessübergreifend die Grundlage für die Erschließung weiterer Anwendungsfelder von THTB in der Blechmassivumformung geschaffen.

## **2 Stand der Technik und Forschung**

In diesem Kapitel wird der relevante Stand der Technik als Grundlage der vorliegenden Arbeit dargestellt. Dieser gliedert sich neben einer allgemeinen Erörterung zum Leichtbaupotential von hochfesten Aluminiumlegierungen vor allem in die Möglichkeiten zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen durch Wärmebehandlungsstrategien sowie in die Charakterisierung und Prozessbeschreibung des Taumelverfahrens, welches der Blechmassivumformung zugeordnet werden kann. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit einer Bewertung des Standes der Technik hinsichtlich des identifizierten Forschungsbedarfs.

### **2.1 Leichtbaupotential hochfester Aluminiumlegierungen**

Globale Entwicklungen wie ein gesteigertes Umwelt- und Nachhaltigkeitsbewusstsein oder die Individualisierung der Mobilität stellen produzierende Unternehmen vor steigende Herausforderungen, wie beispielsweise eine Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen während der Herstellung sowie über den gesamten Lebenszyklus der Produkte oder einem signifikanten Anstieg der Variantenvielfalt durch individuelle Produktkonfigurationen [11]. Besonders im Automobilbau trägt ein Anstieg an sicherheitsrelevanten Bauteilen und eine Vielzahl an zusätzlichen Funktionen sowohl zu einer kontinuierlichen Zunahme an Komplexität als auch an Gesamtgewicht bei [1]. Folglich bedarf es geeigneter Maßnahmen, diesen Entwicklungen entgegenzuwirken, wobei konsequenter Leichtbau eine vielversprechende Methode darstellt. Der Begriff Leichtbau darf dabei allerdings nicht rein auf die Definition der Reduzierung von Masse in einem bestehenden System bei gleichzeitiger Erhaltung der Funktionalität aufgefasst werden [12]. Vielmehr bedarf es der ganzheitlichen Darstellung aller relevanten Wirkzusammenhänge.

Entsprechend ist eine Untergliederung des Oberbegriffs Leichtbau sinnvoll. Dieser lässt sich nach Klein und Gänsicke [13] in die Bereiche Stoff-, Fertigungs-, Form-, Konzept- sowie Bedingungsleichtbau untergliedern, welche alle mit unterschiedlichen Ansätzen zur übergeordneten Leichtbaustrategie beitragen sollen. Aufgrund der fachlichen Ausrichtung der vorliegenden Arbeit wird im Folgenden speziell auf den Form- sowie Stoffleichtbau und deren Bedeutung für die Arbeit eingegangen.

### **Formleichtbau**

Der Formleichtbau lässt sich nach Friedrich et al. [1] als Optimieren der Materialverteilung im Bauteil definieren. Das Grundprinzip besteht in einer beanspruchungsgerechten Auslegung, bei welcher Bereiche mit hoher Beanspruchung gezielt durch verschiedene Maßnahmen gestärkt und weniger stark beanspruchte Bereiche entsprechend geschwächt werden. Dabei wird der tragende Querschnitt des Bauteils analysiert und folglich optimiert, wohingegen der Werkstoff zunächst unberücksichtigt bleibt [14]. Konstruktive Versteifungen in Form von Schalen, Sicken oder Rippen werden eingebracht, welche den Widerstand gegen Verformung oder Instabilität erhöhen, ohne dabei maßgeblich das Eigengewicht des Bauteils zu steigern [15]. Eine übergeordnete Rolle wird im Formleichtbau dem Prinzip des Kraftflusses und der Krafteinleitung zugeschrieben [16], nach welchem Kraftflusslinien den Verlauf der Kraft in einem Bauteil aufzeigen. An Orten mit hoher Flussliniendichte kommt es zu Spannungsspitzen. Diese treten vor allem an scharfkantigen Querschnittsübergängen oder Kerben auf und sind im Sinne des Formleichtbaus zu vermeiden. Gegenstand aktueller Forschung sind prozessangepasste Halbzeuge, welche über eine lokal angepasste Materialstärkenverteilung verfügen, wodurch eine zielgerichtete Kraftübertragung oder Ausformung von Nebenformelementen ermöglicht wird [17]. Ein prominentes Beispiel zu angewandtem Formleichtbau in diesem Gebiet ist die Herstellung von sogenannten Flexplates, welche die Kombination aus Anlasszahnkranz und Mitnehmerscheiben einer Kupplung im Antriebsstrang von modernen Fahrzeugen darstellen, bei welcher durch gezielte Materialverteilung und kontinuierliche Querschnittsübergänge das Prinzip des Kraftflusses umgesetzt wird [18]. Dabei wird nicht nur das Gesamtgewicht des Bauteils reduziert, sondern durch eine Verringerung der bewegten Masse zudem das Massenträgheitsmoment positiv beeinflusst. Eine dynamischere Handhabung im Betrieb ist die Folge [19].

### **Stoffleichtbau**

Im Rahmen des Stoffleichtbaus soll das Gewicht von Baugruppen ohne einen Verlust der benötigten Festigkeit durch den Einsatz von speziellen Leichtbauwerkstoffen mit einer hohen spezifischen Festigkeit bezogen auf deren Dichte reduziert werden [20]. Einerseits kann die Dichte durch Substitution mit leichteren Materialien verringert werden oder andererseits die Festigkeit durch gezielte Maßnahmen gesteigert werden. Ebenso ist eine Kombination aus beidem möglich. [1]

Entsprechend werden im Stoffleichtbau vermehrt konventionelle Tiefziehstähle durch hoch- oder höchstfeste Stähle substituiert, wobei durch eine gesteigerte Festigkeit gleichzeitig eine geringere Wandstärke eingesetzt sowie folglich das Gesamtgewicht reduziert werden können [21].

Neben diesen Komponenten mit enormen Anforderungen an Festigkeit gibt es im Fahrzeug andere Karosseriebereiche, bei welchen die reine Gewichtsreduzierung im Vordergrund steht und die Festigkeit nur eine untergeordnete Rolle spielt. Als Beispiel kann die Außenhautherstellung für ein Automobil genannt werden [22]. Hier liegt der Fokus neben einem geringen Gewicht vor allem auf Eigenschaften wie einer einwandfreien Optik und einer guten Verarbeitbarkeit im Umformprozess. Im Bereich neuer Leichtbauwerkstoffe stehen deshalb neben faserverstärkten Kunststoffen oder Titanlegierungen vor allem die Werkstoffsysteme hochfester Aluminiumlegierungen aufgrund ihrer hohen spezifischen Festigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte im Fokus aktueller Forschung [23]. Die am häufigsten eingesetzten Legierungssysteme sind dabei die der 5xxx-, 6xxx- und 7xxx-Serien [24]. Während die 7xxx-Serie durch das Erzielen teils sehr hoher Festigkeiten vorwiegend im Flugzeugbau sowie in der Raumfahrtindustrie eingesetzt wird [24], finden die 5xxx- sowie 6xxx-Serien Anwendung bei Struktur- und Außenhautteilen im Fahrzeug [25].

Allerdings verfügen Aluminiumlegierungen neben den zahlreichen Vorteilen auch über entscheidende Nachteile hinsichtlich Umformbarkeit und Duktilität bezogen auf ebendiese Eigenschaften von konventionellen Tiefziehstählen [26]. Entsprechend sind geeignete Maßnahmen zur Steigerung der Formgebungsgrenzen von essenzieller Bedeutung für den zukünftigen Einsatz von ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen. Neben einer Verbesserung der tribologischen Eigenschaften [27] oder einer Anpassung der Werkzeug- und Bauteilgeometrie [28] eignen sich besonders Wärmebehandlungsverfahren zur werkstückseitigen Erweiterung der Formgebungsgrenzen von Stahl- und Aluminiumlegierungen [29]. Ein Überblick über die Grundlagen von ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen wird im nächsten Absatz gegeben.

## **2.2 Grundlagen ausscheidungshärtbarer Aluminiumlegierungen**

Aluminium ist mit rund 7,5 Gew.-% das am häufigsten vorkommende Metall in der Erdkruste und nach Eisen das am häufigsten Eingesetzte in technischen Anwendungen [30]. Aufgrund seines günstigen Verhältnisses von Festigkeit zu Dichte und einer hohen Korrosionsbeständigkeit wird

Aluminium zu den bedeutendsten Leichtbauwerkstoffen gezählt [24]. Entsprechend konnte ein Anstieg von durchschnittlich fünf auf 50 Kilogramm im Automobilbau innerhalb des Zeitraumes von 1998 bis 2017 verzeichnet werden [31]. Bezogen auf die Verarbeitungsart werden Aluminiumlegierungen in Knet- sowie Gusslegierungen untergliedert [32]. Letztere werden vor allem für Verbindungselemente oder Gehäuse im Fahrwerk oder im Antriebsstrang eingesetzt [24]. Großflächige Komponenten im Außenhautbereich oder im Karosseriebau werden hingegen aus Aluminiumknetlegierungen hergestellt. Diese werden durch Umformverfahren wie Walzen oder Strangpressen in die gewünschte Form gebracht [32].

Aluminiumlegierungen lassen sich in Abhängigkeit ihrer Verfestigungsmechanismen in die beiden Hauptgruppen naturharte sowie aushärtbare Legierungen unterscheiden. Während die hohe Festigkeit bei naturharten Legierungen hauptsächlich durch Mischkristallhärtung oder Kaltverfestigung erzielt wird [25], erreichen aushärtbare Legierungen diese durch die Bildung von Ausscheidungen der beigefügten Legierungselemente im Rahmen einer gezielten Wärmebehandlung [25]. Nachfolgende Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die unterschiedlichen Legierungsserien von Aluminiumknetlegierungen. Dabei zählen die 2xxx-, 6xxx- und 7xxx-, sowie Teile der 4xxx-Serie zu den aushärtbaren Legierungen. Der grundlegende Mechanismus zur Festigkeitssteigerung beruht auf der Auslagerung von Legierungselementen und einer daraus resultierenden Behinderung der Versetzungsbewegung [24].

Tabelle 1: Übersicht der Aluminiumknetlegierungen nach DIN EN 573-1 [33].

Serie	1xxx	2xxx	3xxx	4xxx	5xxx	6xxx	7xxx	8xxx
Legierungselemente	-	Cu	Mn	Si	Mg	Si-Mg	Zn-Mg	Sonstige

### 2.2.1 Festigkeitssteigernder Mechanismus

Bei aushärtbaren Aluminiumlegierungen ist die Wärmebehandlung nach dem Kaltwalzen von entscheidender Bedeutung für die gewünschte hohe Festigkeit [24]. Diese setzt sich aus den Schritten Lösungsglühen, Abschrecken und Auslagern zusammen und ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Die einzelnen Vorgänge sowie spezifische Charakteristika werden im nachfolgenden Teil erläutert.

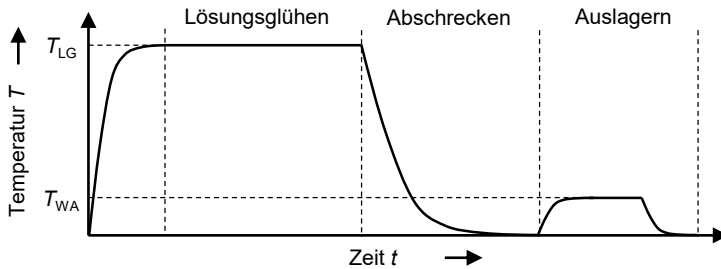


Bild 1: Schematischer Wärmebehandlungsverlauf von ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen, nach [24].

### **Lösungsglühen zur Bildung eines homogenen Mischkristalls**

Nach dem Kaltwalzen der Aluminiumknetlegierung wird diese bei einer spezifischen Temperatur zwischen  $450\text{ °C} - 550\text{ °C}$  über eine entsprechende Dauer lösungsgeglüht [25]. Eine gestiegene Löslichkeit der Atome im Metallgitter resultiert in der Bildung eines homogenen Mischkristalls. Eine Erhöhung der Beweglichkeit der Atome bewirkt zudem eine Zunahme der Leerstellen im Gitter [34]. Zu beachten gilt dabei der genaue Temperaturbereich zwischen vollständiger Lösung der Legierungselemente und beginnender Anschmelzung im Gefüge [35].

### **Abschrecken zur Unterdrückung von Ausscheidungsbildung**

Durch ein ausreichend schnelles Abschrecken der Legierung von Lösungsglüh- auf Raumtemperatur bleiben für die Diffusionsvorgänge zur Bildung von Ausscheidungen nicht genügend Zeit [36]. Ein Unterdrücken von Ausscheidungsbildungen und ein zwangsgelöster Zustand der Atome sind die Folge [34]. Ebenso bleiben die vorher gebildeten Leerstellen teilweise vorhanden. Im Anschluss liegt ein an Fremdatomen sowie Leerstellen doppelt übersättigter Mischkristall vor, welcher für die Bildung von festigkeitssteigernden Ausscheidungen vorausgesetzt wird [36]. Bei Unterschreiten der kritischen Abkühlgeschwindigkeit bildet sich eine intermetallische Phase vorrangig an Gitterfehlern oder Korngrenzen, welche eine Versprödung und daraus resultierend eine Reduzierung der mechanischen Eigenschaften zur Folge hätte [35]. Aufgrund der zwei nebeneinander vorliegenden metallischen Phasen steigt die Korrosionsneigung deutlich [37].

### **Auslagern zur Festigkeitssteigerung**

Nach dem Abschrecken liegt im Aluminiummischkristall ein thermodynamisches Ungleichgewicht vor, welches er bestrebt ist zu verlassen [35]. Dabei wird temperatur- und zeitabhängig eine zweite Phase ausgeschieden.

Bei einer Auslagerung bei Raumtemperatur, einer sogenannten Kaltauslagerung, bilden sich kohärente Ausscheidungen, welche sich aufgrund einer ausreichenden Ähnlichkeit in die vorhandene Gitterstruktur einfügen [35]. Aufgrund einer geringen Verzerrung des Gitters werden hier meist moderate Festigkeitssteigerungen erreicht. Zur Erzeugung von teil- und inkohärenten Ausscheidungen kann eine Warmauslagerung bei Temperaturen zwischen 100 - 200 °C durchgeführt werden. Da diese Teilchen in ihrer Struktur deutlich vom Gitter abweichen, folgen hier die größten Gitterverspannungen. Zusammenfassend lassen sich entsprechend mit der Warmauslagerung höhere Festigkeiten erreichen [38].

Je nach Wärmebehandlung und Dauer lassen sich unterschiedliche Werkstoffzustände für Aluminiumlegierungen nach DIN EN 515 [39] erzielen. Ausgewählte und für die Arbeit relevante Zustände sind in Tabelle 2 aufgelistet. Je nach Legierungszusammensetzung und Wärmebehandlung unterscheiden sich die Ausscheidungsmechanismen und resultierenden mechanischen Eigenschaften. Im Folgenden wird deshalb speziell auf das Legierungssystem der 6xxx-Serie eingegangen.

Tabelle 2: Übersicht ausgewählter Werkstoffzustände von Aluminiumlegierungen nach DIN EN 515 [39]

Zeichen	Werkstoffzustand
W	Lösungsgeglüht (instabil)
W* [40]	Kurzzeitwärmebehandelt, quasi-lösungsgeglüht (instabil)
T4	Lösungsgeglüht und kaltausgelagert
T6	Lösungsgeglüht und warmausgelagert

### 2.2.2 Legierungssystem der 6xxx-Serie

Während Aluminiumlegierungen der 5xxx-Serie aufgrund von auftretenden Fließfiguren [41] vorwiegend im Strukturbereich eingesetzt werden, können Legierungen der 6xxx-Serie zudem im sichtbaren Außenhautbereich eingesetzt werden [42]. Da hier der Fokus neben der Optik vor allem auf Leichtbau liegt, werden typischerweise Blechdicken zwischen 0,9 mm - 1,2 mm verwendet. Hinsichtlich der vielseitigen Anwendbarkeit werden rund 50% der weltweiten Aluminiumproduktion der 6xxx-Serie zugeordnet, wobei die Legierungen EN AW-6016 sowie EN AW-6111 am häufigsten eingesetzt werden [42]. Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, sind die Hauptlegierungselemente Magnesium und Silizium [24]. Entsprechend

weisen diese Legierungen ein spezifisches Auslagerungsverhalten auf. Im Rahmen der Kaltauslagerung bilden sich *MgSi-Cluster* sowie kugelförmige *GP(I)-Zonen*, welche zu einer Verzerrung des Metallgitters und einem Anstauen von Versetzungen an den Korngrenzen führen. Aufgrund der Behinderung der Versetzungsbewegung, welche Träger der plastischen Verformung ist, wirken diese Ausscheidungen festigkeitssteigernd [43]. Findet die Auslagerung bei erhöhten Temperaturen als Warmauslagerung statt, bewirkt die Bildung von nadelförmigen *GP(I)-Zonen* sowie darauf folgend von  $\beta''$ -,  $\beta'$ - und  $\beta$ -Phasen eine zusätzliche Festigkeitssteigerung [43]. Neben der Auslagerung besteht zudem die Möglichkeit, durch Zugabe von Kupfer in der Legierungszusammensetzung, die Festigkeit zu erhöhen. Dabei bilden sich neben der  $\beta'$ -Phase eine  $Q'$ -Phase, welche sich mit fortschreitender Auslagerungsdauer in stabile  $\beta$ - und  $Q$ -Phasen umwandelt [44]. Die höhere Dispersion der stäbchenförmigen, teilkohärenten  $Q'$ -Phase sowie der nadelförmigen, teilkohärenten  $\beta''$ -Phase wird dabei als Grund der Festigkeitssteigerung genannt [45].

Die speziell für den Automobilbau entwickelten Legierungssysteme der 6xxx-Serie weisen eine Besonderheit hinsichtlich des Auslagerungsverhaltens auf. Nach der Formgebung der Bleche, durch beispielsweise Tiefziehoperationen im kaltausgelagerten Zustand T4, werden die Teile an der gefügten Karosserie der Kathodischen Tauchlackierung (KTL) und einem anschließenden Lackeinbrennprozess unterzogen. Dieser Wärmebehandlungsschritt bei etwa 185 °C über eine Dauer von 20 Minuten reicht aus, um die Auslagerungssequenz und folglich die Festigkeitszunahme von Legierungen der 6xxx-Serie zu initiieren [46].

Trotz der breiten Anwendbarkeit verfügen Aluminiumlegierungen im Vergleich zu duktilen Stahlwerkstoffen über ein eingeschränktes Formänderungsvermögen. Entsprechend bedarf es hinsichtlich steigender geometrischer Komplexität der Entwicklung von Maßnahmen, dieses zu erweitern.

### **2.3 Methode der Kurzzeit-Wärmebehandlung zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen**

Eine Möglichkeit zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen von Blechwerkstoffen ist eine dem Umformprozess vorgelagerte Wärmebehandlung. Der Einsatz von thermischen Verfahren zielt dabei auf eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften ab, um durch Interaktion zwischen festen und entfestigten Bereichen den Stofffluss gezielt zu steuern. Dabei kann zudem zwischen der Kalt- und der Halbwarm- oder Warmumformung unterschieden werden. Die letzteren beiden bedingen meist komplizierte und

teure Werkzeuge mit beispielsweise Kühlkanälen, welche mit thermischen Spannungen belastet werden [47]. Konventionelle Flüssigschmiermittel sind aufgrund der hohen Temperatur oft nur eingeschränkt nutzbar. Entsprechend sind Kaltumformprozesse zu bevorzugen. In diesem Kontext hat sich in den letzten Jahrzehnten die Methode der Kurzzeit-Wärmebehandlung etabliert, bei welcher die Festigkeit von ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen durch kürzesten Wärmeeintrag reduziert wird. Nach Abkühlung bleiben diese Eigenschaften temporär bestehen und das Bauteil kann kaltumgeformt werden [48].

### 2.3.1 Zugrundeliegende Wärmebehandlungsmechanismen

Prinzipiell lassen sich drei grundlegende Mechanismen unterscheiden, welche bedingt durch den thermischen Wärmeeintrag im Aluminium ablaufen. Diese gliedern sich in Erholung, Rekristallisation und Ausscheidungsmodifizierung. Im Folgenden werden diese grundlegend erläutert und unterschiedliche Einflussparameter, deren Wirkungsweise sowie die energetische und prozesstechnische Anwendbarkeit für Verfahren der Blechmassivumformung diskutiert. Die grundlegende Wirkungsweise sowie der tragende mikrostrukturelle Effekt der drei zu bewertenden Mechanismen sind in Bild 2 gegenübergestellt.

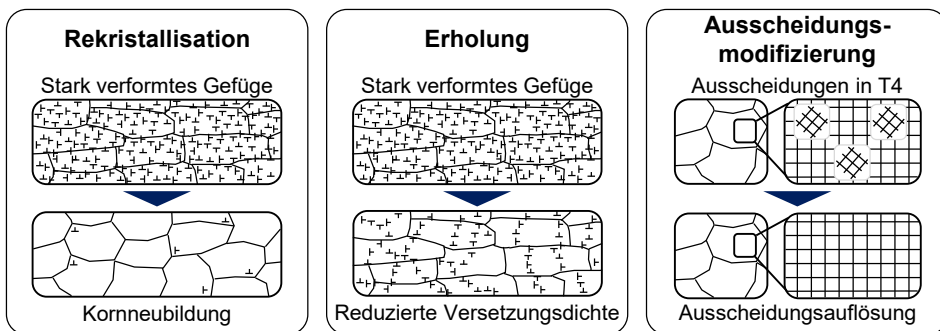


Bild 2: Mikrostrukturelle Effekte der Rekristallisation, der Erholung sowie der Ausscheidungsmodifizierung, nach [24].

#### ***Kornneubildung durch Rekristallisationsglühen***

Bei der statischen, primären Rekristallisation wird durch thermisch aktivierte Keimbildung und -wachstum ein neues, globulares Korngefüge im vorher verformten Werkstoff gebildet. Dabei ist die Korngröße maßgeblich vom vorliegenden Umformgrad abhängig. Je höher der vorher eingebrachte Umformgrad, desto größer die Keimzahl. Die Keime stellen

dabei Ausgangspunkte für das Kornwachstum dar [24]. Entsprechend lässt sich ein gewisser Mindestumformgrad als Voraussetzung für Rekristallisation definieren, welcher bei bis zu 15% plastischer Dehnung im uniaxialen Zugversuch liegt [49]. Von Vorteil für die Bildung einer feinen Korngröße ist dabei zudem eine schnelle Aufheizrate, damit die gespeicherte Verformungsenergie nicht durch Polygonisation oder Versetzungsauslöschung als Mechanismen der Erholung abgebaut und dadurch die Keimbildung reduziert werden kann [50]. Zudem werden langsame Abkühlraten von  $\leq 30$  K/h empfohlen, um die Bildung eines übersättigten Mischkristalls und somit eines instabilen Zustands zu vermeiden. Hufnagel schlägt beispielsweise eine zweistündige Haltezeit bei  $230\text{ °C}$  im Ofen bei anschließender Abkühlung an Luft vor [51]. Aufgrund der Abhängigkeit von Umformgrad und Glühdauer wird die Rekristallisationstemperatur üblicherweise als die Temperatur definiert, bei welcher ein stark kaltverformter Werkstoff innerhalb einer Stunde vollständig rekristallisiert [49]. Eine Rekristallisation von technischen Aluminiumlegierungen erfolgt mit einer Dauer von mindestens einer Stunde [24], abhängig von der Legierung in Temperaturbereichen zwischen  $300 - 400\text{ °C}$ . Dies entspricht in etwa  $0,6 * T_s$  [49].

Aufgrund eines für die Rekristallisation vorausgesetzten Mindestumformgrades kann die statische Rekristallisation für eine Prozesskette der Blechmassivumformung ausschließlich nach einem ersten Umformprozess erfolgen. Dies hat eine signifikante Verlängerung der Prozesskette zur Folge. Zudem bedarf es einer Glühdauer von einer Stunde bei Temperaturen zwischen  $300 - 400\text{ °C}$ . Die sogenannte dynamische Rekristallisation erfolgt während des Umformprozesses bei entsprechenden Temperaturen ab  $0,7 * T_s$ , weshalb hier bereits von einer Warmumformung gesprochen werden kann. Dabei müssen allerdings ebenfalls die Herausforderungen einer Warmumformung berücksichtigt werden [49].

### ***Reduzierung der Versetzungsdichte und Abbau von Spannungsfeldern durch Erholung***

Im Vergleich zur Rekristallisation beinhaltet der Begriff der Erholung keine Neubildung von Körnern, sondern lediglich eine Reduktion der Versetzungsdichte durch Abbau oder Umlagerung [24]. Dabei erfolgt keine Verlagerung von Großwinkelkorngrenzen, wodurch die verformungsinduzierte Kornlängung sowie die eingebrachte Textur erhalten bleiben [49]. Durch thermisch aktivierte Prozesse, wie das Quergleiten von Schraubenversetzungen oder das Klettern von Stufenversetzungen, wird das mechanische Kraftgleichgewicht zwischen den Versetzungen überwunden.

Folglich wird ein Wandern von Versetzungen auf andere Gleitebenen und die Einnahme von energetisch günstigeren Positionen ermöglicht. Die Bewegung der Versetzungen wird durch eine Reduzierung der Versetzungsdichte erleichtert und folglich die vorliegenden Spannungsfelder abgebaut [24]. Die Versetzungsdichte wird durch zwei gleichzeitig ablaufende metallphysikalische Mechanismen reduziert, die Versetzungsauslöschung sowie die Versetzungspoligonisation [50]. Dieser Vorgang konkurriert teilweise mit der Rekristallisation und der Übergang kann nicht immer exakt getrennt werden. Üblicherweise erfolgt die Erholung unterhalb der Rekristallisationstemperatur bei  $\leq 0,5 \cdot T_S$  [49]. Der tragende Mechanismus des Auslöschens von Versetzungen bedingt auch hier eine der Wärmebehandlung vorangegangene plastische Verformung des Materials, wenngleich der Verformungsgrad nicht über dem kritischen Verformungsgrad der Rekristallisation liegen muss. Jedoch kann es aufgrund einer Überschreitung beim Verformungsgrad oder der Temperatur-Zeit-Kombination zum Übergang in die Rekristallisation kommen.

Im Vergleich zur Rekristallisation findet die Erholung von technischen Aluminiumlegierungen kontinuierlich und bei niedrigeren Temperaturen zwischen 100 - 250 °C statt [50]. Aufgrund eines bei entsprechenden Temperaturen sofortigen Einsetzens der Erholungsvorgänge sind Zeiten zwischen wenigen Minuten bis einigen Stunden, je nach Umformgrad sowie Temperatur, denkbar [49]. Allerdings werden nur geringere Entfestigungsgrade erzielt. Ähnlich wie bei der Rekristallisation besteht aufgrund der teils langen Wärmebehandlungszeiten sowie der zuvor einzubringenden plastischen Verformung nur bedingt die Möglichkeit der Einbindung in eine umformtechnische Prozesskette.

### ***Abbau von Versetzungsbehinderungen durch Ausscheidungsmodifizierung***

Als letzter mikrostruktureller Mechanismus kommt die Auflösung von Ausscheidungen im Werkstoff in Frage. Der Einsatz ausscheidungshärtbarer Aluminiumlegierungen für den unter anderem als Rückbildungsglühung bezeichneten Prozess muss als Voraussetzung erfüllt sein [25]. Auf metallphysikalischer Ebene werden dabei festigkeitssteigernde Ausscheidungen im Kristallgitter durch kurzzeitigen Wärmeintrag temporär aufgelöst [10]. Die Gitterverzerrung als Behinderung der Versetzungsbewegung sowie die Festigkeit werden dabei maßgeblich reduziert. Dies ist sogar teilweise mit dem lösungsgeglühten und abgeschreckten Zustand vergleichbar [24]. Die Ausscheidungsmorphologie hängt dabei in großem Maße von der vorliegenden Legierung, der

Temperatur sowie der anschließenden Auslagerungszeit ab. Im Unterschied zur Rekristallisation oder der Erholung kann die Ausscheidungsmodifikation als instabiler Zustand beschrieben werden, da sich die festigkeitssteigernden Ausscheidungen in ähnlicher Weise wie beim Kaltauslagern nach Lösungsglühen über eine gewisse Zeit zurückbilden und die Festigkeit wieder ansteigt [52]. Diese Kaltauslagerung beginnt direkt nach der Wärmebehandlung, zu Beginn sind die Festigkeitssteigerungen jedoch moderat, wodurch ein Zeitfenster von  $< 30 - 60$  min zur anschließenden Umformung im weitestgehend entfestigten Zustand genutzt werden kann [24].

Bereits 1941 konnten Haase et al. die Möglichkeit einer Festigkeitsreduktion durch eine Kurzzeit-Wärmebehandlung nachweisen [53]. Durch sogenanntes Rückglühen werden die MgSi-Cluster mit festigkeitssteigernder Wirkung temporär aufgelöst. Dabei entsteht ein quasi-lösungsgeglühter Zustand, welcher allerdings mit einer deutlich verkürzten Dauer und bei reduzierten Temperaturen im Vergleich zum Lösungsglühen erreicht werden kann [54]. Aufgrund des dabei erneut gebildeten übersättigten Mischkristalls setzt unmittelbar nach der Wärmebehandlung der Prozess der zuvor beschriebenen Kaltauslagerung ein. Dabei beginnt durch Diffusionsprozesse die Rückbildung der MgSi-Cluster, welche wiederum folglich Versetzungsbewegungen hemmen und dadurch zu einem erneuten Anstieg der Festigkeit führen [54]. Die Dauer bis zum Angleichen an die ursprüngliche Festigkeit entspricht dabei in etwa dem Verfestigungsverhalten infolge von Auslagerung nach einer konventionellen Wärmebehandlung [55]. Der Einfluss einer Kurzzeit-Wärmebehandlung auf die mechanischen Eigenschaften und das Gefüge von Aluminiumlegierungen wurden grundlegend in [56] untersucht.

Ab einer Temperatur von  $T_{\max} \geq 200$  °C beginnt der Werkstoff mit einer Entfestigung, was sich in einer Reduktion der Zugfestigkeit  $R_m$  widerspiegelt. Bis zum Erreichen der minimalen Werte tritt ein annähernd linearer Abfall der Festigkeit auf. Abhängig von den Legierungselementen tritt der maximale Effekt der Entfestigung bei Temperaturen zwischen 350 – 400 °C auf [57]. Zusätzlich bewirkt die Kurzzeitwärmebehandlung eine Reduzierung der Duktilität, welche bei Temperaturen zwischen 250 °C – 300 °C mit 15-20% ihr Minimum erreicht und sich durch eine inhomogene Mikrostruktur in Form von semi-kohärenten und inkohärenten Ausscheidungen begründen lässt [56]. Daraus ableiten lässt sich der signifikante Einfluss der Maximaltemperatur [54] auf die Festigkeitsreduktion, wohingegen Aufheiz- und Abkühlrate oder die Haltedauer eine untergeordnete Rolle spielen [58].

Diese stoßartigen Glühvorgänge beanspruchen nur sehr geringe Zeiten von Sekunden bis wenige Minuten, wodurch sich diese ideal in mögliche Umformprozesse integrieren lassen. Zudem kann eine Erwärmung der Probe außerhalb eines Ofens erfolgen, wodurch der Energiebedarf zeitlich und lokal maßgeschneidert bereitgestellt und so signifikant reduziert werden kann [10]. Mögliche Wärmequellen zur definierten Einbringung der Wärmebehandlungstemperatur können unter anderem Induktion, Konduktion und Wärmestrahlung mittels Laser sein, welche hinsichtlich einer potentiellen Anwendbarkeit bereits in [10] bewertet wurden.

### **Abschließende Bewertung der zugrundeliegenden Mechanismen**

Für eine abschließende Bewertung der Einsatzmöglichkeit sowie zur Identifikation des geeignetsten Wärmebehandlungsmechanismus sind die zugrundeliegenden mikrostrukturellen Effekte und vorliegende Randbedingungen in Tabelle 3 gegenübergestellt.

Tabelle 3: Zusammenfassende Bewertung der drei Wärmebehandlungsmechanismen

Kriterium	Rekristallisation	Erholung	Ausscheidungsmodifizierung
Mechanismus	Kornneubildung	Reduzierte Versetzungsdichte und Abbau Spannungsfeld	Ausscheidungsauflösung
Voraussetzung / Ausgangslage	Mindestumformgrad	Plastische Verformung	Ausscheidungshärtbare Legierung in T4/T6
Dauer	$t_{WB} \geq 1 \text{ h}$	$1 \text{ min} < t_{WB} < 1 \text{ h}$	$t_{WB} \leq 1 \text{ min}$
Temperatur	300 - 400 °C	100 - 250 °C	350 - 450 °C
Abkühldauer	$t_{AK} \geq 1 \text{ h}$	$t_{AK} \leq 1 \text{ h}$	$t_{AK} \leq 1 \text{ min}$
Einbindung in Prozesskette	Während/nach Umformung	Während/nach Umformung	Vor Umformung

Die Mechanismen der Rekristallisation sowie der Erholung lassen sich aufgrund der metallphysikalisch ablaufenden Prozesse der Kornneubildung an verformungsindizierten Keimstellen und des Versetzungsabbaus ausschließlich nach erfolgter Umformung oder als Zwischenstufe einsetzen. Dies hat eine Zunahme der Einzelschritte sowie der Gesamtprozesskette

zur Folge. Zudem werden für unterschiedlich lange Zeiten von wenigen Minuten bis hin zu mehreren Stunden konstant Energie in Form von Wärme benötigt. Beide Mechanismen haben zudem den Nachteil, dass sie aufgrund der Wärmebehandlungsdauer sowie einer hohen Wärmeleitfähigkeit nicht sinnvoll lokal zur Stoffflusssteuerung eingesetzt werden können. Aus technischer und energetischer Sicht können diese folglich als nicht zielführend für den Einsatz zur Stoffflusssteuerung in der Blechmassivumformung eingestuft werden.

Bei einer Kurzzeit-Wärmebehandlung werden durch kurzzeitigen Wärmeeintrag festigkeitssteigernde Ausscheidungen aufgelöst, welche im kaltausgelagerten Ausgangszustand vorliegen. Entsprechend besteht nicht nur der Vorteil eines reduzierten Energieeintrages, sondern die Anwendung kann vor der eigentlichen Umformung erfolgen und es bedarf keiner Unterbrechung des Prozesses. Zudem wirkt die Auflösung der festigkeitssteigernden Ausscheidungen nur temporär, mit fortschreitender Zeit erfolgt eine Rückbildung und eine erneute Zunahme der Festigkeitskennwerte. Dies verdeutlicht nochmals das Potential der Anwendung zur Stoffflusssteuerung in der Blechmassivumformung. Mit einem moderaten Energieeintrag über sehr kurze Zeiten kann die Festigkeit lokal und zeitlich begrenzt reduziert und so durch Wechselwirkung zwischen festen und entfestigten Bereichen eine Steuerung des Stoffflusses ermöglicht werden. Der Umformprozess kann dabei bei Raumtemperatur in entfestigtem Zustand stattfinden und die mechanischen Einseigenschaften erreichen durch die nachfolgend einsetzende Kaltauslagerung nahezu den Ausgangszustand.

Während ein grundlegendes Prozessverständnis zum Einsatz einer Kurzzeit-Wärmebehandlung von ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen in Blechumformprozessen mit geringen bis moderaten Spannungs- und Formänderungszuständen bereits erarbeitet, die metallphysikalischen Vorgänge untersucht [48] und das Auslagerungsverhalten charakterisiert wurden [59], fehlt ein fundiertes Prozessverständnis über die Wechselwirkung der Kurzzeit-Wärmebehandlung mit dem nachgelagerten Einbringen von hohen Umformgraden auf die mechanischen Eigenschaften und das resultierende Auslagerungsverhalten. Diese Wechselwirkung gilt es grundlagenwissenschaftlich zu untersuchen. Aufgrund der vorherrschenden Charakteristika der Blechmassivumformung gegenüber der konventionellen Blechumformung sowie der vorangeschalteten Kurzzeit-Wärmebehandlung sind konventionelle Charakterisierungsmethoden nur bedingt einsetzbar. Entsprechend bedarf es der Erarbeitung

eines geeigneten Modellprozesses zur definierten Nachstellung der Randbedingungen der Blechmassivumformung in Kombination mit einer Kurzzeit-Wärmebehandlung.

### 2.3.2 Anwendung von Tailor Heat Treated Blanks

Aufgrund der Möglichkeiten einer Kurzzeit-Wärmebehandlung von ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen sowie resultierender Vorteile konnte sich der Begriff der *Tailor Heat Treated Blanks* (THTB) etablieren. Grundsätzlich sieht diese Technologie die maßgeschneiderte Einstellung der mechanischen Eigenschaften von Blechplatten durch eine lokal aufgebraute Wärmebehandlung vor [10]. Die eigentliche Umformung findet anschließend bei Raumtemperatur mit sämtlichen Vorteilen der konventionellen Kaltumformung statt [47]. Folglich bietet diese Technologie das Potential, die Umformbarkeit von Aluminiumblechhalbzeugen durch flexible Wärmebehandlungslayouts zu verbessern. Entsprechend breit gefächert gestaltet sich der aktuelle Stand der Forschung, welcher nachfolgend an einschlägigen Anwendungsbeispielen aufgezeigt wird.

Abgeleitet von einer lokal begrenzten Wärmeeinwirkungszone bedarf es zur Umsetzung gewünschter Layouts geeigneter Maßnahmen zur Durchführung der Wärmebehandlung. Neben analytischen Ansätzen zur Darstellung der Wirkflächen [60] wird zudem die Finite Elemente Methode eingesetzt [61], um allgemeingültige Auslegungsrichtlinien abzuleiten [62]. All diese Ansätze erfordern eine definierte und lokal genau positionierte Wärmebehandlungszone. Entsprechend werden verschiedene Verfahren zur Applikation des Layouts beschrieben. Neben Verfahren der Konduktion sowie Induktion [63] wird aufgrund der Flexibilität und Steuerbarkeit zudem die Wärmestrahlung [64] untersucht. Speziell die Kombination einer justierbaren Laseroptik mit einem universell manipulierbaren Roboterarm konnte hier entscheidende Vorteile hinsichtlich Gestaltungsfreiheit des Layouts, der Spotgröße sowie der Steuerbarkeit bringen [48].

Diverse Forschungsarbeiten widmen sich zudem der Anwendung auf bestehende Fertigungsprozesse, um die Prozessgrenzen zu erweitern. Merklein et al. untersuchten beispielsweise die Gefügestruktur sowie die mechanischen Eigenschaften von ultrahochfesten Aluminiumplatten, welche mittels *Accumulative Roll Bonding* (ARB) hergestellt wurden [65]. Diesen Ansatz weiterverfolgend konnte Herrmann den positiven Effekt einer Kurzzeit-Wärmebehandlung auf die Umformbarkeit von mehrlagigen ARB-Blechen in einem Tiefziehprozess durch Steigerung des Grenzziehverhältnisses von  $\beta_{\max} = 2,2$  auf  $\beta_{\max} = 2,5$  bestätigen. Bei einer

Wärmebehandlungstemperatur von 350 °C bleibt das ultrafeinkörnige Gefüge erhalten, wodurch die hohe Festigkeit nach dem Umformprozess und der stattfindenden Kaltauslagerung erhalten bleibt [66]. Durch die Anwendung der THTB Technologie auf Profile [67] und mehrstufige Prozesse [68] konnten die Formgebungsgrenzen ebenfalls erweitert werden. Der maximal erreichbare Biegewinkel von Aluminiumquadratrohren konnte in [69] vergrößert werden. Schulte [70] konnte durch eine lokale Kurzzeit-Wärmebehandlung auftretende Prozessfehler in einem kombinierten Tiefzieh- und Stauchprozess vermeiden. Graser et al. [40] konnten die Technologie erfolgreich in einem Clinch-Prozess zur Erweiterung der Fügbarkeit umsetzen und in [71] auf beidseitige Fügepartner aus hochfesten Aluminiumlegierungen übertragen.

Alle genannten Untersuchungen haben die Anwendung einer lokalen Wärmebehandlung zur Verbesserung der Umformbarkeit von Blechhalbzeugen oder dünnwandigen Bauteilen gemeinsam. Ein breites und fundiertes Wissen hinsichtlich der Übertragbarkeit auf die komplexen Spannungszustände in der Massiv- sowie der Blechmassivumformung wurden bisher nicht erarbeitet. Von besonderer Bedeutung ist hier vor allem die Wechselwirkung zwischen lokal wirkender Entfestigung, der Wärmeeinflusszone über die Blechdicke hinweg sowie der örtlich begrenzten Umformzonen mit Bereichen variierender Spannungs- und Formänderungszustände.

Zur Herstellung von Funktionsbauteilen mit Blechdickengradient aus Blechhalbzeugen ist neben der Lösung werkstoffseitiger Herausforderungen durch eine lokale Kurzzeit-Wärmebehandlung zudem die Erweiterung von konventionellen Blechumformoperationen durch Massivumformverfahren nötig. In diesem Zusammenhang liegt der Fokus aktueller Forschung auf der neuartigen Verfahrensklasse der Blechmassivumformung, welche im nachfolgenden Absatz grundlegend erläutert wird.

## 2.4 Verfahrensklasse der Blechmassivumformung

Konventionelle Fertigungsverfahren stoßen aufgrund steigender Anforderungen hinsichtlich Nachhaltigkeit, Effizienz und Produktivität vermehrt an ihre Grenzen. Eine zunehmende Variantenvielfalt und die Notwendigkeit von Funktionsintegration sind zudem auftretende Herausforderungen, welchen mit der Entwicklung innovativer Produkte und effizienter Prozesse begegnet werden kann. Die neuartige Verfahrensklasse der Blechmassivumformung bietet das Potential, komplexe Funktionsbauteile mit unterschiedlichen lokalen Eigenschaften sowie Blechdicken effizient in verkürzten Prozessketten herzustellen. Neben einer Verfahrensdefinition

werden die Herausforderung eines dreidimensionalen Spannungs- sowie Formänderungszustandes diskutiert und das Taumeln von Blechhalbzeugen als Fertigungsverfahren innerhalb der Blechmassivumformung (BMU) aufgrund der Relevanz für die vorliegende Arbeit genauer erläutert.

### **2.4.1 Verfahrensdefinition und Grundlagen**

Mit dem Ziel der nachhaltigen und effizienten Produktion von Funktionsbauteilen mit hoher Funktionsdichte kommen konventionelle Verfahren wie das Biegen oder Tiefziehen hinsichtlich Materialausnutzung, geometrischer Komplexität sowie erreichbarer Genauigkeiten an ihre Grenzen. Um diesen Herausforderungen entgegenzuwirken, ist die Erforschung neuer und die Weiterentwicklung bestehender Fertigungsprozesse unabdingbar. In diesem Zusammenhang bietet die Blechmassivumformung entscheidende Vorteile zur Herstellung von Funktionsbauteilen mit beabsichtigtem Blechdickengradient sowie einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch Kaltverfestigung [8].

Nach Merklein et al. [72] lässt sich die Blechmassivumformung als Anwendung von Massivumformoperationen auf Blechhalbzeuge mit einem beabsichtigten dreidimensionalen Stofffluss definieren. Während Blechumformoperationen typischerweise einen zweidimensionalen Formänderungszustand hervorrufen und eine konstante Blechdicke erwünscht ist [73], weisen Massivumformverfahren oft dreidimensionale Formänderungszustände mit großen Querschnittsänderungen sowie hohen Kontaktkräften auf [74]. Beide Verfahren bieten spezifische Vorteile. Innerhalb dieser neuartigen Prozessklasse erfolgt eine bewusste Kombination von bereits erforschten Blech- und Massivumformverfahren, bei welcher die Vorteile beider Klassen genutzt und so die Formgebungsgrenzen erweitert werden sollen [8]. Die eingesetzten Halbzeuge sind dabei Bleche oder Platinen mit einer Blechdicke zwischen 1 - 5 mm und können dabei sowohl Fein- als auch Mittelblech zugeordnet werden [73]. Aufgrund des dreidimensionalen Stoffflusses lassen sich Funktionselemente wie Verzahnungen oder Mitnehmer senkrecht zur Blechebene mit Abmaßen im Bereich der Blechdicke ausformen, welche mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht oder nur unter großem Aufwand realisiert werden können [8]. Blechmassivumformprozesse lassen sich durch lokal variierende Spannungs- und Formänderungszustände und folglich durch eine Wechselwirkung zwischen Umformzonen mit unterschiedlichen Dehnungen sowie inkrementell und wechselnd wirkenden Kontaktkräften definieren [75].

Zusammenfassend können Verfahren der Blechmassivumformung zugeordnet werden, wenn sie die folgenden fünf Kriterien aufweisen [8]:

- Verwendung von Blech als Halbzeug
- Dreidimensionaler Spannungszustand im Blech
- Lokal variierende Blechdicke
- Lokale Änderung der Prozesskraft sowie Werkzeugbelastung
- Kombination aus Blech- und Massivumformoperationen

Aufgrund der oft zusammen auftretenden Charakteristika mehrerer Verfahren ist eine Einteilung der zugeordneten Prozesse nach eindeutigen Spannungszuständen laut DIN 8580 [76] nicht zielführend. Vielmehr wird eine Unterteilung nach der zu erzielenden Blechdickenänderung sowie der Werkzeugbewegung angestrebt [8]. Verfahren mit einer linearen Werkzeugbewegung sind beispielsweise Stauchen, Fließpressen oder Prägen, wohingegen eine rotierende Werkzeugbewegung beim Walzen oder Tauseln eingesetzt wird. Mit diesen Verfahren lassen sich unterschiedliche Blechdickenänderungen erzielen. Vorteile der neuartigen Verfahrensklasse liegen vor allem in einer erhöhten möglichen Bauteilkomplexität sowie Materialeffizienz, welche trennende Verfahren nicht erreichen können [8]. Aufgrund der Umformung erfolgt eine Kaltverfestigung, durch welche die mechanischen Eigenschaften verbessert werden können. Durch die Kombination mehrerer Fertigungsverfahren in einem Prozessschritt kann die Länge der Prozesskette entscheidend verkürzt werden [77]. Das Zusammenwirken von lokal variierenden Eigenschaften hinsichtlich Blechdicke und Formänderung erschwert eine eindeutige Bestimmung des komplexen Stoffflusses, welcher maßgeblich für die resultierende Bauteilqualität verantwortlich ist [78].

#### **2.4.2 Herausforderungen und Potentiale eines dreidimensionalen Stoffflusses**

Die zugeordneten Verfahren lassen sich durch eine komplexe Wechselwirkung zwischen Umformzonen hoher und niedriger Dehnung sowie einem gleichzeitig auftretenden zwei- und dreidimensionalen Spannungszustand charakterisieren [8]. Typische Blechumformoperationen sind meist durch einen großflächigen Kontakt, stetige Blechdickenübergänge und zweidimensionale Formänderungszustände geprägt [79]. Gerade hinsichtlich der Ausformung von Nebenformelementen senkrecht zur Blechebene sind

diese Verfahren folglich ungeeignet. Die Anwendung von Massivumformprozessen ermöglicht zwar große Querschnittsänderungen durch einen dominierenden mehrachsigen Formänderungszustand, bringt allerdings sowohl Herausforderungen wie eine komplexe Wechselwirkung zwischen variierenden Umformzonen als auch hohe lokal wirkende Umformkräfte mit sich [73].

Neben den prozess- und werkzeugseitigen Herausforderungen manifestieren sich die lokal variierenden Eigenschaften im Prozess zudem auf die resultierenden Werkstückeigenschaften. Bereiche mit hohem Umformgrad verfügen über eine lokal auftretende Festigkeitszunahme durch Kaltverfestigung [8]. In nachfolgenden Prozessen kann dieser Gradient zu einem veränderten Materialfluss und folglich zu einer inhomogenen Formfüllung führen [80].

Diese Prozessgrenzen und Bauteilfehlerstellen erfordern die Möglichkeit einer zielgerichteten Steuerung des Materialflusses während des Umformprozesses und machen Forschung und Entwicklung diesbezüglich unabdingbar [81]. Eine Möglichkeit zur Kontrolle des Materialflusses zur Verbesserung der Bauteileigenschaften und der Formfüllung ist die Anwendung von lokal angepassten Werkzeugoberflächen, sogenannte *Tailored Surfaces* [82]. Neben den werkzeugseitigen Ansätzen wurde das werkstückseitige Verbesserungspotential prozessangepasster Halbzeuge, sogenannte *Tailored Blanks*, untersucht [83]. Ein weiteres Forschungsfeld diesbezüglich sind sogenannte *Tailor Rolled Blanks* [84] sowie *Tailor Rolled Stripes* [85]. Durch kontinuierliche BMU-Prozesse können verzweigte Strukturen hergestellt werden [86], welche insbesondere von dem dreidimensionalen Stofffluss der BMU profitieren [87]. Zudem konnten Fügeoperationen durch Adaption eines bestehenden Umformprozesses zur Herstellung von hybriden Funktionsbauteilen umgesetzt werden [88]. Das Prozessverständnis konnte durch Variation der Werkstoff- und Festigkeitsklassen entscheidend erweitert werden [89].

Prozesseitig wird zu den genannten Ansätzen außerdem die schwingungsüberlagerte Reduzierung der Prozesskraft von Behrens et al. im Rahmen der Blechmassivumformung untersucht [90]. Eine analytische Beschreibung von Schädigungsmechanismen im komplexen Umfeld von BMU-Prozessen konnte durch Gerstein et al. [91] implementiert werden.

## 2.5 Taumeln von Funktionsbauteilen

In diesem Abschnitt werden die Prozessgrundlagen zum Taumelverfahren erläutert. Zusätzlich werden die Einflussfaktoren der Taumelkinematik und des Winkels beschrieben und deren Einfluss auf den Prozess sowie das Umformergebnis erklärt. Die für die Umformung verantwortlichen Spannungs- und Formänderungszustände werden im Gesamtkontext diskutiert und daraus abgeleitet Prozessgrenzen und Versagensfälle definiert. Abschließend werden aktuelle Entwicklungen im Bereich des Taumelns aufgezeigt sowie Anwendungsbeispiele gegeben.

### 2.5.1 Historische Entwicklung

Die erste Anwendung einer Taumelpresse mit dem Ziel der Herstellung von Wellen für Motoren und Propeller ist von Slick [92] im Jahr 1918 aus den USA bekannt. Bis zu den 1960er Jahren blieb das Verfahren jedoch weitestgehend unbeachtet. Ab diesem Jahrzehnt entstanden zahlreiche Forschungsarbeiten und Publikationen, welche sich mit dem Prozess des Taumelns auseinandersetzten. Beispielfhaft sei hier die Implementierung einer Versuchspresse in England im Jahr 1964 genannt, welche als Grundlage für die erste automatisierte Taumelpresse *Rotaform* im Jahr 1966 genutzt wurde [93]. In der darauffolgenden Zeit wurden weitreichendere Untersuchungen zur Werkstückdeformation von Slater et al. 1969 [94] sowie von Appleton und Slater 1973 [95] durchgeführt. Marciniak [96] begann bereits 1967 in Polen mit seiner Arbeit über die Technologie der Taumelpresse und konnte seine Forschung mit der Patentierung im Jahr 1970 abschließen. Durch eine Anstellung der oberen Matrize um  $2^\circ$  und anschließender Kippbewegung konnte die resultierende Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück entscheidend reduziert und so der Kraftbedarf minimiert werden. Eine industrielle Anwendung des Verfahrens wurde vor allem in China [97], Japan [98] und Polen [99] untersucht. Die Weiterentwicklung der Maschinenteknologie erfolgte vermehrt in Deutschland und der Schweiz. Ein umfassender Überblick zum Stand der Technik des Taumelns wurde in den darauffolgenden Jahren von Standring und Appleton [100] 1979, Kobayashi et al. [101] 1982 sowie Shivpuri [99] 1988 gegeben. Als Grundlage für diese Arbeit kann zudem die Abhandlung von Standring [102] aus dem Jahr 2001 herangezogen werden, in welcher er neben der Darstellung der Prozesscharakteristika zudem verschiedene Maschinenkonzepte erläutert. Eine Übersicht von Sivam et

al. [103] aus dem Jahr 2016 zeigt aktuelle Entwicklungen zum Taumelprozess. Aufbauend auf diesen Entwicklungen werden im nachfolgenden Kapitel die Prozessgrundlagen des Taumelns erläutert.

### 2.5.2 Prozessgrundlagen

Aufgrund seines inkrementellen Charakters lässt sich das Taumeln nach Groche et al. [104] der inkrementellen Massivumformung zuordnen. Abgeleitet vom konventionellen Stauchen verfügt es über die Besonderheit einer angestellten Werkzeugkomponente [73] in Kombination mit einer charakteristischen Taumelbewegung um die vertikale Werkzeugachse [105] und den Werkstückmittelpunkt. Neben der Anstellung um den Taumelwinkel  $\Theta$  ist der Stempel konisch ausgeführt und definiert mit einem Stempelwinkel  $\alpha$  die Kontaktfläche bei einem entsprechend eingestellten Taumelwinkel [106]. In Folge der Anstellung einer Werkzeugkomponente wird die resultierende Kontaktfläche zwischen Stempel und Werkstück signifikant reduziert [107]. Diese wandert in einer kombinierten Press- und Abwälzbewegung über das Werkstück und bewirkt so die lokale Umformung mit quasi-inkrementellem Charakter [72]. Abhängig vom Winkel sowie der zugrundeliegenden Taumelkinematik variiert der Einfluss auf die Kontaktfläche [108].

#### *Ausprägung des Taumelwinkels*

Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Kontaktfläche und benötigter Umformkraft [109], welcher speziell für konventionelle Stauchprozesse von großer Bedeutung ist [110], kann die Umformkraft beim Taumeln im Vergleich zum Stauchen signifikant reduziert werden. Diese Reduktion ist abhängig von der sich im Eingriff befindlichen Kontaktfläche, welche wiederum direkt vom eingestellten Taumelwinkel abhängt. Dieser wird für konventionelle Anwendungen zwischen  $0^\circ$  -  $2^\circ$  gewählt [111]. Weiterführende Untersuchungen weisen Winkel zwischen  $4^\circ$  [112],  $5^\circ$  [98] oder maximal  $10^\circ$  [113] auf. Dabei ist eine Erhöhung des Taumelwinkels und infolge dessen eine Reduzierung der Kontaktfläche von der Wirkungsweise her gleichbedeutend mit einer Krafterhöhung [107]. In [114] konnte eine Erhöhung des Taumelwinkels von  $1^\circ$  auf  $2^\circ$  hinsichtlich des Umformergebnisses mit einer Krafterhöhung um den Faktor 1,5 verglichen werden. Eine weitere Erhöhung des Taumelwinkels hat nach Standring [113] keinen signifikanten Einfluss mehr auf die Reduzierung der benötigten Umformkraft. Je kleiner der Taumelwinkel gewählt wird, desto größer wird der axiale Umformanteil und der Taumelprozess nähert sich dem konventionellen Stauchen an [113]. In diesem Fall sollte nach [115] zusätzlich die

elastische Werkzeugdeformation im Prozess berücksichtigt werden, welche aufgrund des abnehmenden Winkels einen Einfluss auf den Kontaktzustand hat. Aufgrund ungünstiger Spannungs- und Dehnungszustände wird ein Taumelwinkel von größer als  $2^\circ$  nicht empfohlen [116].

### ***Resultierende Kontaktfläche***

Abhängig vom eingestellten Taumelwinkel kann die sich im Eingriff befindliche Kontaktfläche deutlich reduziert werden. In [108] wird eine maximale Kontaktfläche von 30% gegenüber dem konventionellen Stauchen genannt, welche mit zunehmendem Winkel stetig abnimmt. Stranding [111] und Nagel [107] postulieren hingegen eine minimale Kontaktfläche von nur mehr 20%. Ein analytischer Ansatz zur Beschreibung der Kontaktflächenverhältnisse während des Taumeln konnte durch Marciniak in [117] beschrieben werden. Einen direkten Vergleich der wirksamen Kontaktflächen im Zylinderstauchen sowie beim Taumeln stellten Han und Hua in [118] auf. Beim Stauchen prägt sich zu Prozessbeginn durch die plane Ausrichtung beider Stauchbahnen ein beidseitig vollflächiger Kontakt mit dem Werkstück aus, welcher bedingt durch eine Durchmesserergrößerung infolge einer Höhenreduktion [118] und entsprechend steigendem Reibungseinfluss [119] mit fortschreitendem Prozess zunimmt. Im Gegensatz dazu treten beim Taumeln aufgrund der unterschiedlichen Ausführung von Ober- und Unterwerkzeug variierende Kontaktflächen auf, welche sich über den Prozess hinweg ändern. Am oberen konischen Werkzeug erfolgt durch die Berührung mit dem Werkstück eine sprunghafte Zunahme der Kontaktfläche zu Prozessbeginn, wohingegen der vollflächige Kontakt auf der Unterseite durch die lokale Krafteinwirkung reduziert wird. Nach dem Ausprägen des vollständigen Kontakts zwischen beiden Werkzeugen sowie dem Werkstück steigt der Kontaktflächenanteil analog dem Stauchen durch eine Vergrößerung des Durchmessers stetig an. Zu Prozessende wird die axial Zustellung unterbrochen, entsprechend nehmen beide Kontaktflächen wieder ab [118].

### ***Reduzierter Kraftbedarf***

Die beschriebene Abnahme der Kontaktfläche infolge eines eingestellten Taumelwinkels bedingt eine signifikante Reduzierung der benötigten maximalen Prozesskraft, wodurch sich gleichzeitig ein entscheidender Vorteil des Taumeln gegenüber dem konventionellen Stauchen äußert [120]. In Kombination mit verbesserten tribologischen Bedingungen beim Taumeln aufgrund des Übergangs von Gleit- zu Rollreibung [104] wird die Umformung von Werkstücken vereinfacht. Die Reibzahl kann laut Stranding und

Appleton [98] sowie Kubo und Hirai [109] im Ringtaumelversuch im Vergleich zum konventionellen Ringstauchversuch um bis zu 40% gesenkt werden. Der inkrementelle Charakter des Taumelns bewirkt entsprechend eine reduzierte Prozesskraft im Vergleich zum Stauchen oder Fließpressen. Die maximal mögliche Reduzierung variiert dabei in den unterschiedlichen Untersuchungen von Marciniak [108], Bernet [121] sowie Kobayashi et al. [101] zwischen 80-90% gegenüber dem Stauchen. Weitere Forschungsarbeiten von Standring bestätigen eine mögliche Reduktion der Umformkraft von mindestens 70% [113]. Eine Beschreibung des Zusammenhangs zwischen eingestelltem Taumelwinkel und resultierender Prozesskraft konnte von Standring in [113] bis zu einem Winkel von  $10^\circ$  aufgestellt werden. Eine analytische Beschreibung der benötigten Umformkraft beim freien Zylinder-taumeln konnte in [122] von Choi et al. abgebildet werden.

### 2.5.3 Einfluss der Taumelkinematik

Neben dem Taumelwinkel wird vor allem der Taumelkinematik ein entscheidender Einfluss auf die Umformeigenschaften der Bauteile zugeschrieben [123]. Diese beschreibt die Bewegungsart und Abfolge der Werkzeugbewegung über das Werkstück und wird meist durch zwei unabhängig angetriebene Exzenterringe mit unterschiedlichen Drehrichtungen sowie Geschwindigkeiten realisiert [124]. Analytische Darstellungen der Interaktion beider Exzenterringe werden zweidimensional in [125] sowie dreidimensional in [126] umgesetzt. Die möglichen Bewegungsmuster lassen sich nach Nagel [107] prinzipiell in die vier Varianten Spirale, Kreis, Mehrblattkurve und Linie untergliedern.

Bei der Spiralbewegung wandert der Bewegungsmittelpunkt in variierenden Bahnkurven vom Werkstückzentrum nach außen oder umgekehrt und begünstigt dabei die Umformung von komplexen Geometrien bei gleichzeitig hohen Umformgraden im Zentrum [124]. Aufgrund der stetig nach außen wandernden Bahnkurve ändert sich zusätzlich der Taumelwinkel während des Prozesses [119]. Zudem ist die Spiralbewegung meist zum Erreichen der Kreisbahn der Kreiskinematik erforderlich, da der gewünschte Taumelwinkel erst angestellt werden muss [123].

Die am häufigsten umgesetzte Kreiskinematik [120] beschreibt eine kontinuierliche Bewegung auf einer gleichbleibenden Kreisbahn, welche durch einen konstanten Taumelwinkel definiert ist [127]. Entsprechend findet hier ausschließlich eine rotierende Bewegung des Taumelstempels statt. Folglich tritt die gesamte Werkzeugoberfläche während des Prozesses in Kontakt mit dem Werkstück, wodurch eine gleichmäßige und homogene

Umformung realisiert werden kann. Gefertigt werden können rotations-symmetrische Teile, wie beispielsweise Kupplungskomponenten [123]. Diese Kinematik weist aus den genannten Vorteilen eine besondere Relevanz für die vorliegende Arbeit auf.

Die lineare Werkzeugbewegung ist durch eine reine Kippung des Stempels um eine horizontale Achse gekennzeichnet und wird besonders für längliche Bauteile wie Zahnstangen eingesetzt [123]. Hier erfolgt die Realisierung der Kinematik nicht wie bei den anderen Varianten durch eine Kombination aus Winkelanpassung und Bewegung, sondern ausschließlich durch ein Verkippen des Stempels um den entsprechenden Winkel [119].

Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung der Bahnkurve des Mittelpunkts der Werkzeugbewegung besteht in der sogenannten Rosettenkurve oder Mehrblattkurve [128]. Dabei wandert der Mittelpunkt in wiederkehrenden Schleifen oder Blättern über das Werkstück. Die Homogenität kann durch eine Steigerung der Blattanzahl bei gleichzeitiger Zunahme der Prozesszeit gesteigert werden. Entsprechend können Bauteile mit ähnlichen Eigenschaften im Vergleich zu Kreiskinematik hergestellt werden. Greskowiak [129] konnte eine gesteigerte Reproduzierbarkeit und einen reduzierten Verdreheneffekt nachweisen.

#### 2.5.4 Spannungs- und Formänderungszustände

Bedingt durch die Einstellung des Taumelwinkels sowie der angewandten Taumelkinematik treten beim Taumeln im Vergleich zum konventionellen Stauchen grundsätzlich verschiedene Spannungs- und Formänderungszustände auf. Eine Gegenüberstellung zwischen konventionellem Stauchen und Taumeln hinsichtlich Spannungs- und Formänderungszustand sowie der reduzierten Kontaktfläche ist in Bild 3 aufgezeigt. Die einzelnen Charakteristika werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

Während des Stauchens kommt es zu einer Reduzierung der Werkstückhöhe in Folge der axialen Zustellung der Presse, wodurch ein axialer Materialfluss entsteht. Darauf folgend wird ein radialer Materialfluss induziert, welcher mit einer Durchmesserergrößerung einhergeht [118]. Mit zunehmender Zylinderstirnfläche infolge von Fließbehinderung zwischen Stauchbahn und Werkstück steigt auch der Reibungseinfluss im Prozess. Die Ausbildung der charakteristischen Tonnenform [119] sowie eines Schmiedekreuzes hinsichtlich der auftretenden Vergleichsspannung [130] sind die Folge. Die Maximalwerte der auftretenden Normalspannung  $\sigma_{\max}$

sind hierdurch höher als die benötigte Anfangsfließspannung  $k_{f0}$  des Werkstoffs. Im Bauteilzentrum treten dabei die Bereiche mit größter Spannung auf, wohingegen die Werte nach außen hin abnehmen [73]. Hierbei hat die Reibung sowie das Verhältnis von Durchmesser zu Höhe einen entscheidenden Einfluss auf die maximal auftretenden Spannungen [119].

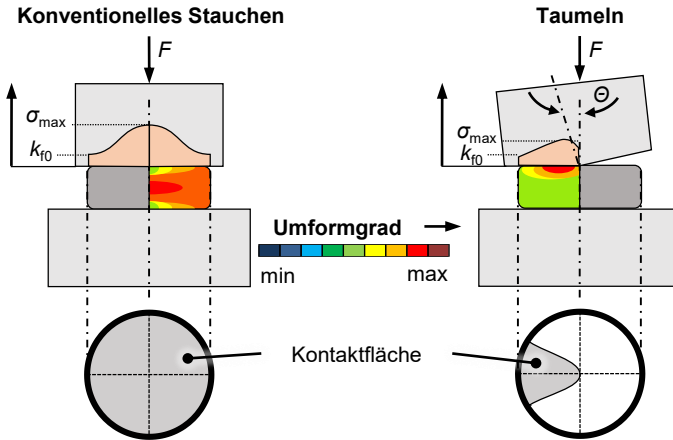


Bild 3: Vergleich der Spannungszustände nach [73], des resultierenden Umformgrads nach [118] sowie der sich im Eingriff befindlichen Kontaktfläche beim Stauchen und Taumeln im reibungsbehafteten Fall.

Einen gänzlich unterschiedlichen Charakter weist der Spannungszustand während des Taumelprozesses auf. Ausschlaggebend ist hierfür die reduzierte und lokal auftretende Kontaktfläche zwischen Stempel und Werkstück. Aufgrund des geringen Reibungseinflusses und der verringerten Fläche entsteht eine nahezu konstant verlaufende Spannungsverteilung mit Maximalwerten von  $\sigma_{max}$ , welche die benötigte Anfangsfließspannung  $k_{f0}$  nur geringfügig überschreiten [73]. Die im Eingriff befindliche Wirkfläche variiert über den Prozessverlauf aufgrund der Abrollbewegung über das gesamte Werkstück. Die auftretenden Normalspannungen bilden entsprechend nur eine Momentaufnahme ab [131].

Durch die Untersuchungen zur auftretenden Kontaktnormalspannung im Zylindertaumeln durch Han und Hua [131] konnte gezeigt werden, dass Kontaktnormalspannungen ausschließlich oberflächennah in einer lokal begrenzten Umformzone auftreten. Diese befindet sich zeitlich variabel im Kontaktbereich zwischen Oberstempel und Werkstück. Daraus resultiert ein Gradient in der Spannungsverteilung auf der Bauteiloberfläche in radialer sowie tangentialer Richtung. Aufgrund der fehlenden Umformzone auf der Unterseite des Bauteils tritt hier eine sehr geringe und homogen verteilte Normalspannung auf.

Infolge der Höhenreduktion sowie der Durchmesservergrößerung durch die axiale Zustellung während des Stauchprozesses dominieren zuerst axiale, anschließend radiale Stoffflussanteile [118]. Diese treten gleichmäßig über den kompletten Prozessablauf auf und bewirken einen Materialfluss in radialer Richtung nach außen [132]. Folglich treten beim Stauchen größere plastische Verformungen im Vergleich zum Taumeln auf, welche die geringsten Werte an der Ober- sowie Unterseite und maximale Werte im Zentrum aufweisen [118].

Durch die abrollende Werkzeugbewegung während des Taumelns verfügt der Prozess zudem über eine tangential Komponente des Stoffflusses [118], welche dabei eine entscheidende Rolle einnimmt. Aufgrund der reduzierten Reibung und des Übergangs von Gleit- zu Rollreibung wird der radiale Stofffluss begünstigt [104]. In Untersuchungen zur lokalen Verteilung der Stoffflussanteile konnten Liu, Yuan und Wang [130] eine steigende radiale Komponente mit zunehmender Entfernung vom Bauteilzentrum feststellen. Infolge der abrollenden Bewegung auf der Oberfläche treten hier die größten Kontaktnormalspannungen und folglich auch die größten Deformationen [133] in tangentialer Richtung auf [134]. Zwar werden beim Taumeln durch die örtlich begrenzte Einwirkung der Kraft lokal höhere Umformgrade erreicht [117], allerdings fällt der maximale Stauchgrad bedingt durch einen reduzierten axialen Stoffflussanteile geringer aus [124].

### 2.5.5 Prozessgrenzen und Versagensfälle

Aufgrund der komplexen Spannungs- und Formänderungszustände, der in der Blechmassivumformung vorherrschenden hohen Flächenpressung sowie einer vielseitig einstellbaren Prozesskinematik können während des Taumelns unterschiedliche Versagensfälle und Prozessgrenzen auftreten.

Basierend auf der Spannungsverteilung und der lokal entstehenden Umformzone auf der Werkstückoberseite beim Taumeln kann im Extremfall die Kontur eines umgedrehten Kegelstumpfes entstehen. Dieses Phänomen wird als Mushroom-Effekt bezeichnet [134] und tritt besonders bei relativ hohen Bauteilen auf, also bei einem kleinen Verhältnis von Ausgangsdurchmesser zu Ausgangshöhe. Beeinflusst wird dieser Effekt unter anderem durch die Taumelkinematik und kann eine inhomogene Formfüllung zur Folge haben [135]. Die Kombination aus einem konischen Stempel mit einem primär auftretenden radialen Materialfluss kann zudem zur Ausdünnung in der Werkstückmitte führen. In der Literatur wird dieser Effekt als Center-Thinning bezeichnet [136]. Dieser hängt wiederum stark

von der Zustellrate der Presse, des Taumelwinkels sowie der Werkstückabmessung ab.

Neben diesen beiden spezifischen Prozessfehlern können beim Taumeln zudem Risse in unterschiedlichen Formen infolge einer Überschreitung des Formänderungsvermögens auftreten. Entlang des äußeren Umfangs des Bauteils entstehen oberflächennahe Risse, welche sich im fortschreitenden Prozess bis hin zu tiefen radialen Rissen ausprägen [137]. Als Begleiterscheinung konnten Materialabplatzungen identifiziert werden. Risse im Bauteilzentrum können durch axiale Zustellung des Stempels und darauffolgender Plastifizierung des Werkstoffs bei gleichzeitigem Ausbleiben der Abrollbewegung entstehen [136]. Infolge von zu großen Taumelwinkeln oder entsprechend hoher Umformkräfte kann es am Bauteilrand aufgrund des radialen Materialflusses zur Ausbildung eines Grats kommen [106].

Ein analytisches Modell zur Vorhersage von Schädigung wurde in [136] sowie [138] aufbauend auf experimentellen Untersuchungen beschrieben und erweitert. Eine Reduzierung des Versagens im Taumelprozess konnte sowohl durch einen kleineren Taumelwinkel als auch ein kleineres Verhältnis von Ausgangshöhe zu Ausgangsdurchmesser umgesetzt werden [136].

### **2.5.6 Maßnahmen zur Stoffflusssteuerung im Taumelprozess**

Prozesseitig kann vor allem die aufgebrachte Umformkraft als signifikanter Einflussfaktor auf das Umformergebnis erhöht werden [17]. Durch eine gesteigerte Maximalkraft können die Zielgrößen Materialvolumen und Aufdickung vergrößert werden. Eine globale Wirkungsweise verhindert jedoch die Möglichkeit einer lokalen Stoffflusssteuerung. Unerwünschte Prozessfehler in Form von Gratbildung oder starker lokaler Ausdünnung sind die Folge [28]. Zudem stehen die Forderung nach einem reduzierten Energiebedarf und der Einsatz von kleineren Umformmaschinen im Kontrast zu einer Erhöhung der Pressenkraft. Ein weiterer prozesseitiger Ansatz ist die Adaption der Prozesskinematik sowie der Prozessschritte [28], welche einen nachweisbaren Einfluss auf das Umformergebnis haben. Neben einer deutlich aufwendigeren Prozesssteuerung sowie -auslegung werden dadurch allerdings die Prozesszeiten signifikant erhöht. Zudem wird die Stoffflusssteuerung durch eine Wechselwirkung zwischen den einzelnen Prozessstufen sowie der global wirkenden Kinematik erschwert [139].

Werkzeugseitig wurden vor allem Ansätze mit maßgeschneiderten Oberflächen untersucht, sogenannte Tailored Surfaces [140]. Prinzipiell besteht durch eine lokale Anpassung der Reibung die Möglichkeit den Stofffluss gezielt zu steuern [141], hingegen sind mit dieser Maßnahme auch Nachteile wie eine reduzierte Werkzeugstandzeit sowie die aufwändige Bearbeitung der Werkzeugoberflächen verbunden [142]. Beim Einsatz von Aluminium muss zudem die Anhaftung von Werkstoffpartikeln auf der Werkzeugoberfläche in Form von adhäsivem Verschleiß berücksichtigt werden.

### 2.5.7 Anwendungsbeispiele und aktuelle Entwicklungen

Aufgrund des komplexen Zusammenspiels aus einem dreidimensionalen Formänderungszustand und der aufgebrachten Taumelkinematik sind der Taumelprozess, die Wirkzusammenhänge sowie mögliche Anwendungen Gegenstand aktueller Forschung. In diesem Kapitel wird ein Überblick über einschlägige Anwendungsbeispiele und eine kurze Zusammenfassung relevanter Arbeiten gegeben.

Hinsichtlich der herstellbaren Bauteilgeometrien konnte in den letzten Jahren ein breites Spektrum an Möglichkeiten erarbeitet werden. In Untersuchungen zur Herstellbarkeit durch Taumeln konnten 50% aller Versuchsgeometrien gefertigt werden [143]. Bei entsprechender Auswahl der Taumelkinematik gibt es geometrisch nahezu keine Grenzen bezüglich der möglichen Ausformung [144]. Besonders Zahnradkomponenten eignen sich aufgrund der definierten Vorteile zur Fertigung in einem Taumelprozess. In [145] wurde die Herstellung einer Zahnradkontur untersucht und eine unzureichende Formfüllung als Prozessgrenze identifiziert. Durch Anwendung einer *Pre-Form* als vorgeformtes Halbzeug, konnte diese in [146] entscheidend verbessert werden. In [147] wird die Auslegung sowie Herstellung von beidseitig verzahnten, nicht-rotationssymmetrischen Zahnradern behandelt. Durch gezielte Einstellung der Taumelparameter können sehr filigrane Zahnradern mit kleinen Kopfdurchmessern [123] sowie dünnwandige Komponenten [148] realisiert werden. Das Taumeln von Feinblech zur Herstellung prozessangepasster Halbzeuge wurde in [17] untersucht, wodurch die Formfüllung in einem nachfolgenden kombinierten Tiefzieh- und Stauchprozess verbessert werden konnte [149]. Weitere Anwendungsbeispiele sind Differentialkegelräder [150], Funktionsbauteile mit Blechdickengradient als Mitnehmerscheiben einer Kupplung [139] oder rechteckige Abdeckungen für Smartphone-Applikationen [151].

Einen wichtigen Faktor hinsichtlich Bauteilqualität spielen die erreichbaren Toleranzen. Aufgrund reduzierte Reibung können hohe Genauigkeiten [152] zwischen 0,1 – 0,2 mm [153] und bis zu 0,05 mm [154] erzielt werden. Erreichbare Toleranzen liegen zwischen IT8 - IT12 [155]. Ebenso kann die Oberflächenrauheit durch Einglätteeffekte von  $R_a = 2,0$  auf  $R_a = 0,3$  reduziert werden [123]. Dies ist jedoch stark abhängig von der Qualität der Gesenke [121] und kann beispielsweise durch Polieren verbessert werden [114].

Durch die verbesserten mechanischen Eigenschaften, welche durch Kaltverfestigung während des Taumelns resultieren, kann die Dauerfestigkeit um 15% erhöht [156] oder das Bauteilgewicht um 30% gesenkt werden [157]. Die statische Bruchfestigkeit von getaumelten Ausgleichskegelrädern lässt sich im Vergleich zur spanenden Herstellung um 30% sowie zum Schmieden um 10% erhöhen [123]. Hinsichtlich dynamischer Belastung kann die Biegewechselfestigkeit gegenüber gefrästen Bauteilen um 40% erhöht werden, welche stark vom unebrochenen Faserverlauf und der Kaltverfestigung beim Taumeln profitiert [133].

Eine stetige Weiterentwicklung findet auch prozess- und anlagenseitig statt. Untersuchungen in [158] bewirken durch Anwendung von mehreren keilförmigen Ambossen ein Rückwärtsfließpressen und infolge dessen ein Aufdicken des Werkstücks. Dabei kann die Rissbildung während der Umformung reduziert werden [159]. Ein analytisches Modell der Deformationen sowie auftretenden Spannungen in der Taumelpresse wurde in [160] aufgestellt. Mathematische Beschreibungen des Schwingungsverhaltens des Werkzeugs konnten in [161] vorgenommen, sowie in [162] auf die Taumelkinematik übertragen werden. Neben der klassischen Kaltumformung findet das Taumeln zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen zudem Anwendung unter warmen Bedingungen [163].

Aufgrund der tendenziell geringeren Ausbringungsmenge im Vergleich zum Stauchen oder Schmieden stehen zudem wirtschaftliche Gesichtspunkte im Fokus aktueller Forschung [120]. Die Werkzeugstandzeit kann durch geringere Umformkräfte und folglich eine verminderte Belastung erhöht werden [164]. Weiterhin können kleinere und kostengünstigere Anlagen verwendet werden [165]. Damit einhergehend folgen geringere Schallbelastungen [166] sowie Vibrationseinflüsse [152]. Unter Berücksichtigung dieser Möglichkeiten mit der Kombination der Vorteile hinsichtlich Bauteilqualität und Maßhaltigkeit bietet das Taumeln eine Alternative zur spanenden Fertigung [167].

## 2.6 Zusammenfassende Bewertung des Standes der Technik und Forschung

Konträre Anforderungen an den Automobilbau bringen etablierte Verfahren und Prozesse hinsichtlich Effizienz und Komplexität an ihre Grenzen. Maßnahmen wie Downsizing oder alternative Antriebskonzepte zur Erreichung von gesetzlichen Vorgaben zum Schadstoffausstoß verschärfen diesen Effekt zusätzlich. Speziell für Komponenten im Antriebsstrang erwächst daraus der Bedarf an gewichtsreduzierten und gleichzeitig leistungsfähigeren sowie hochfunktionellen Bauteilen. Konventionelle Fertigungsverfahren reichen oft nicht aus, diese effizient und wirtschaftlich herzustellen. Die neuartige Verfahrensklasse der Blechmassivumformung bietet die Möglichkeit die Vorteile der Blech- mit denen der Massivumformung zu kombinieren und so bestehende Prozessgrenzen entscheidend zu erweitern. Speziell das Taumeln konnte als zielführend zur Herstellung von prozessangepassten Halbzeugen sowie Funktionsbauteilen mit hohem Potential für Leichtbauanwendungen eingestuft werden. Als maßgebliche Prozessgrenze für eine ausreichende Formfüllung konnte dabei die Stoffflusssteuerung identifiziert werden. Gegenstand aktueller Forschung sind entsprechend verschiedene Ansätze zur Steuerung des auftretenden Materialflusses im dreidimensionalen Spannungs- und Formänderungszustand der Blechmassivumformung zur Erreichung einer maximalen Formfüllung. Eine vielversprechende Möglichkeit zur weiteren Steigerung des Leichtbaupotentials von umformtechnisch hergestellten Funktionsbauteilen stellt der Einsatz von neu entwickelten hochfesten Aluminiumlegierungen im Sinne des Stoffleichtbaus dar. Aufgrund des hohen spezifischen Verhältnisses von Festigkeit zu Dichte werden diese Legierungen für sicherheits- und crashrelevante Teile sowie im Antriebsstrang eingesetzt. Speziell in der Blechmassivumformung bestehen für Aluminiumlegierungen aufgrund einer im Vergleich zu hochfesten Stahlwerkstoffen geringeren Festigkeit prozesstechnische Herausforderungen wie beispielsweise eine gesteigerte Gratbildung. Deshalb bedarf es geeigneter Maßnahmen zur Erweiterung der Formgebungs- sowie Prozessgrenzen. Eine für Blechumformprozesse bereits etablierte Methode ist die lokale Kurzzeit-Wärmebehandlung von ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen und anschließender Umformung bei Raumtemperatur. Festigkeitssteigernde Ausscheidungen werden durch Wärmeeintrag temporär aufgelöst, wodurch eine Entfestigung des Materials erreicht werden kann. Neben einer Erweiterung der Formgebungsgrenzen konnte damit bereits der Stofffluss in Blechumformoperationen durch die Wechselwirkung zwischen festen und

entfestigten Bereichen zielführend beeinflusst werden. Entsprechend konnten ein grundlegendes Prozessverständnis sowie Wirkzusammenhänge im zweidimensionalen Spannungszustand bereits erarbeitet werden.

Gerade im Hinblick auf den Einsatz als stoffflusssteuernde Maßnahme in der Blechmassivumformung fehlt jedoch eine ganzheitliche Analyse der Wirkungsweise einer Kurzzeit-Wärmebehandlung im dreidimensionalen Spannungs- und Formänderungszustand der Blechmassivumformung. Aufgrund einer variierenden Spannungs- und Dehnungsverteilung und einer Veränderung der Blechdicke bedarf es der Überprüfung der Übertragbarkeit der bestehenden Ansätze aus den zweidimensionalen Anwendungsfällen. Dabei fehlt eine ganzheitliche Qualifizierung von Wärmebehandlungsmethoden, deren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und dem charakteristischen Auslagerungsverhalten im Kontext hoher plastischer Formänderung unter Berücksichtigung von werkstoff-, prozess- und halbzeugseitigen Randbedingungen. Weiterhin besteht eine Forschungslücke hinsichtlich des Zusammenspiels aus einer lokalen Entfestigung durch eine Kurzzeit-Wärmebehandlung und dem resultierenden Stofffluss zur Anwendung in Blechmassivumformprozessen. Dabei wurde die Einstellung eines laserparameterabhängigen Temperatur- und Festigkeitsgradienten sowie die Ausprägung einer Wärmeeinflusszone, wie aus der Blechumformung bekannt, bisher nicht grundlagenwissenschaftlich untersucht. Zudem fehlt gänzlich die Anwendung und Bewertung für potentielle industrierelevante Bauteil- und Prozessketten sowie dem Einsatzverhalten der Funktionsbauteile.

Zusammenfassend bestehen maßgebliche Forschungslücken hinsichtlich der Wirkungsweise von Wärmebehandlungsmethoden im dreidimensionalen Spannungs- und Formänderungszustand und der Anwendung als stoffflusssteuernde Maßnahme, welche es durch die Erarbeitung und ganzheitlichen Qualifizierung einer Wärmebehandlungsstrategie zur Stoffflusssteuerung durch lokale Eigenschaftsgradierung in der Blechmassivumformung zu schließen gilt.

### 3 Zielsetzung und methodische Vorgehensweise

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erarbeitung einer Methode zur Stoffflusssteuerung durch lokale Eigenschaftsgradierung ausscheidungshärtbarer Aluminiumlegierungen in der Blechmassivumformung und Qualifizierung einer zielführenden Wärmebehandlungsstrategie. Zur Erreichung gliedert sich die methodische Vorgehensweise der Arbeit in vier Schwerpunkte. Diese bestehen aus der Erarbeitung einer stofffluss- und spannungsbezogenen Modellvorstellung des Taumelprozesses und der Identifikation von Prozessgrenzen, aus einer ganzheitlichen Charakterisierung des Einflusses von Wärmebehandlungsmethoden auf die mechanischen Eigenschaften im Rahmen der Blechmassivumformung, aus der Stoffflusssteuerung im Taumelprozess mit der Ableitung einer Auslegungsmethode sowie aus einer abschließenden Prozessbewertung und Verifizierung der Erkenntnisse durch Übertragung auf eine Demonstratorgeometrie. Eine Übersicht über die methodische Vorgehensweise ist in Bild 4 gegeben.

Zu Beginn soll eine stofffluss- und spannungsbezogene Modellvorstellung über den zu untersuchenden Taumelprozess erarbeitet werden, um so das Einsatzpotential von ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen bewerten zu können. Auf Basis eines kombiniert experimentell-numerischen Untersuchungsansatzes sollen die Ursache-Wirkbeziehungen im Formgebungsprozess bedingt durch die vorliegenden Spannungszustände erarbeitet und damit die Grundlage für eine Ableitung und Bewertung von stoffflusssteuernden Maßnahmen geschaffen werden. Aufbauend auf experimentellen Untersuchungen werden werkstoffabhängige Prozessgrenzen identifiziert und die Notwendigkeit alternativer Maßnahmen zur Stoffflusssteuerung für die Blechmassivumformung aufgezeigt.

Das Ziel im zweiten Teil der Arbeit besteht in einer ganzheitlichen Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften infolge einer Kurzzeitwärmebehandlung in Kombination mit nachfolgend definiert eingebrachten Umformgraden. Zur Abbildung der gesamten Prozesskette aus Wärmebehandlung, Umformoperation sowie Auslagerung wird eine Charakterisierungsmethode im Labormaßstab entwickelt. Im Anschluss erfolgt eine Analyse der mechanischen Eigenschaften infolge der einzelnen Teile der Prozesskette, um den im Stand der Technik bisher nicht umfassend untersuchten Einfluss von hoher plastischer Deformation nach

einer Kurzzeit-Wärmebehandlung auf das Auslagerungsverhalten aufzuzeigen. Zudem wird die Wärmebehandlungsstrategie für die lokale Anwendung in der Blechmassivumformung qualifiziert.

**Erarbeitung einer spannungs- und stoffflussorientierten Modellvorstellung des Taumelns zur Bewertung des Einsatzpotentials von Aluminiumlegierungen**

**Ganzheitliches Prozessverständnis**

- Validierung der Stoffflussanteile
- Identifikation der dreidimensionalen Spannungskomponenten

**Berücksichtigung von Prozessfehlern**

- Ausknicken
- Gratbildung

Kombiniert experimentell-numerischer Untersuchungsansatz

**Erarbeitung und Qualifizierung einer Wärmebehandlungsstrategie zur Stoffflusssteuerung durch lokale Eigenschaftsgradierung**

**Ganzheitliche Charakterisierung**

- Diskussion Wärmebehandlungsmethoden
- Analyse mechanische Eigenschaften
- Bewertung Auslagerungsverhalten
- Untersuchung Wärmeeinflusszone

► Grundlegendes Prozessverständnis

**Stoffflusssteuerung im Taumelprozess**

- Definition Wärmebehandlungslayouts
- Analyse Bauteileigenschaften
- Identifikation Stoffflussanteile
- Übertragung auf variierende Geometrien

► Ableitung einer Auslegungsmethode

**Prozessbewertung und Übertragung auf Demonstratorgeometrie**

- Verifikation der Auslegungsmethode
- Analyse der Bauteileigenschaften
- Qualifizierung der Einsatzzeigenschaften

Bild 4: Methodische Vorgehensweise und Arbeitsschwerpunkte

Nach einer Qualifizierung der untersuchten Wärmebehandlungsstrategie zum Einsatz auf Blechronden unter Berücksichtigung der Randbedingungen der Blechmassivumformung werden im folgenden experimentelle Umformversuche mit wärmebehandelten Referenzronden durchgeführt.

Dabei liegt der Fokus analog des ersten Teils der Arbeit auf den ursächlichen zwei- und dreiachsigen Spannungszuständen, auf der Identifikation der resultierenden Stoffflussanteile sowie den geometrischen Eigenschaften infolge der Wärmebehandlung. Zur Sicherstellung der Allgemeingültigkeit werden diese mit Hinblick auf eine potentielle Anwendung auf weiterführende Geometrien übertragen. Aufbauend auf einer ganzheitlichen Prozessbewertung zur Möglichkeit der Stoffflusssteuerung mittels lokaler Eigenschaftsgradierung im Taumelprozess werden abschließend eine Auslegungsmethode abgeleitet und die zugrundeliegenden Wirkmechanismen hinsichtlich des dreidimensional wirkenden Spannungs- und Formänderungszustandes sowie der identifizierten Prozessfehler in der Blechmassivumformung definiert.

Zur Bewertung der Übertragbarkeit auf geometrisch komplizierte Funktionsbauteile und unter Berücksichtigung gesamtheitlicher Randbedingungen wird die Auslegungsmethode im abschließenden Teil durch Übertragung auf ein industrierelevantes Demonstratorbauteil verifiziert. Dies beinhaltet neben der Beurteilung der vorliegenden Spannungs- und Formänderungszustände und der erreichbaren geometrischen Eigenschaften zudem eine Qualifizierung der Einseigenschaften unter Beachtung der zuvor abgeleiteten Erkenntnisse hinsichtlich des Auslagerungsverhaltens.



## 4 Werkstoffe, Versuchsanlagen und Auswertemethoden

In diesem Kapitel werden alle im Rahmen der Arbeit eingesetzten Werkstoffe, Schmierstoffe, Versuchsanlagen sowie Auswertemethoden aufgezeigt und die wichtigsten zugehörigen Kenngrößen und Daten erläutert. Neben den verwendeten Werk- und Schmierstoffen wird vor allem die Versuchssperipherie zur umformtechnischen Herstellung der unterschiedlichen prozessangepassten Halbzeuge und der experimentelle Aufbau zur Realisierung der lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung beschrieben. Anschließend werden die Auswertemethoden zur Analyse der geometrischen und mechanischen Eigenschaften der Funktionsbauteile erläutert. Eine Übersicht über das zugrundeliegende numerische Simulationsmodell schließt dieses Kapitel ab.

### 4.1 Eingesetzte Werk- und Schmierstoffe

Zur Realisierung einer lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung und aufgrund der hohen industriellen Relevanz wird die ausscheidungshärtbare Aluminiumlegierung EN AW-6016 eingesetzt. Der Versuchswerkstoff wurde von der Becker Aluminium-Service GmbH in einer Blechdicke von  $s_0 = 2,0$  mm im kaltausgelagerten Zustand T<sub>4</sub> zur Verfügung gestellt. Die im einachsigen Zugversuch ermittelten relevanten mechanischen Eigenschaften sowie die chemische Zusammensetzung mit den wichtigsten Legierungselementen nach DIN 573-3 [168] sind in Tabelle 4 für die verwendete Aluminiumlegierung im Zustand T<sub>4</sub> aufgelistet.

Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften aus dem Zugversuch in Walzrichtung und Legierungselemente der verwendeten Aluminiumlegierung EN AW-6016 im Zustand T<sub>4</sub>

Wert	$R_{p0,2}$	$R_m$	$A_g$	$r$ -Wert	Legierungselemente		
Einheit	MPa	MPa	%	-	% Masseanteil		
EN AW-6016	139,8 ±2,1	254,6 ±0,7	21,5 ±0,5	0,66 ±0,02	Mg	Si	Cu
					0,3-0,6	1,0-1,5	0,2

Zur Sicherstellung einer ausreichenden Schmierwirkung zur Verringerung des mechanischen Verschleißes, welcher besonders bei der Verwendung von Aluminiumwerkstoffen durch Werkstoffanhaftungen am Werkzeug geprägt ist [169], wird der Kühlschmierstoff Beruforge 150 DL der Carl

Bechem GmbH verwendet. Dieser wurde sowohl für die Umformung von Eisen- als auch von Nichteisenmetallen entwickelt [170] und konnte für die Anwendung in der Blechmassivumformung bei Raumtemperatur qualifiziert werden [17].

## 4.2 Methode zur lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung

Aufgrund der eingeschränkten Flexibilität von klassischen Verfahren wie der Induktionserwärmung oder der Erwärmung im Ofen konnte der Einsatz von Laserstrahlung als zielführend für die Applikation einer lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung identifiziert werden [10]. Für die Wärmebehandlung wird ein Diodenlasers LDM 3000-100 der Laserline GmbH eingesetzt, welcher eine Wellenlänge zwischen 900 nm und 1.080 nm aufweist. Die zugehörige Laseroptik mit Zoom-Homogenisator wird auf einem frei programmierbaren Fünffachs-Roboterarm der Kuka AG montiert, wodurch sich nahezu beliebige zweidimensionale Wärmebehandlungslayouts abbilden lassen. Die genaue Positionierung der Prüflinge kann durch eine speziell angefertigte Bauteilschablone mit entsprechendem Durchmesser sichergestellt werden. Die Größe des rechteckigen Laserspots mit über den gesamten Bereich homogenisierter Wärmeleistung kann stufenlos in beide Raumrichtungen zwischen einer Kantenlänge von  $l_{\min} = 6$  mm bis  $l_{\max} = 42$  mm variiert werden. Die maximale Laserleistung beträgt dabei 3 kW, welche redundant durch zwei separate Messsysteme zur Einhaltung der definierten Temperatur überwacht wird. Zum einen erfolgt die Temperaturmessung mittels Pyrometer, durch welche die Laserleistung angepasst wird. Zum anderen ist eine Infrarotkamera vom Typ FLIR SC 7600 der Flir Systems Inc. installiert, um den Temperaturverlauf zu überprüfen und die Wärmebehandlung entlang der Probe graphisch darzustellen. Der beschriebene Versuchsaufbau ist schematisch in Bild 5 dargestellt.

Um einen konstant hohen Emissionsgrad zu gewährleisten, wird eine dünne Graphitschicht auf die Oberfläche aufgetragen und die Verfahrensgeschwindigkeit auf  $v_{\text{laser}} = 7,5$  mm/s eingestellt. Die Graphitierung der Oberfläche verhindert zudem eine Schädigung der Laseroptik durch reflektierende Strahlung. Zur thermografischen Auswertung der Wärmebehandlungslayouts sowie zugehöriger Wärmeübergangszonen wird ein konstanter Emissionskoeffizient von  $\varepsilon = 0,95$  angenommen [68].

Während die Layouts für die spätere Wärmebehandlung der Funktionsbauteile spezifisch an die Geometrie angepasst werden, wird die Wärmebehandlung der Blechstreifen für die Zugversuchsproben mit Variation der

jeweiligen zu untersuchenden Parameter durchgeführt, wie im Bild 5 rechts dargestellt.

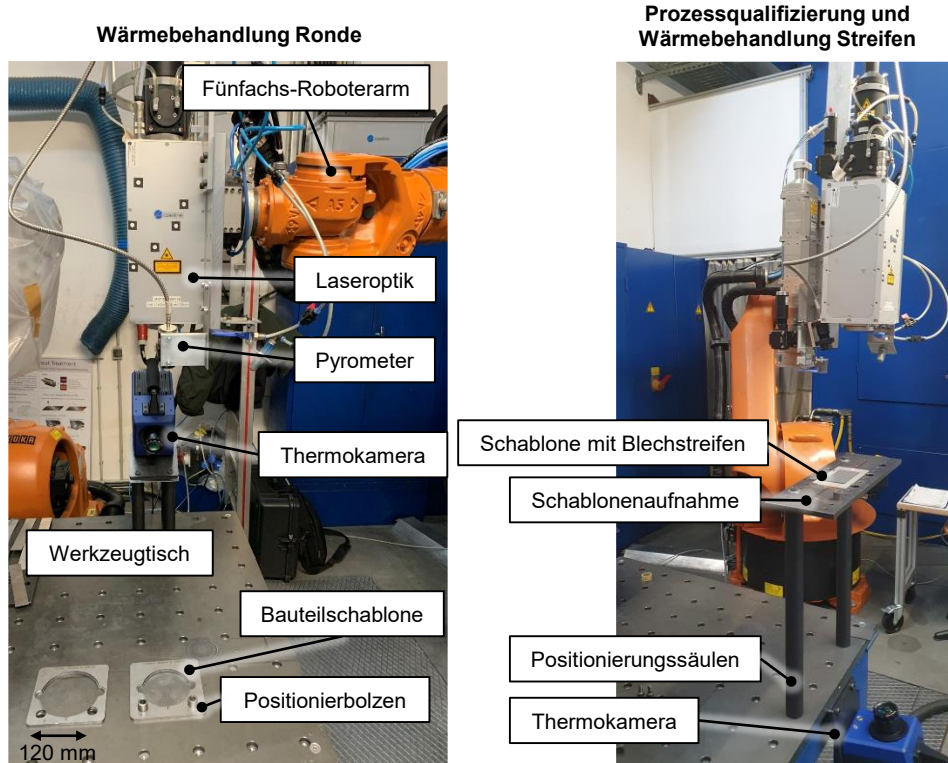


Bild 5: Unterschiedliche Versuchsaufbauten zur Realisierung einer laserinduzierten lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung

Für beide Varianten wird eine entsprechende Schablone eingesetzt. Eine umfassende Prozessqualifizierung wird mittels Thermokamera auf der Unterseite zur Messung der rückseitigen Temperaturverteilung durchgeführt. Die Durchführung der Wärmebehandlung sowie die eingestellten Parameter orientieren sich dabei im Wesentlichen an den Untersuchungen von Graser [59] und wurden bedarfsgerecht für die vorliegende Arbeit adaptiert.

### 4.3 Umformtechnische Anlagen und Werkzeuge

Zur umformtechnischen Herstellung der Funktionsbauteile werden unterschiedliche Anlagen sowie Werkzeuge benötigt. Neben der eingesetzten hydraulischen Tiefziehpressen liegt der Fokus vor allem auf dem Aufbau und der Funktion des Taumelwerkzeugs.

### 4.3.1 Hydraulische Tiefziehpresse mit Taumelfunktion

Zur Realisierung des Umformprozesses wird eine dreifach-wirkende hydraulische Tiefziehpresse vom Typ TZP400/3 der LASCO Umformtechnik GmbH eingesetzt. Die Bauteile können dabei mit einer stufenlos geregelten maximalen Pressenkraft zwischen  $F_{\min} = 400 \text{ kN}$  und  $F_{\max} = 4.000 \text{ kN}$  umgeformt werden. Eine Besonderheit dieser Presse liegt in der speziell ausgelegten Taumelfunktion, welche durch die phasenverschobene Ansteuerung sowie den weggeregelten Hub von vier seitlich angebrachten Hydraulikzylindern ermöglicht wird. Diese sorgen für eine Auslenkung der Taumelplatte, welche beweglich auf einer Kugelkalotte gelagert ist. Durch die definierte Auslenkung können einerseits verschiedene Winkel im Bereich von  $\Theta_{\max} = \pm 1^\circ$  als auch variierende Taumelkinematiken abgebildet werden. Die Presse sowie der für das Taumeln gerüstete Arbeitsraum sind in Bild 6 dargestellt.

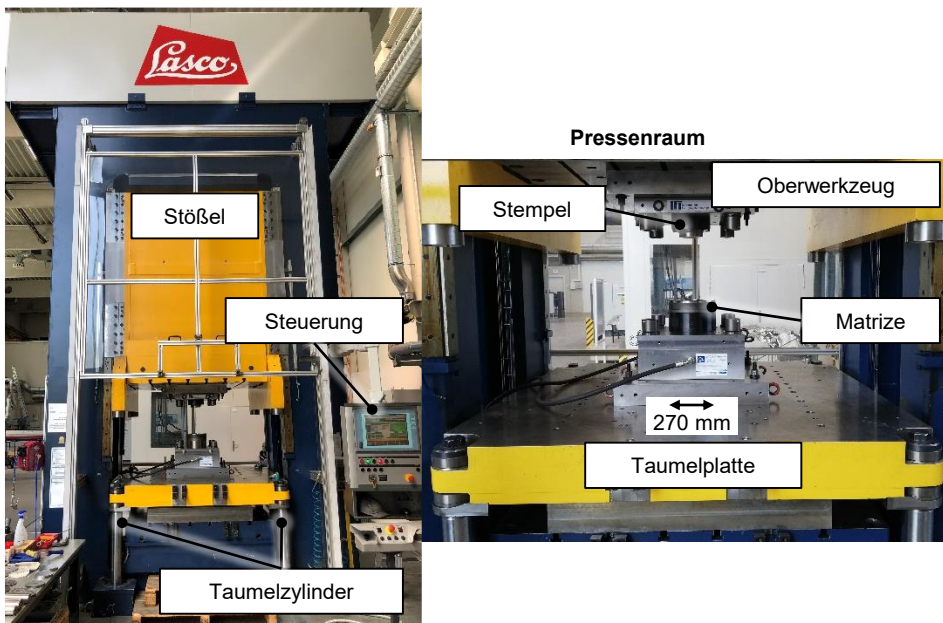


Bild 6: Hydraulische Tiefziehpresse TZP 400/3 von Lasco mit eingebautem Taumelwerkzeug

Eine Besonderheit im Vergleich zu aus der Literatur bekannten Taumelpressen ist dabei die Einbringung der Taumelbewegung durch die untere Werkzeugseite. Dabei kann die Kinematik vom Kraftfluss durch den Hauptstößel von oben in das Werkzeug entkoppelt aufgebracht werden.

Das Zusammenspiel aus Taumelwinkel und der Anzahl an Taumelrunden lässt sich dabei in drei charakteristische Phasen unterteilen [17]. Prozessseitig beginnt das Taumeln in einer ebenen Ausgangsposition ohne Winkelanstellung. Anschließend wird der Taumelwinkel während einer bestimmten Anzahl an Taumelrunde angestellt. Dies wird als Hochfahrphase  $U_h$  bezeichnet. Nach Erreichen des Zielwinkels von maximal  $\Theta = 1^\circ$  wird dieser für eine definierte Anzahl an Runden in der Konstanthaltephase  $U_k$  beibehalten. Die Ausgangsposition wird am Ende der Rückstellphase  $U_r$  wieder erreicht. Die Anzahl an Taumelrunden pro Phase kann dabei unter der Bedingung  $U \geq 1$  frei definiert und die Umdrehungsgeschwindigkeit zwischen  $v_{\min} = 0,125$  1/s und  $v_{\max} = 0,5$  1/s eingestellt werden. Die Beziehung zwischen Taumelwinkel und Umdrehungszahl sowie mögliche Taumelkinematiken sind schematisch in Bild 7 dargestellt.

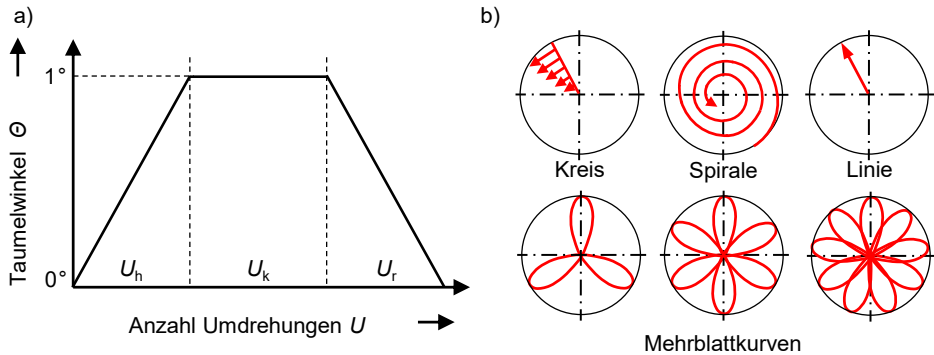


Bild 7: Taumelprozess mit a) zugeordneten Umformphasen und b) möglichen Kinematiken

Aufgrund der Verkippung der unteren Werkzeugkomponente und einer teilweise beidseitig erfolgenden Umformung bedarf es eines speziell ausgelegten Taumelwerkzeugs. Der grundlegende Aufbau sowie die Funktionsweise werden im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

### 4.3.2 Taumelwerkzeug

Zu Beginn des Prozesses erfolgt ein Schließen der Werkzeughälften durch Zustellen des Stößels. Infolge der charakteristischen Taumelbewegung mit einem primär radial auftretenden Stofffluss wird der Gegenstempel, welcher über die entsprechende Negativkavität der einseitigen Bauteilgeometrien verfügt, durch eine umlaufende Matrize eingefasst. Beim Umformen von beidseitig aufgedickten Ronden verfügen sowohl der Stempel als auch der Gegenstempel über die entsprechende Kavität. Mit einer Positionierfläche am Stempel sowie einem Führungssäulengestell

während des Rüstvorgangs kann eine exakte Positionierung der Aktivteile zueinander sichergestellt werden. Nach dem Aufbringen der definierten Umformkraft startet der eigentliche Taumelprozess durch die Ansteuerung der Hydraulikzylinder und folglich der Taumelkinematik. Der in radialer Richtung einsetzende sowie im Laufe des Prozesses auch in tangentialer Richtung auftretende Stofffluss ist für die Füllung der definierten Kavitäten verantwortlich. Je nach eingesetzten Stempelpaaren weist der Taumelprozess charakteristische Züge des Vorwärts- und Rückwärtsfließpressens auf. Durch eine hydraulische Auswerferereinheit kann nach dem Prozessdurchlauf, welcher in Abschnitt 4.3.1 beschrieben wird, sowohl das Bauteil entnommen als auch ein Stempelwechsel vorgenommen werden. Der schematische Aufbau mit den wichtigsten Komponenten sowie Stempel und Gegenstempel sind in Bild 8 dargestellt.

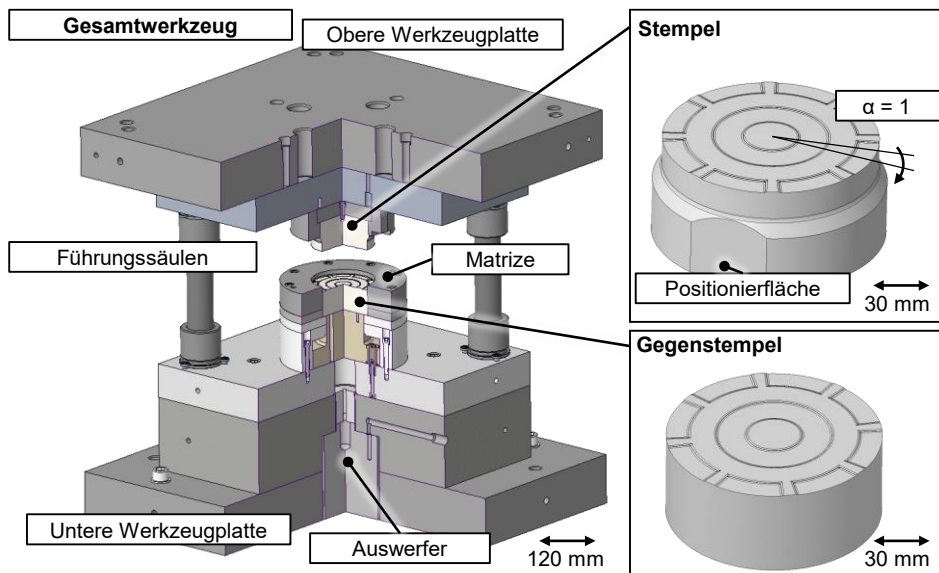


Bild 8: Schnittdarstellung Taumelwerkzeug mit Detailansicht Stempel und Gegenstempel

Die Einbringung der Taumelbewegung erfolgt entsprechend von der Unterseite des Werkzeugs über die Auslenkung der Taumelplatte. Der Krafteintrag wird über den Stößel in die obere Werkzeugplatte realisiert. Durch einen modularen Aufbau können Stempel sowie Gegenstempel mit geringem Montageaufwand gewechselt und entsprechend unterschiedliche Bauteilgeometrien hergestellt werden.

## 4.4 Versuchsauswertung und Messmethoden

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen zur Versuchsauswertung sowie zugrundeliegende Messmethoden erläutert. Neben den geometrischen Eigenschaften der Komponenten als primäre Messgröße werden zudem die Methoden zur Werkstoffcharakterisierung im wärmebehandelten Zustand bei Raumtemperatur sowie die Grundlagen der optischen Dehnungsmessung zur Validierung der Stoffflussanteile aufgezeigt.

### 4.4.1 Geometriebasierte Auswertung

Als Indikator zur Bewertung der unterschiedlichen Wärmebehandlungsstrategien wird primär die Formfüllung der Funktionselemente definiert. Diese wird durch die geometrische Auswertung der Bauteile hinsichtlich Kontur und Blechdickenverlauf bestimmt. Dazu werden die Bauteile mit dem optischen 3D-Messgerät ATOS Core 300 der Carl Zeiss Group digitalisiert und anschließend vermessen. Dabei werden zuvor matt lackierte Bauteile mit Referenzpunkten beklebt, um dem Photogrammetriesystem TRITOP der GOM GmbH die Orientierung des Bauteils im dreidimensionalen Raum zu ermöglichen. Die Digitalisierung erfolgt anschließend durch den Einsatz von zwei nebeneinander positionierten und kalibrierten Kamerasystemen mithilfe der Streifenlichtprojektion. Jedem Pixel des aufgezeichneten Musters der Oberfläche werden auf Basis von optischen Transformationsgleichungen Raumkoordinaten zugeordnet [171]. Durch die Aufnahme von unterschiedlichen Blickwinkeln und Seiten kann so das gesamte Bauteil mit einer erreichbaren Genauigkeit von 0,01 mm digital abgebildet werden. In der Software GOM Inspect kann daraufhin die Auswertung der Bauteile erfolgen. Anhand unterschiedlicher Auswertemethoden können beispielsweise die Blechdicke oder die Kontur entlang des Bauteilradius ausgeleitet werden. Durch den Import von CAD-Modellen kann außerdem ein Vergleich zwischen der Soll- und der Ist-Kontur durchgeführt werden. Zur Bewertung der Bauteile werden die unterschiedlichen Bauteilbereiche je nach Geometrie in die vier Zonen Mitte ( $< 15$  mm), innere Aufdickung ( $> 15$  mm -  $< 33$  mm), Zwischenbereich ( $> 33$  mm -  $< 47$  mm) sowie äußere Aufdickung ( $> 47$  mm) eingeteilt.

### 4.4.2 Werkstoffcharakterisierung der verschiedenen Werkstoffzustände bei Raumtemperatur

Zur Identifikation des Einflusses unterschiedlicher Wärmebehandlungsstrategien und zur Erarbeitung der zielführenden Parameterkombination

bedarf es der grundlegenden Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften. Zur Bestimmung der mechanischen Kennwerte wird der einachsige Zugversuch durchgeführt. Die resultierenden mechanischen Eigenschaften infolge der Kurzzeit-Wärmebehandlung werden zudem durch metallographische Gefügeanalysen und Härtemessungen gestützt.

### ***Axialer Zugversuch***

Zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften und zur Bestimmung der Fließeigenschaften unter einachsiger Zugbelastung bei unterschiedlichen Wärmebehandlungsstrategien werden uniaxiale Zugversuche nach DIN EN ISO 6892-1 [172] durchgeführt. Die Proben werden mittels Laserstrahlschneiden mit einem CO<sub>2</sub>-Laser des Typs TruLaserCell 7020 der Firma Trumpf vorbeschnitten. Die resultierende Wärmeeinflusszone wird durch eine anschließende spanende Nachbearbeitung der parallelen Länge an der Zugprobe entfernt. Für die experimentellen Versuche wird eine Universalprüfmaschine vom Typ Z100 der Zwick Roell AG mit einer maximalen Prüfkraft von 100 kN eingesetzt. Zur Aufnahme der Proben werden hydraulische Spannbacken mit einem Anpressdruck von 100 bar verwendet. Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften wird die Dehnungsmessung mit dem optischen Messsystem ARAMIS der Carl Zeiss Group. Dabei werden zwei CCD-Kameras zur Erfassung der Deformation eines vor den Versuchen aufgebrauchten stochastischen Musters integriert. Die so berechnete Dehnung auf der Probenoberfläche bildet in Kombination mit der Kraft aus der Universalprüfmaschine die Grundlage zur Berechnung der mechanischen Kennwerte Dehngrenze, Zugfestigkeit sowie Gleichmaßdehnung. Eine mögliche Richtungsabhängigkeit wird durch die Prüfung in 0°, 45° und 90° zur Walzrichtung identifiziert.

### ***Metallographische Untersuchungen und Härtemessung***

Zur Bewertung und zur Quantifizierung der resultierenden mechanischen Eigenschaften durch eine vorgeschaltete Kurzzeit-Wärmebehandlung werden in der Arbeit unterschiedliche Bauteilbereiche metallographisch präpariert. Dazu werden die Proben aus dem Bauteil herausgetrennt und in Epoxidharz eingebettet. Dies geschieht in kaltem Zustand, um einen möglichen Wärmeeinfluss auf die Aluminiumbauteile während der Einbettung zu verhindern. Nach dem Aushärten der Probenkörper werden diese beginnend bei einer Körnung von 120 bis auf eine Körnung von 1200 nassgeschliffen. Um die nachfolgenden Untersuchungen und Härtemessungen zu ermöglichen, bedarf es nachfolgend der Herstellung der Planparallelität, welche durch den Einsatz einer Flachsleifmaschine sichergestellt wird. Im Anschluss werden die Proben bis zu einer Körnung

von 4.000 geschliffen und anschließend unter der Verwendung von Diamantsuspension mit Partikelgrößen von 6  $\mu\text{m}$  bis 1  $\mu\text{m}$  poliert. Durch Einsatz einer 3%-igen Nitallösung kann die Oberfläche angeätzt und so das Gefüge sowie dessen Orientierung unter dem Mikroskop sichtbar gemacht werden. Dabei wird ein Digitalmikroskop vom Typ VHX-100 der Firma Keyence verwendet. Die Orientierung des Gefüges kann anschließend qualitativ zur Identifikation des Materialflusses der unterschiedlichen Geometrien ausgewertet werden. Zudem werden Gefügebilder zur Beurteilung des auftretenden Prozessfehlers der Gratbildung verwendet.

Neben den Gefügaufnahmen werden die mechanischen Eigenschaften mittels Härtemessungen nach DIN EN ISO 14577-1 [173] bewertet. Dafür kommt das Mikrohärtmessgerät Fischerscope HM2000 der Helmut Fischer GmbH & Co. KG zum Einsatz. In einem Kraftbereich zwischen 0,4 - 2.000 mN kann mit einer Genauigkeit von 40  $\mu\text{N}$  gemessen werden. Die Messung der Eindringtiefe des Prüfkörpers besitzt eine Auflösung von  $\pm 0,1 \text{ nm}$  [174]. Als Eindringkörper wird eine Diamantpyramide mit einem Öffnungswinkel von  $136^\circ$  eingesetzt, welche eine definierte Prüfkraft aufbringt. Durch die Eindringtiefe sowie eine indentorspezifische Konstante kann die Härte berechnet werden. Die Mikrohärtmessungen erfolgen nach Vickers gemäß DIN EN ISO 6507-1 [175] mit einer Prüfkraft von 500 mN entsprechend als HV<sub>0,05</sub>. Die Eindring- sowie die Haltezeit wurden dabei als fünf und zehn Sekunden definiert. Als Kompromiss aus Messzeit und Auflösung wurde der Messpunktabstand in Blechdickenrichtung als 0,3 mm sowie in Blechlängsrichtung als 0,6 mm gewählt. Durch Programmierung des Messtisches kann neben einer Punkt- oder Linienmessung zudem ein Messraster abgefahren und damit ein Mikrohärteplot des Prüfkörpers ausgeleitet werden. Entsprechend erfolgt die Auswertung qualitativ sowie quantitativ durch die Berechnung der Mittelwerte mit zugehöriger Standardabweichung in den unterschiedlichen Messbereichen. Zur Bewertung des Einflusses der Kurzzeit-Wärmebehandlung auf das Verfestigungsverhalten der Aluminiumlegierungen wird zudem die Grundhärte im Anlieferungszustand T4 bestimmt, welche in Tabelle 5 aufgelistet ist.

Tabelle 5: Grundhärte Vickers HV<sub>0,05</sub> der eingesetzten Aluminiumlegierung

Legierung	EN AW-6016
Grundhärte HV <sub>0,05</sub>	90,7 $\pm$ 6,0

### 4.4.3 Stoffflussanalyse mittels optischer Dehnungsmessung

Der Versuchsaufbau zur optischen Dehnungsmessung folgt dem Aufbau in [176]. Zur Durchführung der optischen Analyse wird ein definiertes Punktmuster mit einem Durchmesser von  $d_o = 1,0$  mm und einem Abstand von  $l_o = 2,0$  mm zwischen den Punkten mittels Laserbeschriftung auf die Oberfläche der Proben aufgebracht. Anschließend werden die Halbzeuge unter Verwendung des Taumelwerkzeugs umgeformt. Für die optische Umformanalyse wird die Messsoftware GOM Correlate der Carl Zeiss Group eingesetzt. Sie dient zur Berechnung der Dehnungswerte und Scherwinkel im Bauteil auf Basis der Photogrammetrie [177]. Das Vorgehen besteht dabei aus drei Hauptschritten, welche in Bild 9 dargestellt sind.

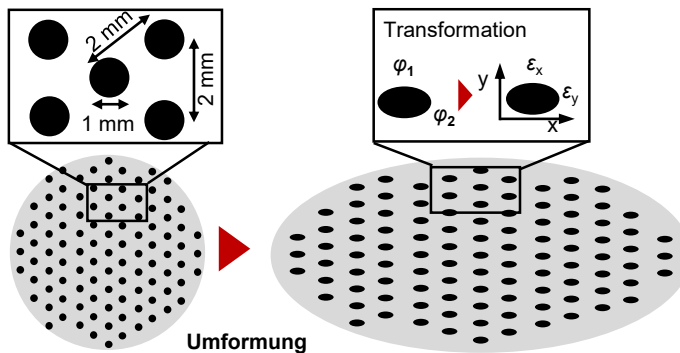


Bild 9: Schematische Vorgehensweise zur optischen Verschiebungsmessung

Zunächst werden die fotografischen Daten des Bauteils in geometrische Daten umgewandelt. Dazu werden Maßstabsleisten mit Referenzpunkten neben dem Bauteil positioniert. Diese werden in den Bildern erkannt und zur Berechnung der Geometriedaten herangezogen. Um die Verformung in allen relevanten Bereichen und insbesondere an den Kanten des Bauteils ganzheitlich zu erfassen, ist eine glockenförmige Fotoanordnung mit einer ausreichenden Anzahl von Bildern notwendig. Im zweiten Schritt wird ein dreidimensionales Gitter auf Grundlage der Verformung des zuvor aufgebrauchten Punktmusters erzeugt. Schließlich werden die ebenen Dehnungswerte berechnet. Dabei wird die Veränderung des Punktmusters mit der Ausgangsform verglichen. Der Abstand zwischen den Punkten dient als Basis für die Verschiebung und die Formänderung der Punkte zu Ellipsen als Grundlage für die Dehnungswerte. Daraus lassen sich Haupt- und Nebendehnungswerte extrahieren. Aufgrund der fehlenden Orientierung im Raum von Haupt- und Nebendehnung werden diese anschließend in die technischen Dehnungen  $\epsilon_x$  und  $\epsilon_y$  überführt, wobei ein Koordinatensystem mit Ausrichtung in  $x$ - und  $y$ -Richtung definiert wird. Unter Annahme von

Volumenkonstanz kann auf die Änderung der Blechdicke rückgerechnet und damit die Ergebnisse der optischen Messung mit den geometrischen Auswertungen analog der Vorgehensweise in Abschnitt 4.4.1 verifiziert werden. Mit dieser Auswertemethode kann nachfolgend der Stofffluss in radialer und tangentialer Richtung als zugehörige Verschiebung bestimmt werden.

## 4.5 Finite-Elemente Simulation des Taumelprozesses

Zur Erweiterung des bestehenden Prozessverständnisses im Rahmen des untersuchten Taumelprozesses bietet die numerische Simulation die Möglichkeit einer ganzheitlichen Analyse der Formgebung während der Umformung. Darüber hinaus kann der experimentelle Umfang der Versuche nach sichergestellter Validierung des Modells signifikant reduziert werden. Zudem können in der Simulation Kenngrößen wie auftretende Spannungen und Umformgrade ausgewertet werden, welche in den grundlegenden Erklärungsansätzen Anwendung finden aber im Experiment nicht oder nur unter erheblichem Aufwand ermittelt werden können.

Für die numerische Abbildung des Taumelprozesses wird die speziell für die Analyse und Optimierung von Fertigungsprozessen ausgelegte Software Simufact.Forming der Firma Hexagon (Schweden) in der Version 2021.1 verwendet. Mithilfe dieser auf der Finite-Elemente-Methode basierenden Software können sowohl implizite als auch explizite Lösungsverfahren angewendet werden [178], um unterschiedliche Prozessgrößen effizient vorherzusagen. Während für statische oder quasi-statische Prozesse meist implizite Verfahren genutzt werden, werden dynamische Prozesse aufgrund der Massen- und Dämpfungseffekte explizit gerechnet [179]. Die Prozessklasse der Massivumformung wird vor allem nach dem impliziten Lösungsverfahren durch eine Vernetzung des Volumens berechnet, da diese als quasi-statischer Prozess angesehen werden kann [180]. Dabei wird die Knotenverschiebung durch eine eingebrachte Umformkraft ausgehend von einem Kräftegleichgewicht für jedes Zeitinkrement errechnet. Das sich dem Gleichgewichtszustand annähernde Ergebnis wird dabei aufgrund von zahlreichen Nichtlinearitäten iterativ für eine definierte Schrittweite bestimmt [181].

Die eingesetzte Software ist mit einem Pre-Prozessor zur Erstellung der Simulationsmodelle, einem Vernetzer (Mesher) zur Diskretisierung der Geometrien sowie einem Solver zur Berechnung und Lösung der numerischen Problemstellung ausgestattet. Als Ausgangsmodell zur Adaption auf die in dieser Arbeit untersuchten Randbedingungen dient das

validierte Modell in [28], welches in die aktuell gültige Version der Software übertragen wurde. Im Modell werden die Matrize sowie der Gegenstempel als starr definiert, wohingegen der Taumelstempel auf der Oberseite, bedingt durch eine signifikante elastische Verformung während des Kippprozesses, als deformierbar implementiert wird. Begründet durch einen radialen sowie tangentialen Stofffluss während des Taumelns wird ohne die Nutzung von Symmetrieebenen voll dreidimensional gerechnet. Eine Übersicht des Simulationsmodells sowie der genutzten Vernetzungsparameter von Stempel und Bauteil sind nachfolgend in Bild 10 zusammengefasst. Zur möglichst genauen Abbildung der Wirklichkeit werden sämtliche im realen Taumelprozess eingestellten Parameter ebenso in der Simulation berücksichtigt.

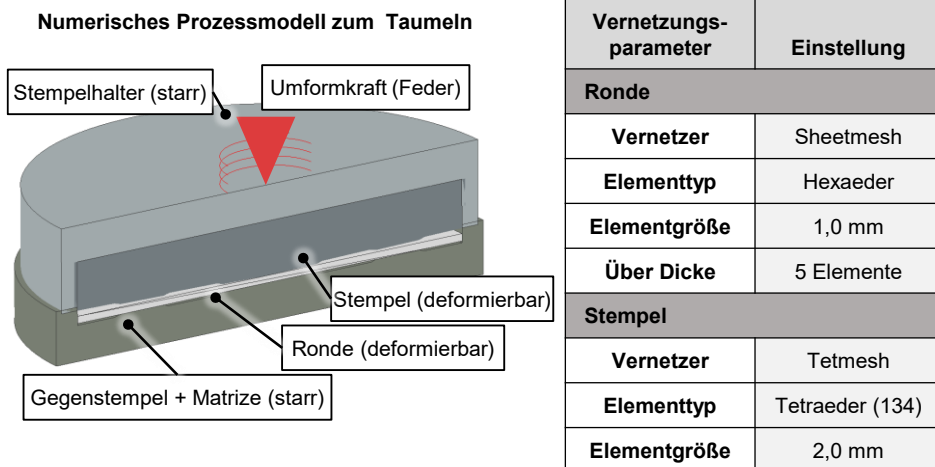


Bild 10: Numerisches Simulationsmodell zum Taumelprozess sowie verwendete Vernetzungsparameter, in Anlehnung an [28]

Der Einsatz verschiedener Stempel- und Gegenstempelsätze ermöglicht die Übertragung auf verschiedene, in dieser Arbeit untersuchte Geometrien. Bedingt durch die unterschiedlichen Kavitäten sowie variierende primäre Umformzonen werden Verfeinerungsboxen bedarfsgerecht für die Ronde als auch für den Taumelstempel eingesetzt. Diese verfügen über einen flexibel einstellbaren Bereich und sind mit einer Verfeinerung der Stufe 1 definiert.

## **5 Erarbeitung einer spannungs- und stoffflussbasierten Modellvorstellung des Taumelprozesses**

Um einen potentiellen Einsatz von Aluminiumlegierungen für hochbelastete Komponenten in alternativen Antriebskonzepten oder Getrieben zu forcieren, bedarf es der Sicherstellung einer ausreichenden Bauteilqualität und der Identifikation sowie Vermeidung von Prozessfehlern. Dazu müssen der zugrundeliegende Blechmassivumformprozess im Rahmen eines dreidimensionalen Spannungs- und Formänderungszustands systematisch verstanden und das Einsatzpotential von Aluminium vollumfänglich bewertet werden können. Weiterhin können nur durch umfassende Kenntnis des Umformprozesses, dessen Beeinflussung und der resultierenden Bauteileigenschaften zielführende Maßnahmen zur Stoffflusssteuerung identifiziert und in weiterführenden Untersuchungen analysiert werden. Die aktuell bestehenden Prozessbeschreibungen und Modellvorstellungen berücksichtigen in der grundlagenwissenschaftlichen Analyse lediglich Stahlwerkstoffe unterschiedlicher Festigkeitsklassen, wohingegen Untersuchungen über den Einsatz von Aluminium bisher nur oberflächlich erfolgt sind. Weiterhin fehlt ein tiefgehendes Verständnis über die zugrundeliegende Ursache in den Spannungskomponenten und das Auftreten von prozessabhängigen Stoffflussanteilen, welche als maßgebliche Herausforderung in der Blechmassivumformung zu überwinden sind. In Kombination mit der Identifikation und Bewertung von Prozessfehlern soll so das Einsatzpotential von Aluminium bewertet und gleichzeitig die Grundlage für die Erarbeitung und Qualifizierung von stoffflusssteuernden Maßnahmen geschaffen werden.

Ziel ist folglich die Erarbeitung einer spannungs- und stoffflussbasierten Modellvorstellung des Taumelprozesses und Integration relevanter Umformkenngrößen sowie die Berücksichtigung von identifizierten Prozessfehlern zur Möglichkeit der ganzheitlichen Bewertung des Einsatzpotentials von Aluminium. Damit soll die Erarbeitung potentieller Strategien zur Stoffflusssteuerung sowie eine fundamentale Bewertung derer Wirkungsweisen auf Basis der zugrundeliegenden prozesstechnischen Herausforderungen und umformtechnischen Besonderheiten des Taumelprozesses ermöglicht werden. Zur Erreichung dieses Ziels wird ein kombiniert numerisch-experimenteller Ansatz zur Analyse der Ursache-Wirkbeziehung während der Formgebung sowie zur Identifikation von

Prozessgrenzen gewählt. Der Fokus der wissenschaftlichen Untersuchungen liegt dabei auf einer Erweiterung der Validierung eines numerischen Prozessmodells zur Abbildung der auftretenden Stoffflussanteile, welche zwar als maßgeblich für die erreichbare Bauteilqualität eingestuft wurden, im Rahmen eines holistischen Prozessverständnisses aber bisher nicht Gegenstand grundlagenwissenschaftlicher Arbeiten waren. Weiterhin gilt es, hinsichtlich des Einsatzes von Aluminium auftretende Prozessfehler beim Taumeln zu berücksichtigen und auf den grundlegenden Wirkmechanismus zurückzuführen. Darauf aufbauend kann die bestehende Modellvorstellung über den Taumelprozess um ebendiese Erkenntnisse erweitert und damit als Grundlage für die Bewertung der Bauteilqualität, der auftretenden Spannungs- und Formänderungszustände sowie von resultierenden Stoffflussanteilen und Prozessfehlern eingesetzt werden. Dieses erweiterte Prozessverständnis befähigt zur Einschätzung der Notwendigkeit, zur grundlagenwissenschaftlichen Erarbeitung, zum Einsatz und zur technologischen und ökonomischen Bewertung von stoffflusssteuernden Maßnahmen in der Blechmassivumformung.

## 5.1 Numerisch-experimentelle Untersuchung zum Taumeln von Aluminium

In diesem Abschnitt wird eine kombinierte numerisch-experimentelle Untersuchungsmethode zur Identifikation der im Referenzprozess vorliegenden Stoffflussanteile sowie Umformgrade verfolgt. Dabei wird ein numerisches Modell des Taumelprozesses anhand experimenteller Versuche mittels geometrischer und mechanischer Eigenschaften validiert, um anschließend zur Vorhersage der auftretenden Stoffflussanteile sowie der zugrundeliegenden Ursache-Wirkbeziehungen eingesetzt werden zu können. Eine abschließende Plausibilisierung der Erkenntnisse erfolgt mittels optischer Formänderungs- und Verschiebungsmessung der real umgeformten Bauteile.

### *Numerische Simulation des Taumelprozesses und experimentelle Validierung*

Die Ergebnisse in diesem Kapitel beziehen sich auf die Referenzgeometrie mit einem Außendurchmesser von  $D_a = 100,0$  mm mit einer einseitig umlaufenden Aufdickung ab einem Radius von  $r = 40,0$  mm, welche in Bild 11 dargestellt ist. Diese Geometrie bildet die Grundlage für sämtliche weiterführende Untersuchungen und wurde bereits grundlagenwissenschaftlich unter Einsatz unterschiedlicher Stahlwerkstoffe analysiert.

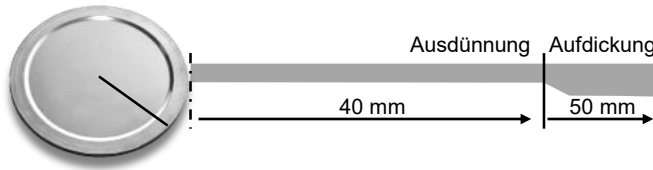


Bild 11: Referenzgeometrie mit umlaufender Aufdickung und zugehörigen Abmessungen

Als Prozessparameter werden eine Kreiskinematik bei einem Taumelwinkel von  $\Theta = 1,0^\circ$  und einer konstanten Taumelrundenzahl von  $U_h = U_k = U_r = 5$  definiert. Um den Einfluss einer späteren Wärmebehandlung auf eine Erhöhung der Stoffflussanteile sowie auf die maximal erreichbaren Blechdicke nachzuweisen, wird eine vergleichsweise geringe Umformkraft von  $F_{\max} = 500$  kN eingesetzt. Durch Wahl dieser Parameterkombination wird weiterhin die Übertragbarkeit auf Ergebnisse anderer Arbeiten sichergestellt. Sämtliche Umform- und Prozessparameter sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Für die numerische Prozessmodellierung werden der Taumelprozess in der Software Simufact.Forming 2021.1 (Hexagon) vollumfänglich modelliert und sämtliche Umformparameter integriert. Für die Implementierung des Materialmodells im Ausgangszustand werden die Ergebnisse der Zugversuche in  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$  zur Walzrichtung im kaltausgelagerten Zustand T4 genutzt.

Tabelle 6: Umform- und Prozessparameter des Referenzversuchs

Parameter	Ausprägung	Einheit
Taumelwinkel $\Theta$	1	$^\circ$
Taumelrunden $U_h; U_k; U_r$	5	-
Umformkraft $F_U$	500	kN
Ausgangsblechdicke $s_o$	2,0	mm
Versuchswerkstoff	EN AW-6016	

Um den Einfluss der Umformoperationen auf die Bauteileigenschaften und die zugrundeliegenden Wirkmechanismen hinsichtlich des Stoffflusses zu identifizieren, werden die resultierenden geometrischen Eigenschaften im kaltausgelagerten Zustand T4 durch Analyse des Blechdickenverlaufs über den Rondenradius  $r$  sowie der mittleren Blechdicke in der Aufdickung  $s_a$  ausgewertet. Des Weiteren werden die mechanischen Eigenschaften in Form des vorliegenden Umformgrades als Indikator für die stattfindende

Formänderung des Bauteils herangezogen. Die beschriebenen numerischen und experimentellen Ergebnisgrößen sind in Bild 12 zusammengefasst.

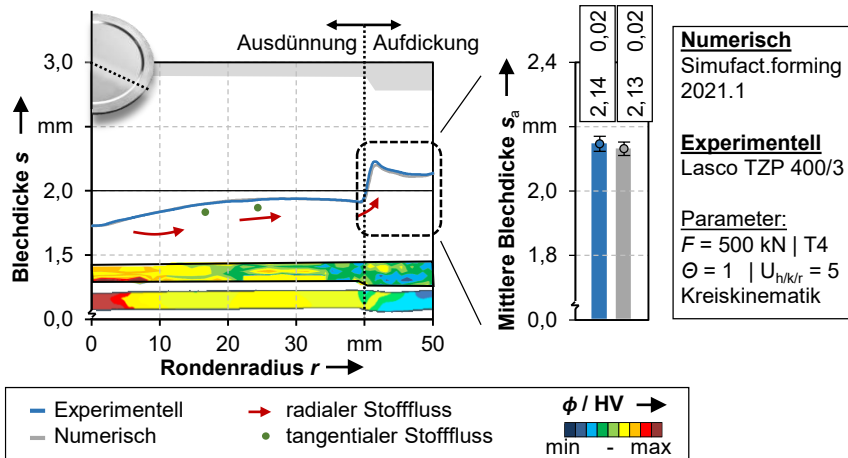


Bild 12: Numerische Ergebnisse und experimentelle Validierung der geometrischen und mechanischen Eigenschaften für das Referenzbauteil

Der Effekt des Center-Thinning [136] kann anhand der reduzierten Blechdicke im Rondeninneren nachgewiesen werden. Durch das Aufbringen der Umformkraft in axialer Richtung sowie durch die konische Stempelform resultiert zu Prozessbeginn ein radialer Stofffluss aus dem Bauteilzentrum. Die Folge ist eine signifikante Ausdünnung, welche sich in einer minimalen Blechdicke mit einem Wert von  $s_{\min} = 1,73$  mm äußert. Mit zunehmender Dauer des Umformprozesses wird das Material durch ein Anstellen des Taumelwinkels radial nach außen verdrängt. Der inkrementelle Charakter des Prozesses sowie die Abrollbewegung in Umfangsrichtung resultieren zudem in einem tangentialen Stofffluss. Im aufgedickten Bereich ab  $r > 40$  mm bewirkt der radiale Stofffluss eine Materialanhäufung in der Kavität des Gegenstempels. Bei den gewählten Prozessparametern wird eine mittlere Blechdicke in der Aufdickung von  $s_a = 2,13$  mm erzielt. Neben den geometrischen Eigenschaften wird zudem die Umformgradverteilung als Maß für die eingebrachte plastische Verformung ausgewertet. Die höchsten Werte werden infolge der beschriebenen Ausdünnung im Rondenzentrum erreicht, wohingegen diese bis zum Beginn der Aufdickung sinken. In der Aufdickung selbst sind die Werte am geringsten, da hier der Werkstoff bei geringer Formfüllung kaum oder nur moderat umgeformt wird. Am Einlaufradius der Kavität wird aufgrund des erhöhten Fließwiderstandes ein lokales Maximum erreicht.

Sowohl im stark ausgedünnten Zentrum als auch in der Aufdickung kann eine hohe Übereinstimmung zwischen numerischen und experimentellen Ergebnissen nachgewiesen werden. Die mittlere Blechdicke in der Aufdickung kann mit Werten von  $s_a = 2,14 \pm 0,02$  mm für die Realversuche und  $s_a = 2,13 \pm 0,02$  mm für die numerische Auswertung im Rahmen der Standardabweichung statistisch als identisch eingestuft werden. Neben der Blechdicke werden darüber hinaus die mechanischen Eigenschaften in Form des Umformgrades mit den experimentell ermittelten Härteverläufen gegenübergestellt. Auch hier kann eine hohe qualitative Übereinstimmung zwischen numerischer Vorhersage und experimentellen Ergebnissen erzielt werden. Aufgrund der hohen Prognosegüte hinsichtlich der Blechdickenverteilung sowie der resultierenden mechanischen Eigenschaften kann zwar prinzipiell von einer realitätsnahen Abbildung der auftretenden Stoffflussanteile ausgegangen werden, allerdings wurde eine Validierung des adaptierten Modells in vorangegangenen Arbeiten ausschließlich auf Basis der geometrischen und mechanischen Eigenschaften durchgeführt [70].

### ***Erweiterung des numerischen Modells zur Identifikation der Stoffflussanteile und experimentelle Validierung***

Zur ganzheitlichen Bewertung von stoffflusssteuernden Maßnahmen ist die Kenntnis über den auftretenden Stofffluss während des Umformprozesses essenziell. Bisherige Untersuchungen beziehen sich dabei jedoch lediglich auf lokal begrenzte Auswertungen dieser Kenngröße im Taumelprozess und können deshalb den komplexen Zusammenhang zwischen den wirkenden Spannungskomponenten und den daraus induzierten Stofffluss nicht ausreichend beschreiben. Folglich bedarf es einer Erweiterung der Methode der numerischen Simulation zur Identifikation der auftretenden Stoffflussanteile und einer weiterführenden Validierung.

Zur Bestimmung der auftretenden Stoffflussanteile im Referenzprozess werden die radiale sowie tangentielle Verschiebung eines jeden Knotens im Bauteilquerschnitt numerisch ausgewertet. Diese Methode wurde durch Hildenbrand [28] für lokal begrenzte Bereiche auf der stempelseitigen Werkstückoberfläche angewendet und wird im Rahmen dieser Arbeit zum Aufbau eines ganzheitlichen Prozessverständnisses hinsichtlich auftretender Stoffflussanteile übertragen. Zur Sicherstellung der Aussagefähigkeit über die auftretenden Stoffflussanteile mithilfe der numerischen Simulation muss eine umfangreiche experimentelle Validierung des Modells erfolgen, welches neben einer hohen Prognosequalität für die geometrischen

sowie mechanischen Eigenschaften außerdem die auftretenden Stoffflussanteile realitätsnah abbilden kann.

Für die experimentelle Validierung der radialen und tangentialen Stoffflussanteile kommt die in Kapitel 4 beschriebene optische Formänderungsanalyse unter Verwendung der Software GOM Correlate (Carl Zeiss Group) zum Einsatz. Während des Umformprozesses wird ein vorher aufgebrachtes Punktmuster verformt und entsprechend des Stoffflusses verschoben. Diese Verschiebung kann mithilfe der Software nach einer Zentrierung der Bauteile im Rondenzentrum sowohl in radialer als auch in tangentialer Richtung ausgewertet und entsprechend direkt mit den Ergebnissen der numerischen Simulation verglichen werden. Der numerische und experimentelle Verlauf des radialen und tangentialen Stoffflusses entlang des Rondenradius ist in Bild 13 dargestellt.

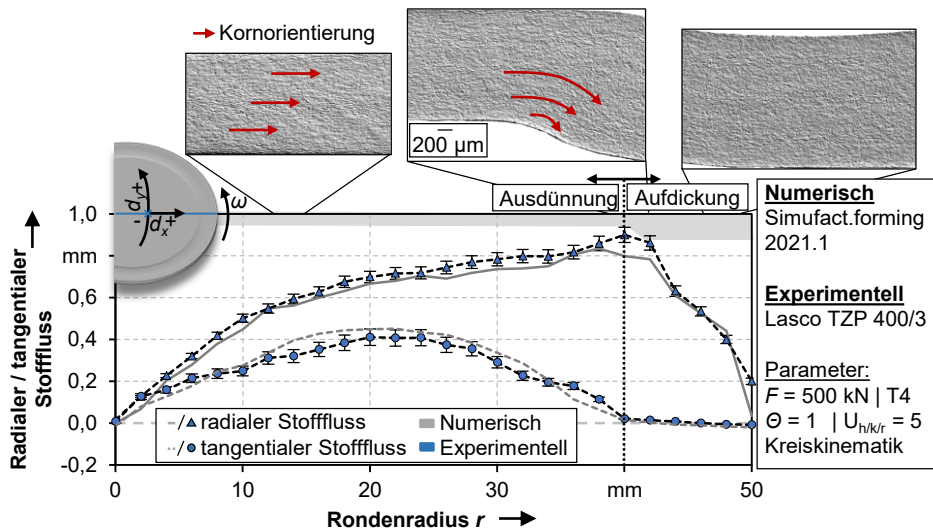


Bild 13: Validierung der numerisch identifizierten radialen und tangentialen Stoffflussanteile des Referenzbauteils anhand experimenteller Versuche

Während der Hochfahrphase  $U_h$  wird der Taumelwinkel sukzessive auf den definierten Maximalwert angestellt, was eine stufenweise Zunahme des radialen Stoffflusses zur Folge hat. Der steile Anstieg im Rondenzentrum lässt sich mit der starken Ausdünnung zu Prozessbeginn begründen, welche eine ringförmige Materialverschiebung in radialer Richtung bewirkt. Mit zunehmendem Radius steigt auch der radiale Stofffluss an, jedoch nimmt die Steigung sukzessive ab. Als charakteristischer Punkt im Verlauf des radialen Stoffflusses kann der Bereich radial direkt vor und am Einlaufbereich der Kavität identifiziert werden. Hier werden maximale

Werte von  $d_x = 0,90 \pm 0,03$  mm erreicht, welche sich durch das Einfließen des Werkstoffs in die Randbereiche der Kavität bei gleichzeitiger verminderter Stützwirkung begründen lassen. Bei Beginn der Kavität verliert das Werkstück sprunghaft den Kontakt zum Stempel, wodurch kein zusätzliches Material mehr in radialer Richtung verdrängt wird. Die Werte erreichen über die Länge der Aufdickung wieder den Ausgangswert. Neben der radialen Komponente wird das Taumeln zusätzlich durch einen tangentialen Anteil des Stoffflusses charakterisiert [17]. Dieser begründet sich in der inkrementellen Zunahme des Taumelwinkels, in der konischen Form des Stempels sowie in der durch die Kreisbewegung des Unterwerkzeugs eingeleitete Abrollbewegung des Stempels auf der Werkstückoberfläche. Somit wird Material in Umfangsrichtung vor dem Taumelstempel hergeschoben, wobei Analogien zum flexiblen Walzen erkennbar sind [182]. Geometrisch bedingt durch die maximalen Taumel- und Anstellungswinkel sowie das zu Prozessbeginn stattfindende Eindringen im Rondenzentrum liegt ein lokales Maximum in etwa in der Mitte des ausgedünnten Bereichs mit Werten von  $d_y = 0,41 \pm 0,03$  mm. Bis zum äußeren Rand der Ausdünnung sinken diese Werte wieder bis auf  $d_y = 0$  mm ab. Dieser charakteristische Punkt ohne nachweisbaren tangentialen Stofffluss am Beginn der Aufdickung lässt sich durch den fehlenden Werkzeugkontakt der freien Fläche der Stempelkavität begründen. Dieser Effekt kann aufgrund der unvollständigen Formfüllung über die gesamte Länge der Kavität beobachtet werden.

Bei einem direkten Vergleich zwischen numerischen und experimentellen Ergebnissen kann eine hohe Übereinstimmung beider Verläufe nachgewiesen werden. Neben dem allgemeinen Verlauf über den Rondenzentrum kann zudem eine hohe Prognosegüte für die Lage sowie Maximalwerte der charakteristischen Punkte am Einlauf der Kavität abgeleitet werden. Zur qualitativen Plausibilisierung der auftretenden Stoffflussanteile wurden Gefügebilder an relevanten Bauteilbereichen ausgewertet. Im Rondenzentrum zeigt sich eine in radialer Richtung gelängte Gefügestruktur, welche sich durch die axiale Stauchung zu Prozessbeginn und die radiale Verdrängung des Materials mit zunehmender Winkelanstellung erklären lässt. Am Einlauf in die Werkzeugkavität werden maximale Werte für den radialen Stofffluss erzielt. Dies kann ebenso anhand der Gefügerorientierung plausibilisiert werden. Die Körner sind in Richtung des freien Kavitätsvolumens um die Einlaufschräge herum gelängt. Im Aufdickungsbereich liegt aufgrund des fehlenden tangentialen Stoffflusses und dem sinkenden radialen Anteil keine eindeutige Orientierung der Gefügestruktur vor.

Zusammenfassend kann das numerische Modell durch die experimentelle Validierung zur Vorhersage der auftretenden Stoffflussanteile im Taumelprozess eingesetzt werden. Da die Steuerung des Stoffflusses als maßgebliche Herausforderung zur Sicherstellung einer hohen Bauteilqualität in Blechmassivumformprozessen identifiziert werden konnte, bietet die Erweiterung des numerischen Modells um diese validierte Ergebnisgröße einen entscheidenden Mehrwert bei einer zukünftigen Prozessauslegung, einer Werkzeug- und Geometrieangepassung oder bei der Bewertung der vorliegenden Stoffflussanteile und Übertragung auf weitere Bauteilgeometrien.

## 5.2 Identifikation und Bewertung von festigkeitsabhängigen Prozessgrenzen

Im Rahmen einer ganzheitlichen Modellvorstellung zur Bewertung der Bauteilqualität und der Beurteilung von Grenzen bei der Stoffflusskontrolle besteht der Bedarf der Identifikation und der Einordnung von Prozessfehlern sowie einer Rückführung auf die zugrundeliegenden Wirkmechanismen. Dabei wurde in vorangegangenen Arbeiten die Gratbildung speziell für weichere Stahlgüten als maßgeblich eingestuft [28]. Diese Prozessgrenze kann ebenso beim Einsatz der untersuchten Aluminiumlegierung zur Herstellung der Referenzgeometrie festgestellt werden, siehe Bild 14.

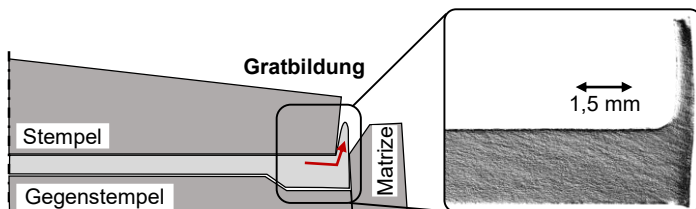


Bild 14: Schematische Darstellung der Wirkungsweise der Gratbildung und Ausprägung am Bauteilrand bei einer Umformkraft von 1.000 kN

Für die Einordnung dieses Prozessfehlers und Bewertung von potentiellen Maßnahmen zur Verringerung oder Vermeidung des Prozessfehlers bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der erwünschten Stoffflusskontrolle wird dieses Fehlerbild im Nachfolgenden systematisch analysiert und auf den zugrundeliegenden Wirkmechanismus zurückgeführt. Zur Bewertung der Gratbildung wird auf experimentelle Untersuchungen zurückgegriffen, da dieser Prozessfehler bedingt durch die vereinfachten Annahmen eines idealen Werkzeugs sowie der begrenzten Vernetzungsmöglichkeit numerisch nicht zielführend abbildbar ist. Dazu wird die Umformkraft sukzessive von

500 – 1.000 kN erhöht und jeweils die Gratbildung anhand von Schlibfbildern analysiert. Aufgrund eines werkzeugtechnisch notwendigen Spalts zwischen Stempel und Matrizenwand, durch welchen die definierte Taumelkinematik in Kombination mit einem maximal angestellten Winkel von  $\Theta = 1^\circ$  ermöglicht wird, kommt es bei gesteigerter Umformkraft vermehrt zur Gratbildung am oberen Bauteilumfang [106]. Diese Gratbildung konnte speziell für weichere Stahlwerkstoffe, wie einem Tiefziehstahl DCo4, bei einer Erhöhung der Prozesskraft identifiziert werden [17]. Der eingesetzte Aluminiumwerkstoff weist im Vergleich zum DCo4 mit einer Dehngrenze von  $R_{p0,2} = 181,0$  MPa [28] einen nochmals um 23% reduzierten Wert von  $R_{p0,2} = 139,8 \pm 2,1$  MPa auf. Entsprechend kann der Quotient aus Grathöhe zu Blechdicke bereits bei reduzierten Umformkräften im Rahmen der experimentellen Versuche nachgewiesen werden. Dieser ist in Abhängigkeit der Umformkraft in Bild 15 dargestellt und ab einer Umformkraft von  $F_U = 600$  kN im Mikroschliffbild nachweisbar.

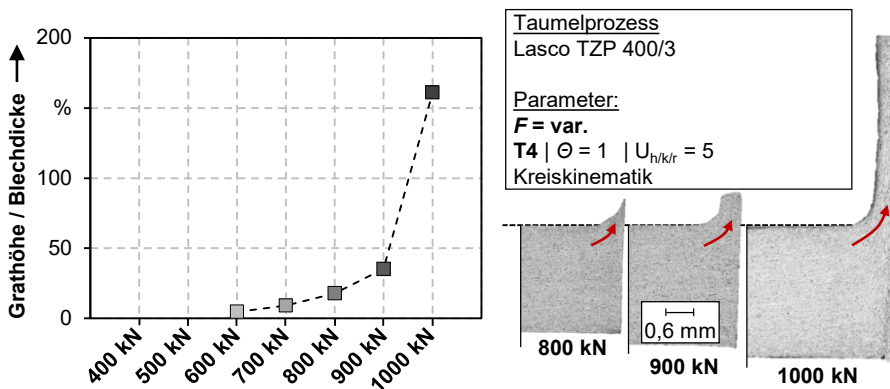


Bild 15: Prozessgrenze bei erhöhter Umformkraft durch kritische Gratbildung

Mit steigender Umformkraft steigen die vorliegenden dreiachsigen Druckspannungskomponenten und die radiale Verdrängung des Werkstoffs sowie die Formfüllung in der Kavität nimmt zu, wodurch die Gratbildung signifikant erhöht wird, wie in Bild 15 anhand der Schlibfbilder gezeigt. Bei einer Umformkraft von  $F_U = 800$  kN beträgt die Grathöhe 18% der Blechdicke. Bei der maximal untersuchten Umformkraft von  $F_{max} = 1.000$  kN bildet sich ein Grat von 160% der Blechdicke bezogen auf den Aufdickungsbe- reich. Neben einer erschwerten Weiterverarbeitung der Teile durch geometrische Abweichungen, einer gegebenenfalls notwendig gewordenen Nachbearbeitung und einem nicht mehr zur Verfügung stehenden Werkstoff [28] besteht so die Gefahr einer Werkzeugbeschädigung durch

Abbruch des Grats und anschließendem Wandern im Werkzeug. In Kombination mit einer erhöhten Neigung zu adhäsivem Verschleiß von Aluminiumwerkstoff an Werkzeugoberflächen aus Stahl [24] kann so eine gleichbleibende Bauteilqualität nicht sichergestellt werden. Als zugrundeliegender Wirkmechanismus kann ein zu großer Gradient aus wirkender Spannung und dem vorliegenden Formänderungswiderstand des Aluminiumwerkstoffs identifiziert werden. Die vorliegende Spannung besteht in diesem Fall aus drei Druckspannungskomponenten, welche sowohl axial, radial als auch tangential wirken. Unter der Wirkungsweise dieser drei Druckspannungen kommt es zu einem Fließen des Werkstoffs in den vorhandenen Spalt. Aufgrund einer generell geringeren Festigkeit der meisten Aluminiumlegierungen im Vergleich zu Stahl kann dieser Effekt der Gratabbildung bereits bei niedrigeren wirkenden Spannungen und folglich auch Umformkräften beobachtet werden.

Unter Berücksichtigung der Qualifizierung des numerischen Prozessmodells zur validierten Vorhersage der geometrischen und mechanischen Eigenschaften sowie der auftretenden Stoffflussanteile kann auf dieser Basis eine spannungs- und stoffflussorientierte Modellvorstellung über den Taumelprozess erarbeitet werden. Dadurch soll einerseits eine ganzheitliche Bewertung der Einsatzfähigkeit von Aluminiumwerkstoffen im Taumelprozess ermöglicht und andererseits die Grundlage für eine zielgerichtete Auslegung von potentiellen stoffflusssteuernden Maßnahmen geschaffen werden.

### **5.3 Spannungs- und stoffflussbasierte Modellvorstellung des Taumelprozesses**

Um die Einsatzfähigkeit von Aluminiumlegierungen in der Verfahrensklasse der Blechmassivumformung zu gewährleisten und die resultierenden Umformergebnisse allumfassend bewerten zu können, bedarf es auf Basis der zuvor abgeleiteten Erkenntnisse der Erarbeitung einer spannungs- und stoffflussorientierten Modellvorstellung des Taumelprozesses, welche über den aktuellen Stand der Technik hinausgeht. Bisher fehlt eine systematische Untersuchung der auftretenden Stoffflussanteile als Folge von lokal variierenden Spannungskomponenten, welche zur Bewertung der Stoffflusskontrolle essenziell sind. Weiterhin können auf Basis dieser Modellvorstellung potentielle Maßnahmen zur Stoffflusssteuerung mittels lokaler Eigenschaftsgradierung zielführend ausgelegt werden, da die grundlegenden Wirkzusammenhänge während des Umformens und bei der Entstehung möglicher Prozessfehler bekannt sind.

Zur Einordnung der Kenngrößen entlang des Prozessfortschritts wird dieser in die initiale Krafteinleitungsphase zu Prozessbeginn, das Ende der Hochfahrphase bei  $U = 5$  sowie das Ende der Konstanthaltephase bei  $U = 10$  mit maximaler Kontaktfläche unterteilt. Der Einfluss der Rückstellphase konnte bereits in vorausgegangenen Untersuchungen als vernachlässigbar eingestuft werden [17], weshalb diese Phase im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter berücksichtigt wird. Die erarbeitete spannungs- und stoffflussorientierte Modellvorstellung ist schematisch entlang der einzelnen Teilprozessschritte in Bild 16 dargestellt.

Zu Prozessbeginn wird die Ronde in die Matrize eingelegt, durch welche diese in radialer Richtung gekammert und der Stofffluss gehemmt wird. Nach Schließen des Werkzeugs wird die definierte Maximalkraft über das Oberwerkzeug ins Bauteil und folglich das Unterwerkzeug induziert. Dabei kommt es aufgrund der axialen Zustellung des konischen Stempels zu einem prägeähnlichen Vorgang, bei welchem der Werkstoff ausschließlich in radiale Richtung verdrängt wird. Eine Anhäufung vor dem Stempel ist die Folge, was in der Analyse der Blechdicke nach Erreichen der Maximalkraft mit einer Blechdicke von bis zu 2,1 mm ersichtlich wird. Die Ausdünnung im Zentrum hat einen lokalen Umformgrad von  $\phi = 0,3$  zur Folge. Bedingt durch die punktartige Ausdünnung in axialer Richtung kann zudem ein radialer Stofffluss von  $d_x = 0,6$  mm erst ab größeren Radien festgestellt werden. Aufgrund der rotationssymmetrischen Wirkungsweise der Ausdünnung wird kein tangentialer Stofffluss induziert. In Folge der axialen Einwirkung der Umformkraft, der radial wirkenden Fließbehinderung in Form der Matrizenwand sowie des in Umfangsrichtung vorhandenen Werkstoffes können alle drei Spannungskomponenten als Druckspannung mit Werten von bis zu  $\sigma = -1.000$  MPa identifiziert werden, welche sich bis zum radialen Bauteilrand aufheben. Die Spannungskomponente in radialer Richtung, welche einen über die Blechdicke abnehmenden Gradienten aufweist, induziert zudem eine Knickbildung im Bereich der Kavität im Gegenstempel durch fehlende Stützwirkung sowie einer Überschreitung der Knicksteifigkeit. Nach Erreichen der Maximalkraft beginnt der eigentliche Taumelprozess über fünf Taumelrunden durch stufenweise Anstellung des Winkels bis auf das definierte Maximum von  $\Theta = 1^\circ$ . Infolge der zunehmenden Winkelanstellung wird das Material schrittweise vom Stempel in radialer Richtung verdrängt, wodurch die maximale Blechdicke am Einlaufbereich der Kavität sowie der zunehmende Umformgrad erklärt werden können.



der Kavität wird ein tangentialer Stoffflussanteil durch fehlenden Werkzeugkontakt verhindert. Geometriebedingt wandert die signifikant größer werdende Kontaktfläche radial nach außen, was eine Verschiebung sowie Reduzierung der maximalen Druckspannungskomponenten zur Folge hat. Hierdurch manifestiert sich zudem der Effekt des Ausknickens des Werkstoffs im Bereich der Kavität.

Während der Konstanthaltephase findet keine weitere Anstellung des Werkzeugs statt, wodurch die Stoffflussanteile ausschließlich durch eine stufenweise weiter zunehmende axiale Zustellung in Folge der lokal wirkenden Umformkraft bedingt sind. Die maximale Blechdicke mit Werten von  $s_{\max} = 2,2$  mm wird am Ende der Konstanthaltephase im Bereich der Kavität erreicht. Eine radiale Verdrängung des Werkstoffs aus der Rondenmitte begründet die größte Ausdünnung mit einer Restblechdicke von  $s_{\min} = 1,7$  mm. Entsprechend der Ausdünnung bildet sich ein Gradient in der Umformgradverteilung, welcher in positiver radialer Richtung abnimmt. Der radiale Stofffluss weist sein Maximum am Einlaufbereich der Kavität auf, was auf die fehlende Stützwirkung in der Kavität sowie die Umlenkung des Werkstoffs um die Einlaufschräge zurückgeführt werden kann. Durch die abrollende Stempelbewegung erreicht zudem der tangentialer Stofffluss sein Maximum in der Mitte des ausgedünnten Bereichs. Eine teilweise unvollständige Formfüllung in der Kavität wirkt aufgrund des fehlenden Kontakts hemmend auf den tangentialen Stofffluss, weshalb die analysierten Werte im Bereich von  $d_y = \pm 0$  mm liegen. Die Werte der Spannungskomponenten befinden sich auf einem vergleichbaren Niveau zur Hochfahrphase. Die Lage hat sich durch die nach außen wandernde, maximale Kontaktfläche radial verschoben. Der lokal maximale, radiale Stofffluss in Kombination mit der dreidimensionalen Druckspannung bewirkt eine weiter zunehmende Ausknickung in der Kavität.

Zusammenfassend kann durch die aufgezeigten Ergebnisse die spannungs- und stoffflussorientierte Modellvorstellung für das Taumeln auf Basis von validierten Ergebnissen hinsichtlich Geometrie, Umformgrad und Stoffflussanteile aufgestellt und die Formänderung im Prozess auf die wirkenden Spannungskomponenten zurückgeführt werden. Diese schematische, durch experimentelle Ergebnisse gestützte, numerisch-experimentelle Modellvorstellung deckt sich in den Grundzügen mit der Prozessanalyse des Taumelns von Stahlwerkstoffen [17], verfügt aber über bisher nicht systematisch untersuchte Kenngrößen wie die dreidimensional wirkenden Spannungskomponenten oder die resultierenden Stoffflussanteile über den

Bauteilradius in Abhängigkeit der Prozessphasen. Mithilfe dieser ganzheitlichen Prozessbeschreibung als Grundlage können der Einsatz von Aluminiumwerkstoffen vollumfänglich abgebildet und die zugrundeliegenden Ursache-Wirkbeziehungen verstanden werden. Darüber hinaus können mit der erweiterten Modellvorstellung über die zugrundeliegenden Spannungs- und Formänderungszustände, umformtechnische Kenngrößen und die mechanischen Eigenschaften der Bauteile die Notwendigkeit für die Anwendung von stoffflusssteuernden Maßnahmen aufgezeigt und eine Entscheidungshilfe bei der Erarbeitung und Umsetzung dieser Maßnahmen gegeben werden.

Eine Identifikation von Prozessgrenzen im realen Umformprozess und die Rückführung auf den zugrundeliegenden Wirkmechanismus lässt den Vergleich und eine Bewertung bisher eingesetzter Maßnahmen zur Stoffflusssteuerung zu. Unter Zuhilfenahme der ganzheitlichen Modellvorstellung können die in der Blechmassivumformung von Stahlwerkstoffen etablierten Maßnahmen zur Stoffflusssteuerung im Taumelprozess prinzipiell auf den Einsatz von Aluminiumwerkstoffen durch Rückführung auf denselben zugrundeliegenden Wirkmechanismus übertragen werden. Eine Anwendung dieser Maßnahmen führt jedoch, bedingt durch eine global erfolgende Erhöhung des Gradienten aus wirkender Spannung und vorliegendem Formänderungswiderstand, zu einer ausgeprägten Gratbildung durch ungewollten Stofffluss in den Werkzeugspalt zwischen Stempel und Matrize. Während bei Stahlwerkstoffen diese Gratbildung aufgrund einer höheren Festigkeit erst bei einem hohen Maß an Formfüllung oder einer gesteigerten Umformkraft auftritt, kommt dieser Effekt bei Aluminiumlegierungen bereits bei geringeren Werten zum Tragen. Folglich sind diese Maßnahmen zur Stoffflusssteuerung beim Taumeln von Aluminiumlegierungen nur bedingt zielführend einsetzbar und es muss mit einer reduzierten Bauteilqualität durch die Gratbildung und ggf. weiteren Folgeschäden durch eine mögliche Ablösung im Prozess gerechnet werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorherigen Abschnitte kann speziell für den Einsatz von Aluminiumlegierungen aufgrund einer reduzierten Festigkeit die Notwendigkeit einer lokalen Stoffflusssteuerung im untersuchten Taumelprozess aufgezeigt werden, um einerseits durch eine erhöhte Stoffflusskontrolle die Aufdickungshöhe zu maximieren, andererseits aber auch den Prozessfehler der Gratbildung zu vermeiden. Eine lokale Gradierung der mechanischen Eigenschaften kann in diesem Fall als zielführend eingestuft werden, welche mittels lokaler Kurzzeit-Wärmebehandlung und den Einsatz von örtlich wärmebehandelten Platinen im

Rahmen der Methode der Tailor Heat Treated Blanks (THTB) in der Blechumformung eingesetzt wird [48]. Da in der Blechmassivumformung und speziell im Taumelprozess ein dreidimensionaler Spannungs- und Formänderungszustand vorliegt, gilt es für den zielgerichteten Einsatz von THTB eine Wärmebehandlungsstrategie zu erarbeiten und grundlegend zu qualifizieren. Der Fokus der nachfolgenden wissenschaftlichen Untersuchungen liegt dabei auf der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften infolge einer Kurzzeit-Wärmebehandlung in Kombination mit hohen plastischen Formänderungen der Blechmassivumformung sowie die Übertragung zur lokalen Eigenschaftsgradierung auf Blechhalbzeuge. Speziell bei der Auslegung der Wärmebehandlungslayouts im Sinne einer lokalen Eigenschaftsgradierung wird die erarbeitete spannungs- und stoffflussbasierte Modellvorstellung dieses Kapitels eingesetzt.



## **6 Qualifizierung einer Wärmebehandlungsstrategie für die Blechmassivumformung**

Ziel in diesem Kapitel ist eine ganzheitliche Qualifizierung von Wärmebehandlungsstrategien sowie eine grundlagenwissenschaftliche Untersuchung deren Wirkungsweise zur Anwendung als stoffflusssteuernde Maßnahme in der Blechmassivumformung. Die Simulation der Prozessrandbedingungen einer Kombination aus Kurzzeit-Wärmebehandlung und Blechmassivumformung erfolgt anhand eines Modellversuchs aus laserinduzierter Kurzzeit-Wärmebehandlung, Einbringen definierter Umformgrade mittels Flachwalzen und abschließender Kaltauslagerung. Dabei soll ein grundlegendes Prozessverständnis über die Wechselwirkung zwischen einer Kurzzeit-Wärmebehandlung und dem Umformprozess auf die resultierenden Werkstoffeigenschaften und das Auslagerungsverhalten von ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen aufgebaut werden. Durch eine Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften und Rückführung der Ergebnisse auf die zugrundeliegenden Wirkmechanismen kann die Methode der Kurzzeit-Wärmebehandlung zur Stoffflusssteuerung in der Blechmassivumformung analysiert sowie deren Einsatzfähigkeit sichergestellt werden. Anhand einer Übertragung vom Modellversuch auf die Anwendung zur lokalen Eigenschaftsgradierung von Blechhalbzeugen werden laserparameterabhängige Wärmeeinflusszonen identifiziert. Die ganzheitliche Qualifizierung der Wärmebehandlungsstrategie wird mit der Umsetzung kreisrunder Layouts auf Blechronden und einer Analyse der Ausbildung von Temperatur- und Härtegradienten abgeschlossen.

### **6.1 Analyse der Wechselwirkung zwischen Wärmebehandlung, Umformprozess und Werkstoffeigenschaften**

Für eine ganzheitliche Charakterisierung der Wechselwirkung zwischen einer Kurzzeit-Wärmebehandlung und hohen Umformgraden wird im Rahmen der Arbeit ein Modellprozess eingesetzt, welcher aus laserinduzierter Kurzzeit-Wärmebehandlung, dem Einbringen definierter Umformgrade mittels Flachlängswalzen sowie aus dem Einhalten von spezifischen Kaltauslagerungszeiten besteht, siehe Bild 17.

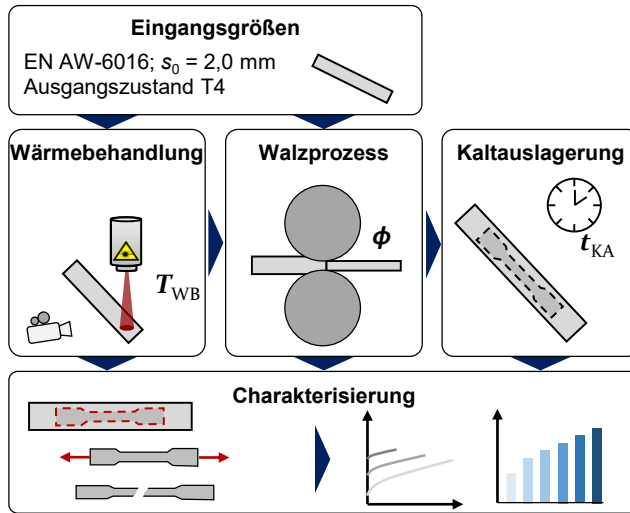


Bild 17: Ganzheitliche Charakterisierungsmethode zur Analyse der Wechselwirkung zwischen Wärmebehandlung, Umformprozess sowie Auslagerungsverhalten

Im erarbeiteten Modellprozess werden zunächst beide Teilprozessschritte der Wärmebehandlung sowie des Walzens zum Einbringen der Umformgrade separat untersucht. Dabei liegt der Fokus auf den resultierenden mechanischen Eigenschaften, welche anhand der zugrundeliegenden metallphysikalischen Vorgänge begründet werden. Nachfolgend wird die Charakterisierungsmethode in ganzheitlicher Form durchgeführt, um die mechanischen Eigenschaften nach einer Überlagerung beider Teilprozesse zu analysieren. Neben der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften wird zudem die Wechselwirkung auf das Auslagerungsverhalten grundlegend charakterisiert. Die untersuchten Parameterkombinationen sowie deren Ausprägungen sind in Tabelle 7 aufgelistet, wobei die mit \* gekennzeichneten Ausprägungen die jeweilige Referenz darstellen.

Tabelle 7: Parameterausprägung Wärmebehandlungs-, Walz- und Auslagerungsversuch

Parameter	Ausprägungen	Einheit
$T_{WB}$	20 (RT)*; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500	°C
$\phi$	0*, 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	-
$t_{KA}$	1*; 24; 168; 672; 2.016	h

### 6.1.1 Einfluss einer Kurzzeit-Wärmebehandlung auf die mechanischen Eigenschaften

In diesem Abschnitt wird die Wirkungsweise einer Kurzzeit-Wärmebehandlung auf die mechanischen Eigenschaften der ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierung EN AW-6016 ausgehend vom kaltausgelagerten Zustand T<sub>4</sub> analysiert. Dabei steht die Wärmebehandlungstemperatur  $T_{WB}$  als Haupteinflussfaktor im Fokus der Untersuchungen. Für den Laser wird eine Verfahrgeschwindigkeit von  $v_{\text{Laser}} = 5,0 \text{ mm/s}$  definiert, um eine homogene Temperaturverteilung über die gesamte Probe zu realisieren. Neben einer Erklärung durch metallphysikalische Vorgänge soll zudem die zielführendste Parameterkombination mit einer möglichst hohen Entfestigung bei gleichzeitig moderaten Einbußen bezüglich Umformbarkeit für weiterführende Versuche identifiziert werden.

#### *Dehngrenze $R_{p0,2}$ und Zugfestigkeit $R_m$ als Festigkeitskennwerte*

Als grundlegende Kennzahlen für die Festigkeit eines Werkstoffs werden sowohl die Dehngrenze als auch die Zugfestigkeit unter Einfluss einer Kurzzeit-Wärmebehandlung mit unterschiedlichen Temperaturstufen in Bild 18 gegenübergestellt. Während maximale Werte von  $139,8 \pm 2,1 \text{ MPa}$  sowie  $254,6 \pm 0,7 \text{ MPa}$  für Dehngrenze und Zugfestigkeit im Zustand T<sub>4</sub> erreicht werden, können diese signifikant durch den Einsatz der Kurzzeit-Wärmebehandlung reduziert werden. Bereits bei einer Wärmebehandlungstemperatur von  $T_{WB} = 200 \text{ °C}$  beginnen erste Ausscheidungsauflösungen im Kristallgitter [57], wodurch die Festigkeitskennwerte auf  $127,4 \pm 1,6 \text{ MPa}$  bzw.  $241,0 \pm 0,7 \text{ MPa}$  sinken. Dieses Verhalten setzt sich bis zu einer Temperatur von  $T_{WB} = 300 \text{ °C}$  fort, wobei Werte von  $124,1 \pm 2,3 \text{ MPa}$  und  $207,3 \pm 0,2 \text{ MPa}$  erzielt werden. Ab einem Temperaturbereich von  $275 \text{ °C} - 300 \text{ °C}$  beginnt die Bildung von  $\beta''$ - und  $\beta'$ -Ausscheidungen [183]. Als metallphysikalische Erklärung wird hier die semi- oder inkohärente Bindung der Ausscheidungen an die Aluminiummatrix angenommen, welche von den Versetzungen nicht oder nur teilweise geschnitten werden können [184]. Folglich kommt es zu einer Verzerrung des Gitters und einer Zunahme der Festigkeit bei gleichzeitiger Abnahme der Duktilität [48]. Quantifiziert werden kann dieser Effekt an den Werten für  $R_{p0,2} = 120,0 \pm 5,3 \text{ MPa}$  sowie  $R_m = 207,5 \pm 0,6 \text{ MPa}$ , anhand welcher trotz gesteigerter Wärmebehandlungstemperatur statistisch keine Veränderung zu verzeichnen ist. Mit zunehmender Temperatur von  $T_{WB} = 400 \text{ °C}$  werden auch diese Ausscheidungen aufgelöst [185], wodurch Werte von  $89,4 \pm 1,5 \text{ MPa}$  und  $170,1 \pm 0,7 \text{ MPa}$  erzielt werden.

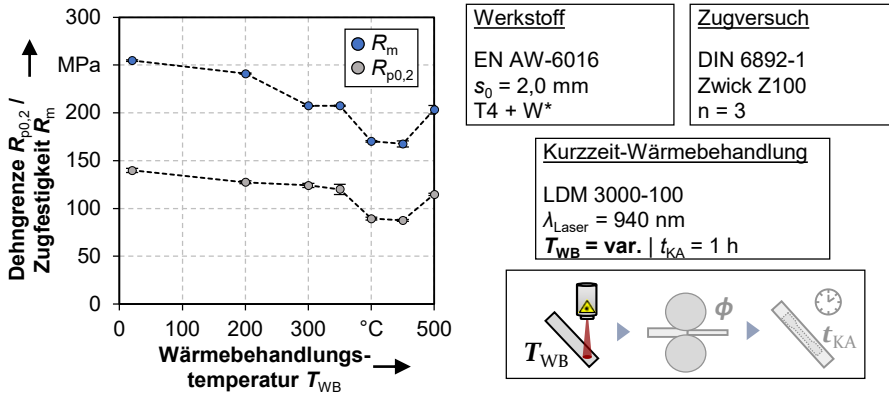


Bild 18: Dehngrenze  $R_{p0,2}$  und Zugfestigkeit  $R_m$  in Abhängigkeit der Wärmebehandlungstemperatur

Durch eine weitere Erhöhung der Wärmebehandlungstemperatur auf  $T_{\text{WB}} = 450 \text{ }^\circ\text{C}$  kann keine nachweisbare Reduzierung der Festigkeiten mehr erreicht werden, was auf die beginnende Bildung von  $\beta$ -Ausscheidungen bei höheren Temperaturen zurückzuführen sein kann [186]. Bei  $T_{\text{WB}} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  wirkt die zunehmende Bildung von  $\beta$ -Ausscheidungen einer weiteren Reduktion der Festigkeit entgegen, weshalb erneut gesteigerte Werte von  $114,8 \pm 1,3 \text{ MPa}$  und  $203,2 \pm 4,5 \text{ MPa}$  erreicht werden.

### Gleichmaßdehnung $A_g$ als Kennwert für die Umformbarkeit

Neben den Festigkeitskennwerten bedarf es zudem der Auswertung der Gleichmaßdehnung als Maß für die Umformbarkeit eines Werkstoffes. Diese ist in Abhängigkeit der Wärmebehandlungstemperatur in Bild 19 dargestellt. Im kaltausgelagerten Zustand T4 werden charakteristische Werte von  $A_g = 21,4\% \pm 2,1\%$  erreicht. Während bei einer Temperatur von  $T_{\text{WB}} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$  lediglich eine leichte Reduzierung der Gleichmaßdehnung auf  $20,8\% \pm 0,6\%$  zu verzeichnen ist, werden mit  $T_{\text{WB}} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$  minimale Werte von nur  $12,2\% \pm 1,2\%$  erreicht. Durch eine Erhöhung der Wärmebehandlungstemperatur können diese Werte zwar wieder leicht erhöht werden, aufgrund der Standardabweichung kann aber keine signifikante Erhöhung der Gleichmaßdehnung bis einschließlich  $T_{\text{WB}} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$  nachgewiesen werden. Dieser Verlauf lässt sich metallphysikalisch durch eine stärkere Verzerrung des Kristallgitters infolge der sich bildenden  $\beta''$ - und  $\beta'$ -Ausscheidungen ab einem Temperaturbereich  $> 200 \text{ }^\circ\text{C}$  begründen [63]. Zudem liegen die Ausscheidungen nicht homogen verteilt, sondern in Agglomeraten und vermehrt an den Korngrenzen vor [48].

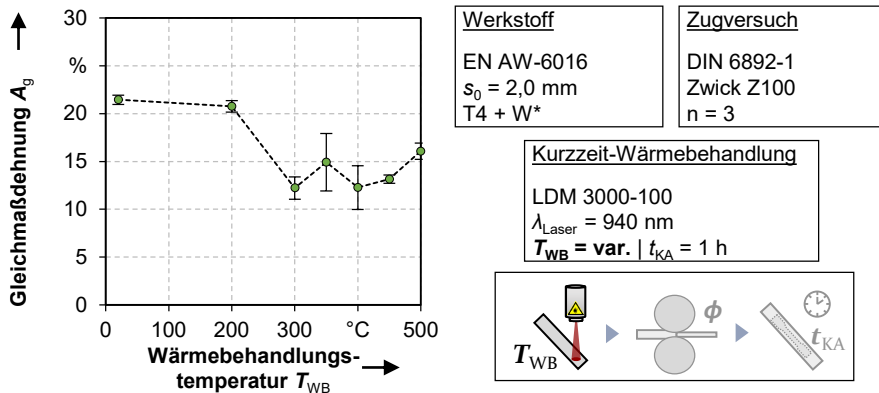


Bild 19: Gleichmaßdehnung  $A_g$  in Abhängigkeit der Wärmebehandlungstemperatur

Folglich wird dadurch die Initiierung von Mikroanrissen begünstigt, welche unter Belastung zu einem früheren Versagen und einer Reduzierung der Gleichmaßdehnung führt. Durch eine weitere Zunahme der Wärmebehandlungstemperatur auf  $T_{\text{WB}} > 400 \text{ °C}$  kann ein erneuter leichter Anstieg auf ein lokales Maximum von  $16,1\% \pm 0,9\%$  bei  $500 \text{ °C}$  erreicht werden. Dies lässt sich durch die nun fast vollständig in Lösung befindlichen Legierungselemente und damit einer Reduzierung der Gitterverzerrung begründen [48].

### Verfestigungsexponent $n$ und senkrechte Anisotropie $r$

Zur ganzheitlichen Charakterisierung der resultierenden mechanischen Eigenschaften infolge einer Kurzzeit-Wärmebehandlung und für eine potentielle nachfolgende Weiterverarbeitung sind zudem der Verfestigungsexponent  $n$  sowie die senkrechte Anisotropie  $r$  auszuwerten. Diese beiden Kenngrößen sind in Abhängigkeit der Wärmebehandlungstemperatur in Bild 20 dargestellt. Aufgrund einer generell hohen Stapelfehlerenergie von Aluminiumlegierungen im Vergleich zu beispielsweise Stahlwerkstoffen [187] werden im kaltausgelagerten Zustand T4 Werte von  $n = 0,26 \pm 0,00$  für den Verfestigungsexponenten erreicht. Die Bildung von  $\beta'$ - und  $\beta''$ -Ausscheidungen im entsprechenden Temperaturbereich [185] bedingt allerdings eine Reduzierung der Verfestigung. Dieses Verfestigungsverhalten wird dabei stark vom Kohärenzgrad, der Größe sowie der Stabilität der Ausscheidungen beeinflusst [188]. Durch das Vorliegen großer Ausscheidungen kann beispielsweise eine Reduktion des Verfestigungsverhaltens durch früheres Einsetzen von dynamischer Entfestigung für den warmausgelagerten Zustand T6 nachgewiesen werden [189]. Dabei

wird die plastische Verformung an den inhomogen vorliegenden Ausscheidungen im Korngefüge lokalisiert, weshalb diese Stellen nach Erreichen eines kritischen Werts als Ausgangspunkt für den Bruchvorgang angesehen werden können [24]. Folglich wird ein lokales Minimum im Bereich zwischen 350 – 400 °C mit  $n = 0,17 \pm 0,01$  erreicht. Mit steigender Wärmebehandlungstemperatur lösen sich zuvor gebildete Ausscheidungen wieder auf, welche dann in gelöstem Zustand in der Matrix vorliegen. Dies führt mit einer weiter zunehmenden Wärmebehandlungstemperatur zu einem Anstieg der Verfestigung infolge einer Behinderung der Versetzungsbewegung durch die zunehmende Anzahl an gelösten Elementen [190]. Ein Maximum von  $n = 0,28 \pm 0,00$  kann entsprechend bei vollständig gelösten Legierungsbestandteilen bei  $T_{WB} = 500$  °C erreicht werden.

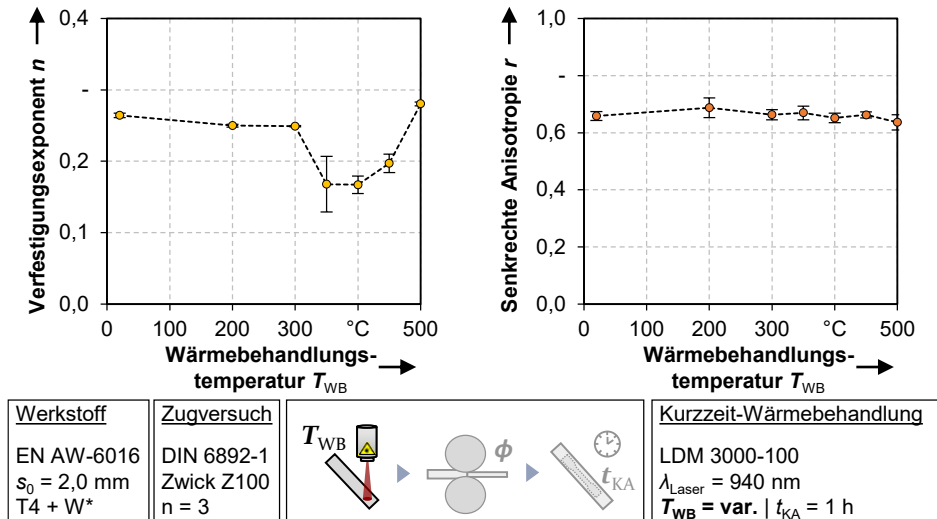


Bild 20: Verfestigungsexponent  $n$  und senkrechte Anisotropie  $r$  in Abhängigkeit der Wärmebehandlungstemperatur

Zur Beschreibung der Abhängigkeit von Blechbreiten- zu Blechdickenreduktion infolge einer uniaxialen Zugbelastung muss zudem die Anisotropie bei Aluminiumwerkstoffen berücksichtigt werden, da speziell bei Aluminium Werte  $r < 1$  vorliegen und somit ein verfrühtes Versagen aufgrund von Einschnürung begünstigt wird [79]. Der Verlauf der senkrechten Anisotropie in  $0^\circ$  zur Walzrichtung wird als Quotient der logarithmischen Breiten- und Dickendehnung berechnet und ist in Bild 20 in Abhängigkeit der Wärmebehandlungstemperatur dargestellt. Im kaltausgelagerten Zustand T4 werden für Aluminium typische Werte von  $r = 0,66 \pm 0,02$  erzielt. Wie aus

dem Verlauf der Kurve ersichtlich wird, hat die Wärmebehandlungstemperatur keinen nachweisbaren Einfluss auf das Anisotropieverhalten, da alle resultierenden Werte im Bereich von  $0,64 < r < 0,67$  liegen. Dies lässt sich im maßgeblichen Einfluss des Herstellungsprozesses des Blechhalbzeuges und das daraus resultierende kristallographische Erscheinungsbild des Gefüges auf die Anisotropie begründen [191]. Durch den kurzzeitigen Wärmestrom wird die Textur der Kornorientierung nicht wesentlich beeinflusst [48], wodurch sich das konstante Niveau der  $r$ -Werte erklären lässt.

### **Bewertung**

Durch die grundlegende Charakterisierung des Einflusses einer Kurzzeit-Wärmebehandlung auf die mechanischen Eigenschaften kann der zur Stoffflusssteuerung nötige Mechanismus einer reduzierten Festigkeit in Abhängigkeit der Wärmebehandlungstemperatur nachgewiesen werden. Die charakteristischen Verläufe der Festigkeits- und Dehnungswerte sowie die metallphysikalisch wirkende Ausscheidungskinetik decken sich dabei mit den Ergebnissen in [48] für eine ausscheidungshärtbare Legierung vom Typ EN AW-6181 PX sowie mit den Ergebnissen in [59] für eine Legierung vom Typ EN AW-6082. Prinzipiell kann der positive Effekt einer Entfestigung mit zunehmender Wärmebehandlungstemperatur nachgewiesen werden. Dabei kann eine maximale Entfestigung von bis zu 36% und 33% der Dehngrenze oder der Zugfestigkeit im Bereich zwischen 400 - 450 °C im Vergleich zum Ausgangszustand T<sub>4</sub> erzielt werden. Allerdings gilt es, auch die reduzierte Umformbarkeit in Form der Gleichmaßdehnung zu berücksichtigen, welche sich ab gewählten Wärmebehandlungstemperaturen von  $T_{WB} > 200$  °C aufgrund der Bildung von  $\beta''$ - und  $\beta'$ -Ausscheidungen auf ein Minimum von  $12,2\% \pm 1,2\%$  einstellt. Zudem bedarf es für diesen Temperaturbereich aufgrund einer Reduzierung der sich in Lösung befindlichen Legierungsbestandteile weiterhin der Kenntnis eines verringerten Verfestigungsexponenten von  $0,17 \pm 0,01$ . Bezüglich des Einsatzes der Kurzzeit-Wärmebehandlung in einer nachfolgenden Prozesskette ergibt sich auf Basis der zuvor erzielten Erkenntnisse hinsichtlich einer wärmebehandlungstemperaturabhängigen Entfestigung ein sehr enges Prozessfenster für die Einstellung einer maximalen Entfestigung im Bereich zwischen 400 - 450 °C. Speziell dieser Temperaturbereich kann in nachfolgenden Umformoperationen für eine definierte Stoffflusssteuerung eingesetzt werden. Aufbauend auf den gezeigten Ergebnissen, der vorteilhaften Spannungs- und Dehnungsverteilung im Taumelprozess im Vergleich zum Zugversuch sowie aus energetischen Gesichtspunkten wird im Rahmen dieser Arbeit die Wärmebehandlungstemperatur  $T_{WB} = 400$  °C

als zielführend eingestuft, welche nachfolgend zur Untersuchung der Wechselwirkung mit hohen Umformgraden herangezogen wird.

### 6.1.2 Wirkungsweise von hohen Umformgraden auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften

Als zweiter Bestandteil im Rahmen der ganzheitlichen Charakterisierungsmethode werden Walzversuche im kaltausgelagerten Zustand T<sub>4</sub> mit unterschiedlicher Stichabnahme zur definierten Einstellung des Umformgrades durchgeführt. Der Walzprozess erfolgt dabei an einem Duo-Walzgerüst der Firma Bühler vom Typ EW 105 x 160.

Aufgrund der Anforderungen eines definiert vorliegenden und einstellbaren Umformgrades sowie der gleichverteilten Werkstückeigenschaften wird aus umformtechnischer Sicht ein Längswalzen als Umformprozess zur Simulation der charakteristischen Eigenschaften der Blechmassivumformung eingesetzt. Durch gezielte Stichabnahme, welche in einem oder mehreren Walzhüben erfolgen kann, wird der Umformgrad, definiert nach Gleichung 1, eingestellt [79].

$$\varphi = \ln\left(\frac{s_1}{s_0}\right) = \ln\left(\frac{s_0 - \Delta s}{s_0}\right) \quad (1)$$

Häufig wird in der Literatur [192] der eingebrachte Kaltwalzgrad als Vergleichskenngröße angegeben. Dieser beschreibt das Verhältnis der Stichabnahme zur Ausgangsblechdicke und kann durch Gleichung 2 bestimmt werden [79].

$$\varepsilon_W = \frac{\Delta s}{s_0} \quad (2)$$

Einer ungleichmäßigen Verformung der Probe durch Reibungseinflüsse sowie durch die elastische Durchbiegung der Walze wird durch eine Materialzugabe an beiden Streifenenden und an der Streifenbreite entgegengewirkt. Die Messung der Blechstreifen an diversen Stellen über die Länge und Dicke stellt die zu erreichende Restblechdicke und damit den gewünschten Umformgrad sicher. Für ein einfaches Handling wurde für die Streifen eine Abmessung von 250 mm Länge und 25 mm Breite gewählt.

Die Berechnung des definierten Umformgrades  $\varphi$ , der relevanten Stichabnahme  $\Delta s$  und des Kaltwalzgrades  $\varepsilon_W$  sind in Tabelle 8 aufgelistet. Nach dem Walzprozess und der Sicherstellung der gewünschten Restblechdicke durch wiederholte Blechdickenmessung an unterschiedlichen Stellen des Walzstreifens erfolgen die Probenpräparation und die Durchführung analog der vorherigen Versuche.

Tabelle 8: Umformgrad, Restblechdicke, Stichabnahme und Kaltwalzgrad im Walzprozess

Umformgrad $\phi$	Restblechdicke $s_1$ in mm	Stichabnahme $\Delta s$ in mm	Kaltwalzgrad $\epsilon_W$ in %
0,0	2,0	0	0
0,2	1,64	0,36	18,13
0,4	1,34	0,66	32,96
0,6	1,10	0,90	45,12
0,8	0,90	1,10	55,07
1,0	0,74	1,26	63,21

Zudem werden Schlibbilder des entstehenden Gefüges analysiert. Dafür wird eine Probe im Querschnitt getrennt sowie metallographisch eingebettet. Durch verschiedene Schleif- und Polieroperationen sowie eine Ätzung wird das Gefüge sichtbar gemacht. Damit kann die Veränderung der Gefügestruktur durch die hohe plastische Deformation aufgezeigt werden, welche als Diskussionsgrundlage für die metallphysikalischen Vorgänge genutzt wird, siehe Bild 21.

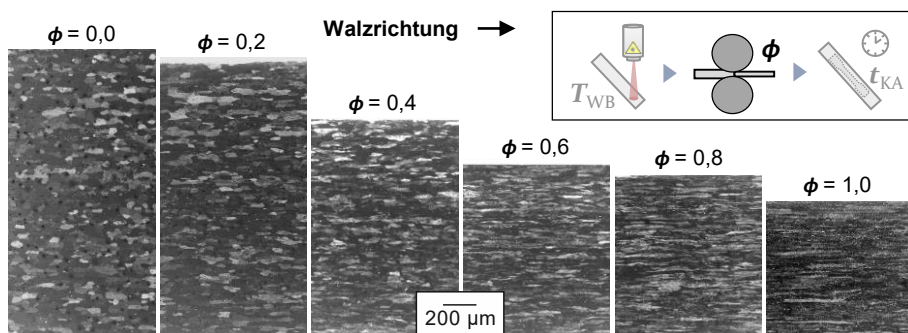


Bild 21: Darstellung des Gefüges in Abhängigkeit des eingebrachten Umformgrades

Bereits ab einem Umformgrad von  $\phi = 0,2$  ist eine Längung der Körner in Walzrichtung zu erkennen. Ab einem Umformgrad  $> 0,6$  ist die plastische Deformation des Gefüges so groß, dass die Korngrenzen nur noch schwer oder teilweise gar nicht mehr identifiziert werden können. Der Einfluss dieser hohen plastischen Deformation auf die mechanischen Eigenschaften wird im folgenden Abschnitt untersucht.

### ***Einfluss auf Dehngrenze $R_{p0,2}$ und Zugfestigkeit $R_m$***

Anlog der Wärmebehandlungsversuche wird in diesem Abschnitt der Einfluss von hohen Umformgraden auf die Festigkeitskennwerte Dehngrenze  $R_{p0,2}$  sowie die Zugfestigkeit  $R_m$  analysiert. Diese sind in Abhängigkeit des Umformgrades in Bild 22 gegenübergestellt. Die Zunahme der Festigkeitskennwerte und eine gleichzeitige signifikante Reduktion der Gleichmaßdehnung lässt sich durch die Einbringung von Kaltverfestigung während des Walzvorgangs erklären. Beim Walzen erfolgt die Umformung durch Abgleiten auf mehreren Gleitsystemen, wodurch eine Orientierungsänderung der Körner oder einzelner Kornbereiche stattfindet [193]. Durch Einbringen von plastischer Deformation beginnt eine Versetzungsbewegung und die Versetzungsdichte an Korngrenzen steigt entsprechend mit zunehmendem Walzgrad an. Es kommt zur Neuordnung der Versetzungen und Umorientierung zu Zellstrukturen [194]. Im Stand der Technik wird weiterhin angeführt, dass die Fehlausrichtung dieser Zellstrukturen weiter zu nimmt, weshalb es zu einer Rotation und Neuausrichtung von Subkörnern kommt [195].

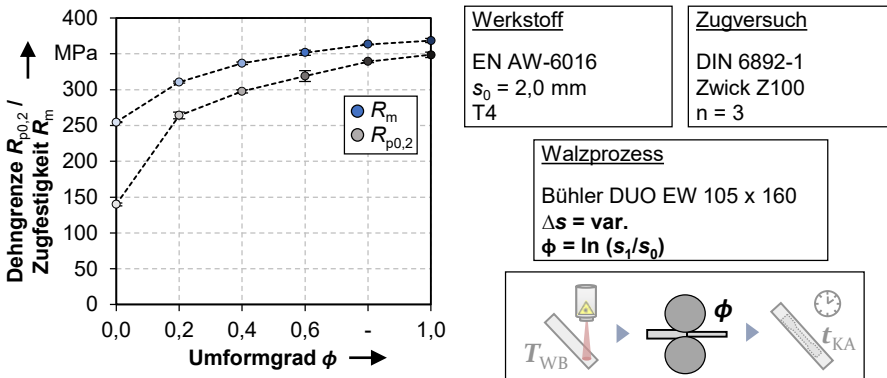


Bild 22: Dehngrenze  $R_{p0,2}$  und Zugfestigkeit  $R_m$  in Abhängigkeit des eingebrachten Umformgrades

Es bilden sich feine Subkörner mit einem signifikant geringem Durchmesser [196]. Entsprechend steigen die Werte für die Dehngrenze sowie Zugfestigkeit kontinuierlich, jedoch mit abnehmender Steigung, bis zu ihren maximalen Werten von  $348,6 \pm 3,8$  MPa und  $368,6 \pm 3,1$  MPa bei  $\phi = 1$  an. Dies entspricht einer Steigerung von 149% bzw. 44,7%. Die abnehmende Gleichmaßdehnung kann hier bereits am nur noch gering ausgeprägten Unterschied beider Kenngrößen zueinander nachgewiesen werden. Die

Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen aus anderen Kaltwalzprozessen an einer Legierung vom Typ EN AW-6082 [197] sowie EN AW-1050A-0 [192].

### Reduzierung der Gleichmaßdehnung $A_g$ durch Kaltverfestigung

Aufgrund der eingebrachten plastischen Deformation und folglich einer Erhöhung der Versetzungsdichte sowie einem Anstauen an den Korngrenzen kommt es zu einer starken Verzerrung des Kristallgitters. Dabei steigt zwar die Festigkeit signifikant, jedoch geht dieser Anstieg mit einer drastisch reduzierten Umformbarkeit in Form der Gleichmaßdehnung einher [66]. Die Gleichmaßdehnung in Abhängigkeit des eingebrachten Umformgrades im kaltausgelagerten Zustand T<sub>4</sub> ist in Bild 23 dargestellt.

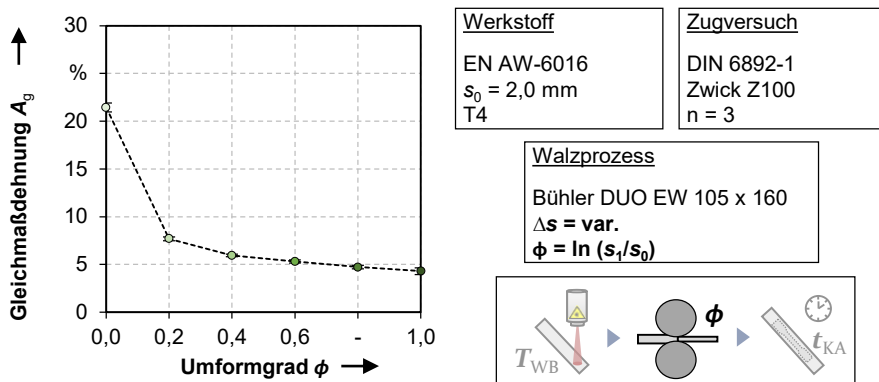


Bild 23: Gleichmaßdehnung  $A_g$  in Abhängigkeit des eingebrachten Umformgrades

Während im kaltausgelagerten Ausgangszustand ohne plastische Deformation Werte von  $A_g = 21,5\% \pm 0,5\%$  erzielt werden, wird ab einem Umformgrad von  $\phi = 0,2$  bereits ein signifikant niedrigerer Wert von  $7,7\% \pm 0,2\%$  erreicht. Anschließend ist ein fast linearer Abfall der Gleichmaßdehnung bis auf einen Wert von  $4,3\% \pm 0,4\%$  bei  $\phi = 1,0$  zu verzeichnen, was einer prozentualen Abnahme von 80% entspricht. Diese Reduktion ist vergleichbar mit den Ergebnissen in [198] zu kaltgewalzten mehrlagigen Blechhalbzügen der Legierung EN AW-6014.

### Verfestigungsexponent $n$ und senkrechte Anisotropie $r$

Neben den Festigkeits- und Dehnungskennwerten werden zudem der Verfestigungsexponent sowie die Anisotropie des Werkstoffes maßgeblich durch die Einbringung von hohen Umformgraden beeinflusst. Beide Kenngrößen sind in Bild 24 in Abhängigkeit des Umformgrades dargestellt. Im

Ausgangszustand beträgt der Verfestigungsexponent mit  $n = 0,26 \pm 0,00$  typische Werte für aushärtbare Aluminiumlegierungen. Dieser tendenziell niedrige Wert im Vergleich zu konventionellen Stahlwerkstoffen lässt sich durch die hohe Stapelfehlerenergie und das daraus resultierende Quergleiten begründen [187]. Mit steigendem Umformgrad nimmt auch die Anhäufung an Versetzungen signifikant zu, weshalb das Verfestigungsvermögen reduziert wird [199]. Entsprechend werden niedrigere Werte von  $n = 0,09 \pm 0,00$  bei  $\phi = 0,2$  erreicht.

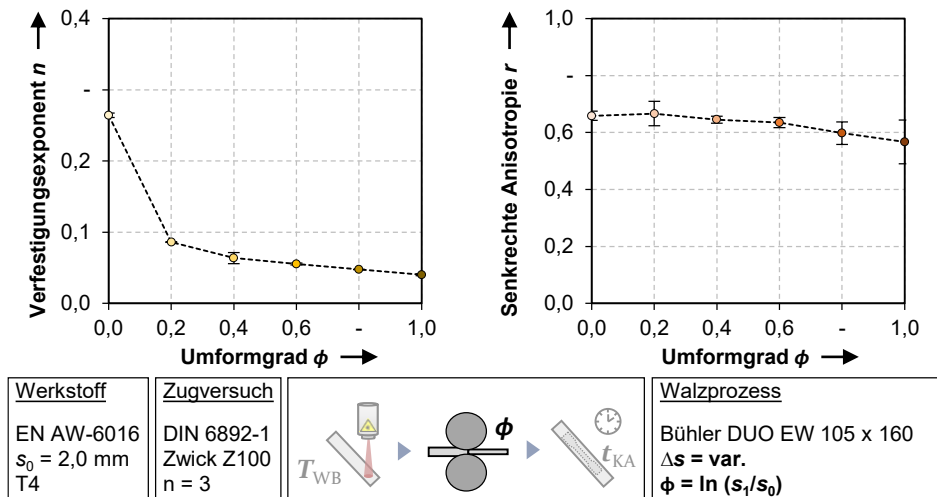


Bild 24: Verfestigungsexponent  $n$  und senkrechte Anisotropie  $r$  in Abhängigkeit des eingebrachten Umformgrades

Der anschließende abfallende Verlauf lässt sich analog der Auswertung der Gleichmaßdehnung als linear beschreiben. Bei  $\phi = 1,0$  wird lediglich ein Verfestigungsexponent von  $n = 0,04 \pm 0,00$  erzielt, was einer Reduktion von 84,6% entspricht und mit den reduzierten Werten der Gleichmaßdehnung direkt vergleichbar ist. Als weiteren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs nach Einbringung von Umformgraden wird die senkrechte Anisotropie  $r$  ausgewertet, welche in Bild 24 dargestellt ist. Wie bereits beschrieben, haben der Herstellungsprozess sowie die Umformhistorie den mit Abstand größten Einfluss auf das Anisotropieverhalten [191]. Aufgrund des Walzprozesses und dem nachfolgend hergestellten kaltausgelagerten Zustand T4 wird im Ausgangszustand ein Wert von  $r = 0,66 \pm 0,02$  erzielt. Mit zunehmendem Umformgrad wird das Gefüge in Walzrichtung gelängt und senkrecht dazu gestaucht. Die Ausformung einer lamellaren Gefügestruktur ist die Folge

[200]. Diese begünstigt die bereits durch den Herstellungsprozess vorliegende Vorzugsrichtung zum Fließen unter Zugbelastung aus der Blechdicke zusätzlich, weshalb ein leichter Abfall bis zu einem Wert von  $r = 0,57 \pm 0,08$  bei  $\phi = 1,0$  zu verzeichnen ist.

### **Bewertung**

Zusammenfassend kann der Einfluss der Kaltverfestigung, welche durch den Walzprozess mit unterschiedlicher Stichabnahme eingebracht wird, in den Festigkeits- und Dehnungskennwerten nachgewiesen werden. Durch die hohe plastische Deformation beginnt eine Versetzungsbewegung im Kristallgitter, wodurch speziell an den Korngrenzen die Versetzungsdichte signifikant steigt. Folglich wird das Gitter verzerrt und die Versetzungsbewegung behindert. Die Bildung von feinen Subkörnern bei höheren Umformgraden bedingt zudem einen Festigkeitsanstieg [196]. Mit dieser eingeschränkten Beweglichkeit der Versetzungen geht folglich aber auch eine geringere Gleichmaßdehnung einher, welche um bis zu 80% reduziert wird. Diesen negativen Einfluss auf die Umformbarkeit gilt es bei der Auslegung von speziell durch Zug belasteten Bauteilen zu berücksichtigen. Die Werte des Verfestigungsexponenten fallen mit zunehmendem Umformgrad merklich geringer aus, was auf die Vielzahl an Versetzungen und damit eine Reduzierung des Verfestigungsvermögens zurückzuführen ist [199]. Die bereits im Aluminium vorliegende, durch den Herstellungsprozess eingebrachte Vorzugsrichtung wird durch die Zunahme des Walzgrades begünstigt, weshalb die Werte der senkrechten Anisotropie tendenziell sinken.

Die Erkenntnisse aus der vorangegangenen Analyse der Werkstoffzustände mit hoher plastischer Deformation lassen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem eingebrachten Umformgrad und der Versetzungsdichte mit signifikant gesteigerten Festigkeitskennwerten bei gleichzeitigen Einbußen hinsichtlich der Gleichmaßdehnung und des Verfestigungsexponenten erkennen. Weiterhin wird die Anisotropie infolge einer zusätzlichen Längung der Körner in Walzrichtung verstärkt. Da die hohen Umformgrade im Rahmen der untersuchten Prozesskette erst nach der Wärmebehandlung eingebracht werden, kann die maßgeblich reduzierte Umformbarkeit für die direkte Verarbeitung der THTB im Taumelprozess vernachlässigt werden. Ebendiese Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften gilt es aber in potentiellen Folgeprozessen zu berücksichtigen, bei welchen beispielsweise die Umformbarkeit oder die Schneidfähigkeit eine maßgebliche Rolle für die resultierende Bauteilqualität spielen.

### 6.1.3 Überlagerung der Wärmebehandlung mit nachfolgend eingebrachten Umformgraden

Zur Analyse der Wechselwirkung zwischen einer Kurzzeit-Wärmebehandlung und einem nachfolgend eingebrachten Umformgrad wird in diesem Kapitel die Wärmebehandlung mit einem nachfolgenden Walzprozess überlagert. Dazu werden die Blechstreifen nach der Wärmebehandlung bei  $T_{WB} = 400\text{ °C}$  direkt dem Walzprozess unterzogen und anschließend die Extraktion und Präparation der Zugversuchsproben durchgeführt.

#### **Einfluss auf Dehngrenze $R_{p0,2}$ und Zugfestigkeit $R_m$**

Analog der Versuche im kaltausgelagerten Zustand T4 sind die resultierenden Festigkeitskennwerte der Dehngrenze  $R_{p0,2}$  sowie der Zugfestigkeit  $R_m$  in Bild 25 in Abhängigkeit des Umformgrades und nach der Applikation einer Kurzzeit-Wärmebehandlung dargestellt. Anhand des Verlaufs und der Maximalwerte lässt sich die Überlagerung der beiden Effekte einer reduzierten Festigkeit durch die Kurzzeit-Wärmebehandlung sowie einer gesteigerten Festigkeit infolge des eingebrachten Umformgrades erkennen. Der generelle Verlauf ist auf die mechanischen Eigenschaften des kombinierten Prozesses übertragbar.

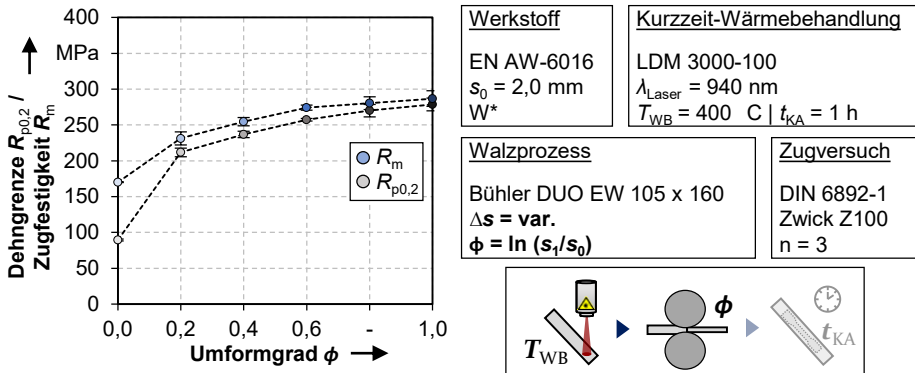


Bild 25: Dehngrenze  $R_{p0,2}$  und Zugfestigkeit  $R_m$  in Abhängigkeit des eingebrachten Umformgrades nach einer Kurzzeit-Wärmebehandlung bei  $T_{WB} = 400\text{ °C}$

Mit zunehmendem Umformgrad steigen die Agglomeration an den Korngrenzen sowie die Versetzungsdichte signifikant an. Eine Verzerrung des Gitters und die Neubildung von feinen Subkörnern ist dabei maßgeblich für den Anstieg der Festigkeit verantwortlich [196]. Auf der anderen Seite werden durch den Wärmeeintrag bei  $T_{WB} = 400\text{ °C}$  festigkeitssteigernde Ausscheidungen aufgelöst [59], wodurch die Gitterverzerrung sowie die

resultierende Festigkeit generell abnimmt. Folglich werden im wärmebehandelten Ausgangszustand die minimalen Werte für  $R_{p0,2} = 89,4 \pm 1,5$  MPa und  $R_m = 170,2 \pm 0,7$  MPa erreicht. Bereits bei einem Umformgrad von  $\phi = 0,2$  können Werte von  $211,7 \pm 6,2$  MPa und  $231,2 \pm 9,0$  MPa identifiziert werden. Mit zunehmendem Umformgrad steigen diese Werte weiter an, der Anstieg flacht allerdings ab, analog der Ergebnisse im kaltausgelagerten Zustand T<sub>4</sub>. Bei einem Umformgrad von  $\phi = 1,0$  können so Werte von  $278,6 \pm 9,1$  MPa und  $286,8 \pm 10,8$  MPa erreicht werden, was einer prozentualen Steigerung von 211,6% und 68,5% entspricht. Hier wird ersichtlich, dass die maximalen Werte durch die Kurzzeit-Wärmebehandlung zwar reduziert sind, die prozentuale Zunahme der Festigkeit infolge der Kaltverfestigung aber auf einem höheren Niveau liegt. Als möglicher Erklärungsansatz können in diesem Temperaturbereich noch vorliegende  $\beta''$ - oder  $\beta'$ -ähnliche semikohärente Ausscheidungen gelten [48], welche zu einer Verzerrung des Gitters vor der eigentlichen Umformung führen. Nachfolgend eingebrachte Versetzungen stauen sich an den vorliegenden semikohärenten Ausscheidungen, welche als Versetzungsmultiplikatoren wirken [201], wodurch der Effekt der Kaltverfestigung zusätzlich verstärkt wird. Zusammenfassend kann der Effekt der Kaltverfestigung als einflussreicher auf die mechanischen Eigenschaften im Vergleich zur Festigkeitsreduktion durch Kurzzeit-Wärmebehandlung eingestuft werden. Weiterhin lässt sich der Einfluss auf die Gleichmaßdehnung durch den deutlich reduzierten Abstand beider Kurven zueinander bereits als maßgeblich beeinträchtigt voraussagen.

### **Wechselwirkung beider Einflussgrößen auf die Gleichmaßdehnung**

Wie bereits aus dem Verlauf der beiden Festigkeitskennwerte ersichtlich, wird die Gleichmaßdehnung als Ergebnis einer Überlagerung aus Kurzzeit-Wärmebehandlung und Umformgrad reduziert. Die entsprechenden Werte in Abhängigkeit der eingebrachten Umformung sind für  $T_{WB} = 400$  °C in Bild 26 dargestellt. Im wärmebehandelten Ausgangszustand ohne Umformung werden Werte von  $A_g = 12,3\% \pm 2,3\%$  erzielt. Die Reduzierung zum kaltausgelagerten Zustand T<sub>4</sub> lässt sich, wie bereits beschrieben, durch die gitterverzerrende Wirkung der  $\beta''$ - und  $\beta'$ -Ausscheidungen begründen. Zudem besteht durch die inhomogen verteilten Ausscheidungen die Möglichkeit von dynamischer Entfestigung während eines nachfolgenden Umformschritts aufgrund einer Lokalisierung der plastischen Deformation [24]. Mit zunehmendem Umformgrad nehmen die erreichbaren Werte mit  $3,7\% \pm 0,9\%$  für  $\phi = 0,2$  und  $1,9\% \pm 0,4\%$  für  $\phi = 1,0$  entsprechend signifikant ab. Die durch die höheren

Umformgrade vermehrt eingebrachten Versetzungen verzerren das Gitter zusätzlich [199], wobei die Werte für die Gleichmaßdehnung auf ein Minimum sinken. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung kann ab  $\phi = 0,4$  von einer niedrigen, konstant bleibenden Gleichmaßdehnung im Bereich von 2% gesprochen werden.

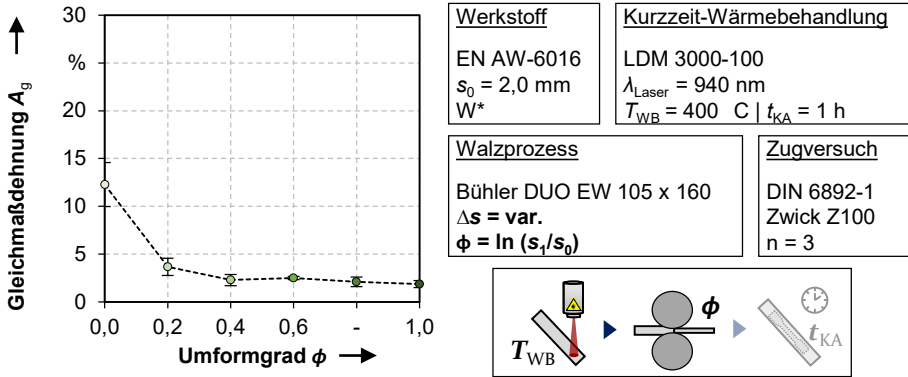


Bild 26: Gleichmaßdehnung  $A_g$  in Abhängigkeit des eingebrachten Umformgrades nach einer Kurzzeit-Wärmebehandlung bei  $T_{\text{WB}} = 400 \text{ °C}$

**Verfestigungsexponent  $n$  und senkrechte Anisotropie  $r$**

Neben der Gleichmaßdehnung wird im kaltausgelagerten Zustand T4 der Verfestigungsexponent sowie die Anisotropie durch den Kaltwalzprozess beeinflusst. Beide Kenngrößen sind zum direkten Vergleich in Bild 27 in Abhängigkeit des Umformgrades nach einer Kurzzeit-Wärmebehandlung bei  $T_{\text{WB}} = 400 \text{ °C}$  dargestellt. Der Verfestigungsexponent im Ausgangszustand mit  $n = 0,17 \pm 0,01$  liegt, wie in Abschnitt 6.1.1 erläutert, in der reduzierten Anzahl an gelösten Elementen aufgrund der Bildung von  $\beta''$ - und  $\beta'$ -Ausscheidungen begründet. Der Wert wird mit zunehmender plastischer Verformung weiter reduziert, was durch eine weitere Verzerrung aufgrund von verformungsinduzierten Versetzungsbewegungen durch ein hohes Maß an Kaltverfestigung sowie Versetzungsanhäufungen begründet werden kann [199]. Hinsichtlich des Einflusses einer Überlagerung aus Kurzzeit-Wärmebehandlung und nachfolgender Umformung auf die senkrechte Anisotropie kann der erwartete Verlauf festgestellt werden. Während durch eine reine Kurzzeit-Wärmebehandlung keine Änderung der Werte nachweisbar ist, wird die herstellungsprozessbedingte Vorzugsrichtung durch weiteres Kaltwalzen verstärkt. Dieser Effekt kann unter Beachtung der Standardabweichung auf den überlagerten Fall übertragen werden. Dabei ist ein leichter Abfall von  $r = 0,65 \pm 0,02$  bei  $\phi = 0$  auf  $r = 0,51 \pm 0,06$  bei  $\phi = 1,0$  zu verzeichnen. Die

tendenziell leicht niedrigeren Werte im Vergleich zum Walzprozess im Zustand T<sub>4</sub> bei höheren Umformgraden lassen sich möglicherweise durch eine begünstigte Bildung einer lamellaren Struktur infolge der hohen plastischen Verformung des Kristallgitters begründen, bei welcher die Großwinkelkorngrenzen in Walzrichtung orientiert werden [200]. Durch die zum Zeitpunkt der Umformung nahezu vollständig gelösten MgSi-Cluster werden Fehlstellen im Kristallgitter leichter umorientiert als im kaltausgelagerten Zustand T<sub>4</sub>.

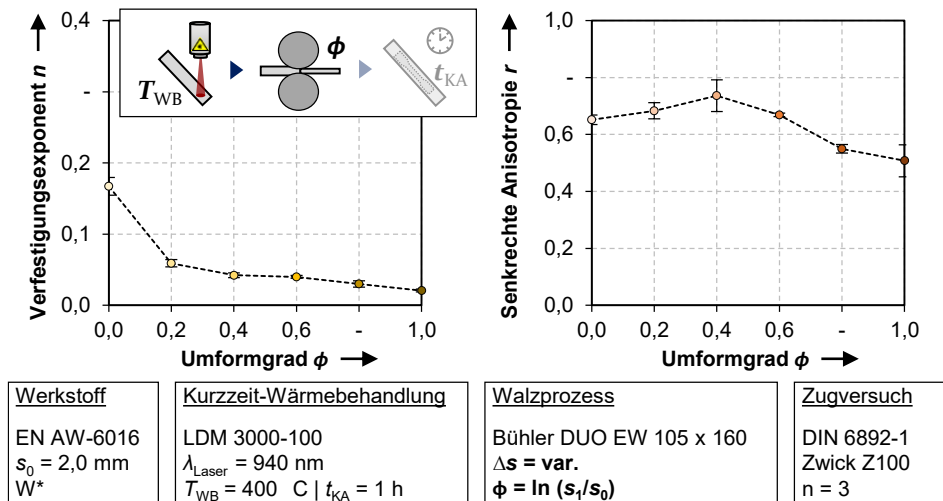


Bild 27: Verfestigungsexponent  $n$  und senkrechte Anisotropie  $r$  in Abhängigkeit des eingebrachten Umformgrades nach einer Kurzzeit-Wärmebehandlung bei  $T_{\text{WB}} = 400 \text{ °C}$

### Bewertung

Im Rahmen der grundlegenden Charakterisierungsversuche kann geschlussfolgert werden, dass die Wirkungsweise einer Kurzzeit-Wärmebehandlung sowie die Einbringung hoher plastischer Deformationen in Wechselwirkung stehen. Durch die maximalen Werte und durch den Verlauf der Festigkeitskennwerte in Abhängigkeit des Umformgrades kann der Effekt der Verfestigung infolge des Walzprozesses als maßgeblich beeinflussend eingestuft werden. Die Applikation einer Kurzzeit-Wärmebehandlung verstärkt die zugrundeliegenden Wirkmechanismen hoher plastischer Verformung zusätzlich. Zwar können die Dehngrenze sowie Zugfestigkeit durch eine Entfestigung mittels Auflösung von festigkeitssteigernden Clustern und Ausscheidungen signifikant reduziert werden, allerdings wirken sich inhomogen verteilte  $\beta''$ - und  $\beta'$ -Ausscheidungen negativ auf die erreichbare Gleichmaßdehnung sowie das Verfestigungsverhalten aus. Nachfolgend eingebrachte hohe Deformationen führen

einerseits zu einer steigenden Zahl an Versetzungen und folglich zu einer Verzerrung sowie andererseits zu einer dynamischen Entfestigung mit einer einhergehenden Lokalisierung der plastischen Verformung an den inhomogen verteilten Ausscheidungen [202]. Dies konnte beispielsweise beim kumulativen Kaltwalzen einer aushärtbaren Aluminiumlegierung vom Typ EN AW-6014 von Ruppert et al. [198] nachgewiesen werden. Besonders zu beachten ist dabei der sich verstärkende Effekt einer reduzierten Gleichmaßdehnung in Folge der Bildung von gitterverzerrenden  $\beta''$ - und  $\beta'$ -Ausscheidungen sowie deren Agglomeration an Korngrenzen und einer nachfolgend ebenfalls an den Korngrenzen stattfindenden lokalen Versetzungsanhäufung durch hohe Umformgrade im Walzprozess. Obwohl diese Werte nicht für die direkte Herstellung von Blechbauteilen im überlagerten Fall von Kurzzeit-Wärmebehandlung und nachfolgender Blechmassivumformoperation entscheidend sind, müssen diese für die Beurteilung des späteren Einsatzverhaltens berücksichtigt werden. Für die Prozessauslegung und die Bewertung nachfolgender Prozesskettenglieder kann festgehalten werden, dass im Vergleich zum rein wärmebehandelten Werkstoff bereits bei geringen Umformgraden von  $\phi = 0,2$  eine signifikante Beeinflussung der resultierenden Festigkeitswerte sowie des Umformvermögens vorliegt. Dieser gegenläufige Effekt einer gesteigerten Festigkeit bei gleichzeitig reduzierter Gleichmaßdehnung und reduziertem Verfestigungsvermögen vergrößert sich mit zunehmendem Umformgrad, wenngleich mit einer merklich geringeren Steigung im Vergleich zur Initialen. Die moderate Zunahme der Richtungsabhängigkeit in Form der reduzierten senkrechten Anisotropie lässt sich zweifelsfrei dem nachgelagerten Walzprozess zuordnen, da für die Ausscheidungsmodifikation im Rahmen der Kurzzeit-Wärmebehandlung kein signifikanter Einfluss auf die Vorzugsrichtung nachgewiesen werden konnte. Folglich gilt es in nachfolgenden Prozessschritten unter einer primären Zugbeanspruchung und gleichzeitig zuvor eingebrachten hohen Umformgraden das stärkere Fließen aus der Blechdicke und die daraus folgende Möglichkeit von lokalen Einschnürungen oder gesteigerten Ausdünnungen zu berücksichtigen.

Neben der Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften direkt nach der Umformung bedarf es aufgrund der zeitlich reversiblen entfestigenden Wirkung durch Auflösung der Cluster auch der Bewertung des Auslagerungsverhaltens. Dieser Effekt ist für konventionelle Blechumformoperationen mit geringen bis mittleren Dehnungen bereits vielseitig untersucht, beispielsweise für Aluminiumhohlprofile der Legierung EN AW-6060 [59] oder für Tiefziehbauteile der Legierung EN AW-6016 [54].

Es fehlt jedoch ein grundlegendes Prozessverständnis über die Wechselwirkung aus Kurzzeit-Wärmebehandlung und nachfolgend eingebrachten hohen Umformgraden als Simulation der Randbedingungen der Blechmassivumformung auf das resultierende Kaltauslagerungsverhalten.

#### 6.1.4 Einfluss hoher Umformgrade auf das Auslagerungsverhalten nach einer Kurzzeit-Wärmebehandlung

Neben den zeitlich instabilen mechanischen Eigenschaften der Proben bzw. Bauteile direkt nach dem Wärmebehandlungs- und Umformprozess von ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen sind besonders die Einsatzeigenschaften im späteren, ausgelagerten Zustand relevant. Um die Auslagerungszeit als Teil der ganzheitlichen Charakterisierungsmethode zu berücksichtigen, werden zuvor wärmebehandelte Proben gewalzt und für Zugversuche präpariert sowie anschließend für eine definierte Zeit bei Raumtemperatur kaltausgelagert. Um mit den Versuchen das komplette Prozessfenster über lange Zeiten abdecken zu können, werden jeweils für die Umformgrade von  $\phi = 0,0$  und  $\phi = 1,0$  die Zeiten von 1 h, 24 h, 168 h, 672 h sowie 2.016 h untersucht. Für die dazwischenliegenden Umformgrade werden lediglich die Zeiten 24 h, 672 h und 2016 h analysiert, da der Fokus der Untersuchungen auf den mechanischen Eigenschaften am Ende der Auslagerungszeit liegt. Entsprechend folgt die Auswertung Werte der jeweiligen Kenngröße zudem gesondert für eine Kaltauslagerungszeit von  $t_{KA} = 2.016$  h.

##### **Auslagerungsverhalten von Dehngrenze $R_{p0,2}$ und Zugfestigkeit $R_m$**

Zur Untersuchung des Einflusses von hohen Umformgraden auf die Dehngrenze nach einer vorher induzierten Kurzzeit-Wärmebehandlung sowie deren Auslagerungsverhalten ist diese über die Auslagerungszeit und in Abhängigkeit des eingebrachten Umformgrades in Bild 28 dargestellt. Ohne Einwirkung von plastischer Deformation zeigt sich eine gute Übereinstimmung des Auslagerungsverhaltens mit dem der konventionellen Blechumformung [59]. Zwischen  $t_{KA} = 1$  h und 24 h findet die größte Zunahme der Dehngrenze von  $89,4 \pm 1,5$  MPa auf  $118,4 \pm 3,2$  MPa statt. Nachfolgend verlangsamt sich der Festigkeitsanstieg maßgeblich, was quasi mit dem Verfestigungsverhalten nach Lösungsglühen vergleichbar ist [25]. Nach zwölf Wochen Kaltauslagerungszeit werden maximale Werte von  $131,3 \pm 2,6$  MPa erreicht, was nahezu den kaltausgelagerten Ausgangszustand T<sub>4</sub> widerspiegelt. Im Gegensatz dazu verhält sich das Auslagerungsverhalten bei einem eingebrachten Umformgrad von  $\phi = 1,0$  grundlegend anders. Zwischen  $t_{KA} = 1$  h und 24 h wird tendenziell der größte

Anstieg an Festigkeit von  $278,6 \pm 9,1$  MPa auf  $288,0 \pm 10,1$  MPa verzeichnet. Dieser ist, bezogen auf die gestiegenen Maximalwerte infolge der verformungsinduzierten Kaltverfestigung allerdings gering. Im weiteren Verlauf, ab einer Auslagerungszeit von 168 h, kann kein weiterer Zugewinn der Dehngrenze mehr detektiert werden.

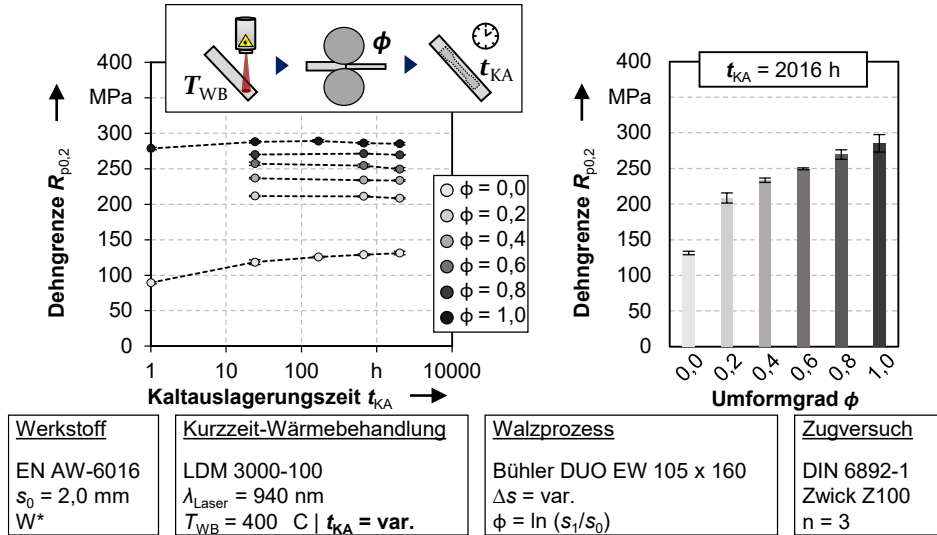


Bild 28: Dehngrenze  $R_{p0,2}$  bei unterschiedlichen Umformgraden in Abhängigkeit der Kaltauslagerungszeit sowie absolute Werte bei einer Kaltauslagerungszeit von  $t_{\text{KA}} = 2016$  h

Bis einschließlich  $t_{\text{KA}} = 2.016$  h bewegt sich der Wert in einem fast konstanten Bereich zwischen 285 MPa und 289 MPa. Dieser Effekt lässt auf eine nahezu vollständig unterdrückte Ausscheidungskinetik durch die große Verzerrung des Kristallgitters infolge der großen Zahl an Versetzungen durch die hohe plastische Deformation schließen. Dies wurde unter anderem von Chbihi et al. [203] für die Legierung EN AW-6061 bei einer Warmauslagerung von 180 °C nachgewiesen. Die hohe Zahl an Versetzungen wirkt dabei als Keimbildungsstelle für Ausscheidungen, wodurch es zu einer inhomogenen Ausscheidungsbildung an den an Korngrenzen angestauten Versetzungen kommt [204]. Dadurch resultiert eine beschleunigte Ausscheidungskinetik mit der Bildung von  $\beta'$ -Ausscheidungen [205] und der sogenannten B'-Phase [206] bei gleichzeitiger Unterdrückung der Ausscheidungskinetik für GP-Zonen sowie  $\beta''$ -Ausscheidungen [207], welche maßgeblich für den erneuten Festigkeitsanstieg nach der Kurzzeit-Wärmebehandlung verantwortlich sind. Zusätzlich konnte eine stabilisierende Wirkung dieser Ausscheidungen auf die Dehngrenze durch die starke Gitterverzerrung beim Warmauslagern

nachgewiesen werden [208]. Diese modifizierte Ausscheidungskinetik ist stark vom Grad der eingebrachten Deformation abhängig [209], weshalb es bei einer weiteren Erhöhung der Versetzungsdichte sogar zu einem der Überalterung ähnlichen Zustand kommen kann [210]. Ebendiese Unterdrückung der Ausscheidungskinetik kann bereits für einen moderaten Umformgrad von  $\phi = 0,2$  nachgewiesen werden. Nach Larché [204] beginnt dieser Effekt bereits bei niedrigen plastischen Verformungen ab 3% und 5%. Für höhere Umformgrade kann entsprechend auch eine nahezu vollständig unterdrückte Aushärtung durch Kaltauslagerung nachgewiesen werden. Folglich sind die erreichbaren Maximalwerte nach einer Kaltauslagerungszeit von  $t_{KA} = 2.016$  h fast ausschließlich vom eingebrachten Umformgrad und der daraus resultierenden Kaltverfestigung abhängig.

Bei der Analyse der Zugfestigkeiten in Abhängigkeit der Kaltauslagerungszeit und der eingebrachten Umformgrade in Bild 29 lässt sich prinzipiell ein ähnlicher Verlauf der Kurven feststellen. Für den unverformten Ausgangszustand kann analog das übliche Auslagerungsverhalten infolge einer Kurzzeit-Wärmebehandlung festgestellt werden, wobei nach  $t_{KA} = 2016$  h mit  $236,3 \pm 4,5$  MPa nahezu die Ausgangszugfestigkeit im Zustand T<sub>4</sub> erreicht wird. Mit einer Erhöhung der eingebrachten plastischen Deformation steigt, wie bereits beschrieben, die Versetzungsdichte signifikant an. Dies führt einerseits zu einer allgemein erhöhten Zugfestigkeit durch Gitterverzerrung, analog des Verlaufs im konventionellen Kaltwalzprozess. Andererseits wird durch die hohe Versetzungsdichte die Ausscheidungskinetik weitestgehend unterdrückt. Im Vergleich zur Dehngrenze kann aber trotzdem ein leichter Anstieg verzeichnet werden, der mit zunehmender Auslagerungszeit ab  $t_{KA} > 672$  h stagniert. Die Differenz kann damit erklärt werden, dass sich im Rahmen der Kaltauslagerung die in Lösung befindliche MgSi-Phase in Form von unterschiedlichen Ausprägungen bevorzugt entlang der Versetzungen an den Korngrenzen ausscheidet [204]. Dies hat eine weitere Verzerrung des Gitters und entsprechend eine Zunahme der absoluten Zugfestigkeit zur Folge, wobei nach einer Kaltauslagerungszeit von  $t_{KA} = 2.016$  h eine maximale Zugfestigkeit von  $306,4 \pm 12,9$  MPa erreicht wird. Die Abweichung zum Wert im Ausgangszustand lässt sich durch die bereits angeführte Unterdrückung einer weiteren Kaltauslagerung durch die hohe Versetzungsdichte erklären [203]. Dieser leichte Anstieg kann unabhängig vom eingebrachten Umformgrad bis zu einer Auslagerungszeit von  $t_{KA} = 672$  h nachgewiesen werden. Daraus kann auf eine vom Umformgrad weitestgehend unabhängige Ausscheidungshärtung infolge der sich ausscheidenden MgSi-Phase geschlossen werden.

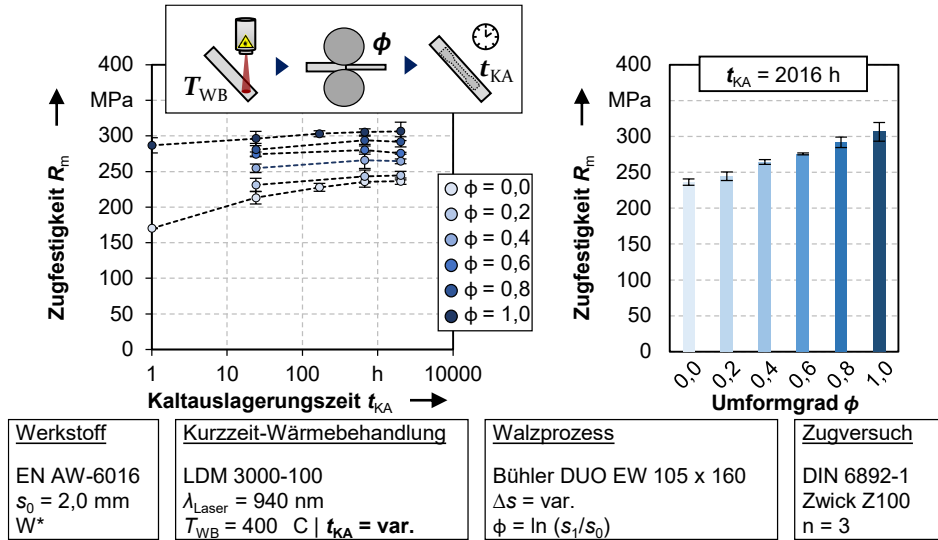


Bild 29: Zugfestigkeit  $R_m$  bei unterschiedlichen Umformgraden in Abhängigkeit der Kaltauslagerungszeit sowie absolute Werte bei einer Kaltauslagerungszeit von  $t_{KA} = 2016$  h

### Auslagerungsverhalten hinsichtlich der Gleichmaßdehnung $A_g$

Ein signifikanter Duktilitätsrückgang infolge der starken Verzerrung des Gitters durch die verformungsinduzierten Versetzungen konnte bereits in den vorangegangenen Untersuchungen bestätigt werden. Zwar ist das Auslagerungsverhalten bezüglich der Gleichmaßdehnung nicht relevant zur Anwendung der Methode einer lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung zur Stoffflusssteuerung, allerdings hat die Restduktilität des Bauteils einen wesentlichen Einfluss auf das spätere Einsatzverhalten. Entsprechend wird auch die Gleichmaßdehnung in Abhängigkeit der Kaltauslagerungszeit nach einer Wärmebehandlung bei  $T_{WB} = 400$  °C ausgewertet. Der Verlauf sowie die maximalen Werte bei einer Auslagerungszeit von  $t_{KA} = 2.016$  h sind in Bild 30 gegenübergestellt. Für den unverformten Zustand ist eine merkbare Zunahme von  $12,3\% \pm 2,3\%$  bei  $t_{KA} = 1$  h auf  $16,9\% \pm 1,3\%$  bei  $t_{KA} = 2.016$  h zu verzeichnen. Dieser Verlauf kann durch die Bildung von Ausscheidungen aus dem quasi-lösungsgeglühten Zustand entlang der bereits erforschten Ausscheidungskinetik begründet werden [211]. Aufgrund der zunehmenden Größe der sich bildenden Ausscheidungen greift der Effekt eines reduzierten Verfestigungsverhaltens [188], welcher mit einer Erhöhung der Duktilität und folglich der Gleichmaßdehnung einhergeht. Da die Ausscheidungskinetik nicht mehr identisch zum Herstellungsprozess mit Lösungsglühen und Abschrecken erfolgt, erreichen die Werte der Gleichmaßdehnung auch nach einer Auslagerungszeit von 12 Wochen

nicht mehr das Maß des Ausgangszustandes, was unter anderem von Hoffmann [54] für eine Kaltauslagerung der Legierung EN AW-6016 ohne und mit einer Vorverformung von 10% nach einer laserinduzierten Kurzzeit-Wärmebehandlung nachgewiesen wurde.

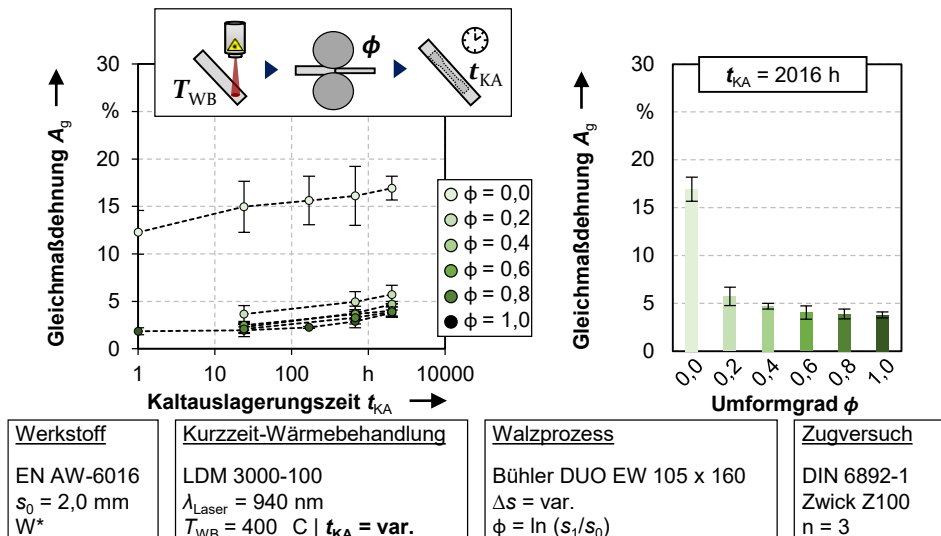


Bild 30: Gleichmaßdehnung  $A_g$  bei unterschiedlichen Umformgraden in Abhängigkeit der Kaltauslagerungszeit sowie absolute Werte bei einer Kaltauslagerungszeit von  $t_{KA} = 2016$  h

Bereits ab einem Umformgrad von 0,2 wird die Gleichmaßdehnung durch die zunehmende Zahl an Versetzungen maßgeblich reduziert, analog der Versuchsergebnisse zu den kaltgewalzten Proben. In einem quasi-lösungsgeglühten Zustand bilden sich vermehrt Ausscheidungen besonders an Stellen hoher Versetzungsdichte an den Korngrenzen, woraus einerseits eine größere Gitterverspannung und andererseits auch eine reduzierte Homogenität resultieren [204]. Entsprechend kommt es bei einer Überlagerung einer Kurzzeit-Wärmebehandlung mit einer nachfolgend eingebrachten hohen plastischen Verformung zu einem weiteren Absenken der Gleichmaßdehnung. Diese erreicht noch 1,9% ± 0,4% bei einem Umformgrad von 1,0. Die Kurven der dazwischenliegenden Umformgrade liegen mit abnehmendem Umformgrad entsprechend oberhalb des minimalen Werteverlaufs für  $\phi = 1,0$ . Trotz der signifikanten Gitterverzerrung bilden sich über die Zeit größere Ausscheidungen [188], welche analog der Ausgangskurve aufgrund eines verringerten Verfestigungsverhaltens zu einem leichten Anstieg der Gleichmaßdehnung bei langen Auslagerungszeiten führen. Dabei steigt der Wert von 1,9% ± 0,4% wieder auf 3,8% ± 0,3% an. Der Vergleich der Maximalwerte nach 12 Wochen

Auslagerungszeit zeigt deutlich, dass der Effekt der hohen Kaltverfestigung gegenüber dem Effekt der Kaltauslagerung den deutlich größeren Einfluss auf die Gleichmaßdehnung hat.

**Auslagerungsverhalten des Verfestigungsexponenten  $n$**

Bei der Kaltauslagerung wird das Verfestigungsverhalten durch die Bildung von neuen Ausscheidungen maßgeblich beeinflusst. Wie bereits beschrieben, hängt die Ausscheidungskinetik dabei von der Kurzzeit-Wärmebehandlung sowie der nachfolgend eingebrachten plastischen Deformation ab. Als Beitrag zur ganzheitlichen Charakterisierung des Auslagerungsverhaltens ist der Verlauf des Verfestigungsexponenten über die Kaltauslagerungszeit unter Einfluss unterschiedlicher Umformgrade in Bild 31 gegenübergestellt.

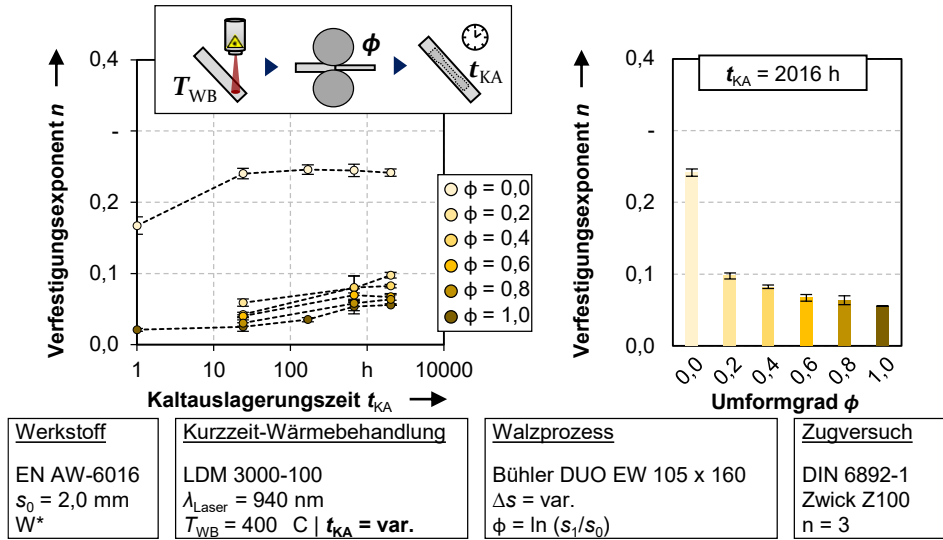


Bild 31: Verfestigungsexponent  $n$  bei unterschiedlichen Umformgraden in Abhängigkeit der Kaltauslagerungszeit sowie absolute Werte bei einer Kaltauslagerungszeit von  $t_{\text{KA}} = 2016 \text{ h}$

Im unverformten Ausgangszustand kann ein Anstieg in den ersten 24 h von  $n = 0,17 \pm 0,01$  auf  $n = 0,24 \pm 0,01$  verzeichnet werden. Nachfolgend bleibt der Wert im Rahmen der Standardabweichung konstant auf demselben Niveau von  $n = 0,24 \pm 0,01$ . Nach eingebrachten Umformgraden lässt sich ein vergleichbarer Verlauf zur Gleichmaßdehnung erkennen. Mit zunehmender Auslagerungszeit steigen die Verfestigungsexponenten wieder leicht an, was wiederum mit der Auslagerung von größeren Ausscheidungen und einer einhergehenden Reduktion des Verfestigungsverhaltens zu begrün-

den ist [188]. Zwar lässt sich wieder der signifikante Einfluss der Kornlänge in Walzrichtung bei hohem Kaltwalzgrad erkennen, im Rahmen der Auflösung kann jedoch keine Veränderung der Gefügestruktur infolge der Kaltauslagerung festgestellt werden, unabhängig von der eingebrachten Verformung.

### Auslagerungsverhalten der senkrechten Anisotropie $r$

Bei der Untersuchung der einzelnen Prozessschritte der Kurzzeit-Wärmebehandlung sowie des Kaltwalzens konnte ein signifikanter Einfluss auf die Vorzugsrichtung ausschließlich im Walzprozess nachgewiesen werden. Zur Bewertung des Auslagerungsverhaltens sind entsprechend die resultierenden  $r$ -Werte in Abhängigkeit des eingebrachten Umformgrades über die Auslagerungszeit in Bild 32 gegenübergestellt.

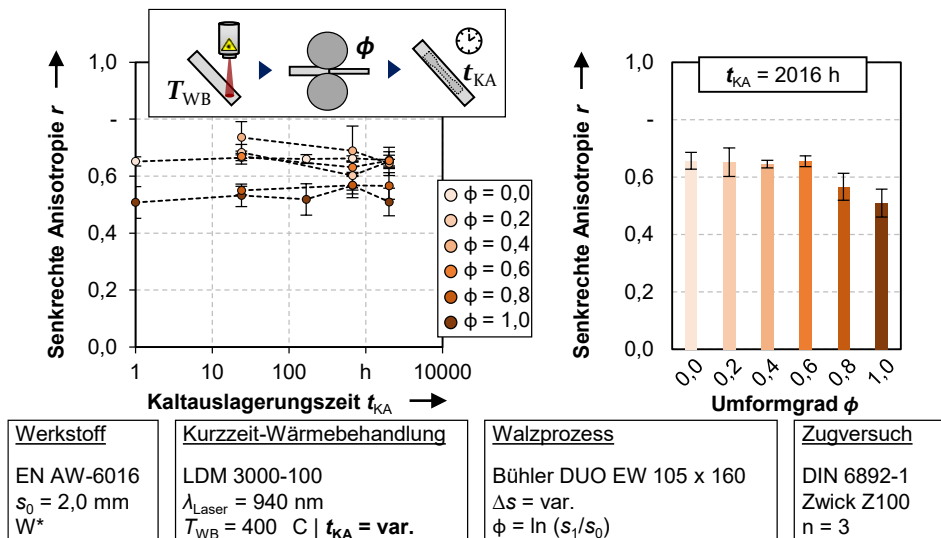


Bild 32: Senkrechte Anisotropie  $r$  bei unterschiedlichen Umformgraden in Abhängigkeit der Kaltauslagerungszeit sowie absolute Werte bei einer Kaltauslagerungszeit von  $t_{\text{KA}} = 2016 \text{ h}$

Zunächst fällt das generell niedrigere Wertenniveau bei hohen plastischen Deformationen auf, entsprechend werden bei  $\phi = 0,0$  Werte von  $r = 0,65 \pm 0,02$  und bei  $\phi = 1,0$  Werte von  $r = 0,51 \pm 0,05$  erzielt. Dies lässt sich, wie bereits beschrieben, durch eine weitere Längung der Kornstruktur und somit der Ausbildung einer lamellaren Struktur in Vorzugsrichtung begründen [200]. Der Einfluss des Herstellungsprozesses durch das weitere Abwalzen wird dadurch verstärkt. Die Ausscheidungsmorphologie hat wie bei der Analyse des Einflusses der Kurzzeit-Wärmebehandlung auf die senkrechte Anisotropie festgestellt, nur einen sehr geringen Einfluss auf die

Vorzugsrichtung. Bei Überlagerung mit hohen Umformgraden greift ausschließlich der Effekt der Kornlängung. Durch die hohe Standardabweichung der einzelnen Werte bei unterschiedlichen Auslagerungszeiten kann kein eindeutiger Zusammenhang erkannt werden. Die generelle Einschätzung eines relativ konstanten Verlaufs der  $r$ -Werte aufgrund des bereits beschriebenen fehlenden Einflusses der Ausscheidungsmorphologie auf die Vorzugsrichtung kann durch die Ergebnisse allerdings gestützt werden.

Für eine abschließende Gegenüberstellung der Ergebnisse werden Gefügebilder nach der in Kapitel 4 vorgestellten Methode von den Eckpunkten des geprüften Parameterfensters angefertigt, welche in Bild 33 gegenübergestellt sind. Dargestellt sind die Proben nach einer Kurzzeit-Wärmebehandlung von  $T_{WB} = 400\text{ °C}$  nach einer Auslagerungszeit von 1 h und 2.016 h ohne plastische Deformation sowie mit einem Umformgrad von 1,0.

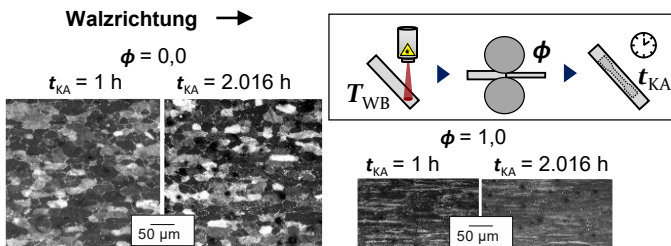


Bild 33: Gefügestruktur nach einer Kurzzeit-Wärmebehandlung im unverformten Zustand und bei  $\phi = 1,0$  nach einer Auslagerungszeit von 1 h sowie 2016 h

Zwar lässt sich wieder der signifikante Einfluss der Kornlängung in Walzrichtung bei hohem Kaltwalzgrad erkennen, im Rahmen der Auflösung kann allerdings keine Veränderung der Gefügestruktur infolge der Kaltauslagerung festgestellt werden, unabhängig von der eingebrachten Verformung.

### 6.1.5 Zusammenfassende Bewertung der Wirkungsweise entlang der gesamten Prozesskette

Auf Basis der ganzheitlichen Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften entlang der gesamten Prozesskette aus Kurzzeit-Wärmebehandlung, Kaltwalzen sowie Kaltauslagerung konnte in diesem Abschnitt ein umfangreiches Prozessverständnis über die resultierenden mechanischen Eigenschaften erarbeitet werden. Dabei wurde der Einfluss der Kurzzeit-Wärmebehandlung auf die mechanischen Eigenschaften für die untersuchte Legierung EN AW-6016 mit einer Ausgangsblechdicke von  $s_0 = 2,0\text{ mm}$  im Rahmen der untersuchten Wärmebehandlungsstrategie

und der definierten Parameter charakterisiert. Weiterhin konnte dabei die entfestigende Wirkung im Sinne einer Eigenschaftsgradierung nachgewiesen werden, welche Grundvoraussetzung zur Anwendung als stoffflusssteuernde Maßnahme ist. Zur definierten Einstellung von Umformgraden im Werkstoff wurde ein Flachlängswalzprozess untersucht. Besonders hervorzuheben sind dabei die beiden gegensätzlichen Effekte einer Entfestigung durch Ausscheidungsauflösung und die stark verfestigende Wirkung durch steigende Versetzungsdichte infolge einer plastischen Deformation. Auf Basis der resultierenden mechanischen Eigenschaften und einer hohen Reproduzierbarkeit wurde der Prozess für den Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit als zielführend einsetzbar eingestuft.

Zur Übertragung der Gegebenheiten in die Blechmassivumformung wurde die Überlagerung aus Kurzzeit-Wärmebehandlung mit einer nachfolgend eingebrachten plastischen Deformation untersucht. Dabei konnte eine konkurrierende Wechselwirkung beider grundlegenden Wirkmechanismen identifiziert werden. Aufgrund der sich weitestgehend in Lösung befindlichen MgSi-Phase kann zwar die Festigkeit entscheidend reduziert werden, durch die verzerrende Wirkung einer hohen Versetzungsdichte durch die nachfolgende Umformung werden allerdings die Umformeigenschaften negativ beeinflusst. Damit einhergehend resultieren unter anderem eine reduzierte Gleichmaßdehnung sowie ein minimal ausgeprägtes Restverfestigungsvermögen.

Abschließend wurden zur Bewertung des späteren Einsatzverhaltens und damit zur vollumfänglichen Charakterisierung der Wirkungsweise einer Kurzzeit-Wärmebehandlung in der Blechmassivumformung das Auslagerungsverhalten anhand der mechanischen Eigenschaften bei unterschiedlich langen Zeiten untersucht. Hier wurde eine stark unterdrückende Wirkung auf das Auslagerungsverhalten bereits ab einem Umformgrad von  $\phi = 0,2$  festgestellt. Diese ist maßgeblich vom eingebrachten Umformgrad abhängig und lässt sich durch die verzerrende Wirkung der Versetzungen sowie einer geänderten Ausscheidungskinetik begründen. Zwar beeinflusst das Auslagerungsverhalten nicht die Umformbarkeit bzw. die Anwendung der Methode der Kurzzeit-Wärmebehandlung als stoffflusssteuernde Maßnahme, allerdings muss dieses für den späteren Einsatz der Bauteile berücksichtigt werden. Durch die stark variierenden Spannungs- und Formänderungszustände sowie lokalen Umformzonen in Blechmassivumformprozessen erwächst dahingegen die Herausforderung, eine homogene Eigenschaftsverteilung über das gesamte Bauteil sicherzustellen oder diese zumindest gezielt einstellen und steuern zu können.

Aufbauend auf den bewerteten Ergebnissen dieses Abschnitts kann die Methode der Kurzzeit-Wärmebehandlung von ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen im Rahmen der Blechmassivumformung zur Anpassung der Werkstoffeigenschaften eingesetzt werden. Dabei kann eine signifikante Reduzierung der Festigkeitskennwerte erzielt werden. Jedoch muss ebenfalls das beeinflusste Werkstoffverhalten, wie die reduzierte Gleichmaßdehnung oder das unterdrückte Auslagerungsverhalten, bei der Auslegung von Wärmebehandlungsstrategien und deren Anwendung berücksichtigt werden. Im nachfolgenden Kapitel wird die Methode der Kurzzeit-Wärmebehandlung mit dem Ziel einer ganzheitlichen Qualifizierung zur Anwendung in der Blechmassivumformung auf die lokale Eigenschaftsgradierung von Blechstreifen übertragen. Aufbauend auf der Identifikation eines laserparameterabhängigen Temperatur- und Festigkeitsgradienten wird abschließend die Realisierung kreisrunder Wärmebehandlungslayouts bewertet und eine zeitliche Beeinflussung charakterisiert.

## 6.2 Qualifizierung der Kurzzeit-Wärmebehandlung für die lokale Eigenschaftsgradierung

Neben dem Aufbau eines grundlegenden Prozessverständnisses über die Wirkungsweise einer Kurzzeit-Wärmebehandlung unter Einfluss einer nachfolgend eingebrachten hohen plastischen Deformation auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften und das Auslagerungsverhalten bildet die Übertragung der Wärmebehandlungsmethode zur lokalen Eigenschaftsgradierung von Blechhalbzeugen einen wesentlichen Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit. Mit dem Ziel der Stoffflusssteuerung durch lokale Eigenschaftsgradierung im Taumelprozess sowie der abschließenden Ableitung einer Auslegungsmethode ist die Analyse der Ursache-Wirkbeziehungen zwischen der Temperaturverteilung und der resultierenden mechanischen Eigenschaften auf die Halbzeuge von essenzieller Bedeutung. Entsprechend erfolgt im nachfolgenden Abschnitt eine Qualifizierung der zuvor grundlegend untersuchten Methode der laserinduzierten Kurzzeit-Wärmebehandlung zur lokalen Eigenschaftsgradierung der Blechhalbzeuge mit einer Ausgangsblechdicke von  $s_0 = 2,0$  mm. Bedingt durch die hohe Wärmeleitfähigkeit von Aluminium von  $235 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  liegt der Fokus der experimentellen Untersuchungen auf der erreichbaren Maximaltemperatur in Längsrichtung analog der Verfahrensrichtung des Lasers und der Ausbildung einer Wärmeeinflusszone in Form eines Temperaturgradienten über die Probenbreite und infolge dessen

lokal variierende Festigkeitswerte. Mit einer lokalen Wärmebehandlungsfläche zur Anwendung in der Blechmassivumformung zwischen 5 und 15 mm Kantenlänge besteht für eine entsprechende Laserspotgröße von 10 x 10 mm bisher kein ausreichendes Prozessverständnis über die Ursache-Wirkzusammenhänge zwischen einem laserinduzierten Temperaturgradienten und den resultierenden Festigkeitseigenschaften.

Bisherige Untersuchungen zur laserinduzierten Kurzzeit-Wärmebehandlung weisen signifikant größere Wärmebehandlungsflächen [48] oder den Einsatz von mehrlagigen Halbzeugen auf [199]. In Kombination mit variierenden geometrischen Eigenschaften oder geschlossenen Hohlprofilen [59] unterscheiden sich die Charakteristika zur Einstellung von Temperaturgradienten sowie die resultierenden Wärmeeinflusszonen maßgeblich. Aufgrund der örtlich sehr lokal definierten Wärmebehandlungsfläche besteht in besonderem Maße die Herausforderung einer minimierten Wärmeeinflusszone zur Sicherstellung der gewünschten Entfestigung bei gleichzeitiger Beibehaltung der ursprünglichen Werkstoffeigenschaften im anliegenden Bereich. Weiterhin wird der laserparameterabhängige Temperatur- und Festigkeitsgradient über die Blechdicke analysiert, um eine zielführende Laserparametereinstellung für die Anwendung auf Blechroden zu identifizieren. Mit einer Untersuchung der Übertragbarkeit auf rotationssymmetrische Bauteile und der daraus resultierenden Beeinflussung durch eine kontinuierliche Erwärmung der Probe während des Wärmebehandlungsprozesses wird die ganzheitliche Qualifizierung der Kurzzeit-Wärmebehandlung zur lokalen Eigenschaftsgradierung abgeschlossen.

### ***Erarbeitung einer Wärmebehandlungsstrategie zur lokalen Eigenschaftsgradierung***

Bevor die Ausbildung einer Wärmeeinflusszone in Blechbreitenrichtung aufgrund der lokalen Anwendung untersucht werden kann, werden die Homogenität der Wärmebehandlung und die Erreichung der definierten Temperaturstufen anhand von Temperaturmessungen mittels einer Thermokamera vom Typ FLIR SC 7600 über die Wärmebehandlungsdauer analysiert, siehe Bild 34. Zu Prozessbeginn kann für alle Temperaturstufen eine charakteristische Aufheizphase in Abhängigkeit der Maximaltemperatur nachgewiesen werden. Dieser Anstieg ist maßgeblich von der zur Verfügung stehenden Laserleistung  $P_{Lmax} = 3 \text{ kW}$  abhängig, welche durch die integrierte Regelung beim Erreichen der Zieltemperatur angepasst wird. Dadurch lässt sich das leichte Überschwingen der Temperaturkurve am Ende des Aufheizvorganges erklären. Unabhängig

von der definierten Temperaturstufe kann anschließend über die gesamte Dauer der Wärmebehandlung von  $t_{WB} = 20$  s bei einer Verfahrgeschwindigkeit von  $v_{Laser} = 5$  mm/s und einer Probenlänge von  $l = 100$  mm eine konstante Temperatur realisiert werden. Messbare Schwankungen im Verlauf sind dabei auf ein sporadisches lokales Entzünden der Grafitsschicht zurückzuführen, welche sich als sprunghafte Stelle im Diagrammverlauf äußert. Eine Überhöhung der Temperatur im Randbereich, welche aufgrund eines einseitig fehlenden Materialvolumens anfangs für realistisch eingestuft wurde, wird durch die Prozessregelung nahezu vollständig ausgeglichen. Nachweisbar ist eine minimale Erhöhung in einem Temperaturbereich zwischen 2 - 7 °C, abhängig von der definierten Maximaltemperatur. Am Ende der Wärmebehandlung kann ein abruptes Absinken der Werte identifiziert werden.

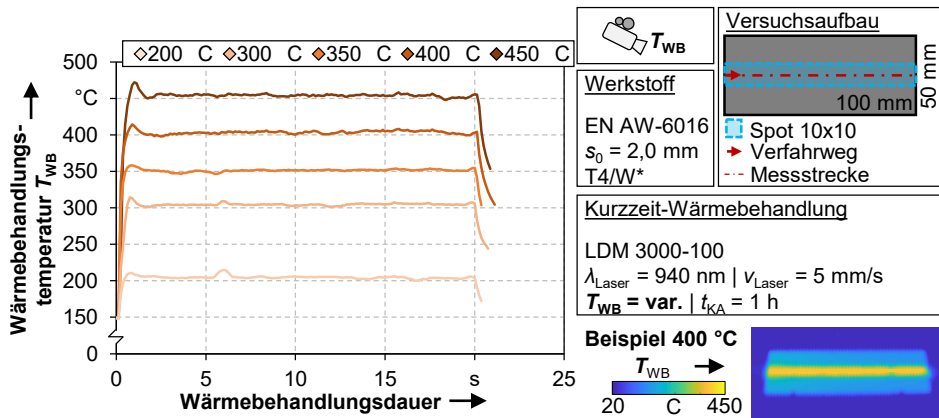


Bild 34: Temperaturverläufe für verschiedene definierte Wärmebehandlungstemperaturen in Abhängigkeit der Wärmebehandlungsdauer in Verfahrrichtung des Lasers

Neben der vorliegenden Maximaltemperatur ist für die Stoffflusssteuerung durch eine Interaktion zwischen festen und entfestigten Bereichen vor allem die resultierende Festigkeit von entscheidender Bedeutung. Als Äquivalent für die Festigkeit wird deshalb die Härte nach Brinell (2,5 / 62,5) entlang der Messstrecke im Bauteilzentrum gemessen, um die Auswirkung der Temperaturstufen auf die mechanischen Eigenschaften zu beurteilen und gleichzeitig eine ausreichende Auflösung der Messmethode für die lokale Charakterisierung zu gewährleisten, siehe Bild 35. Im Vergleich zum kaltausgelagerten Zustand T<sub>4</sub> als Referenz mit Härtewerten von  $81,5 \pm 0,2$  HB kann eine signifikante Reduzierung für die definierten Wärmebehandlungstemperaturen zwischen 200 °C und 450 °C nachgewiesen werden. Während bei einer  $T_{WB} = 200$  °C lediglich eine durchschnittliche Verringerung um 3% auf  $79,3 \pm 0,3$  HB erreicht wird, kann für

$T_{WB} = 300\text{ °C}$  eine Festigkeitsreduzierung von 20% auf  $65,2 \pm 3,6$  HB nachgewiesen werden. Eine weitere Abnahme der Härtewerte kann für die Wärmebehandlungstemperaturen zwischen  $T_{WB} = 350\text{ °C}$ ,  $400\text{ °C}$  und  $450\text{ °C}$  auf Werte von  $55,8 \pm 1,1$  HB,  $52,0 \pm 1,3$  HB und  $50,1 \pm 1,2$  HB verzeichnet werden. Dies entspricht bei  $T_{WB} = 400\text{ °C}$  einer Reduktion um 36% im Vergleich zur Ausgangshärte im Zustand T4, was direkt mit der verringerten Dehngrenze der Zugversuche in Abschnitt 6.1 verglichen werden kann. Weiterhin kann über die gesamte Probenlänge im Rahmen der Standardabweichung von einer weitestgehend konstanten Eigenschaftsgradierung ausgegangen werden. Lediglich in der Nähe des Bauteilrands, an welchem sich auch das Ende der Wärmebehandlung befindet, liegen tendenziell geringfügig niedrigere Werte vor.

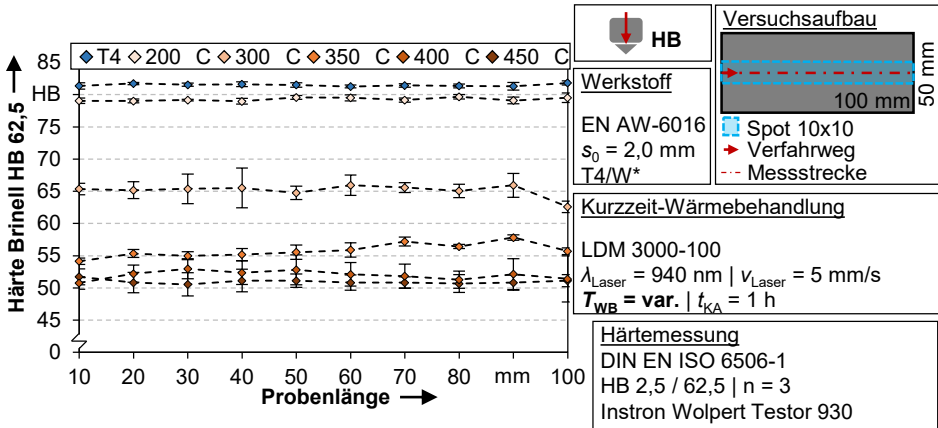


Bild 35: Härteverläufe für definierte Wärmebehandlungstemperaturen über die Probenlänge in Verfahrrichtung des Lasers

Dies lässt sich ebenfalls durch die leicht erhöhten Temperaturwerte am Probenende infolge der verzögerten Temperaturregelung mittels externer Pyrometermessung erklären. Insgesamt bestätigen diese Ergebnisse die generelle Einsatzfähigkeit der laserinduzierten Wärmebehandlung zur Einstellung eines definierten Temperatur- und Festigkeitsgradienten in Längsrichtung. Die Wärmeeinflusszone in Blechbreitenrichtung wird im nachfolgenden Abschnitt bewertet.

### Ausprägung einer laserparameterabhängigen Wärmeeinflusszone

Zur Anwendung der laserinduzierten Kurzzeit-Wärmebehandlung zur lokalen Eigenschaftsgradierung wird im Folgenden eine grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der Ausprägung einer Wärmeeinflusszone auf Basis der zu untersuchenden Legierung, der vorliegenden Blechdicke sowie

der Laserparameter vorgenommen. Dabei können prinzipiell zwei unterschiedliche Wärmeeinflusszonen (WEZ) identifiziert werden. Als erste Zone WEZ I wird der Bereich innerhalb der definierten Wärmebehandlungsfläche bezeichnet, in welchem die Solltemperatur durch Wärmeleitung in angrenzende Werkstoffbereiche nicht gänzlich erreicht und dadurch der Festigkeitsgradient geringer, als auf Basis der vorangegangenen Ergebnisse angenommen, ausfallen kann. Neben der Beeinflussung im direkten Wärmebehandlungsbereich erfolgt durch die hohe Wärmeleitfähigkeit außerdem die Ausbildung einer zweiten Wärmeeinflusszone WEZ II, welche sich im angrenzenden Werkstoffvolumen abhängig von der Verfahrensgeschwindigkeit und entsprechend der eingebrachten Wärmeleistung unterschiedlich stark ausprägt. Aufgrund eines starken Temperaturgradienten in Blechbreitenrichtung innerhalb dieser zweiten Wärmeeinflusszone können wiederum zwei unterschiedliche Bereiche identifiziert werden. Diese werden in der Literatur einerseits in eine direkt an die Wärmebehandlungsfläche angrenzende thermisch beeinflusste und durch ausreichenden Wärmeeintrag entsprechend auch entfestigte Zone, andererseits grenzt anschließend ein rein thermisch beeinflusster Bereich, in welchem die mechanischen Eigenschaften kaum oder gar nicht beeinträchtigt werden [24]. Diese Abgrenzung kann auf Basis der Ergebnisse der Zugversuche aus Abschnitt 6.1 sowie den durchgeführten Härtemessungen bei unterschiedlichen Temperaturen als  $T_{WB} = 200 \text{ °C}$  für die untersuchte Aluminiumlegierung definiert werden.

Zur Untersuchung der sich ausprägenden Wärmeeinflusszonen wird das resultierende Temperaturprofil für unterschiedliche Verfahrensgeschwindigkeiten an der Probenoberseite über die Probenbreite ausgewertet, siehe Bild 36. Zur besseren Visualisierung werden die Ergebnisse lediglich von der Mitte der Probe ausgehend bis zum Rand dargestellt. Eine Überprüfung zur symmetrischen Ausbildung erfolgt ebenfalls durch Härte- und Temperaturmessungen. Beginnend bei einer Verfahrensgeschwindigkeit des Lasers von  $v_{\text{Laser}} = 1,0 \text{ mm/s}$  lässt sich eine stark ausgeprägte WEZ II im Randbereich der Probe erkennen. Dabei erfolgt, bedingt durch eine Wärmebehandlungsdauer von 100 s und dem daraus resultierenden hohen Wärmeeintrag, ein Abführen der Wärme in Blechbreitenrichtung [24], wobei Temperaturen von  $T_{WB} > 300 \text{ °C}$  bis zum Bauteilrand vorliegen und die WEZ II folglich eine Breite von 25 mm aufweist. Dahingegen wird im direkten Wärmebehandlungsbereich die Solltemperatur bereits nach 2 mm erreicht. Mit zunehmender Verfahrensgeschwindigkeit nimmt der gesamte Wärmeeintrag stufenweise ab, wodurch sich die WEZ II von 17 mm über 8 mm und 7 mm auf 6 mm verringert.

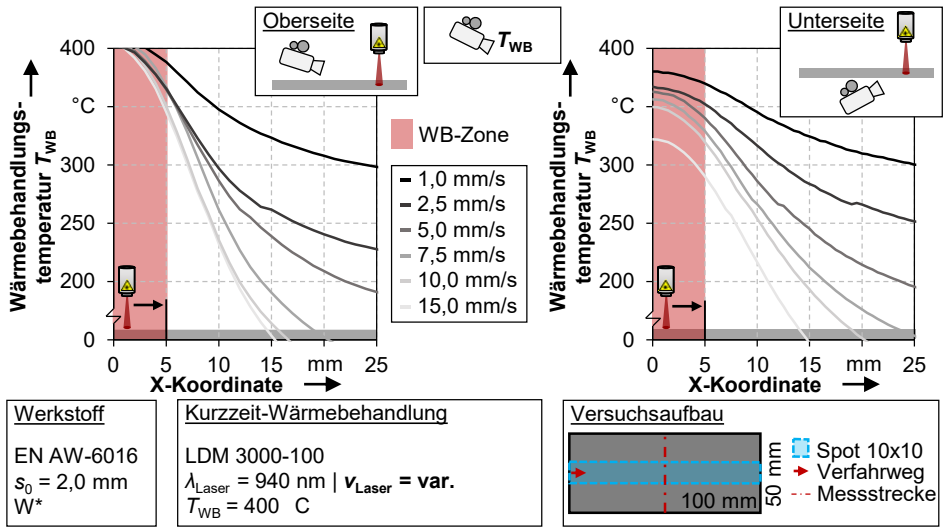


Bild 36: Temperaturprofil für lokal kurzzeit-wärmebehandelte Aluminiumblechstreifen an der Ober- und Unterseite in Abhängigkeit variierender Laserverfahrensgeschwindigkeiten

In umgekehrter Reihenfolge vergrößert sich die WEZ I im direkten Bereich der Wärmebehandlung von 2 mm bis etwa 4 mm, wobei dieser Bereich für die unterschiedlichen Verfahrensgeschwindigkeiten kaum unterscheidbar ist. Im Gegensatz dazu kann eine unterschiedliche Ausprägung beider Einflusszonen auf der der Wärmebehandlung abgewandten Seite identifiziert werden, siehe Bild 36 rechts. Auch für die niedrigste Verfahrensgeschwindigkeit von 1,0 mm/s kann die definierte Solltemperatur von  $T_{WB} = 400 \text{ °C}$  im Wärmebehandlungsbereich mit  $376 \text{ °C}$  nicht gänzlich erzielt werden. Mit zunehmender Verfahrensgeschwindigkeit kann für die resultierende Maximaltemperatur bei  $v_{Laser} = 15,0 \text{ mm/s}$  ein Wert von  $323 \text{ °C}$  erreicht werden. Die Ausprägung der WEZ II kann hingegen mit der Oberseite der Blechhalbzuge verglichen werden. Eine Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften ab  $T_{WB} > 200 \text{ °C}$  kann ab einer Entfernung von jeweils 7 mm, 9 mm, 12 mm und 19 mm für sinkende Verfahrensgeschwindigkeiten identifiziert werden.

Zur Bestätigung der zuvor identifizierten Wärmeeinflusszonen sowie dem Ausbilden des Festigkeitsgradienten werden zudem Härtemessungen in Blechbreitenrichtung an der Blechober- und Blechunterseite durchgeführt, siehe Bild 37. Im Vergleich zum Ausgangszustand mit einer Härte von  $81,5 \pm 0,2 \text{ HB}$  kann für die drei untersuchten Verfahrensgeschwindigkeiten ein signifikant ausgeprägter Entfestigungsbereich festgestellt werden, welcher in Abhängigkeit der Verfahrensgeschwindigkeit unterschiedlich stark ausfällt.

Für 1,0 mm/s wird analog zur Temperaturverteilung ein sehr großer Bereich mit maximaler Entfestigung von 51 HB gemessen, welcher sich bis 8 mm fortsetzt, bevor die Werte wieder leicht ansteigen und eine Sättigung bei 15 mm von etwa 64 HB erreichen. Diese Ergebnisse liegen dabei in guter Übereinstimmung mit dem ausgebildeten Temperaturgradienten.

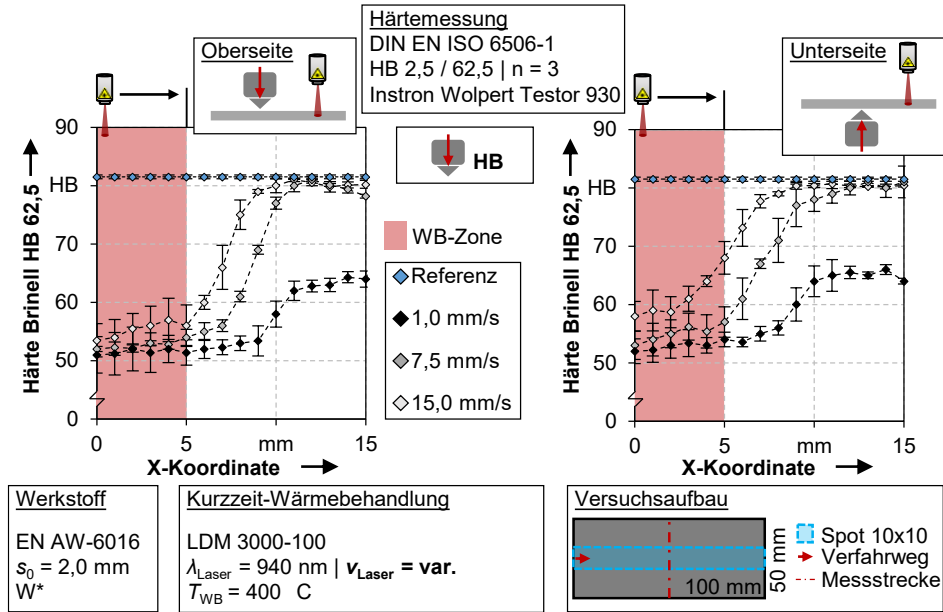


Bild 37: Härteprofil für lokal kurzzeit-wärmebehandelte Aluminiumblechstreifen an der Ober- und Unterseite in Abhängigkeit variierender Laserverfahrensgeschwindigkeiten

Auf der Bauteilunterseite ist ein nahezu identischer Verlauf für die langsame Verfahrensgeschwindigkeit messbar, welcher durch den Wärmeeintrag während der langen Wärmebehandlungsdauer in Kombination mit der hohen Wärmeleitfähigkeit und der daraus folgenden Homogenisierung über die gesamte Bauteilbreite begründet werden kann. Für eine Verfahrensgeschwindigkeit von 7,5 mm/s kann im direkten Wärmebehandlungsbereich ein Wert von durchschnittlich  $52,3 \pm 2,9$  HB erreicht werden, welcher sich etwa 2 mm in den anliegenden Werkstoffbereich fortsetzt, bevor dieser über eine WEZ II von 5 mm wieder bis zum Ausgangszustand ansteigt. Auf der Bauteilrückseite liegt der mittlere Wert von  $55,4 \pm 3,1$  HB leicht höher und der Anstieg beginnt direkt nach der Wärmebehandlungszone. Die Ausprägung der WEZ II kann dabei direkt mit der Bauteiloberseite verglichen werden, was durch die hohe Wärmeleitfähigkeit und eine Homogenisierung des Temperaturgradienten begründet werden kann. Bei einer Ver-

fahrgeschwindigkeit von 15 mm/s wird die geringste Entfestigung im Wärmebehandlungsbereich mit Härtewerten von  $56,7 \pm 2,2$  HB auf der Blechober- und  $64,4 \pm 3,5$  HB auf der Blechunterseite gemessen. Aufgrund des geringen Wärmeeintrags durch die hohe Verfahrgeschwindigkeit und einer Ableitung der Wärmeenergie in Blechbreitenrichtung fällt die WEZ II mit etwa 4 mm in diesem Fall geringer aus. Auf der Bauteilunterseite wird am Rand der Wärmebehandlungszone ein Härtewert von  $68,1 \pm 3,1$  HB erzielt, was auf einen unzureichenden Wärmeeintrag infolge der Verfahrgeschwindigkeit hindeutet. In einem Abstand von weiteren 4 mm befindet sich das Festigkeitsniveau wieder im Ausgangszustand.

Die erzielten Härtewerte für die drei unterschiedlichen Verfahrgeschwindigkeiten bestätigen die Temperaturverteilung auf beiden Bauteilseiten, wobei sich aufgrund der geringen Blechdicke eine gegenseitige Beeinflussung der Härteverteilung durch den Temperaturgradienten in Blechdickenrichtung einstellt. Aufbauend auf den Ergebnissen lässt sich die Ausprägung dieses Gradienten in Breiten- als auch in Dickenrichtung als maßgeblich abhängig von der Verfahrgeschwindigkeit und in Folge dessen von der eingebrachten Wärmeleistung einstufen. Mit gesteigerter Verfahrgeschwindigkeit nimmt die Homogenität der Härteverteilung über die Blechbreiten- und -dicke ab, bei einer zu geringen Geschwindigkeit kann eine lokale Wärmeeinflusszone nicht zielführend abgegrenzt werden. Dabei erwächst speziell die Herausforderung einer ausreichenden Entfestigung bei gleichzeitig lokalem Wirkungsbereich, welche es speziell für die Übertragung auf kreisrunde Layouts zu berücksichtigen gilt.

### ***Übertragung auf kreisrunde Wärmebehandlungslayouts***

Zur Anwendung der Wärmebehandlungsmethode auf kreisrunde Layouts mit dem Ziel der Eigenschaftsgradierung von Blechronden wird zudem die zeitliche Entwicklung des Temperatur- und Härtegradienten in Form von unterschiedlichen Messtrecken ausgewertet, siehe Bild 38. Für einen nachfolgenden Einsatz wird die Verfahrgeschwindigkeit  $v_{\text{Laser}} = 7,5$  mm/s als Kompromiss zwischen der maximalen Entfestigung im Zielbereich und einer gleichzeitig möglichst geringen WEZ II definiert. Dabei fällt zunächst ein kuppelförmiger Verlauf der Ausprägung der Maximaltemperatur zwischen 0 mm und 10 mm auf, welcher sich durch die Lage des Mittelpunkts des Laserspots und der Laserintensität in Form einer Gauß-Kurve begründen lässt. Weiterhin zeigt sich eine zunehmend unsymmetrische Ausbildung der Temperaturverteilung mit steigender Wärmebehandlungsdauer.

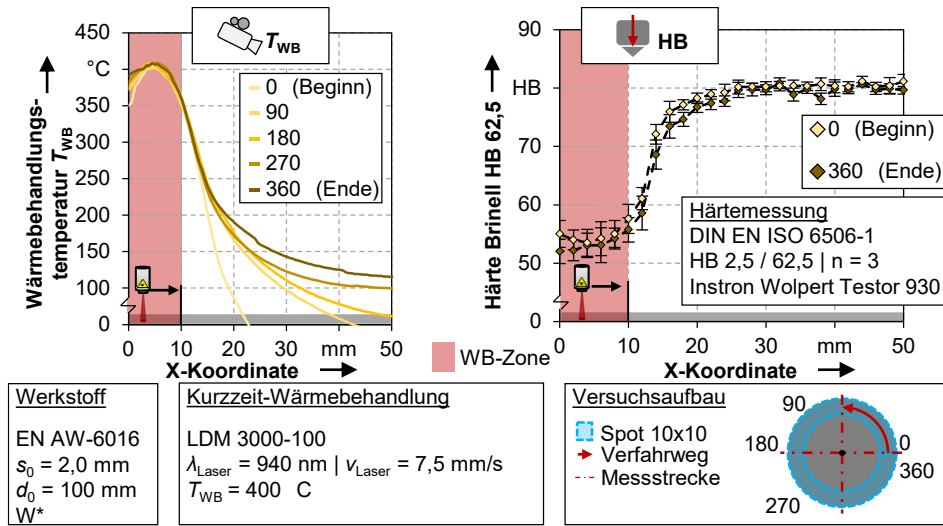


Bild 38: Temperatur- und Härteverlauf für lokal wärmebehandelte Aluminiumblechrenden in Abhängigkeit der Lage der Messstrecke

Diese lässt sich durch eine fehlende Wärmeleitung und die Isolation durch die umgebende Luft am Bauteilrand auf der einen und der Wärmeabfuhr in die Rondenmitte auf der anderen Seite begründen. Im Rahmen der Temperaturmessung an ausgewählten Versuchsbauteilen in einem Messbereich von 100 °C bis 400 °C kann eine auf den Mittelwert von 390 °C gestiegene Maximaltemperatur am Bauteilrand nach einem Umlauf identifiziert werden, womit sich die WEZ I auf einen Bereich kleiner 1 mm reduziert. Auf der Innenseite der Wärmebehandlung kann die eingebrachte Wärmeleistung in die zu Prozessbeginn kalte Bauteilmitte abgeführt werden. Mit zunehmender Wärmebehandlungsdauer steigt somit die mittlere Maximaltemperatur im Zentrum der Ronde bis auf 120 °C an. Ebenso kann eine Vergrößerung der WEZ II von 5 mm auf 9 mm für Temperaturen über 200 °C im Laufe des Wärmebehandlungsprozesses identifiziert werden. Zur Bestätigung des Einflusses des Temperaturgradienten werden weiterhin für den Prozessbeginn (0°) sowie das Prozessende (360°) Härtemessungen durchgeführt. Im direkten Wärmebehandlungsbereich bis 10 mm liegen durchschnittliche Härtewerte von  $53,4 \pm 1,9$  HB und  $52,8 \pm 2,1$  HB vor, wobei im Rahmen der Standardabweichung kein signifikanter Einfluss nachgewiesen werden kann.

Eine Vergrößerung der WEZ II bis zur Erreichung der Ausgangsfestigkeit kann durch eine Verschiebung der Kurve in Richtung Rondenmitte tendenziell erkannt werden, allerdings ist diese ebenfalls als nicht signifikant ein-

zustufen. Bei einer Einstufung der gestiegenen Temperatur in der Bauteilmitte auf Basis der in Bild 35 aufgezeigten beginnenden Reduzierung der Härtewerte infolge der Wärmeleitung ab einem Wert von  $T_{WB} > 200\text{ °C}$  liegt kein merklicher Einfluss auf die Eigenschaftsgradierung vor. Jedoch gilt es, diesen für längere Wärmebehandlungsdauern durch beispielsweise komplizierte Layouts zunehmenden Einfluss zu berücksichtigen. Da die übertragene Wärmeleistung nach dem Fourierschen Gesetz maßgeblich von der vorliegenden Temperaturdifferenz abhängt [212], reduziert sich die abzuführende Wärmeleistung mit zunehmender Erwärmung des Rondenzenentrums. Deshalb ist mit einer Vergrößerung der WEZ II und einer zunehmenden Beeinflussung der Härteverteilung bei längeren Wärmebehandlungsdauern und Energieeinträgen zu rechnen. Ein möglicher Lösungsansatz, welcher im Rahmen der weiterführenden Versuche zur Stoffflusssteuerung in Kapitel 7 Anwendung findet, ist die stufenweise Wärmeeinbringung durch unterbrochene Wärmebehandlungslayouts. Dies steht zwar einem industrienahen Einsatz entgegen, ermöglicht jedoch eine Minimierung der WEZ für den Untersuchungsgegenstand der Arbeit.

### ***Bewertung der Möglichkeit zur lokalen Eigenschaftsgradierung***

Zusammenfassend können aufbauend auf den zuvor erzielten Ergebnissen hinsichtlich der lokalen Eigenschaftsgradierung unter Berücksichtigung werkstoff- und halbzeugseitiger Randbedingungen allgemeingültige Erkenntnisse abgeleitet werden. Im Rahmen des laserinduzierten Wärmeeintrags kann in Verfahrerrichtung des Lasers eine homogene Temperatur- und folglich auch Härteverteilung im direkten Wärmebehandlungsbereich realisiert werden. Dies wird durch die integrierte Leistungsregelung der Laserquelle in einem Regelkreis mit einer Off-Axis Temperaturmessung mittels Pyrometer sichergestellt. Folglich kann die Einsatzfähigkeit der Wärmebehandlungsmethode zur Einstellung definierter Temperatur- und Festigkeitswerte von unterschiedlichen Wärmebehandlungslayouts in Längsrichtung bestätigt werden.

Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Aluminium muss zudem die Ausbildung einer Wärmeeinflusszone quer zur Verfahrerrichtung der Laserquelle berücksichtigt werden. Diese lässt sich anhand der Temperatur- und Härteverteilung in zwei unterschiedliche Bereiche gliedern. In der WEZ I wird die definierte Temperatur durch eine geringfügig inhomogene Leistungsverteilung der Laserstrahlung und der Wärmeableitung in der direkten Wärmebehandlungsfläche nicht erreicht ( $T_{soll} < T_{ist}$ ). Im angrenzenden Werkstoff bildet sich analog zum klassischen Schweißen eine nach außen hin geringer ausgeprägte Wärmeeinflusszone

WEZ II aus. Diese kann wiederum in einen thermischen und infolge der hohen Energieeinbringung auch in einen mechanischen sowie einen lediglich thermischen Einflussbereich untergliedert werden. Diese beiden Zonen sind maßgeblich von der Verfahrensgeschwindigkeit der Laserquelle und damit von der Dauer und Höhe des Energieeintrags abhängig, vgl. Bild 37. Mit einem hohen Vorschub von 15 mm/s kann zwar die WEZ II auf einen Bereich von etwa 5 mm reduziert werden, jedoch vergrößert sich die WEZ I in der direkten Wärmebehandlungsfläche, wodurch eine homogen vorliegende maximale Entfestigung nicht mehr realisiert werden kann. Im Gegensatz dazu wird für eine Verfahrensgeschwindigkeit von  $v_{\text{Laser}} = 1,0$  mm/s die WEZ I auf wenige mm reduziert, wobei aufgrund des lang andauernden Energieeintrags selbst am Bauteilrand eine Temperatur von 300 °C erfasst wird. Ebendiese Bereiche konnten mittels Härtemessung bestätigt werden. Weiterhin gilt es, einen Temperatur- und Festigkeitsgradienten in Blechdickenrichtung zu berücksichtigen, welcher mittels Temperatur- und Härtemessung auf der Bauteilunterseite identifiziert werden konnte. Gerade bei einer sehr hohen Verfahrensgeschwindigkeit von 15 mm/s liegt die erreichbare Maximaltemperatur auf der Unterseite bei nur etwa 320 °C. Dies lässt sich durch die Wärmeabfuhr in Blechbreitenrichtung und einer daraus folgenden Homogenisierung der Temperaturverteilung in Blechdickenrichtung begründen. Bei 1,0 mm/s liegt ebenfalls ein Aufheizen der gesamten Probe auf Werte über 300 °C vor. Hier kann im Sinne einer späteren Anwendung nicht mehr von einer lokalen Eigenschaftsgradierung gesprochen werden.

Als Kompromiss aus einer möglichst lokal auftretenden Wärmeeinflusszone in der Blechebene und einer Sicherstellung der gewünschten Entfestigung über die gesamte Wärmebehandlungsfläche wird  $v_{\text{Laser}} = 7,5$  mm/s für die untersuchte Legierung in Abhängigkeit der Blechdicke und der Laserspotgröße von 10 x 10 mm definiert. Dabei kann mit einer WEZ II von etwa 5 mm eine ausreichende Auflösung realisiert und gleichzeitig eine homogene Entfestigung von 36% erreicht werden. Dieser Wert deckt sich mit den Ergebnissen der Reduzierung der Dehngrenze aus den Zugversuchen.

Im Sinne einer ganzheitlichen Qualifizierung wurde im letzten Abschnitt der Einfluss eines kreisrunden Wärmebehandlungslayouts und die Auswirkung der Wärmeleitung im fortlaufenden Prozess bei der Anwendung auf Blechplatinen mit einem Außendurchmesser von  $D = 100$  mm untersucht. Dabei konnte einerseits eine Zunahme der Homogenität des Temperaturverlaufs in der direkten Wärmebehandlungsfläche am äußeren Bauteilrand und andererseits eine zeitabhängige Erwärmung der Platinenmitte durch

eine länger andauernde Energieabfuhr identifiziert werden. Die Ausprägung des zeitabhängigen Temperaturgradienten kann durch die Isolationswirkung der umgebenden Luft am äußeren Bauteilrand sowie durch die Wärmeleitung in die zu Prozessbeginn kalte Probenmitte begründet werden. Für den untersuchten Fall erwärmt sich das Bauteilzentrum auf einen Mittelwert im Bereich von 120 °C, wobei dieser Temperaturbereich keinen signifikanten Einfluss auf die Ausbildung eines Härtegradienten hat. Unter den gegebenen Randbedingungen und Wahl der oben aufgeführten Parameter kann die Kurzzeit-Wärmebehandlung zielführend für eine lokale Entfestigung eingesetzt werden.

### 6.3 Zusammenfassende Bewertung

In diesem Kapitel konnte die Methode der lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung zur Einstellung von entfestigten Werkstoffzuständen eingesetzt und deren Wirkmechanismen im Kontext der Blechmassivumformung hinsichtlich mechanischer Eigenschaften und Auslagerungsverhalten ganzheitlich qualifiziert werden. Durch eine Übertragung auf Blechhalbzeuge mit Bewertung der laserparameterabhängigen Wärmeeinflusszonen und der Auswirkung auf den vorliegenden Härteverlauf mit dem Ziel der lokalen Eigenschaftsgradierung kann das aus der Blechumformung bestehende Prozessverständnis über die Ursache-Wirkbeziehung der lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung erweitert werden. Zusammenfassend wurden auf Basis der erzielten Ergebnisse folgende allgemeingültige Erkenntnisse bezüglich der Ursache-Wirkbeziehungen der Methode der laserinduzierten Kurzzeit-Wärmebehandlung unter Einfluss der charakteristischen Gegebenheiten der Blechmassivumformung abgeleitet:

#### ***Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften durch eine Kurzzeit-Wärmebehandlung***

Im Rahmen der experimentellen Analyse zu den resultierenden mechanischen Eigenschaften im Zugversuch konnte ein temperaturabhängiger Verlauf für die Festigkeitskennwerte identifiziert werden. Dieser lässt sich durch nacheinander oder teilweise parallel ablaufende Auflösungs- oder Bildungsprozesse von unterschiedlichen Ausscheidungen begründen. Eine maximale Entfestigung kann dabei in einem engen Temperaturbereich zwischen  $T_{WB} = 400 - 450$  °C festgestellt werden, welchen es im Rahmen der Prozessauslegung zielgerichtet einzustellen gilt. Im Gegensatz dazu werden die Gleichmaßdehnung sowie das Restverfestigungsvermögen in Form des Verfestigungsexponenten durch die lokale Anhäufung von Ausscheidungen und einer Lokalisierung von

plastischer Verformung an den Korngrenzen maßgeblich reduziert. Ein Einfluss auf die senkrechte Anisotropie kann nicht nachgewiesen werden. Insgesamt kann durch die untersuchte Wärmebehandlungsstrategie der zur Stoffflusssteuerung nötige Festigkeitsgradient umgesetzt und in Abhängigkeit der Temperatur charakterisiert werden.

### ***Verstärkung der Wirkmechanismen nach Überlagerung mit plastischer Deformation***

Bedingt durch die inhomogene Eigenschaftsverteilung infolge des inkrementellen Taumelverfahrens, was auf Basis der numerischen Umformgradverteilung sowie von experimentellen Härteplots ausführlich in Kapitel 5 diskutiert wurde, bedarf es eines geeigneten Modellversuchs. Dabei steht neben der Sicherstellung der Herstellbarkeit von Prüfkörpern für normierte Charakterisierungsversuche vor allem die definierte Einstellung eines weitgehend vergleichbaren dreidimensionalen Spannungs- und Formänderungszustandes im Vordergrund. Im Vergleich zu klassischen Blechumformung werden in der Blechmassivumformung lokal teils sehr hohe Umformgrade erreicht. Weiterhin bedarf es zur Bewertung von stoffflusssteuernden Maßnahmen der einzelnen Betrachtung der Effekte und deren Wechselwirkung bei einer Überlagerung der untersuchten Prozessschritte. Beim Flachlängswalzen von Blechhalbzeugen wirkt dabei ein weitestgehend vergleichbarer Spannungs- und Formänderungszustand. Durch die quasi-inkrementelle Umformung und ein Abwälzen des Stempels über den Werkstoff beim Taumeln können bezüglich der Kinematik sowie der Spannungszustände Parallelen abgeleitet werden. Ein definierter Umformgrad innerhalb der Versuchsreihe mittels Flachlängswalzen wird durch gezielte Stichabnahme sichergestellt. Entsprechend eignet sich dieses Verfahren als Modellversuch für eine ganzheitliche Charakterisierung mit definiert einstellbaren Randbedingungen.

Im Rahmen der Charakterisierungsversuche von flachgewalzten Prüfkörpern können signifikant gestiegene Festigkeitswerte bei gleichzeitiger Reduzierung der Gleichmaßdehnung sowie des Verfestigungsvermögens infolge einer steigenden Versetzungsdichte, einer Gitterverzerrung und dem Aufstau an Korngrenzen identifiziert werden. Bei einer Überlagerung beider einzelner Vorgänge aus Wärmebehandlung und Walzen in einer Prozesskette kann eine gegenseitige Wechselwirkung beider jeweils wirkender Effekte aufgezeigt werden. Prinzipiell sind durch die Auflösung der festigkeitssteigernden Cluster im Aluminiumgitter die Werte für Dehngrenze und Zugfestigkeit im unverformten Zustand zwar signifikant reduziert, jedoch wirkt das Einbringen hoher Umformgrade mit steigender

Versetzungsdichte und einer Agglomeration an den Korngrenzen diesem Effekt entgegen. Diese festigkeitssteigernde Wirkung äußert sich bereits ab geringen Umformgraden und kann gegenüber der Entfestigung durch Wärmebehandlung als überwiegend eingestuft werden.

### ***Unterdrücktes Auslagerungsverhalten durch erhöhte Versetzungsdichte***

Mit Hinblick auf die Eigenschaften im späteren Anwendungsfall wurde zusätzlich das für ausscheidungshärtbare Aluminiumlegierungen charakteristische Auslagerungsverhalten in Kombination mit hoher plastischer Deformation analysiert. Durch eine temporär reversible Auflösung der festigkeitssteigernden Cluster erreichen die Festigkeitswerte in Abhängigkeit verschiedener Einflussparameter nach einer spezifischen Zeit Werte nahe des kaltausgelagerten Zustands T<sub>4</sub>. Abgeleitet aus den experimentellen Ergebnissen der Prozesskette aus Wärmebehandlung, Flachwalzen und Auslagerungszeit kann eine stark unterdrückende Wirkung festgestellt werden. Diese kann bereits für geringe Umformgrade nachgewiesen werden und lässt sich durch ein stark verzerrtes Gitter sowie eine daraus geänderte Ausscheidungskinetik begründen. Für nachfolgende Prozessschritte oder eine potentielle Anwendung erwächst dadurch für Blechmassivumformbauteile die Herausforderung einer homogenen Eigenschaftsverteilung trotz stark variierender lokaler Umformgrade.

Durch die im vorherigen Kapitel erfolgte Übertragung der Wärmebehandlungsmethode zur lokalen Eigenschaftsgradierung von Blechhalbzeugen konnten weiterführende Erkenntnisse abgeleitet und damit die ganzheitliche Qualifizierung der Wärmebehandlungsstrategie abgeschlossen werden.

### ***Ausprägung einer laserparameterabhängigen Wärmeeinflusszone in Blechbreiten- und Blechdickenrichtung***

Begründet in der hohen Wärmeleitfähigkeit von Aluminiumwerkstoffen können für die untersuchte Legierung in Abhängigkeit der Laserverfahrensgeschwindigkeit generell zwei unterschiedliche Wärmeeinflusszonen identifiziert werden. In WEZ I wird die definierte Solltemperatur in der direkten Wärmebehandlungsfläche aufgrund einer inhomogenen Leistungsverteilung der Laserstrahlung und der Wärmeableitung nicht erreicht ( $T_{\text{soll}} < T_{\text{ist}}$ ). Im angrenzenden Bereich bildet sich aufgrund einer höheren Temperatur im Vergleich zur Solltemperatur ( $T_{\text{soll}} > T_{\text{ist}}$ ) eine Wärmeeinflusszone WEZ II aus. Die Ausprägung ist dabei maßgeblich von der Verfahrensgeschwindigkeit der Laserquelle und dadurch von der Dauer und

Höhe des Energieeintrags abhängig. Auf der einen Seite kann mit einem geringen Vorschub von  $v_{\text{Laser}} = 1,0 \text{ mm/s}$  die WEZ I auf etwa 2 mm reduziert werden, wohingegen aufgrund des langen Energieeintrags die WEZ II bis zum Bauteilrand mit einer Temperatur von  $300 \text{ °C}$  ausgeweitet wird. Auf der anderen Seite kann für  $15 \text{ mm/s}$  eine umgedrehte Wirkungsweise identifiziert werden. Bedingt durch die deutlich kürzere Wärmebehandlungsdauer reduziert sich der Einflussbereich von WEZ II auf etwa 5 mm, während sich WEZ I auf 4 mm vergrößert und keine homogene Temperaturverteilung in der direkten Wärmebehandlungsfläche vorliegt. Der Einfluss der Temperaturverläufe auf die Festigkeitseigenschaften wird mittels der durchgeführten Härtemessungen bestätigt. Neben der Ausprägung der WEZ in Blechbreitenrichtung kann ebenfalls ein Temperatur- und Festigkeitsgradient in Blechdickenrichtung identifiziert werden. Bei sehr hohen Verfahrensgeschwindigkeiten von  $15 \text{ mm/s}$  wird lediglich eine Maximaltemperatur von etwa  $320 \text{ °C}$  auf der Unterseite erzielt. Begründet werden kann diese Differenz durch die Wärmeabfuhr in Blechbreitenrichtung bei gleichzeitiger Homogenisierung der Temperaturunterschiede über die Blechdicke. Im Gegensatz dazu erstreckt sich die WEZ II für eine Geschwindigkeit von  $1,0 \text{ mm/s}$  über die gesamte Probe, wobei bis zum Bauteilrand Temperaturen von über  $300 \text{ °C}$  vorliegen. Im Sinne einer späteren Anwendung ist diese Verfahrensgeschwindigkeit nicht zielführend für die lokale Eigenschaftsgradierung einzusetzen.

### ***Zeitliche Beeinflussung durch Wechselwirkung kreisrunder Layouts***

Mit dem Ziel der lokalen Eigenschaftsgradierung von Blechenden mittels rotationssymmetrischer Wärmebehandlungslayouts liegt der Fokus der Untersuchungen zudem auf der Identifikation der zeitlichen Wechselwirkung zwischen Prozessbeginn und -ende. Dabei bleibt das Zentrum des direkten Wärmebehandlungsbereichs aufgrund des Einsatzes einer integrierten Leistungsregelung mittels Temperaturmessung stets auf der definierten Solltemperatur von  $T_{\text{WB}} = 400 \text{ °C}$ . Infolge des andauernden Energieeintrags und der Energieabfuhr in die kalte Probenmitte kann eine zeitabhängige Erwärmung im Bauteilzentrum nachgewiesen werden. Mit einer maximalen mittleren Temperatur von  $120 \text{ °C}$  zu Prozessende kann eine leichte Asymmetrie der Temperaturverteilung gemessen werden, der Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften im Rahmen von Härtemessungen ist allerdings vernachlässigbar. Diese zeitabhängige Wechselwirkung gilt es jedoch im Rahmen der Auslegung von komplizierten oder lang andauernden Wärmebehandlungslayouts zu berücksichtigen und gegebenenfalls mit geeigneten Maßnahmen zu reduzieren.

### **Schlussfolgerungen für die Wärmebehandlungsstrategie zur Anwendung in der untersuchten Prozesskette**

Als Kompromiss aus der Sicherstellung der gewünschten Entfestigung über die gesamte Wärmebehandlungsfläche und einen möglichst lokal auftretenden Wärmeinflussbereich in Blechlängs- und Blechdickenrichtung wird  $v_{\text{Laser}} = 7,5 \text{ mm/s}$  für die untersuchte Legierung in Abhängigkeit der Blechdicke und der Laserspotgröße von  $10 \times 10 \text{ mm}$  als zielführend definiert. Dabei kann mit einer WEZ II von etwa  $5 \text{ mm}$  eine ausreichende Auflösung realisiert und gleichzeitig eine homogene Entfestigung von  $36\%$  umgesetzt werden. Dies kann prinzipiell mit den Ergebnissen der Reduzierung der Dehngrenze im Rahmen der Zugversuche verglichen werden. Ein Nachweis über den tatsächlich im Werkstoff vorhandenen Festigkeitsgradienten für ein spezielles Wärmebehandlungslayout wird systematisch anhand von Härtemessungen erbracht. Bei einer reduzierten Verfahrensgeschwindigkeit oder einer länger andauernden Wärmebehandlung infolge variierender Layouts muss der zeitliche Einfluss in Form einer Erwärmung der Randbereiche während der Prozesszeit berücksichtigt werden.

Zusammenfassend wurden folgende Erkenntnisse im Rahmen der grundlagenwissenschaftlichen Charakterisierung und einer Bewertung der resultierenden Ergebnisse über das im Stand der Technik zur Verfügung stehende Prozessverständnis hinaus abgeleitet:

- Ein Optimum der für die Stoffflusssteuerung essenziellen entfestigenden Wirkung durch eine lokale Kurzzeit-Wärmebehandlung der Legierung EN AW-6016 mit einer Ausgangsblechdicke von  $s_0 = 2,0 \text{ mm}$  wird bei einer Wärmebehandlungstemperatur von  $T_{\text{WB}} = 400 \text{ °C}$  erzielt. Mit einer resultierenden Dehngrenze von  $R_{p0,2} = 89,4 \pm 1,5 \text{ MPa}$  ist eine Entfestigung um  $37\%$  realisierbar, welche für eine lokale Eigenschaftsgradierung zur Verfügung steht.
- Durch eine Überlagerung der Prozessschritte einer lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung mit dem nachfolgenden Einbringen von hohen plastischen Deformationen im Flachlängswalzen als Modellprozess zur Simulation der Spannungs- und Formänderungszustände der Blechmassivumformung wird eine gegenseitige Beeinflussung beider einzelnen Effekte identifiziert. Dem festigkeitsreduzierenden Effekt einer erleichterten Versetzungsbewegung durch Auflösung der MgSi Cluster wirkt eine Erhöhung der Versetzungsdichte und ein Anstau an Korngrenzen entgegen. Dies äußert sich in einer signifikant gesteigerten Dehngrenze und Zugfestigkeit von  $R_{p0,2} = 278,6 \pm 9,1 \text{ MPa}$  und  $R_m = 286,8 \pm 10,8 \text{ MPa}$ ,

welche sich nur geringfügig von den Werten im kaltausgelagerten Zustand  $T_4$  unterscheiden. Daraus kann der positive Effekt der Kaltverfestigung als weitestgehend unabhängig von einer zuvor durchgeführten Ausscheidungsmodifikation im Rahmen einer Kurzzeit-Wärmebehandlung eingestuft werden.

- Bezogen auf die Gleichmaßdehnung liegt bei einer Überlagerung beider Prozessschritte ein sich verstärkender Effekt vor. Bedingt durch die temperaturabhängige Bildung von  $\beta''$ - und  $\beta'$ -Ausscheidungen und deren gitterverzerrende Wirkung sowie einer Agglomeration der Ausscheidungen an den Korngrenzen liegt eine reduzierte Gleichmaßdehnung im wärmebehandelten Zustand vor. Mit dem zusätzlichen Einbringen hoher plastischer Deformationen steigt die Versetzungsdichte signifikant an, wodurch die Gitterverzerrung steigt. Ebenso stauen sich die Versetzungen vermehrt an Korngrenzen an, was zu einer verbleibenden Gleichmaßdehnung von  $A_g = 1,85\% \pm 0,37\%$  bei einer Wärmebehandlungstemperatur von  $T_{WB} = 400\text{ °C}$  und einem nachfolgend eingebrachten Umformgrad von  $\phi = 1,0$  führt.
- Entgegen der Wirkungsweise einer nur temporär wirkenden Entfestigung infolge einer Kurzzeit-Wärmebehandlung in konventionellen Blechumformoperationen zeigt sich beim nachgelagerten Einbringen von hohen plastischen Deformationen ein nahezu vollständig unterdrücktes Auslagerungsverhalten. Dieses lässt sich durch eine veränderte Ausscheidungskinetik infolge der großen Verzerrung des Kristallgitters durch eine steigende Versetzungsdichte erklären. Ein Überspringen der Bildung von festigkeitssteigernden Ausscheidungen verhindert einen erneuten Anstieg der Festigkeitskennwerte. Dieser Effekt des unterdrückten Auslagerungsverhaltens lässt sich weiterhin auf die Gleichmaßdehnung und den Verfestigungsexponenten übertragen. Die an den Korngrenzen angestauten Versetzungen wirken dabei als Keimstellen für die Bildung von Ausscheidungen, wodurch die Inhomogenität und die Gitterverzerrung weiter steigen.

Zur Anwendung im Sinne einer lokalen Eigenschaftsgradierung von Blechhalbzeugen mit dem Ziel der Stoffflusssteuerung lassen sich weiterhin folgende Erkenntnisse auf Basis der Versuchsdurchführung sowie Ergebnisauswertung ableiten:

- In Abhängigkeit der Laserparameter bildet sich eine charakteristische Wärmeeinflusszone im direkten sowie im indirekten Wär-

mebehandlungsbereich aus. Für die untersuchte Aluminiumlegierung EN AW-6016 mit einer Ausgangsblechdicke von  $s_0 = 2,0$  mm und einer Verfahrgeschwindigkeit von  $7,5$  mm/s wird dabei eine Wärmeeinflusszone von  $1 - 2$  mm im direkten Bereich erzielt. Die entfestigende Wirkung sinkt mit zunehmendem Abstand zur direkten Wärmebehandlungszone und hat ab einer Entfernung von etwa  $5$  mm keinen nachweisbaren Einfluss mehr auf die resultierende Härte. Unter Berücksichtigung des vorliegenden Untersuchungsgegenstandes wird diese Parameterkombination als Kompromiss zwischen einer homogenen Entfestigung im direkten Bereich und einer möglichst lokalen Wirkzone für die weiterführenden Untersuchungen ausgewählt.

- Bedingt durch das vergleichsweise geringe Gesamtbauteilvolumen mit einem Außendurchmesser von  $d_0 = 100$  mm wurde im Rahmen der Übertragung auf kreisrunde Wärmebehandlungslayouts eine zeitliche Beeinflussung des Temperaturgradienten über das Bauteil identifiziert. Basierend auf der hohen Wärmeleitung von Aluminium erwärmen sich auch die nicht direkt wärmebehandelten Bauteilbereiche mit zunehmendem Energieeintrag auf Temperaturen von knapp über  $100$  °C. Auf Basis von Härtemessungen kann dieser Effekt für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand mit definiertem Halbzeugdiameter und festgelegter Verfahrgeschwindigkeit allerdings als vernachlässigbar eingestuft werden.

Nach einer ganzheitlichen Qualifizierung der Kurzzeit-Wärmebehandlungsmethode hinsichtlich mechanischer Eigenschaften sowie Auslagerungsverhalten und einer Übertragung auf die lokale Eigenschaftsgradierung von prozessangepassten Halbzeugen für das Taumeln wird die Wirksamkeit zur Stoffflusssteuerung im Formgebungsprozess im nachfolgenden Kapitel überprüft.



## 7 Einsatz einer Kurzzeit-Wärmebehandlung zur Stoffflusssteuerung im Taumelprozess

Zur Erarbeitung von geeigneten Wärmebehandlungsstrategien und Layouts zur Anwendung als stoffflusssteuernde Maßnahme im untersuchten Taumelprozess und zur ganzheitlichen Bewertung der Wirkungsweise auf die resultierenden geometrischen Eigenschaften und Stoffflussanteile wird auf die spannungs- und stoffflussbasierte Modellvorstellung aus Kapitel 5 zurückgegriffen. Damit ist es möglich, auf Basis der vorliegenden mechanischen Bauteileigenschaften und der identifizierten Stoffflussanteile im Referenzprozess eine lokale Eigenschaftsgradierung mit dem Ziel einer Maximierung der Aufdickungshöhe bei gleichzeitiger Vermeidung der Gratbildung auszulegen und umzusetzen. Um dieses Ziel zu erreichen, wird die erarbeitete Strategie zur Kurzzeit-Wärmebehandlung als stoffflusssteuernde Maßnahme im Taumelprozess unter Berücksichtigung der Charakterisierungsversuche bezüglich der resultierenden mechanischen Eigenschaften nach einer Kurzzeit-Wärmebehandlung mit nachfolgender Einbringung plastischer Deformation eingesetzt.

Dazu bilden die in Kapitel 5 identifizierten Spannungs- und Formänderungszustände die Grundlage zur Ableitung zielführender Wärmebehandlungsstrategien. Eine Einsatzfähigkeit der Wärmebehandlungsstrategien wird dabei jeweils durch Analyse der resultierenden Härteverteilung in Korrelation mit der gemessenen Oberflächentemperatur während der Wärmebehandlung analog der Analyse in Abschnitt 6.2 sichergestellt. Zur Bewertung des Potentials einer Stoffflusssteuerung werden wärmebehandelte Platinen im Taumelprozess umgeformt und anschließend hinsichtlich ihrer Blechdickenverteilung sowie der auftretenden Stoffflussanteile analysiert. Aufbauend auf diesen Untersuchungen werden zugrundeliegende Wirkmechanismen bezüglich des Stoffflusses in der Blechmassivumformung identifiziert. Mittels Analyse geometrisch unterschiedlich komplizierter Bauteileigenschaften werden die Übertragbarkeit und Skalierbarkeit dieser Wirkmechanismen sichergestellt, welche abschließend in einer holistischen Prozessbewertung zusammengefasst werden.

In Kombination mit der spannungs- und stoffflussbasierten Modellvorstellung des Taumelprozesses aus Kapitel 5 und der grundlagenwissenschaftlichen Erarbeitung der Wirkungsweise der Wärmebehandlung in der Blechmassivumformung wird eine Auslegungsmethode zur gezielten Einstellung

der lokalen Eigenschaftsgradierung mit dem Ziel der Stoffflusssteuerung abgeleitet. Die zugrundeliegende methodische Vorgehensweise innerhalb dieses Kapitels ist in Bild 39 dargestellt.

Dabei liegt der Fokus neben der Referenzgeometrie auf dem Einfluss einer Fließwegverlängerung durch eine Durchmesserergrößerung sowie auf der Wirkungsweise einer beidseitig eingebrachten Kavität. Weiterhin werden der Einfluss einer geänderten radialen Position der Kavität und die daraus resultierenden Stoffflussanteile sowie deren Steuerbarkeit analysiert. Durch eine abschließende Prozessbewertung der Wärmebehandlungsstrategien werden das Einsatzpotential in der Blechmassivumformung aufgezeigt und die erarbeiteten Wirkmechanismen im Rahmen einer Auslegungsmethode zusammengefasst.

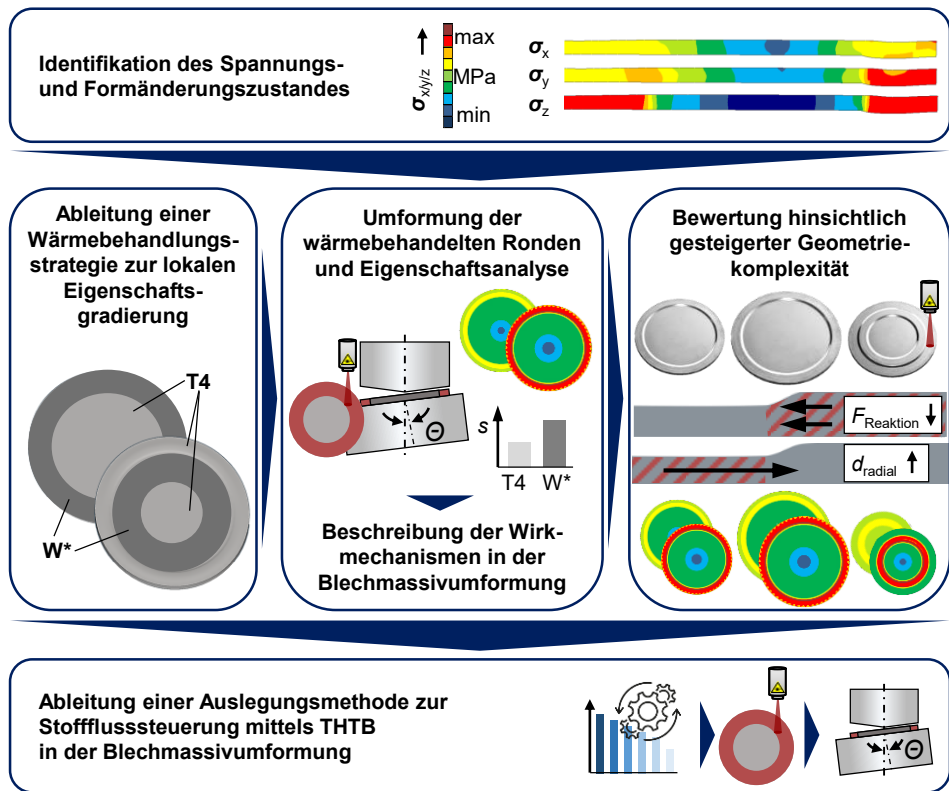


Bild 39: Methodische Vorgehensweise in Kapitel 7 zur holistischen Prozessbewertung und Ableitung einer Auslegungsmethode zur Stoffflusssteuerung in der Blechmassivumformung

## 7.1 Einsatz wärmebehandelter Platinen im Taumelprozess und Ableitung der Wirkmechanismen

In diesem Kapitel erfolgt die experimentelle Untersuchung zur Wirkungsweise einer lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung auf die erzielbaren Stoffflussanteile sowie die resultierende Blechdickenverteilung im Referenzprozess. Dazu werden wärmebehandelte Ronden mittels zuvor eingebrachten Wärmebehandlungslayouts im Taumelprozess umgeformt und abschließend analog der Vorgehensweise in Kapitel 5 auf ihre resultierenden Eigenschaften untersucht. Eine Übertragbarkeit zwischen den Referenzversuchen im Zustand T<sub>4</sub> und der Versuche mit eingebrachter Wärmebehandlung wird dabei durch Verwendung derselben Prozessparameter sichergestellt. Grundlage für die Wahl der Wärmebehandlungslayouts mit dem Ziel einer lokalen Entfestigung bilden die erarbeitete spannungs- und stoffflussbasierte Modellvorstellung sowie die Möglichkeit der lokalen Eigenschaftsgradierung mittels lokaler Kurzzeit-Wärmebehandlung aus den vorangegangenen Kapiteln.

Für ein grundlegendes Prozessverständnis über die dreidimensional wirkenden Spannungs- und folglich die resultierenden Formänderungszustände werden die Radialspannung, die Tangentialspannung sowie die Axialspannung entlang des Bauteilquerschnitts für die Referenzgeometrie im Ausgangszustand mithilfe des validierten Simulationsmodells analysiert, siehe Bild 40. Die Auswertung erfolgt zur Bewertung der maximal wirkenden Spannungskomponenten bei einer Winkelanstellung von  $\Theta = 1,0^\circ$  und einer folglich minimalen Kontaktfläche. In dieser Kontaktzone liegt die primäre Umformzone, welche durch einen dreidimensionalen Druckspannungszustand geprägt ist. Bedingt durch die in axialer Richtung wirkende Umformkraft wird eine axiale Druckspannung induziert, welche ein betragsmäßiges Maximum von  $\sigma_{\text{axial}} = -1.132 \text{ MPa}$  im Mittelpunkt der Wirkfläche aufweist. Im Bereich der Werkzeugkavität sowie im Bauteilzentrum liegt kein direkter Stempelkontakt vor, weshalb hier keine axiale Komponente der Spannung nachweisbar ist. Infolge der konischen Stempelform, dem in axialer Richtung erfolgenden Eindringen zu Prozessbeginn und die radiale Kammerung durch die Matrizenwand wird zudem eine radiale Druckspannungskomponente induziert. Dieser Effekt wird durch das inkrementelle Anstellen des Taumelwinkels weiter verstärkt, wodurch eine radiale Druckspannung von  $\sigma_{\text{rad}} = -862 \text{ MPa}$  resultiert. Die abrollende Bewegung des Stempels über die Werkstückoberfläche in Umfangsrichtung resultiert weiterhin in einer tangentialen Druckspannungskomponente, welche ebenfalls im Mittelpunkt der primären

Umformzone einen Wert von  $\sigma_{\text{tang}} = -852 \text{ MPa}$  erreicht. Durch eine Überlagerung dieser drei Spannungskomponenten in der direkten Umformzone kommt es zu einem Stofffluss in radialer und tangentialer Richtung. Der Werkstoff wird sukzessive in das freie Kavitätvolumen des Gegenstempels verdrängt und bewirkt dort die gewünschte Aufdickung. An dieser Stelle liegt folglich ein zweidimensionaler Druckspannungszustand vor. Auf Basis dieser vorliegenden Spannungskomponenten gilt es im nachfolgenden Abschnitt die resultierenden Stoffflussanteile zu analysieren und zu bewerten.

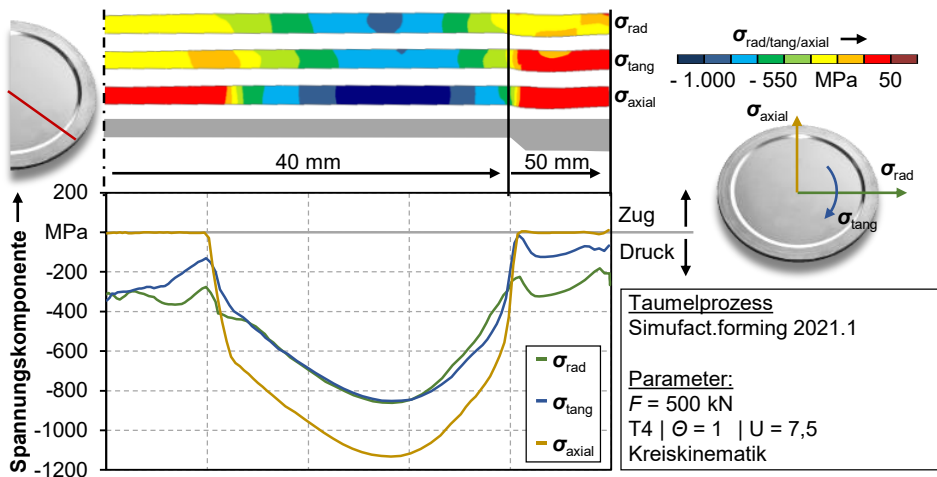


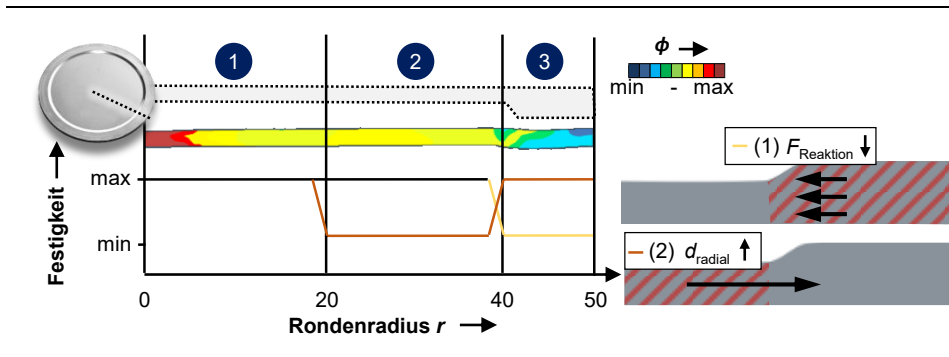
Bild 40: Numerische Identifikation der dreidimensional wirkenden Spannungskomponenten im radialen Bauteilschnitt für die Referenzgeometrie im Ausgangszustand T4

Aufbauend auf der erarbeiteten Modellvorstellung und den damit identifizierten Spannungskomponenten sowie Stoffflussanteilen der Referenzbauteile lassen sich drei unterschiedliche Bereiche untergliedern. Eine genaue Definition der unterschiedlichen Kriterien sowie die Abmessungen der einzelnen Bereiche sind in Tabelle 9 aufgelistet. Im Rondenzentrum (1) liegt der höchste Umformgrad vor, bedingt durch eine Ausdünnung infolge eines Prägeanteils zu Prozessbeginn. Direkt im Zentrum liegt ausschließlich ein axialer Stofffluss vor, welcher mit zunehmendem Radius in radialen Stofffluss übergeht, analog dem konventionellen Stauchen [79]. Durch die Quasi-Abrollbewegung in tangentialer Richtung bei Einsetzen der Taumelkinematik tritt zudem eine tangentiale Komponente auf, welche bis zur primären Umformzone in Mitte der Ausdünnung zunimmt. Da dieser Bereich weitestgehend durch das signifikant auftretende Center-Thinning [136] beeinflusst wird, soll die Festigkeit in diesem Bereich nicht reduziert werden. Im anschließenden Bereich (2) liegt eine moderate Ausdünnung

mit mittleren Umformgraden vor. Bedingt durch die einsetzende Winkelanstellung und ein inkrementelles radiales sowie tangenciales Verdrängen des Werkstoffs liegt hier die primäre Umformzone. Dabei wirkt der Fließweg bis zu Kavität stoffflusshemmend, weshalb als Ziel einer Wärmebehandlung in diesem Bereich ein begünstigter Stofffluss durch eine lokale Entfestigung und gleichzeitig eine erleichterte Plastifizierung definiert wird.

Tabelle 9: Definitionen von zu untersuchenden Wärmebehandlungszonen sowie deren Eigenschaftsausprägung

Kriterium	Bereich 1 „Zentrum“	Bereich 2 „Ausdünnung“	Bereich 3 „Aufdickung“
Abmessungen	< 20 mm	20 mm - 40 mm	> 40 mm
Resultierende Blechdicke	Starke Ausdünnung	Moderate Ausdünnung	Aufdickung
Umformgrad	Am höchsten	moderat	niedrig
Stoffflussanteile	Radial + tangential steigend	Radial steigend + tangential abnehmend	Radial sinkend, Gratbildung
Wirkungsweise	Center-Thinning induziert durch Prägevorgang	Ausprägung der primären Umformzone	Fließbehinderung durch Kavität und Matrize
Ziel der Wärmebehandlung	-	(2) Begünstigter Stofffluss	(1) Reduzierter Fließwiderstand



Im direkten Bereich der Aufdickung (3) gilt es, ein möglichst großes Materialvolumen bereitzustellen. Durch die Umlenkung des Werkstoffs um die Einlaufschräge in die Kavität liegt hier ein lokales Maximum des Umformgrades sowie der radialen Verschiebung vor. Infolge der Fließbehinderung in Form des freien Volumens sowie der Kammerung in der Matrize sinkt der radiale Stofffluss bis zur Matrizenwand ab. Ziel einer Wärmebehandlung in diesem Bereich ist folglich eine Reduzierung der Fließbehinderung durch lokale Entfestigung. Hierbei muss allerdings die kritische Gratbildung beachtet werden, für welche dieser radiale Festigkeitsgradient begünstigend wirkt. Im Rahmen der Versuche wird diese Gradierung zur Bestätigung der Wirkungsweise als zweite Variante untersucht und dient als weitere Stützstelle im Versuchsplan. Bei der lokalen Auflösung der gewählten Wärmebehandlungslayouts wird die minimal mögliche Spotgröße berücksichtigt. Folglich lässt sich die Wärmebehandlungszone für die beiden unterschiedlichen Zielstellungen auf die Referenzgeometrie übertragen. Dabei sollen jeweils der begünstigte Stofffluss oder der reduzierte Fließwiderstand gezielt gesteuert werden. Die definierten Wärmebehandlungslayouts sowie das Ergebnis der Temperaturmessung mittels Thermokamera sind in Bild 41 dargestellt. Zur Applikation der Wärmebehandlungslayouts auf die Blechhonden kommt der in Kapitel 4 beschriebene Aufbau zum Einsatz. Die festgelegten Bereiche der Ausdünnung sowie der Aufdickung werden dabei als Kreisbahn mit einem Radius von  $r = 30\text{ mm}$  sowie  $r = 45\text{ mm}$  mit jeweils einer Kantenlänge von  $20\text{ mm}$  und  $10\text{ mm}$ , definiert. Im ausgedünnten Bereich soll so die Wärmeeinflusszone in die Aufdickung reduziert werden.

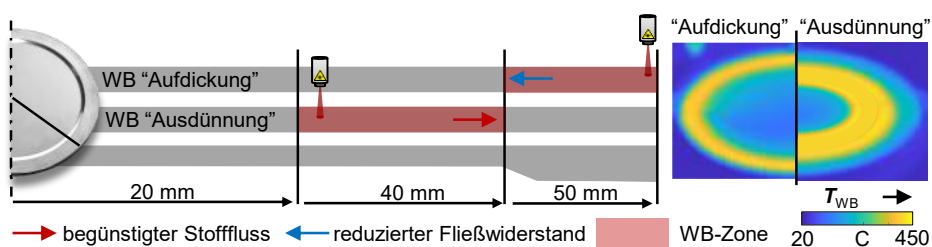


Bild 41: Definierte Wärmebehandlungszonen mit dem Ziel eines begünstigtem Stoffflusses oder eines reduzierten Fließwiderstands und Ergebnis der thermographischen Aufnahmen

Zur Sicherstellung der gewünschten Eigenschaftsgradierung mittels festen und entfestigten Bereichen sowie zur Bewertung der Wärmeeinflusszone werden der gemessene Temperaturverlauf sowie die resultierenden Härte-  
werte in Bild 42 für beide Layouts gegenübergestellt. Bei einer lokalen

Erwärmung im äußeren Randbereich wird die Wärmeenergie ausschließlich in Richtung des kalten Rondenzentrums abgegeben und die Platine erwärmt sich als Ganzes auf etwa 75 °C. Die WEZ II kann auf Basis der Ergebnisse aus Abschnitt 6.2 auf etwa 4 bis 5 mm über den eigentlichen Wärmebehandlungsbereich hinaus geschätzt werden. Während der Umsetzung von WB-Layout „Ausdünnung“ mit einem wärmebehandelten Bereich zwischen  $r = 20 - 40$  mm kann positionsbedingt eine beidseitig ausgeprägte WEZ II festgestellt werden. Durch die folglich auch beidseitig stattfindende Energieabfuhr wird insgesamt mehr Laserleistung aufgebracht, um die Zieltemperatur zu erreichen. Dies äußert sich sowohl in einer Erwärmung des Rondenzentrums als auch des äußeren Randbereichs auf 150 °C. Zur lokalen Begrenzung der Entfestigung in der WEZ II wird bewusst eine Vergrößerung der WEZ I durch eine verkleinerte Spotgröße in Kauf genommen, diese liegt bei etwa 5 bis 6 mm. Neben der Temperatur wird die Eigenschaftsgradierung ebenfalls durch Auswertung der Härte- werte entlang des Bauteilradius analysiert.

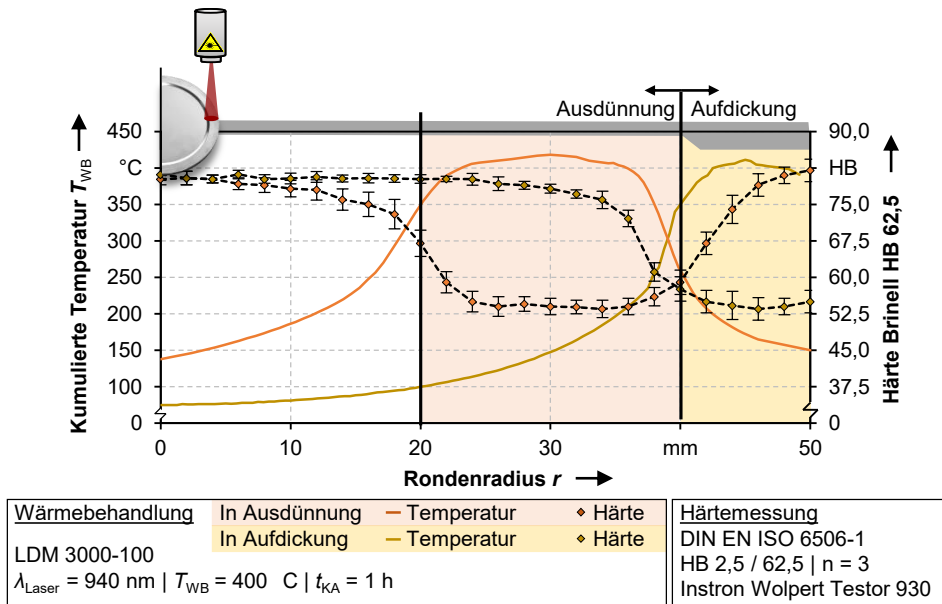


Bild 42: Temperaturverteilung und resultierender Härteverlauf der Referenzgeometrie in Abhängigkeit des Wärmebehandlungslayouts

Durch den Einsatz der Wärmebehandlung kann die Härte für beide Layouts um etwa 35% reduziert werden, was sich prinzipiell mit den Ergebnissen einer Wärmebehandlung bei 400 °C aus Abschnitt 6.2 deckt. Während für beide Layouts die minimalen Härte werte im Zentrum der Wärmebe-

handlung erzielt werden, wirken die Wärmeeinflusszonen anhand der Zunahme der Härtewerte auf einem Bereich zwischen 5 - 10 mm. Anhand der Temperaturverteilung sowie der resultierenden Härtewerte können die Einsatzfähigkeit der Wärmebehandlungsmethode sowie eine ausreichende geometrische Auflösung für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand bestätigt werden.

Die lokal wärmebehandelten Ronden werden im Anschluss zur Bewertung der Stoffflusssteuerung im Taumelprozess umgeformt. Die geometrischen Eigenschaften in Form der Blechdicke sind in Bild 43 sowohl für die Referenz mit umlaufender Aufdickung und  $D = 100$  mm ohne Wärmebehandlung als auch für die beiden Wärmebehandlungslayouts gegenübergestellt. Im Vergleich zur Referenz zeigen beide wärmebehandelten Ronden eine größere Ausdünnung im Rondenzentrum, was prinzipiell durch eine lokal reduzierte Festigkeit infolge der Wärmebehandlung erklärt werden kann. Dabei wird im konventionellen Prozess eine minimale Blechdicke in der Ausdünnung von  $s_{\min} = 1,73$  mm und eine mittlere Blechdicke in der Aufdickung von  $s_a = 2,14 \pm 0,02$  mm erzielt. Eine Gratbildung kann, wie in Abschnitt 5.2 aufgezeigt, für die Referenzrunde im Zustand T4 aufgrund der geringen Ausprägung nicht zielführend ermittelt werden.

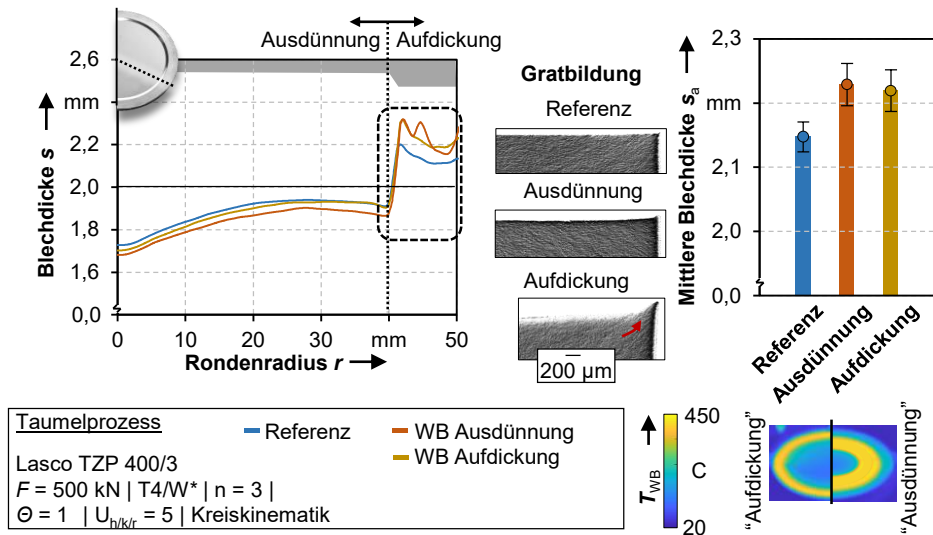


Bild 43: Blechdickenverlauf, mittlere Blechdicke in der Aufdickung sowie Schlibfbilder der Gratausprägung der Referenz sowie der wärmebehandelten Bauteile

Durch eine lokale Entfestigung im Bereich der Ausdünnung zwischen  $20 \text{ mm} < r < 40 \text{ mm}$  wird die minimale Blechdicke im Rondenzentrum auf  $s_{\min} = 1,68$  mm reduziert. Durch die axial einwirkende Umformkraft tritt

eine gesteigerte Ausdünnung im Rondenzentrum auf. Diese reduzierte Blechdicke setzt sich bis zum Beginn der Aufdickung mit einem gleichermaßen reduzierten Verlauf fort. Der Werkstoff wird radial in die Kavität verdrängt und bewirkt dort eine Erhöhung der Aufdickung auf  $s_a = 2,23 \pm 0,03$  mm, wobei ein begünstigter Stofffluss zum Tragen kommt. Bei Analyse der Gratöhe in den ebenfalls in Bild 43 gezeigten Schlibbildern kann die Wirkungsweise der lokalen Gradierung nachvollzogen werden. Trotz einer erhöhten Aufdickungshöhe infolge eines begünstigten Stoffflusses aus der Rondennitte kann eine ausgeprägte Gratbildung unterdrückt werden. Eine Reduzierung der lokal wirkenden Spannung durch eine global verringerte Umformkraft bei unveränderter Werkstofffestigkeit im Randbereich kann als Begründung angeführt werden.

Durch eine umlaufende Entfestigung im Aufdickungsbereich zwischen  $40 \text{ mm} < r < 50 \text{ mm}$  soll der lokal wirkende Fließwiderstand in die Kavität reduziert werden. Mit einer minimalen Blechdicke von  $s_{\min} = 1,70$  mm im Rondenzentrum liegt dieses Bauteil zwischen der Referenz und dem zuvor analysierten Bauteil mit einer Wärmebehandlung des ausgedünnten Bereichs. In Kombination mit einer mittleren Blechdicke in der Aufdickung von  $s_a = 2,22 \pm 0,03$  mm lässt sich festhalten, dass mit einer lokalen Entfestigung des Zielbereichs der Materialverteilung durch lokale Reduzierung der wirkenden Reaktionskräfte ebenso eine signifikant gesteigerte Aufdickung erzielt werden kann, wenn auch tendenziell geringer als bei einer Wärmebehandlung im ausgedünnten Bereich. Am Bauteilrand kann aufgrund eines reduzierten Formänderungswiderstands infolge der Wärmebehandlung die aus Abschnitt 5.2 identifizierte Prozessgrenze einer kritischen Gratbildung nachgewiesen werden. Dabei wirkt sich die lokale Entfestigung im Randbereich zwar positiv auf den Stofffluss aus, allerdings begünstigt die Festigkeitsverteilung mit einem entfestigten Randbereich unter Wirkungsweise des als maßgeblich für die Gratbildung eingestuften Gradienten aus lokal wirkender Druckspannung und vorliegendem Formänderungswiderstand die Gratbildung, wie in Bild 43 gezeigt.

Zur Bewertung einer lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung als stoffflusssteuernde Maßnahme werden neben den Zielgrößen der maximal erreichbaren Blechdicke im Aufdickungsbereich sowie der Ausprägung des Grats zudem der radiale sowie tangentielle Stofffluss in Form der jeweiligen Verschiebung der Rasterpunkte während der Umformung ausgewertet. Der Verlauf der radialen Punktverschiebung über den Bauteilradius ist für das Referenzbauteil ohne lokale Eigenschaftsgradierung sowie für beide Wärmebehandlungslayouts in Bild 44 gegenübergestellt. Im Bauteilzentrum kann unabhängig vom Untersuchungsfall aufgrund der axialen

Zustellung kein radialer Stofffluss festgestellt werden. Mit zunehmendem Radius kann der Unterschied zwischen Referenzbauteil und den Bauteilen mit Wärmebehandlung detektiert werden. Während sich die radiale Punktverschiebung beim Referenzbauteil bis  $r = 30$  mm einem Wert von  $d_x = 0,8$  mm annähert und sich anschließend ein Maximum von  $d_{x\max} = 0,88 \pm 0,04$  mm am Einlaufbereich der Kavität ausbildet, erreichen die Kurven beider lokal gradierten Bauteile mit größerer Steigung ihren jeweiligen Maximalwert am Einlaufbereich. Bis zu einer radialen Position von  $r = 30$  mm kann ein vergleichbares Niveau beider Kurven erkannt werden. Anschließend werden maximale Werte für die Wärmebehandlung der Aufdickung von  $d_{x\max} = 1,19 \pm 0,05$  mm und für die Ausdünnung von  $d_{x\max} = 1,32 \pm 0,05$  mm. Durch den gesteigerten radialen Stofffluss kann die erhöhte Blechdicke in Bild 43 erklärt werden. Nach Erreichen der Maximalwert fallen alle drei Kurven sukzessive in einem übertragbaren Verlauf zum Bauteilrand hin ab.

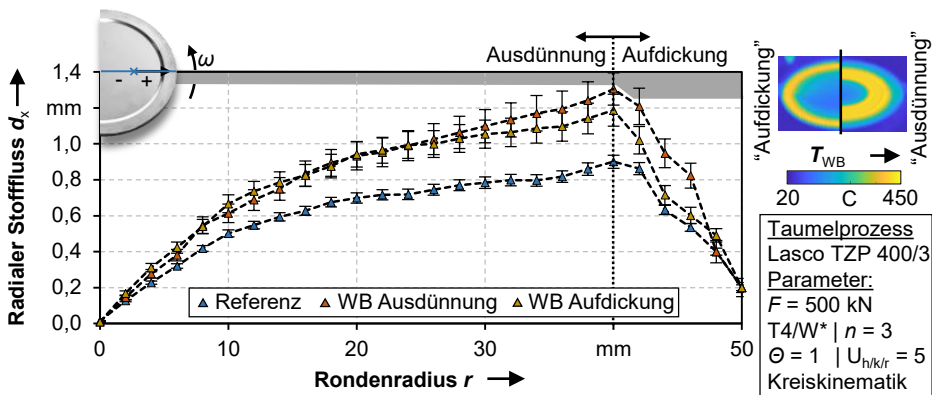


Bild 44: Radialer Stofffluss über den Bauteilradius für das Referenzbauteil sowie für beide Wärmebehandlungslayouts

Wie bereits in Kapitel 5 im Rahmen der numerisch-experimentellen Analyse nachgewiesen, resultiert während des Taumelns eine aufgrund der eingeleiteten Kinematik induzierte Abrollbewegung in Umfangsrichtung. Dabei wird Werkstoff in tangentialer Richtung inkrementell vor dem Stempel hergeschoben. Dieser Stoffflussanteil wird ebenso für die drei Varianten über den Radius ausgewertet und ist in Bild 45 dargestellt. Da dieser Stoffflussanteil maßgeblich vom Formänderungswiderstand im mittleren Bereich der Ronde zwischen  $10 \text{ mm} < r < 30 \text{ mm}$  abhängt, kann die tangentiale Punktverschiebung im Vergleich zur Referenz mit entsprechender Wärmebehandlung im Ausdünnungsbereich von  $d_{y\max} = 0,41 \pm 0,03$  mm auf  $d_{y\max} = 0,83 \pm 0,05$  mm erhöht werden, was einer Verdopplung entspricht.

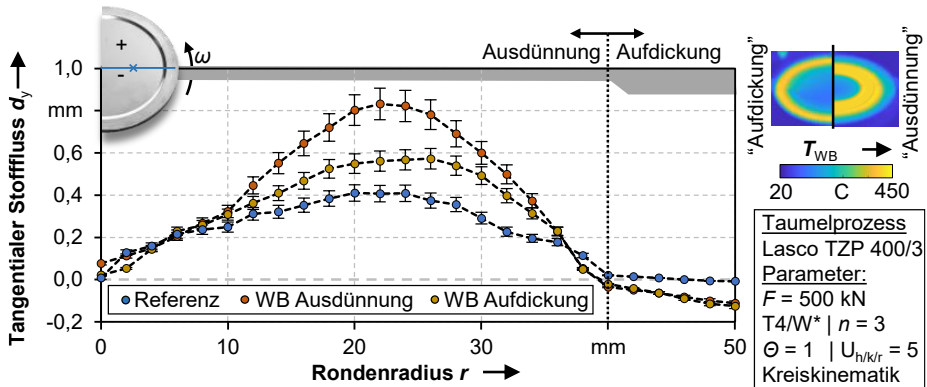


Bild 45: Tangentialer Stofffluss über den Bauteilradius für das Referenzbauteil sowie für beide Wärmebehandlungslayouts

Für den tangentialen Anteil der Wärmebehandlung in der Aufdickung kann eine Erhöhung auf  $d_{y\max} = 0,57 \pm 0,03$  mm erzielt werden. Bis zum Beginn der Kavität nähern sich alle drei Kurven wieder der Nulllinie an, was gleichbedeutend mit einem fehlenden tangentialen Stofffluss gesetzt werden kann. Dies lässt sich durch die scharfe Umlenkung um die Einlaufschräge in radialer Richtung und durch den gleichzeitig abrupt wegfallenden Stempelkontakt nach Kavitätsbeginn erklären. Bis zum Bauteilrand kann durch größtenteils fehlenden Stempelkontakt in Folge des freien Werkzeugvolumens keine weitere tangential Materialverschiebung umgesetzt werden.

### **Bewertung im Kontext der erarbeiteten Modellvorstellung**

Ein abschließender Vergleich zwischen dem zielführenden Wärmebehandlungslayout im ausgedünnten Bereich vor der Kavität mit den Ergebnissen unter Anwendung unterschiedlicher Umformkräfte im Rahmen der adaptierten numerischen Simulation aus Abschnitt 5.1 zeigt das Potential zur Stoffflusssteuerung im untersuchten Prozess auf. Die mittlere Blechdicke in der Aufdickung ist als Zielgröße in Bild 46 vergleichend dargestellt. Infolge einer gesteigerten Stoffflusskontrolle durch den Einsatz der lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung lässt sich eine mittlere Blechdicke von  $s_a = 2,23 \pm 0,03$  mm bei einer Umformkraft von  $F = 500$  kN erzielen. Dieser Wert ist im Rahmen der Standardabweichung direkt mit der mittleren Blechdicke für eine Umformkraft von  $F = 800$  kN mit  $s_a = 2,24 \pm 0,04$  mm vergleichbar. Dies entspricht einer theoretischen Kraftreduktion von 38%. Weiterhin ist beim Vergleich der Gratausbildung keine signifikante Steigerung im Vergleich zur Referenz nachweisbar.

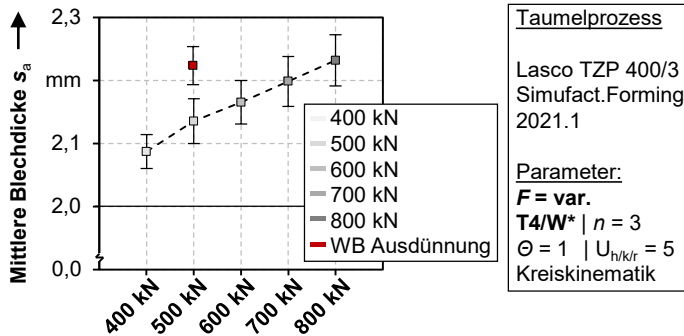


Bild 46: Mittlere Blechdicke in der Aufdickung für variierende Umformkräfte im konventionellen Prozess im Vergleich zur Anwendung einer lokalen Eigenschaftsgradierung mittels Wärmebehandlung

Beim Vergleich der Verläufe der radialen sowie tangentialen Stoffflussanteile lässt sich den Ergebnissen für die Methode der lokalen Eigenschaftsgradierung durch Kurzzeit-Wärmebehandlung eine gleichbedeutende Wirkungsweise wie durch eine gesteigerte Umformkraft zuordnen, siehe Bild 47. Dabei werden bei der radialen Verschiebung ein nahezu identischer Verlauf sowie Maximalwerte im Bereich einer Umformkraft von  $F = 800$  kN erreicht. Durch diesen Vergleich können zudem die gleichwertigen mittleren Blechdicken in der Aufdickung plausibilisiert werden, da geometriebedingt beim Referenzbauteil ausschließlich der radiale Stoffflussanteil einen Einfluss auf die Ausbildung der Aufdickung hat. Bezüglich des tangentialen Stoffflusses werden Ergebnisse erzielt, welche in etwa mit einer Umformkraft von  $F = 700$  kN vergleichbar sind.

Auf Basis dieser Ergebnisse lässt sich die Wirkungsweise der lokalen Eigenschaftsgradierung mittels Kurzzeit-Wärmebehandlung in den Kontext des konventionellen Umformprozesses zurückführen und unter Berücksichtigung der erarbeiteten Modellvorstellung bewerten. Das Ziel einer gesteigerten Aufdickungshöhe bei gleichzeitiger Vermeidung der Gratbildung für die Referenzgeometrie mit umlaufender Aufdickung kann im Rahmen der experimentellen Versuche bestätigt werden.

Die Möglichkeit der Stoffflusssteuerung in einer Prozesskette aus lokaler Kurzzeit-Wärmebehandlung und anschließendem Taumeln ist unter Berücksichtigung der verwendeten werkstoff-, halbzeug- und prozesseitigen Randbedingungen als erfolgsversprechend einzustufen. Dabei wird ein gleichwertiges Umformergebnis im Vergleich mit einer um etwa 60% gesteigerten Umformkraft realisiert. Dadurch ergibt sich speziell für die Prozessauslegung das Potential, Werkzeuge und Anlagen geringer zu dimensionieren.

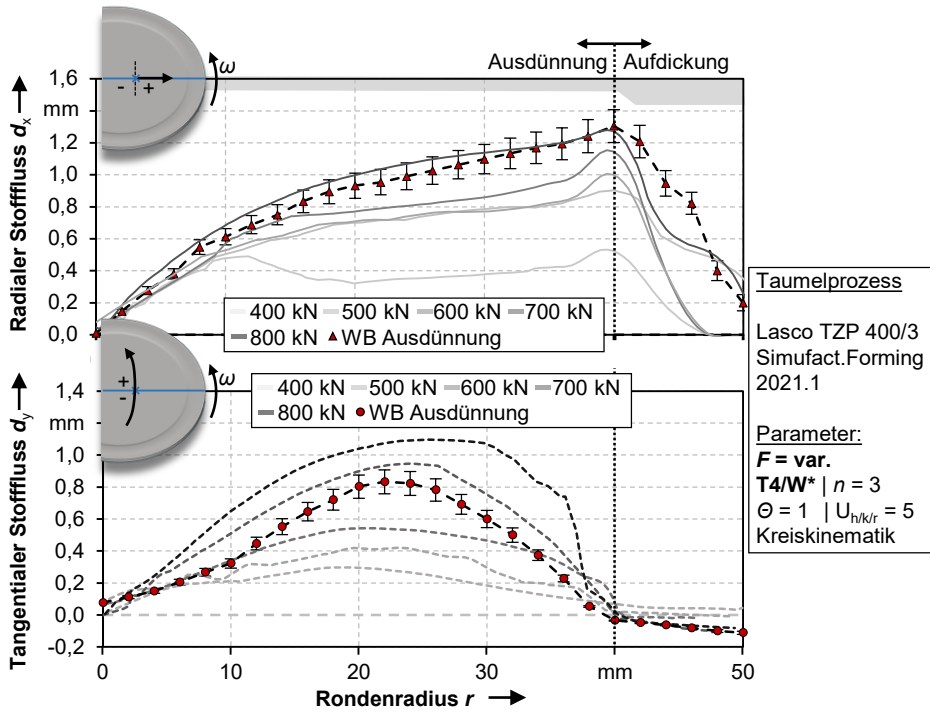


Bild 47: Radiale und tangentielle Stoffflussanteile für variierende Umformkräfte im konventionellen Prozess im Vergleich zur Anwendung einer lokalen Eigenschaftsgradierung mittels Wärmebehandlung

Ein folglich geringeres Gesamtgewicht der Presse ermöglicht eine erleichterte Realisierung der Taumelkinematik und eine verringerte Prozesszeit durch verbessertes Handling. Trotz einer signifikant gesteigerten Formfüllung lässt sich die Ausbildung eines Grats durch eine verbesserte Stoffflusskontrolle und gleichzeitig dem Vorliegen der Ausgangsfestigkeit im Randbereich vermeiden. Für die weitere Verarbeitung dieser Halbzeuge leiten sich dadurch entsprechend die Vorteile einer erhöhten Bauteilqualität, einer leichteren Handhabung und indirekt durch eine geringere Grathöhe und infolge dessen Aus- oder Abbruch von Werkstoff im Umformprozess auch eine Reduzierung des Werkzeugverschleißes und einer Erhöhung der Standzeit ab.

### ***Adaption der zugrundeliegenden Wirkmechanismen von THTB auf die Randbedingungen der Blechmassivumformung***

Bezugnehmend auf die grundlegenden Wirkmechanismen für die Auslegung und den Einsatz von THTB in der Blechumformung [48] lässt sich der Bedarf nach einer Adaption dieser Wirkmechanismen mit dem Ziel der

Stoffflusssteuerung im Rahmen des Taumelprozesses ableiten. Ebenso gilt es dabei, die grundlegend verschiedenen Gegebenheiten zwischen Prozessen der Blechumformung und dem Taumeln zu berücksichtigen, welche sich in veränderten Umform- und Kontaktzonen, anderen Spannungs- und Formänderungszuständen sowie einem geänderten Fehlerbild von Rissbildung durch gehemmten Stofffluss hin zu Gratbildung durch begünstigten Stofffluss äußern. Basis für die Identifikation der zugrundeliegenden Wirkmechanismen bilden sowohl die spannungs- und stoffflussbasierte Modellvorstellung aus den vorherigen Kapiteln als auch die Ergebnisse hinsichtlich der Möglichkeit der Stoffflusssteuerung durch die lokale Wärmebehandlung nach den zuvor definierten Layouts. Daraus folgend können die zwei zugrundeliegenden Wirkmechanismen adaptiert werden:

***(1) Lokale Reduktion des Fließwiderstandes im Zielbereich unter Wirkungsweise eines zweiachsigen Druckspannungszustandes***

Als erster Wirkmechanismus lässt sich im Rahmen einer Wärmebehandlung des Zielbereichs die lokale Reduktion der Reaktionskräfte ableiten. Diese begründet sich auf den im wärmebehandelten Bereich vorliegenden lokalen Fließwiderstand, welcher wiederum durch eine Reduzierung der Anfangsfließspannung infolge der Wärmebehandlung verringert wird. Unter Wirkungsweise eines zweidimensionalen Druckspannungszustandes mit Komponenten in radialer und tangentialer Richtung wird folglich der Stofffluss in den entfestigten Bereich und schlussendlich in das in axialer Richtung liegende freie Kavitätvolumen des Gegenstempels begünstigt. Eine Qualifizierung des Einflusses auf den Stofffluss kann dabei auf Basis des vorliegenden Gradienten aus wirkender Spannung und Formänderungswiderstand erfolgen. Eine lokale Reduzierung des Formänderungswiderstands infolge der Wärmebehandlung führt zu einem gesteigerten Stofffluss in die Kavität.

***(2) Lokale Begünstigung des Stoffflusses aus der primären Umformzone unter dreiachsigem Druckspannungszustand***

Eine bei geringeren Spannungswerten erfolgende Plastifizierung des Werkstoffs aufgrund einer lokal reduzierten Anfangsfließspannung des Werkstoffvolumens in der primären Umformzone begünstigt den Stofffluss in angrenzende Werkstückzonen. Dieser Wirkmechanismus ist dabei sowohl für die Anwendung auf den neben der eigentlichen Umformzone liegenden Bereich als auch auf die direkte Umformzone anwendbar. Speziell beim Taumeln wird ein radialer Stofffluss aus der primären Umformzone im Rondenzentrum nach außen forciert, weshalb eine Entfestigung der primären Umformzone als zielführend eingestuft wird.

Ursächlich für diesen radialen Stofffluss ist dabei der dreidimensionale Druckspannungszustand, welcher sich in der primären Umformzone unterhalb des Taumelstempels ausbildet. Bedingt durch eine Stoffflusshemmung in alle drei Raumrichtungen wird der Werkstoff in das freie Kavitätvolumen verdrängt und die Blechdicke lässt sich signifikant steigern. Dieser Wirkmechanismus ist ebenso abhängig vom lokal vorliegenden Gradienten aus wirkender Spannung und Formänderungswiderstand.

Im Kontext der in Abschnitt 6.2 identifizierten Wärmeeinflusszonen und der Annahme einer gewissen beidseitigen Beeinflussung beider Wirkmechanismen muss eine Bewertung des Einsatzes ebendieser Wirkmechanismen stets in Abhängigkeit der geometrischen und mechanischen Randbedingungen erfolgen. Weiterhin sind örtliche Restriktionen und aus der spannungs- und stoffflussbasierten Modellvorstellung identifizierte Prozessfehler zu berücksichtigen.

Auf Basis der grundlegend erarbeiteten Wirkmechanismen von THTB in der Blechmassivumformung sowie aufbauend auf den Ergebnissen zur Referenzgeometrie im vorangegangenen Abschnitt wird im nachfolgenden Kapitel die Übertragbarkeit hinsichtlich einer gesteigerten Geometriekomplexität untersucht. Damit sollen einerseits die Anwendbarkeit und das Einsatzpotential als auch gleichzeitig die Möglichkeit der Stoffflusssteuerung in der Blechmassivumformung ganzheitlich bewertet und im Rahmen eines grundlagenwissenschaftlichen Leitfadens in Form einer Auslegungsmethode beschrieben werden.

## **7.2 Bewertung der Wirkmechanismen hinsichtlich einer gesteigerten Geometriekomplexität**

Zur Ableitung einer allgemeingültigen Auslegungsmethode von THTB zur Anwendung in Blechmassivumformoperationen auf Basis eines definiert eingebrachten Festigkeitsgradienten bedarf es einer Verifizierung des bestehenden Prozessverständnisses durch Übertragung auf variierende geometrische Eigenschaften. Damit kann der bauteil- und prozessübergreifende Einsatz von THTB in Verfahren der Blechmassivumformung systematisch analysiert und zielführend umgesetzt werden. Neben einer Skalierung auf größere Bauteildurchmesser werden in diesem Abschnitt zudem die Wirkungsweisen einer beidseitig eingebrachten Kavität und einer radial veränderten Position der Aufdickung in Kombination mit einer lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung zur Stoffflusssteuerung durch Eigenschaftsgradierung untersucht. Die abgeleiteten Erkenntnisse dieses

Kapitels bilden die Grundlage für eine abschließende Prozessbewertung und die Ableitung einer allgemeingültigen Auslegungsmethode zur gezielten Stoffflusssteuerung mittels lokaler Kurzzeit-Wärmebehandlung in der Blechmassivumformung.

### 7.2.1 Nachweis der Skalierbarkeit durch Vergrößerung des Bauteildurchmessers

Um allgemeingültige Gestaltungsrichtlinien zur Auslegung von THTB in der Blechmassivumformung mit dem Ziel der Stoffflusssteuerung durch lokale Eigenschaftsgradierung abzuleiten, bedarf es der Überprüfung der Skalierbarkeit der untersuchten Wirkzusammenhänge auf angepasste Bauteildurchmesser. Entsprechend werden in diesem Abschnitt Bauteile mit umlaufender einseitiger Aufdickung mit einem Außendurchmesser von  $D_a = 120$  mm untersucht, der Beginn der Aufdickung liegt bei  $r = 50$  mm.

Zur Sicherstellung der Übertragbarkeit wird die eingebrachte Umformkraft für eine näherungsweise gleich wirkende Flächenpressung auf ein Fünftel der Kreisfläche auf den größeren Bauteildurchmesser skaliert. Diese lässt sich anhand Gleichung 3 für einen Bauteilradius von  $r = 50$  mm berechnen:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{1}{5} \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{500 \text{ kN}}{\frac{1}{5} \cdot \pi \cdot (50 \text{ mm})^2} = 318 \text{ MPa} \quad (3)$$

Mit dieser angenommenen Flächenpressung kann anschließend die benötigte ideelle Umformkraft für einen größeren Bauteilradius von  $r = 60$  mm durch Umstellen mit Gleichung 4 berechnet werden:

$$F_{D120} = p \cdot A = 318 \text{ MPa} \cdot \frac{1}{5} \cdot \pi \cdot (60 \text{ mm})^2 = 719 \text{ kN} \quad (4)$$

Aufgrund der Einstellmöglichkeit an der hydraulischen Tiefziehpresse wird für sämtliche Versuche mit einem Durchmesser von  $D = 120$  mm eine konstante Umformkraft von  $F_{D120} = 720$  kN definiert.

Bei der Wahl der Layouts wird prinzipiell dieselbe Strategie wie bei den Referenzbauteilen verfolgt, jedoch auf einen größeren Durchmesser von 120 mm skaliert. Die definierten Wärmebehandlungslayouts sowie das Ergebnis der Temperaturmessung mittels Thermokamera sind in Bild 48 dargestellt. Das erste Layout beinhaltet dabei den ausgedünnten Bereich vor der Kavität von  $30 \text{ mm} < r < 50 \text{ mm}$ . Als zweites Layout wird analog der Variante bei  $D = 100$  mm der gesamte Aufdickungsbereich mit einer Breite von 10 mm wärmebehandelt. Für die Durchführung der Wärmebehandlung kommen dieselben Parameter und der identische Prozessaufbau zum Einsatz, einzig die Einlegeschaablonen werden auf den größeren Durchmesser

angepasst. Nach der gezielten Eigenschaftsgradierung ausgehend vom Ausgangszustand T<sub>4</sub> der Ronden werden diese ebenfalls im untersuchten Taumelprozess mit umgerüsteten Werkzeugeinsätzen für die gewünschte Geometrie mit  $D = 120$  mm umgeformt.

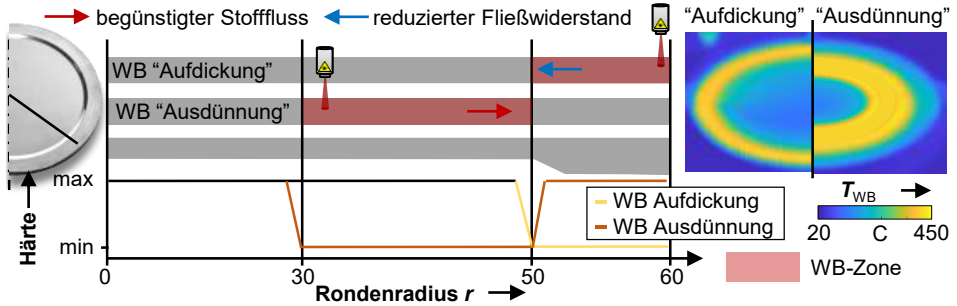


Bild 48: Definierte Wärmebehandlungszonen mit dem Ziel eines begünstigten Stoffflusses oder eines reduzierten Fließwiderstands und Ergebnis der thermographischen Aufnahmen für einen vergrößerten Durchmesser von 120 mm

Ein Nachweis zur Eigenschaftsgradierung im Sinne von festen und entfestigten Bereichen sowie eine Bewertung der Wärmeeinflusszonen werden für beide Layouts mittels Temperatur- und Härtemessung erbracht, siehe Bild 49. Bei einer lokalen Erwärmung im äußeren Randbereich wird die Wärmeenergie analog der Geometrie mit  $D = 100$  mm ausschließlich in Richtung des kalten Rondenzentrums abgegeben und die Platine erwärmt sich auf einen Mittelwert von leicht über  $100$  °C. Der höhere Wert kann durch den längeren Energieeintrag infolge des vergrößerten Umfangs der Kreisbahn für den Laserspot bei gleichbleibender Verfahrensgeschwindigkeit von  $7,5$  mm/s begründet werden. Die WEZ II kann auf Basis der Ergebnisse aus Abschnitt 6.2 auf etwa  $8$  bis  $10$  mm über den eigentlichen Wärmebehandlungsbereich hinaus geschätzt werden, wobei Temperaturen ab  $350$  °C bis  $2$  mm und Temperaturen über  $300$  °C bis  $3$  mm im benachbarten Bereich vorliegen. Folglich kann von einer ausreichenden lokalen Auflösung der Eigenschaftsgradierung ausgegangen werden. Für das WB-Layout „Ausdünnung“ mit einem wärmebehandelten Bereich zwischen  $r = 30 - 50$  mm kann ebenfalls eine beidseitig ausgeprägte WEZ II festgestellt werden. Weiterhin liegt der Laserspot auf einer Kreisbahn mit größerem Durchmesser, weshalb auch hier ein erhöhter Energieeintrag durch die verlängerte Prozesszeit zum Tragen kommt. Dadurch kommt es zu einer stärkeren Erwärmung des Rondenzentrums auf über  $150$  °C und die beidseitig liegenden WEZ II fallen mit  $5-8$  mm größer aus. Ein Bereich mit Temperaturen über  $350$  °C liegt bis auf  $1$  mm am inneren und bis  $3$  mm am äußeren Rand der direkten

Wärmebehandlungsfläche vor, womit eine WEZ I zwar vorhanden ist, diese allerdings auf Basis der temperaturabhängigen Härtegradverteilung in Abschnitt 6.2 keinen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat.

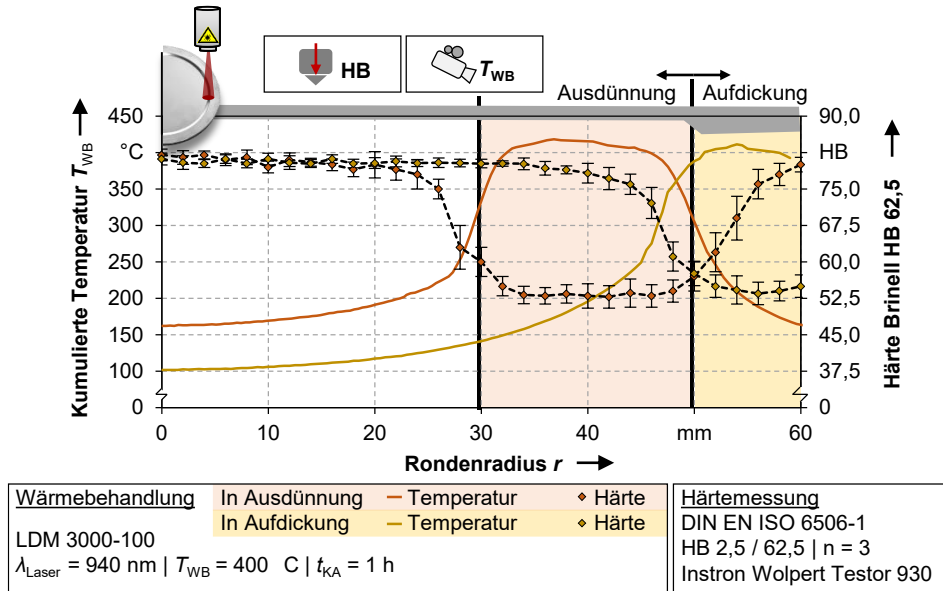


Bild 49: Temperaturverteilung und resultierender Härteverlauf in Abhängigkeit des Wärmebehandlungslayouts für einen vergrößerten Durchmesser von 120 mm

Zur Bestätigung des Einflusses der thermographisch ausgewerteten Temperaturverläufe auf die Festigkeit im Werkstoff werden zudem die Härteverläufe entlang des Bauteilradius analysiert. Dabei kann eine hohe Übereinstimmung der Verläufe und Maximalwerte der Härte zu den Ergebnissen der Bauteile mit  $D = 100 \text{ mm}$  festgestellt werden. Im Zentrum der Wärmebehandlungszonen liegen jeweils die maximale Entfestigung von etwa 35% mit Härtewerten von 52 – 54 HB vor. Die Wärmeinflusszonen fallen bedingt durch den höheren Energieeintrag, wie auf Basis der Temperaturverläufe bereits diskutiert, leicht größer aus. Für eine Wärmebehandlung der Aufdickung kann eine WEZ II von 6 - 7 mm identifiziert werden. Die beidseitige WEZ II für die innenliegende Wärmebehandlungsfläche fällt mit einer Größe von 5 mm am Innen- und 7 – 8 mm am Außenradius wie zuvor beschrieben geringfügig asymmetrisch aus. Zusammenfassend kann eine stärker ausgeprägte WEZ II aufgrund eines höheren Energieeintrags infolge der längeren Prozesszeit durch eine vergrößerte Kreisbahn identifiziert werden. Im Rahmen einer ganzheitlichen Prozessauslegung muss diese stärkere Erwärmung beachtet

und bei Bedarf mittels geeigneter Gegenmaßnahmen reduziert werden. Für den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit kann die lokale Eigenschaftsgradierung dennoch als ausreichend aufgelöst eingestuft werden.

Im vorherigen Abschnitt wurde der dreidimensionale Spannungszustand im kaltausgelagerten Zustand T4 als maßgeblich verantwortlich für den induzierten Stofffluss identifiziert und durch Analyse der Spannungskomponenten auf Basis der numerischen Simulation quantifiziert. Zum Vergleich mit den dreidimensionalen Spannungskomponenten der Referenzgeometrie werden diese für die skalierte Geometrie analog in den drei Raumrichtungen entlang des Radius ausgewertet, siehe Bild 50.

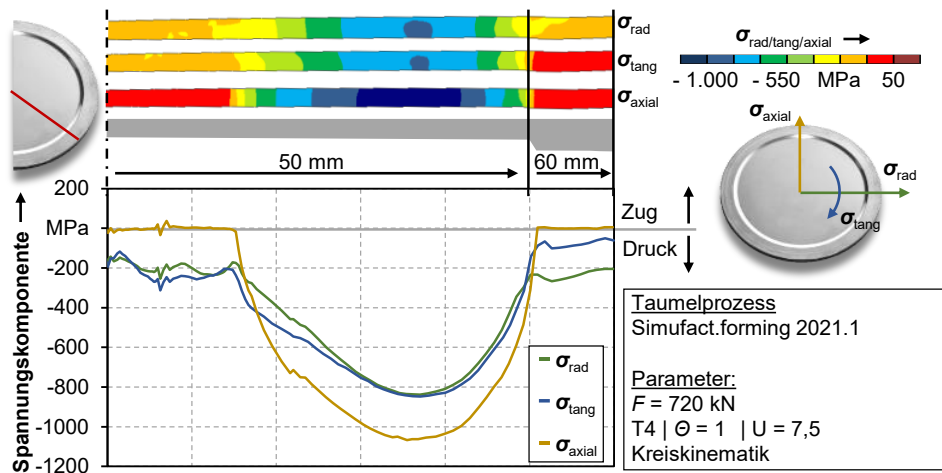


Bild 50: Numerische Identifikation der dreidimensional wirkenden Spannungskomponenten im radialen Schnitt für die auf 120 mm skalierte Referenzgeometrie im Zustand T4

Es zeigt sich ein direkt übertragbarer Verlauf der drei Spannungskomponenten. Während im Bauteilzentrum und im Randbereich aufgrund des fehlenden Stempelkontakts ein zweidimensionaler Druckspannungszustand vorliegt, treten die betragsmäßig größten Wert der jeweiligen Komponente in der primären Umformzone von  $15 \text{ mm} < r < 50 \text{ mm}$  auf. Diese Zone ist dabei bedingt durch den vergrößerten Durchmesser nach außen verschoben und die maximalen Werte der Druckspannungskomponenten liegen bei  $r = 37 \text{ mm}$  vor. Bedingt durch eine größere Kontaktfläche während des Umformprozesses bei gleicher resultierender Umformkraft fällt die betragsmäßig größte Spannungskomponente in axialer Richtung mit  $\sigma_{\text{axial}} = -1.067 \text{ MPa}$  leicht geringer aus. Die beiden Spannungskomponenten in der Ebene sind mit  $\sigma_{\text{rad}} = -837 \text{ MPa}$  und  $\sigma_{\text{tang}} = -852 \text{ MPa}$  vergleichbar zur Referenzgeometrie.

Die anschließende Auswertung erfolgt analog der Referenzgeometrie durch Analyse des Blechdickenverlaufs, der mittleren Blechdicke in der Aufdickung sowie der radialen und tangentialen Stoffflussanteile. Die beiden zuerst genannten Zielgrößen sind in Bild 51 für die Referenz sowie die unterschiedlichen Wärmebehandlungslayouts gegenübergestellt.

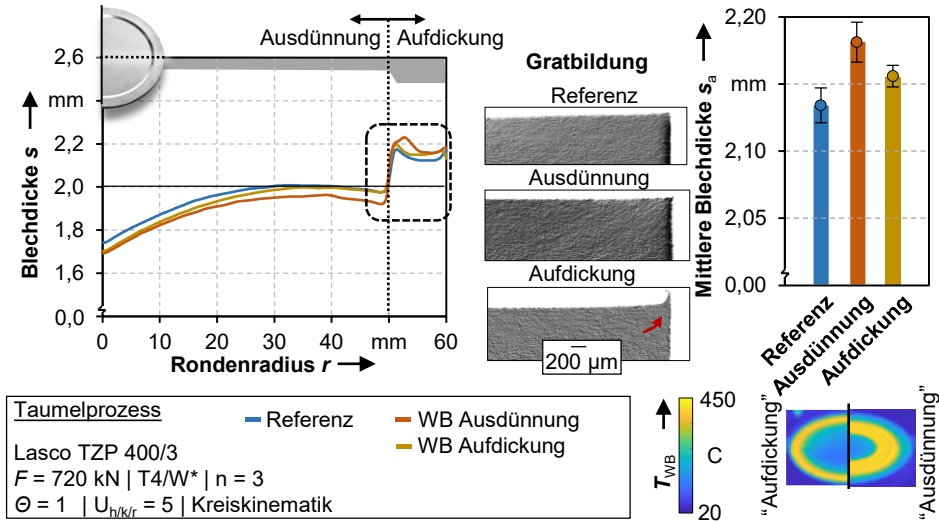


Bild 51: Blechdickenverlauf, mittlere Blechdicke in der Aufdickung sowie Schlibbilder der Gratausprägung der Referenz sowie der wärmebehandelten Bauteile für einen vergrößerten Durchmesser von  $D = 120 \text{ mm}$

Hinsichtlich des Blechdickenverlaufs lässt sich eine direkte Übertragbarkeit zu den Ergebnissen bei reduziertem Durchmesser feststellen. Beide wärmebehandelten Proben verfügen über eine stärker ausgeprägte Ausdünnung im Rondenzentrum, welche sich abhängig vom jeweiligen Layout unterschiedlich bis zum Beginn der Kavität bei  $r = 50 \text{ mm}$  fortsetzt. Ebenso zeigt sich derselbe Effekt einer erhöhten Blechdicke direkt am Einlaufbereich der Kavität, welcher auf die Stützwirkung der Matrizenwand und die so wirkende Fließbehinderung zurückzuführen ist [70]. Im Bereich der Aufdickung wird für die konventionelle Ronde eine mittlere Blechdicke von  $s_a = 2,13 \pm 0,02 \text{ mm}$  erreicht. Dieser Wert ist zwar tendenziell geringer als für die Geometrie mit  $D = 100 \text{ mm}$ , dies lässt sich allerdings durch das größere zu füllende Materialvolumen der Kavität durch den größeren Außendurchmesser begründen. Analog der kleineren Geometrie lassen sich durch die Anwendung beider Wärmebehandlungslayouts gesteigerte Werte für die mittlere Blechdicke in der Aufdickung erzielen, was die beiden zuvor abgeleiteten Wirkmechanismen bestätigt.

Durch den begünstigen Stofffluss aus der primären Umformzone kann die höchste mittlere Blechdicke mit  $s_a = 2,18 \pm 0,03$  mm erreicht werden, wohingegen für eine Wärmebehandlung des aufgedickten Bereichs ein Mittelwert der Blechdicke von  $s_a = 2,16 \pm 0,01$  mm resultiert. Entsprechend kann eine Skalierbarkeit auf Basis der Blechdickenverläufe und der erzielbaren Maximalwerte nachgewiesen werden. Weiterhin kann eine übertragbare Ausbildung des Grats zwischen beiden Bauteilgrößen, abhängig vom jeweiligen Wärmebehandlungslayout, identifiziert werden. Während im Referenzversuch ohne lokale Eigenschaftsgradierung sowie für die Versuchsreihe einer lokalen Entfestigung im ausgedünnten Bereich keine Ausbildung nachweisbar ist, ist diese für die Wärmebehandlung direkt im Aufdickungsbereich signifikant stärker ausgeprägt. Aufgrund des ungünstigen Verhältnisses aus wirkender Spannung und Formänderungswiderstand im Randbereich des Bauteils werden Grathöhen von 0,18 mm erreicht. Zusammenfassend können unter Berücksichtigung einer geänderten Volumenproportion sowohl qualitativ übertragbare Verläufe als auch quantitativ vergleichbare Maximalwerte für die Blechdicke der skalierten Geometrie erzielt werden.

Ebendiese übertragbaren Zusammenhänge gilt es mit dem Ziel einer ganzheitlichen Skalierbarkeit im Nachfolgenden für die auftretenden radialen sowie tangentialen Stoffflussanteile zu bestätigen. Beide Kenngrößen sind analog der Referenzgeometrie in Abschnitt 7.1 für die unterschiedlichen Versuchsreihen ausgewertet. Der radiale Stofffluss in Form der Punktverschiebung nach der Umformung ist für die drei Versuchsreihen in Bild 52 dargestellt. Unabhängig der lokalen Eigenschaftsgradierung kann aufgrund der im Zentrum ausschließlich axial erfolgenden Werkstoffverdrängung, welche durch die konische Stempel­form sowie den Kraftanstieg zu Prozessbeginn begründet werden kann, kein radialer Stofffluss nachgewiesen werden. Als Folge kann mit zunehmender radialer Position bis  $r \approx 20$  mm ein steiler Verlauf identifiziert werden, welcher durch die axiale Materialverdrängung im Rondenzentrum induziert wird. Für das Referenzbauteil ohne Wärmebehandlung wird an dieser Position ein lokales Maximum von  $d_x = 0,66 \pm 0,05$  mm erreicht, was den Einfluss der Ausdünnung bestätigt. Bis vor den Beginn der Kavität bei  $r = 50$  mm sinkt der radiale Stoffflussanteil bedingt durch den verlängerten Fließweg auf Werte von  $d_x = 0,54 \pm 0,04$  mm. Das nachfolgende Maximum direkt im Einlaufbereich liegt bei  $d_x = 0,58 \pm 0,03$  mm, was durch die Umlenkung um die Einlaufschräge und eine damit einhergehende Streckung des Gefüges in diesem Bereich begründet werden kann. Beide wärmebehandelten Varianten zeigen ein zu diesem Verlauf abweichendes

Verhalten bezüglich des radialen Stoffflusses. Beide Kurven steigen bis zum Erreichen des Maximums am Einlaufbereich, wobei durch eine Wärmebehandlung in der primären Umformzone ein tendenziell größerer radialer Stofffluss erzielt werden kann. Als maximale Verschiebungen können für die Wärmebehandlung der Umformzone ein Wert von  $d_x = 1,04 \pm 0,04$  mm und für den aufgedickten Bereich von  $d_x = 0,93 \pm 0,05$  mm realisiert werden. Für alle drei Versuchsreihen nähern sich die Verläufe nach Erreichen ihrer Maxima im Einlaufbereich sukzessive bis zum Bauteilrand aufgrund der Fließbegrenzung durch die Matrizenwand der Nulllinie.

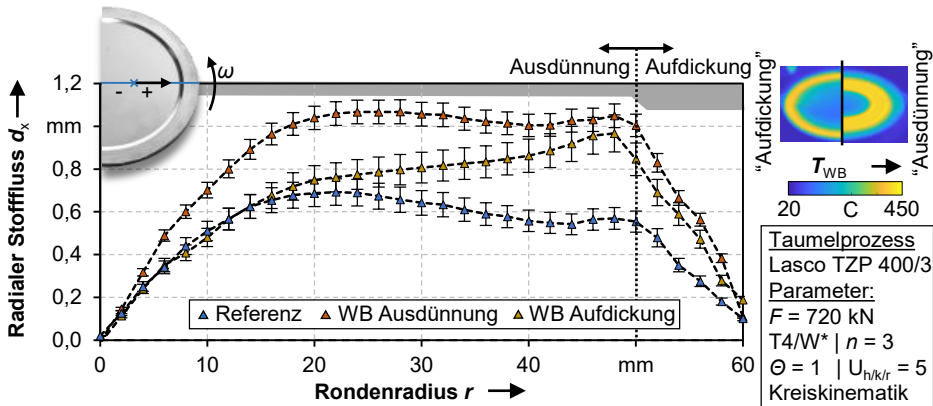


Bild 52: Radialer Stofffluss über den Bauteilradius für das auf  $D = 120$  mm skalierte Referenzbauteil sowie für beide Wärmebehandlungslayouts

Neben den radialen Stoffflussanteilen wird zudem die tangentielle Punktverschiebung analog der vorangegangenen Versuche ausgewertet. Diese hat zwar keinen direkten Einfluss auf die Formfüllung der umlaufenden Kavität, allerdings wird dem tangentialen Stofffluss infolge der Abrollbewegung in Umfangsrichtung eine entscheidende Rolle bei der Erreichung einer hohen Oberflächengüte durch Einglättung zugesagt [28]. Der Verlauf des tangentialen Stoffflusses ist für die drei Versuchsvarianten über den Bauteilradius in Bild 53 dargestellt. Analog zur Referenzgeometrie mit  $D = 100$  mm zeigen die drei Kurven den zuvor beschriebenen charakteristischen Verlauf. Beginnend direkt im Zentrum, in welchem keine radialen sowie tangentialen Anteile auftreten, steigen die Kurven bis zu ihrem in etwa in der Mitte der primären Umformzone liegenden Maximum mit vergleichbarer Steigung an. Für die Geometrie ohne Eigenschaftsgradierung werden an dieser radialen Position Werte von  $d_y = 0,21 \pm 0,02$  mm erreicht. Für den wärmebehandelten Aufdickungsbereich kann die Punktverschiebung auf  $d_y = 0,30 \pm 0,03$  mm sowie für die Umformzone auf  $d_y = 0,42 \pm 0,03$  mm gesteigert werden. Dies entspricht jeweils einer

Steigerung um 50% bzw. 100%, was somit der prozentualen Zunahme des Referenzbauteils mit  $D = 100$  mm entspricht. Als Begründung für diese Steigerung kann eine verstärkt lokal auftretende Plastifizierung infolge der lokalen Entfestigung im ausgedünnten Bereich dienen. Weiterhin sinken mit zunehmender radialer Position alle drei Kurven bis zum Beginn der Kavität wieder bis zur Nulllinie, was mit keinem nachweisbaren tangentialen Stofffluss gleichzusetzen ist. Zudem lässt sich eine radiale Verschiebung der Lage der Maximalwerte von  $r = 25$  mm für das Referenzbauteil auf  $r = 30$  mm für den größten auftretenden tangentialen Stofffluss. Dies lässt sich durch einen radial weiter nach außen versetzten Entfestigungsbereich sowie eine verschobene primäre Umformzone und somit eine lokal höhere Plastifizierung des Werkstoffs begründen.

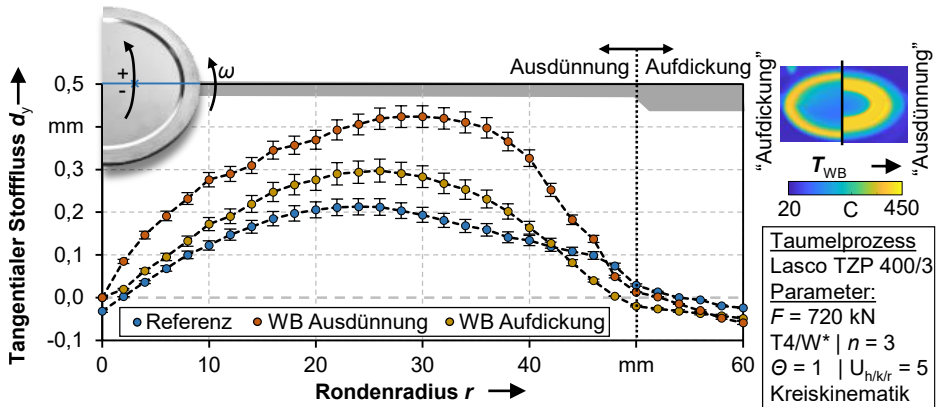


Bild 53: Tangentialer Stofffluss über den Bauteilradius für das auf  $D = 120$  mm skalierte Referenzbauteil sowie für beide Wärmebehandlungslayouts

Basierend auf den zuvor erzielten Ergebnissen und abgeleiteten Erkenntnissen bezüglich der vorliegenden Spannungsverteilung im Druckbereich, der Blechdicke sowie der Stoffflussanteile lässt sich die Skalierbarkeit auf größere Bauteildurchmesser nachweisen. Dies ist sowohl qualitativ hinsichtlich der Kurvenverläufe sowie der auftretenden Fehlerbilder in Form eines Grats sowie quantitativ unter Berücksichtigung des veränderten Werkstoffvolumens und eines verlängerten Fließwegs durch Maximalwerte und vergleichbare Verhältnisse zwischen den Versuchsreihen gegeben.

Bei der prozesstechnischen Auslegung in Frage kommender Wärmebehandlungsstrategien gilt es jedoch, eine vergrößerte Ausprägung der WEZ II im indirekt entfestigten Bereich zu berücksichtigen, welche in Abhängigkeit der Prozessdauer und daraus folgend dem Energieeintrag abhängig ist. Weiterhin gilt zu beachten, dass der zeitliche Einfluss durch eine Erwärmung der Blechrunde während des andauernden Prozesses mit

einem zunehmenden Kreisbahndurchmesser steigt und dadurch die Inhomogenität der Entfestigung zunehmen kann.

### 7.2.2 Übertragbarkeit auf beidseitig angebrachte Funktionselemente

Neben einer Skalierbarkeit der Bauteilgeometrie bedarf es mit Hinblick auf potentiell herzustellende Bauteile in Getrieben wie beispielsweise Synchronringe oder Mitnehmerscheiben zusätzlich der Überprüfung der Übertragbarkeit auf beidseitig angebrachte Funktionselemente. Dadurch wird nicht nur eine Erweiterung der geometrischen Komplexität und damit einhergehend des potentiellen Anwendungsspektrums sichergestellt, sondern ebenso der Einfluss einer lokalen Eigenschaftsgradierung unter einer beidseitig wirkenden Fließbehinderung in Form der Werkzeugkavität im Rahmen eines ganzheitlichen Prozessverständnisses der Wirkungsweise von THTB in der Blechmassivumformung untersucht. Zur Sicherstellung der Übertragbarkeit werden die nachfolgenden Versuche mit denselben Prozessparametern sowie zuvor applizierten Wärmebehandlungslayouts wie beim Referenzbauteil mit einseitiger Aufdickung aus Abschnitt 7.1 durchgeführt. Auf einen detaillierten Nachweis zur Erreichung der gewünschten Temperaturverteilung der Ronden wird an dieser Stelle verzichtet, da beide Layouts bereits in Abschnitt 7.1 grundlegend charakterisiert und deren Einsatzfähigkeit nachgewiesen wurden. Die definierten Wärmebehandlungslayouts sowie das Ergebnis der Temperaturmessung mittels Thermokamera sind in Bild 54 dargestellt. Nach der gezielten Eigenschaftsgradierung ausgehend vom Ausgangszustand T<sub>4</sub> der Ronden werden diese ebenfalls im untersuchten Taumelprozess analog der Referenzbauteile umgeformt.

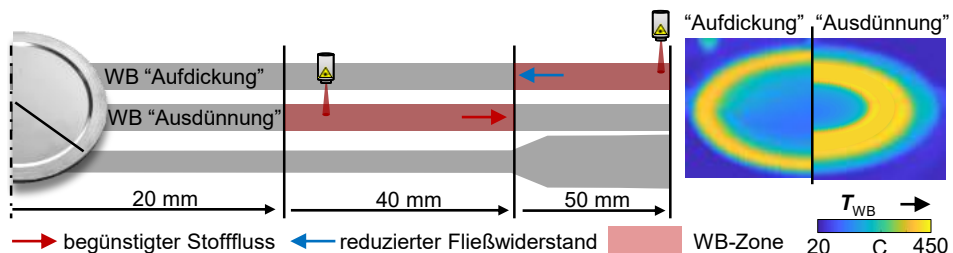


Bild 54: Definierte Wärmebehandlungszonen mit dem Ziel eines begünstigtem Stoffflusses oder eines reduzierten Fließwiderstands und Ergebnis der thermographischen Aufnahmen für eine beidseitig vorliegenden Aufdickung

Als Basis für die zugrundeliegenden Ursache-Wirkbeziehungen zwischen auftretender Spannung und Formänderung in Abhängigkeit des Werkstoffzustandes werden analog die Spannungskomponenten für eine maximale Winkelanstellung über den Bauteilradius ausgewertet, siehe Bild 55.

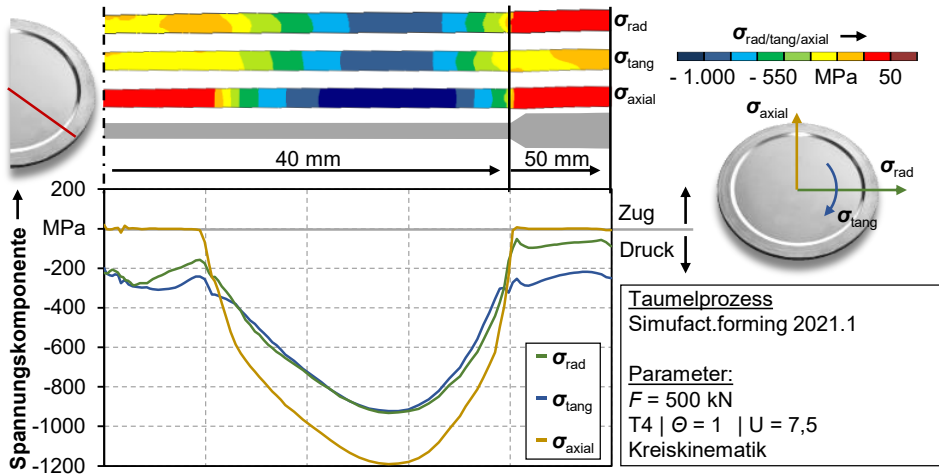


Bild 55: Numerische Identifikation der dreidimensional wirkenden Spannungskomponenten im radialen Bauteilschnitt für eine beidseitig liegende Kavität im Ausgangszustand T4

Bis zum Beginn der außenliegenden beidseitigen Kavität bei  $r = 40$  mm ist der Verlauf der jeweiligen Spannungsanteile direkt mit der Referenz vergleichbar. Während bedingt durch den fehlenden Stempelkontakt im Bauteilzentrum ein zweiachsiger Druckspannungszustand vorliegt ist die primäre Umformzone im Zentrum des Stempelkontakts durch einen dreidimensionalen Druckspannungszustand geprägt. Dieser lässt sich, wie bereits ausführlich in Kapitel 5 erarbeitet, durch die Kammerung der Ronde in der Matrize in Kombination mit der konischen Stempelform und der zunehmenden Winkelanstellung begründen. Mit einem Wert der radialen Druckspannung von  $\sigma_{\text{rad}} = -932$  MPa und  $\sigma_{\text{tang}} = -923$  MPa für die tangentielle Komponente ist in der primären Umformzone eine direkte Übertragbarkeit zur Referenz gegeben. Die durch den Taumelstempel induzierte Axialspannung erreicht ihren betragsmäßig größten Wert ebenfalls in der primären Umformzone mit  $\sigma_{\text{axial}} = -1.190$  MPa. Auffällig im Bereich der Kavität ist zum sonst vergleichbaren Wertebereich der Spannungskomponenten neben der fehlenden Axialspannung zudem eine weitgehend aufgehobene radiale Druckspannung. Bedingt durch ein beidseitig vorliegendes freies Kavitätsvolumen tritt infolge der radialen Druckspannung ein Ausknicken der Ronde zu Prozessbeginn auf. Durch

dieses Ausknicken wird die radiale Druckspannung im Randbereich nahezu vollständig abgebaut.

Als Zielgröße wird in Übereinstimmung mit den vorangegangenen Versuchen der Blechdickenverlauf über den Bauteilradius sowie die resultierende mittlere Blechdicke in der Aufdickung ausgewertet, siehe Bild 56. Zusätzlich wird die mittlere Grathöhe zur qualitativen Bestimmung des Prozessfehlers eines unerwünschten Stoffflusses in den Werkzeugspalt analysiert. Für die Referenz ohne Eigenschaftsgradierung wird eine minimale Blechdicke im Rondenzentrum von  $s_{\min} = 1,78$  mm infolge der axialen Zustellung sowie des radialen Stoffflusses erzielt. Anschließend kann für die Blechdicke ein steigender Verlauf bis zu einer radialen Position von  $r = 25$  mm nachgewiesen werden, nach welcher sich ein lokales Minimum direkt am Einlaufbereich der Kavität ausprägt. Dieser gewölbte Verlauf lässt sich durch die konische Stempelform, die axiale Zustellung sowie die einsetzende Winkelverkipfung erklären und ist unabhängig vom Wärmebehandlungslayout nachweisbar. Im Aufdickungsbereich wird für die Referenz eine mittlere Blechdicke von  $s_a = 2,17 \pm 0,02$  mm erzielt. Auffallend im Vergleich zu den zuvor untersuchten Geometrien ist hier die deutlich stärker ausgeprägte Materialanhäufung direkt am Einlaufbereich der Kavität.

Diese lässt sich durch den zur Formfüllung primär verantwortlichen radialen Stofffluss sowie die Kammerung durch die Matrizenwand erklären, wie bereits in den vorherigen Kapiteln aufgezeigt. Mit einer beidseitig im Stempel und Gegenstempel eingebrachten Kavität wird dieser Effekt signifikant erhöht, was sich in den Spitzen der Blechdickenverläufe am Einlaufbereich äußert. Beide wärmebehandelten Proben zeigen die zuvor identifizierte größere Ausdünnung im Rondenzentrum mit  $s_{\min} = 1,71$  mm für eine Entfestigung in der primären Umformzone sowie mit  $s_{\min} = 1,73$  mm für eine Entfestigung im Aufdickungsbereich, wodurch sich eine gesteigerte radiale Werkstoffverdrängung begründen lässt. Der Verlauf bis zum Beginn der Kavität kann analog der Referenz, jedoch auf niedrigerem Ausgangsniveau, beschrieben werden. Der Effekt der lokalen Materialanhäufung am Einlauf der Kavität ist durch den begünstigten radialen Stofffluss beider Wärmebehandlungslayouts deutlicher ausgeprägt. Folglich werden in der Aufdickung mittlere Blechdicken von  $s_a = 2,28 \pm 0,03$  mm für eine Entfestigung in der primären Umformzone sowie  $s_a = 2,25 \pm 0,03$  mm im aufgedickten Bereich erzielt.

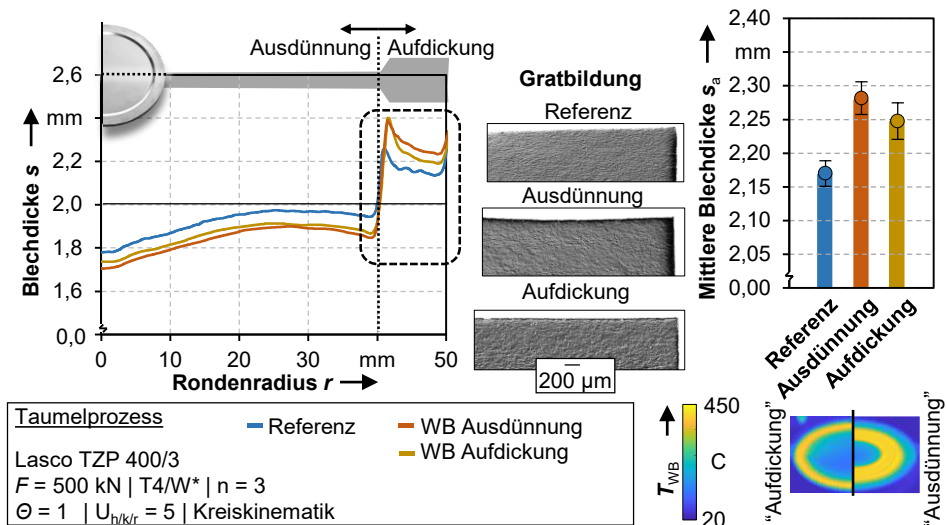


Bild 56: Blechdickenverlauf, mittlere Blechdicke in der Aufdickung sowie Schlibbilder der Gratausprägung der Referenz und der wärmebehandelten Bauteile bei einer beidseitig eingebrachten Kavität

Durch das vergrößerte freie Werkzeugvolumen auf beiden Seiten der Blechronde wird zudem die Ausknickung zu Prozessbeginn verstärkt. Durch eine steigende radiale Druckspannung bedingt, liegt nach Erreichen der Knicksteifigkeit ein einseitig wirkender Eulerscher Knickfall vor. Aufgrund eines an der Oberseite verstärkt wirkenden radialen Stoffflusses durch den alternierenden Stempelkontakt wirkt ein Gradient über die Blechdicke, welcher in einem Ausknicken in Richtung der Krafteinleitung resultiert. Sobald die ausknickende Ronde die Begrenzung durch den Gegenstempel erreicht, tritt ein zweites Eulersches Knicken in entgegengesetzter Richtung nach oben auf. Eine verstärkte inhomogene Formfüllung des Aufdickungsbereiches ist die Folge, welche anhand der signifikant erhöhten Standardabweichungen bestätigt werden kann. Das Ergebnis der numerischen Simulation zu einer einsteigen und beidseitigen Kavität bei  $F = 500 \text{ kN}$  ist in Bild 57 dargestellt. Weiterhin ist eine schematische Beschreibung des einfach und zweifach wirkenden Knickfalls zur deren Verdeutlichung abgebildet. Der Prozessfehler der Gratbildung ist geometriebedingt für die beidseitig wirkende Kavität generell signifikant geringer ausgebildet. Aufgrund eines deutlich größeren freien Werkzeugvolumens auf beiden Seiten der unverformten Ausgangsronde kann durch den Stempel, selbst bei zunehmender Formfüllung keine lokal wirkende Spannung in axialer Richtung eingebracht werden. Die in Abschnitt 5.3 grundlegend beschriebene Radialspannung begünstigt zwar allgemein die

Gratbildung, wird aber wie bereits beschrieben bei steigenden Werten in Form eines beidseitigen Ausknickens abgebaut. Folglich lässt sich grundlegend der Blechdickenverlauf sowie die erreichbaren Maximalwerte von einer einseitigen auf eine beidseitige Materialaufdickung übertragen. Durch das freie Werkzeugvolumen auf beiden Seiten der Blechrunde kann zwar die Gratbildung durch eine fehlende lokal wirkende Spannung minimiert werden, allerdings tritt ein beidseitiger Eulerscher Knickfall als Fehlerbild in Erscheinung.

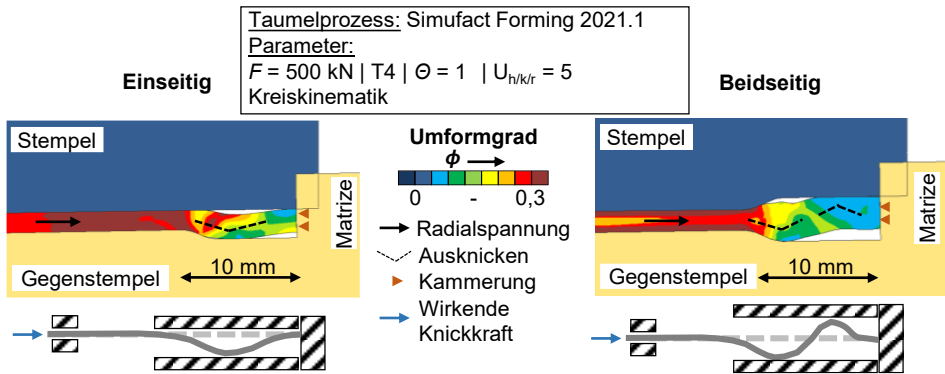


Bild 57: Ergebnis der numerischen Simulation im Ausgangszustand T4 einer einseitigen sowie beidseitigen Kavität und schematische Darstellung der beiden Knickfälle

Neben der Zielgröße der Blechdicke wird nachfolgend analog der radiale sowie tangentielle Stofffluss analysiert, um detailliert die Möglichkeit der Stoffflusssteuerung durch lokale Eigenschaftsgradierung aufzuzeigen. Der radiale Anteil ist für die drei unterschiedlichen zu untersuchenden Varianten in Bild 58 dargestellt.

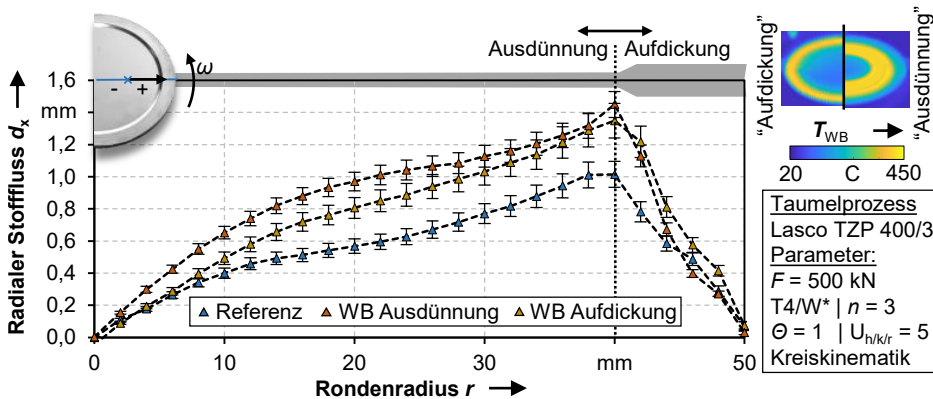


Bild 58: Radialer Stofffluss über den Bauteilradius für das Referenzbauteil sowie für beide Wärmebehandlungslayouts bei einer beidseitigen Anordnung der Funktionselemente

In Anlehnung an die übertragbaren Blechdickenverläufe kann hier ebenfalls ein direkter Vergleich mit dem Referenzbauteil mit einseitiger Aufdickung gezogen werden. Die Kurven steigen beginnend vom Zentrum mit keinem nachweisbaren radialen Stofffluss bis zu einer radialen Position von  $r = 10$  mm gleichermaßen stark an. Für das nicht gradierte Bauteil steigen die Werte sukzessive bis zu einem Maximum direkt am Einlaufbereich der Kavität mit Werten von  $d_x = 1,0 \pm 0,07$  mm. Einen ähnlichen Verlauf weisen die beiden Proben mit Wärmebehandlung auf, allerdings mit einer veränderten Steigung bis zu ihren jeweiligen Maximalwerten am Einlaufbereich mit  $d_x = 1,31 \pm 0,05$  mm für eine Entfestigung im aufgedickten Bereich und  $d_x = 1,36 \pm 0,04$  mm in der primären Umformzone. Mit fortschreitender radialer Position bis hin zum Bauteilrand sinken diese Werte wieder gegen die Nulllinie, was mit dem fehlenden Stempelkontakt und der Fließbehinderung in Form der Matrizenwand begründet werden kann. Der durch die Abrollbewegung des Stempels auf der Bauteiloberfläche induzierte tangentielle Stofffluss ist für die drei Varianten in Bild 59 gegenübergestellt.

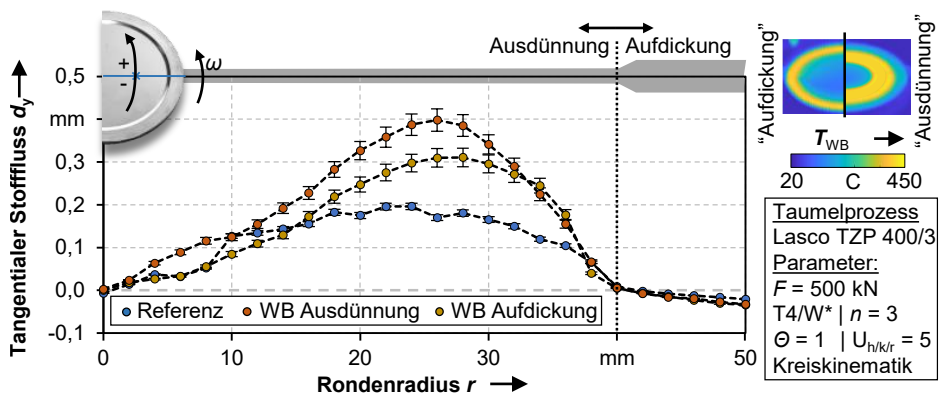


Bild 59: Tangentialer Stofffluss über den Bauteilradius für das Referenzbauteil sowie für beide Wärmebehandlungslayouts bei einer beidseitigen Anordnung der Funktionselemente

Vergleichbar mit den vorangegangenen Untersuchungen steigen die Kurven beginnend im Rondenzentrum ohne tangentialen Stofffluss bis zu ihren jeweiligen Maximalwerten in der Mitte der primären Umformzone an, bevor diese bis zum Beginn der Kavität wieder auf die Nulllinie abfallen. Die maximalen Werte für die Referenz sowie eine Wärmebehandlung im aufgedickten und im ausgedünnten Bereich liegen bei  $d_y = 0,20 \pm 0,01$  mm,  $d_y = 0,31 \pm 0,03$  mm und  $d_y = 0,40 \pm 0,04$  mm. Diese Wertentwicklung sowie die Lage der Maximalwerte sind direkt übertragbar zur Referenz mit einseitiger Aufdickung.

Zusammenfassend können die Wirkungsweise des zwei- bzw. dreidimensionalen Druckspannungszustandes während des Formgebungsprozesses sowie der Einfluss einer lokalen Eigenschaftsgradierung bei beidseitig eingebrachten Formelementen direkt mit der Referenzgeometrie einer einseitigen Aufdickung verglichen werden. Bedingt durch ein beidseitig vorliegendes freies Werkzeugvolumen kommt es allerdings zu einem bisher nicht identifizierten Prozessfehler in Form einer zweifachen Ausknickung in die Kavität. Eine inhomogene Formfüllung mit signifikant gesteigener Standardabweichung ist die Folge. Dieses Ausknicken ist durch den fehlenden Stempelkontakt bedingt und bewirkt den fast vollständigen Abbau der radialen Druckspannung. Durch die betragsmäßig geringe wirkende Druckspannung wird zusätzlich die Gratbildung im Randbereich reduziert, welche auf den lokal am Werkzeugspalt wirkenden Gradienten aus Spannung und Formänderungswiderstand zurückzuführen ist. Das beidseitige Ausknicken wird sowohl durch eine Reduzierung des Fließwiderstands im Bereich der Kavität als auch durch einen gesteigerten Stofffluss aus dem Rondenzentrum nach Wirkmechanismus 2 begünstigt. Mit zunehmender Formfüllung kann sich diese Ausknickung je nach Ausprägung zu einer Materialüberlappung in Form einer oder mehrere Falten ausbreiten und ist deshalb für die Weiterverarbeitung zu berücksichtigen.

### **7.2.3 Einfluss einer variierenden radialen Position der Kavität auf den Spannungs- und Formänderungswiderstand**

Durch eine Übertragung der Wirkzusammenhänge auf eine variierende radiale Position der Aufdickung kann einerseits der Bereich der kritischen Gratbildung und der Zielbereich der Werkstoffvorverteilung voneinander getrennt und somit das Potential beider zuvor untersuchten Wärmebehandlungsstrategien ausgeschöpft werden. Andererseits wird durch die weiter innen liegende Kavität ein theoretischer radialer Stofffluss in Richtung Bauteilzentrum induziert, welcher gezielt zu Formfüllung beitragen kann. Dieser Stoffflussanteil konnte bereits von Opel [17] für Stahlwerkstoffe unterschiedlicher Festigkeit identifiziert und von Hildenbrand [28] auf einen vergrößerten Durchmesser von  $D = 120$  mm übertragen werden. Im Rahmen der Wärmebehandlungsversuche in diesem Kapitel soll also neben der Bewertung der erreichbaren Blechdicke zudem die Möglichkeit zur Umkehr der Stoffflussrichtung aus dem konventionellen Taumelprozess durch lokale Eigenschaftsgradierung evaluiert werden. Entsprechend kommt neben den beiden bereits untersuchten

Wärmebehandlungslayouts im inneren ausgedünnten sowie im aufzudickenden Bereich eine kombinierte Entfestigung in beiden Bereichen am Innen- und Außenradius der Aufdickung in Frage. Die definierten Wärmebehandlungslayouts sowie das Ergebnis der Temperaturmessung mittels Thermokamera sind in Bild 60 dargestellt. Nach der gezielten Eigenschaftsgradierung ausgehend vom Ausgangszustand  $T_4$  der Ronden werden diese ebenfalls im untersuchten Taumelprozess analog der Referenzbauteile umgeformt.

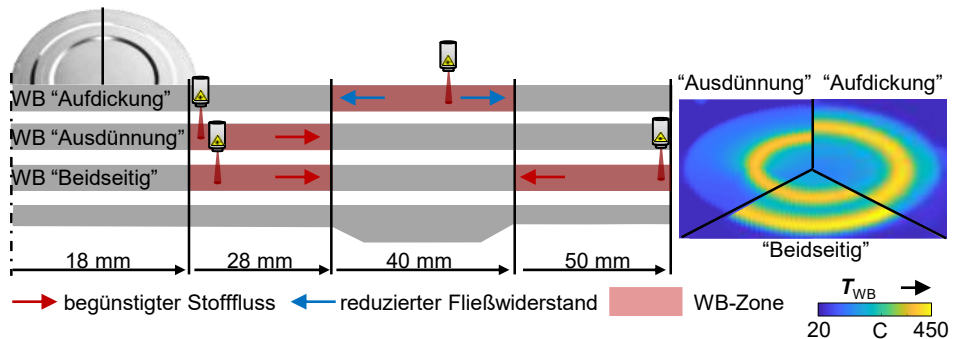


Bild 60: Definierte Wärmebehandlungszonen mit dem Ziel eines begünstigten Stoffflusses oder eines reduzierten Fließwiderstands und Ergebnis der thermographischen Aufnahmen für eine geänderte radiale Position der Kavität

Bei dem zusätzlich zu untersuchenden beidseitigen Layout werden zwei Kreisbahnen mit einem Durchmesser von  $D_L = 45$  mm und einer Kantenlänge des Laserspots von  $l_L = 10$  mm für den äußeren sowie von  $D_L = 23$  mm und  $l_L = 10$  mm für den inneren Bereich definiert. Die Ergebnisse der Härtemessung sind in Bild 61 gegenübergestellt, auf eine detaillierte Darstellung der Temperaturverläufe wird an dieser Stelle verzichtet. Für die beiden Layouts mit jeweils einer einzelnen Kreisbahn zur lokalen Wärmebehandlung am Innenring und in der Aufdickung können analog der vorangegangenen Versuche eine Entfestigung um etwa 35% mit Werten von 52 - 54 HB erzielt werden. Die Wärmeeinflusszonen können auf Basis der Härteverteilung mit einer Größe von etwa 7 - 10 mm identifiziert werden. Eine signifikante Entfestigung wirkt jedoch lediglich in einem Bereich von 5 mm, weshalb eine ausreichend lokale Auflösung bestätigt werden kann. Im Vergleich dazu kann bei der Wärmebehandlung mittels zwei einzelner, nacheinander applizierter Kreisbahnen, eine sich überschneidende WEZ II im Bereich der späteren Aufdickung erkannt werden. Zur Reduzierung dieser Beeinflussung wurde die Wärmebehandlung mit einer Abkühlzeit von 120 s durchgeführt. Zwar kann eine Wärmeeinflusszone im Aufdickungsbereich dabei nicht gänzlich vermieden werden, mit

maximalen Härtewerten von 75 HB liegt im Vergleich zum Ausgangszustand ein für den Untersuchungsgegenstand ausreichender Gradient über den Rondenradius vor. Anhand der Bewertung der Härteverteilung zur lokalen Eigenschaftsgradierung kann außerdem eine Prozessgrenze der untersuchten Wärmebehandlungsstrategie verdeutlicht werden. Wärmebehandlungslayouts mit einer Spotgröße von 10 - 14 mm können unter Berücksichtigung des Werkstoffs, der Blechdicke und der gewählten Laserparameter ausreichend lokal appliziert werden. Es sind bedingt durch die hohe Wärmeleitfähigkeit und die Prozessdauer bereits größere WEZ erkennbar. Gerade bei einem großen Verhältnis von Wärmebehandlungsfläche zu Gesamtbauteilvolumen kann eine lokale Entfestigung nicht mehr sichergestellt werden. Zudem sind sehr kleine oder stufenweise umgesetzte Layouts nur mit sehr hohem Einstellaufwand oder unter Einsatz von Gegenmaßnahmen möglich.

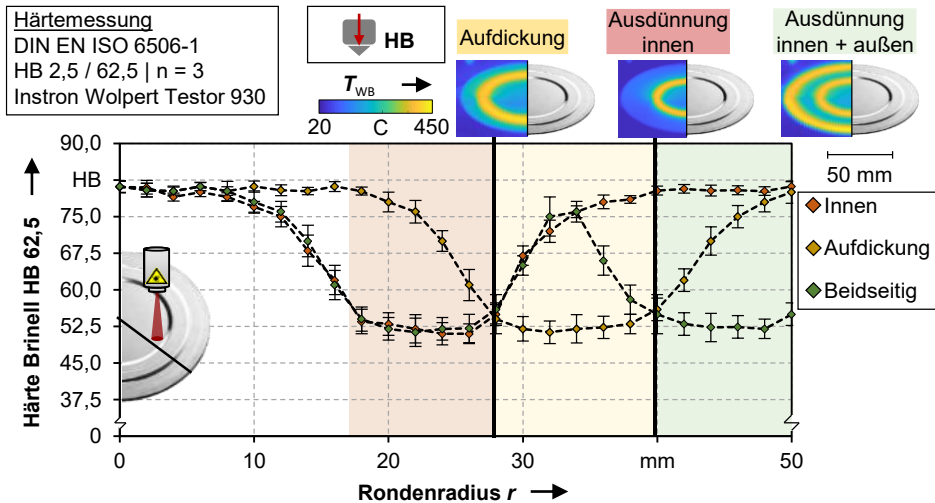


Bild 61: Resultierender Härteverlauf in Abhängigkeit des Wärmebehandlungslayouts für eine geänderte radiale Position der Kavität

Im Vergleich zu den Demonstratorgeometrien mit einer umlaufenden Aufdickung im Randbereich wird bei einem radial nach innen verschobenen Funktionselement eine signifikant veränderte geometriebedingte Ausprägung der wirkenden Kontaktfläche, der vorliegenden Spannungs- und entsprechend auch der Formänderungszustände erwartet. Zur Quantifizierung werden die Spannungskomponenten in die drei Raumrichtungen über den Bauteilradius analog der vorherigen Untersuchungen ausgewertet, siehe Bild 62.

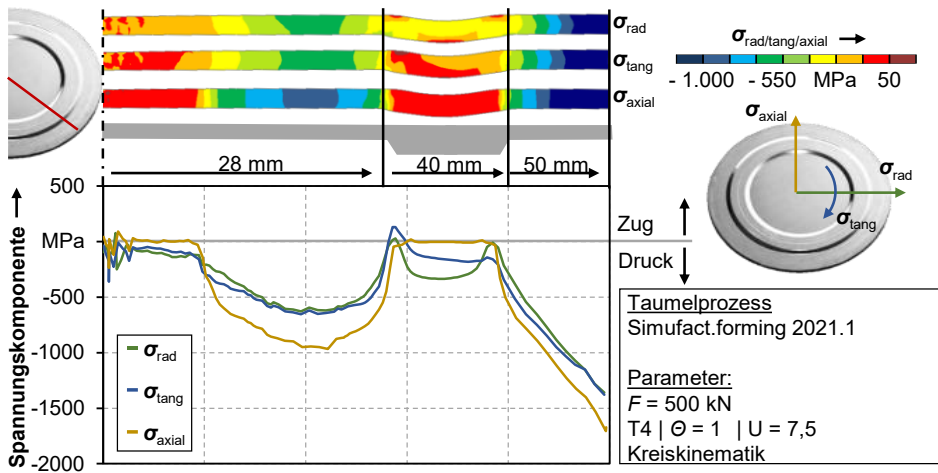


Bild 62: Numerische Identifikation der dreidimensional wirkenden Spannungskomponenten im radialen Schnitt für eine nach innen verschobene Kavität im Ausgangszustand T4

Bei Analyse der Spannungsverläufe fällt ein abweichender Verlauf im Vergleich zur Referenz mit umlaufender Aufdickung außen auf. Während im Rondenzentrum bedingt durch den fehlenden Stempelkontakt weiterhin ein Bereich mit fehlendem axialen Spannungsanteil und somit einem zweidimensionalen Druckspannungszustand vorliegt, kann die primäre Umformzone mit einem dreidimensionalen Druckspannungszustand in zwei Teilbereiche aufgeteilt werden. Der bereits in den vorangegangenen Untersuchungen nachgewiesene Teil kann dabei zwischen dem Rondenzentrum und der weiter außenliegenden umlaufenden Kavität identifiziert werden. In diesem lokalen Minimum werden Werte von  $\sigma_{\text{rad}} = -629 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{\text{tang}} = -652 \text{ MPa}$  und  $\sigma_{\text{axial}} = -966 \text{ MPa}$  erreicht, welche geringfügig niedriger im Vergleich zur Referenz liegen. Dies lässt sich mit dem Vorhandensein einer zweiten Kontakt- und folglich auch Umformzone im äußeren Randbereich der Ronde begründen. Da hier kein freies Werkzeugvolumen in Form einer eingebrachten Kavität vorliegt, wird der Werkstoff bei maximaler Winkelanstellung mit der betragsmäßig größten Druckspannung beaufschlagt. Werte von  $\sigma_{\text{rad}} = -1.360 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{\text{tang}} = -1.378 \text{ MPa}$  und  $\sigma_{\text{axial}} = -1.705 \text{ MPa}$  zeigen einen deutlich stärker ausgeprägten dreidimensionalen Druckspannungszustand im Vergleich zur Referenz auf. Dieser begünstigt im realen Prozess maßgeblich das Fehlerbild der Gratbildung durch Verdrängung von Werkstoffvolumen in den Werkzeugspalt zwischen Stempel und Matrize. Weiterhin lässt sich mit dem in radialer Richtung vorliegenden Gradienten in der zweiten primären Umformzone der Stoffrückfluss entgegen der Hauptstoffflussrichtung

beim Taumeln begründen, welcher bereits in [17] nachgewiesen wurde. Im Bereich der Kavität zwischen  $27,5 \text{ mm} < r < 40 \text{ mm}$  liegt bedingt durch den fehlenden Stempelkontakt analog der Referenz ein zweidimensionaler Druckspannungszustand mit einer radialen und einer tangentialen Komponente vor. Dieser ist bedingt durch die beidseitig liegende primäre Umformzone und den dadurch erfolgenden Stofffluss nahezu symmetrisch ausgeprägt. Aufbauend auf diesen Spannungszuständen gilt es die resultierenden Formänderungszustände zu analysieren.

Analog der vorherigen Kapitel liegt der Fokus der Untersuchungen zunächst auf den geometrischen Zielgrößen der Funktionsbauteile. Dabei sind der Blechdickenverlauf, die mittlere Blechdicke in der Aufdickung sowie Gefügeschliffbilder zur Identifikation der Ausprägung des Grats in Bild 63 zusammenfassend gegenübergestellt. Beim Vergleich der Blechdickenverläufe mit den Referenzbauteilen in Abschnitt 7.1 fällt die stärker ausgeprägte Blechausdünnung im Rondenzentrum auf, welche unabhängig vom Entfestigungszustand nachweisbar ist. Mit minimalen Blechdicken von  $s_{\min} = 1,69 \text{ mm}$  für die Referenz,  $s_{\min} = 1,63 \text{ mm}$  für beide zuvor untersuchten Layouts und  $s_{\min} = 1,61 \text{ mm}$  für das kombinierte Layout fällt die Ausdünnung stärker aus. Dies kann durch die Lage der Kavität im Gegenstempel und einen damit einhergehenden begünstigten Stofffluss durch kürzere Fließwege sowie eine radial beidseitig stattfindende Formfüllung [17] begründet werden. Dadurch fließt der Werkstoff leichter in die Kavität, wodurch insgesamt eine höhere Blechausdünnung im Rondenzentrum folgt. Bis zum radialen Beginn der Kavität verlaufen alle vier Kurven mit gleicher Steigung auf dem vorherigen Niveau. In der Kavität selbst zeigt sich das bereits zuvor beschriebene Erscheinungsbild einer lokalen Materialanhäufung am Einlaufbereich, welche je nach radialem Stoffflussanteil größer ausgeprägt ist. Als Besonderheit bei dieser Geometrie ist, wie bereits beschrieben, der Stoffrückfluss am äußeren Rand der Kavität. Dieser Effekt kann im Blechdickenverlauf durch einen gesteigerten Wert am äußeren Rand nachgewiesen werden. Die maximal erreichbaren Werte für die mittlere Blechdicke im Aufdickungsbereich steigen dabei von der Referenz ohne Eigenschaftsgradierung mit  $s_a = 2,15 \pm 0,02 \text{ mm}$  über einer Entfestigung im inneren Bereich der primären Umformzone mit  $s_a = 2,18 \pm 0,04 \text{ mm}$  bis zu  $s_a = 2,22 \pm 0,03 \text{ mm}$  bei Wärmebehandlung im aufgedickten Bereich. Diese Werte verhalten sich abweichend zu den zuvor identifizierten Wirkzusammenhängen. Bei einer Entfestigung im Aufdickungsbereich sinkt die Fließbehinderung in der Kavität, wodurch ein beidseitig wirkender radialer Stofffluss begünstigt wird. Der hier umgesetzte erste Wirkmechanismus zu einer lokalen

Reduzierung des auftretenden Fließwiderstandes überwiegt den Einfluss des zweiten Wirkmechanismus eines begünstigten Werkstoffflusses aus den einseitig entfestigten Bereichen. Die Gratbildung für diese Geometrie wird zwar durch das Fehlen eines freien Werkzeugvolumens direkt im Randbereich begünstigt, was mit den Schlibbildern nachgewiesen werden kann, wird aber durch die beiden zuerst untersuchten Wärmebehandlungslayouts nicht signifikant beeinflusst.

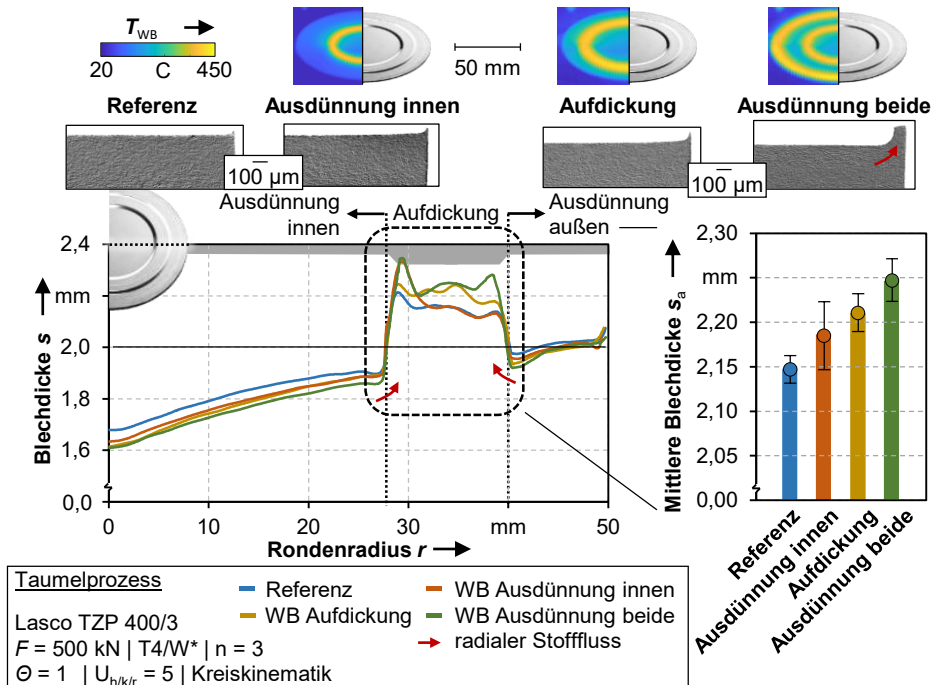


Bild 63: Blechdickenverlauf, mittlere Blechdicke in der Aufdickung sowie Schlibbilder der Gratausprägung der Referenz sowie der drei wärmebehandelten Bauteile bei einer radial weiter innenliegenden Aufdickung

Für das zusätzlich untersuchte Wärmebehandlungslayout mit einer am Innen- und Außenradius der Aufdickung liegenden Entfestigungszone in beiden Teilen der primären Umformzone kann die Aufdickung durch einen beidseitigen Stofffluss in die Kavität erhöht werden, was an den stärker ausgeprägten lokalen Maxima an beiden Seiten der Kavität nachgewiesen werden kann. Es resultiert eine mittlere Blechdicke in der Aufdickung von  $s_a = 2,25 \pm 0,03 \text{ mm}$ , was einer Steigerung der reinen Aufdickungshöhe von 67% gegenüber der Referenz entspricht. Hierbei zeigt sich zudem, dass der zweite Wirkmechanismus eines gesteigerten Stoffflusses aus beiden

entfestigten Bereichen in Richtung Kavität den Mechanismus eines reduzierten Fließwiderstandes übersteigt. Ein lokales Minimum im radialen Anschluss an die Kavität kann abhängig von der erreichten Blechdicke für alle vier Varianten beobachtet werden, was auf ein Eindringen der konischen Stempelform zurückzuführen ist.

Diese veränderten geometrischen Zusammenhänge gilt es im nachfolgenden anhand der auftretenden Stoffflussanteile zu verifizieren. Dafür ist der radiale Stofffluss in Form der Punktverschiebung für die vier untersuchten Varianten in Bild 64 über den Rondenzradius aufgetragen.

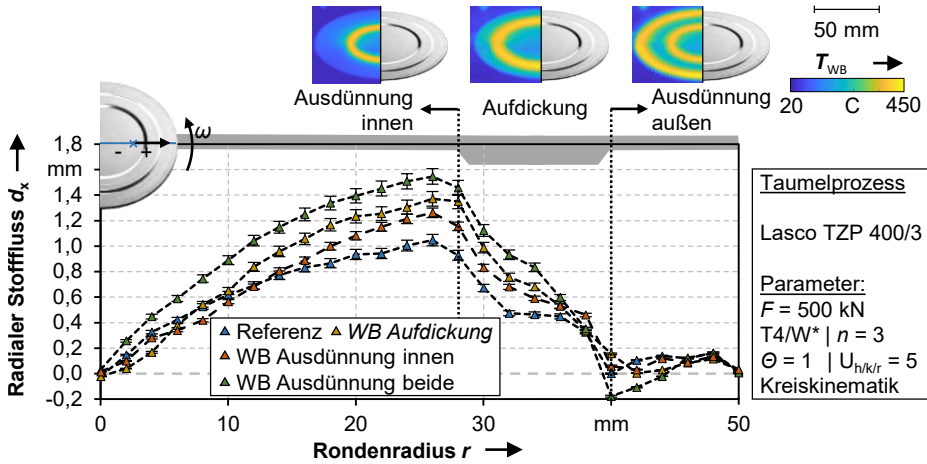


Bild 64: Radialer Stofffluss der Referenz sowie der drei wärmebehandelten Bauteile bei einer radial weiter innenliegenden Aufdickung

Ausgehend vom Rondenzentrum ohne einen radialen Stoffflussanteil bis zum Beginn der Kavität bei  $r = 37,5$  mm weisen alle vier Kurven bis zum Erreichen der Maximalwerte am Kavitätsbeginn einen vergleichbaren Verlauf auf, welcher mit zunehmender radialer Position leicht abflacht. Eine Abstufung der Maximalwerte kann analog der erreichbaren Blechdicken im Aufdickungsbereich erfolgen. Während bei der Referenz ein Wert von  $d_x = 1,01 \pm 0,05$  mm erzielt wird, können durch eine Entfestigung im inneren oder im Aufdickungsbereich Werte von  $d_x = 1,22 \pm 0,04$  mm sowie  $d_x = 1,34 \pm 0,04$  mm erreicht werden. Den höchsten radialen Stoffflussanteil am Einlauf weist die in beiden Teilen der primären Umformzone entfestigte Probe mit  $d_x = 1,56 \pm 0,03$  mm auf. Im Bereich der Kavität selbst lässt sich ausgehend von den vorliegenden Maximalwerten ein vergleichbarer abnehmender Verlauf zu den vorangegangenen Untersuchungen erkennen. Als grundlegend verschieden ist allerdings das Erscheinungsbild des radialen Stoffflusses am äußeren

Kavitätsrand einzustufen. Während für die Referenz sowie die ausschließlich im Inneren entfestigte Ronde kein radialer Anteil nachgewiesen werden kann, kann durch eine Wärmebehandlung der Aufdickung oder eine beidseitige Wärmebehandlung ein negativer Stofffluss erzielt werden. Diese negative Komponente beweist die zuvor aufgestellte Behauptung einer Stoffflussumkehr in Richtung Rondenmitte. In qualitativer Übereinstimmung mit dem Blechdickenverlauf liegt ein größerer Stoffflussanteil in negativer radialer Richtung von  $d_x = 0,19 \pm 0,01$  mm für die im Randbereich entfestigte Probe vor. Diese Ergebnisse bestätigen den zuvor diskutierten größeren Effekt eines beidseitig der Kavität entfestigten Bereichs mit begünstigtem Stofffluss gegenüber einer reduzierten Reaktionskraft entlang der Lastpfade durch Entfestigung im Aufdickungsbereich. Bedingt durch die konische Stempelform und den Kontakt im Randbereich steigen die Werte bis zum Erreichen der Matrizenwand wieder leicht an.

Aufgrund des bei dieser Geometrie weiter innen liegenden freien Werkzeugvolumens wird auch ein signifikanter Einfluss auf den tangentialen Stofffluss postuliert, welcher für die vier untersuchten Varianten in Bild 65 dargestellt ist. Basierend auf den zuvor abgeleiteten Wirkzusammenhängen zwischen tangentialem Stofffluss und Formfüllung in der Kavität kann eine Übertragbarkeit auf die vorliegenden Verläufe bestätigt werden. Im ausgedünnten inneren Bereich steigen die Verläufe ausgehend vom Ursprung bis zu ihrem Maximum in der Mitte der Stempelkontaktfläche in der primären Umformzone. Aufgrund der unterschiedlich entfestigten Bereiche liegen einerseits die Maximalwerte der Referenz mit  $d_y = 0,42 \pm 0,03$  mm und der Probe mit einer Entfestigung im Aufdickungsbereich mit  $d_y = 0,49 \pm 0,04$  mm sowie beide Varianten mit einer Entfestigung in den Teilbereichen der primären Umformzone mit  $d_y = 0,71 \pm 0,04$  mm und  $d_y = 0,73 \pm 0,05$  mm jeweils auf einem vergleichbaren Niveau. Bedingt durch fehlenden Stempelkontakt fallen alle Verläufe bis zum Beginn der Kavität wieder zur Nulllinie ab und verlaufen auf niedrigem Wert bis zu deren Ende. Im äußeren ausgedünnten Bereich steigen die Werte wieder leicht an, ein signifikant ausgeprägter tangentialer Stofffluss kann jedoch nicht nachgewiesen werden. Neben einer allgemein geringen Kontaktfläche in diesem Bereich kann zudem die maßgeblich wirkende Fließbehinderung der Materialvorverteilung auf der einen sowie der Matrizenwand auf der anderen Seite als Begründung angeführt werden.

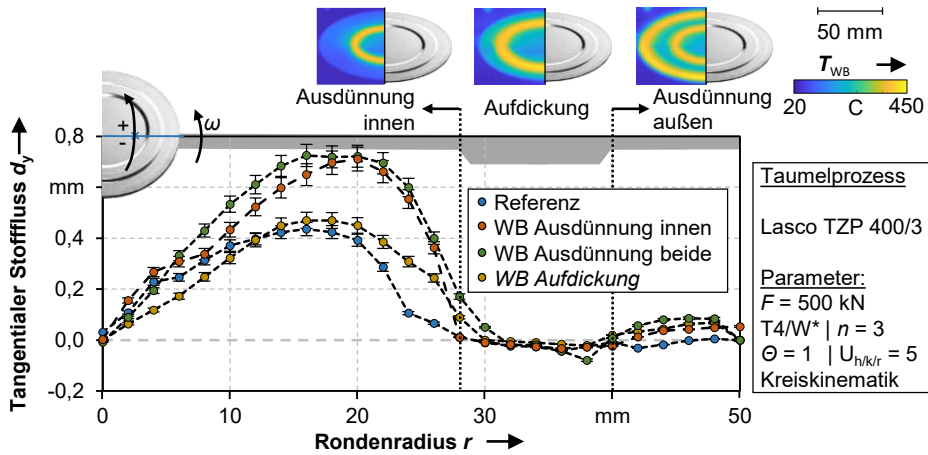


Bild 65: Tangentialer Stofffluss der Referenz sowie der drei wärmebehandelten Bauteile bei einer radial weiter innenliegenden Aufdickung

Zusammenfassend können die Wirkzusammenhänge bezüglich der Formgebung im Prozess sowie der Möglichkeit zur Stoffflusssteuerung mittels lokaler Eigenschaftsgradierung der Referenzgeometrie auf eine radial nach innen versetzte umlaufende Aufdickung übertragen werden. Es gilt aber, geometriebedingte Besonderheiten bezüglich der Auslegung von THTB-Layouts zu berücksichtigen. Aufgrund einer beidseitig liegenden primären Umformzone kann bei dieser Geometrie durch eine Wärmebehandlung des Aufdickungsbereichs und damit eine Reduzierung des lokal wirkenden Fließwiderstandes ein beidseitiger Stofffluss induziert und die Formfüllung verbessert werden. Dies liegt in einem auf beiden Seiten vorliegenden dreidimensionalen Druckspannungszustand begründet. Durch die beidseitige Wirkungsweise kann mit diesem Layout ein höherer Wert für die mittlere Blechdicke in der Aufdickung im Vergleich zu einer Entfestigung im inneren Teil der primären Umformzone erzielt werden.

Im Sinne eines ganzheitlichen Prozessverständnisses kann bei der Umformung dieser Geometrie durch geeignete Wärmebehandlungen ein radial nach innen wirkender Stofffluss im Randbereich realisiert werden, welcher zuerst von Opel [17] für Stahlwerkstoffe nachgewiesen und durch Hildenbrand [28] auf einen Durchmesser von  $D = 120$  mm übertragen wurde. Dabei ist im Vergleich zum konventionellen Taumeln mit weitestgehend radial nach außen wirkenden Anteilen eine Stoffflussumkehr realisierbar, welche für eine zusätzlich gesteigerte Formfüllung genutzt wird. Diese basiert auf einem beidseitig vorliegenden dreiachsigen Druckspannungszustand, durch welchen Werkstoff in das freie Kavitätsumen

verdrängt wird. Eine Steuerung dieses entgegen der Hauptstoffflussrichtung wirkenden Stoffflussanteils wird mit Hilfe einer lokalen Entfestigung im äußeren Rand der primären Umformzone ermöglicht. Trotzdem muss, bedingt durch die Lage der Wärmebehandlungszone im Randbereich, die begünstigte Gratbildung bei der Auslegung von THTB berücksichtigt werden.

Zusätzlich darf die gegenseitige Beeinflussung der Wärmebehandlungsbereiche bei mehrteiligen Layouts bedingt durch eine überschneidende Wärmeeinflusszone für die Auslegung nicht außer Acht gelassen werden. Es besteht eine Limitation der Anwendung hinsichtlich eines großen Verhältnisses aus Wärmebehandlungsfläche zu Gesamtbauteilvolumen. Durch den hohen Wärmeeintrag in Kombination mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit können lokal begrenzte Flächen nicht ausreichend voneinander abgegrenzt werden. Ebendies kann auf vergleichsweise lange Prozesszeiten oder auf stufenweise definierte Layouts übertragen werden. Die Erarbeitung alternativer Wärmebehandlungsmethoden zur lokalen Entfestigung zur Anwendung in der Blechmassivumformung sollte deshalb in weiterführenden Arbeiten adressiert werden.

### **7.3 Ganzheitliche spannungs- und stoffflussbasierte Prozessbewertung**

Aufbauend auf den vorangegangenen Untersuchungen zur Stoffflusssteuerung mittels lokaler Eigenschaftsgradierung in Form einer Wärmebehandlung und der Übertragung auf unterschiedliche geometrische Eigenschaften kann eine ganzheitliche Prozessbewertung erfolgen. Es wird zudem auf die spannungs- und stoffflussbasierte Modellvorstellung des Taumelprozesses aus Kapitel 5 zurückgegriffen. Dabei werden die numerisch identifizierten Spannungskomponenten je Raumrichtung im Ausgangszustand  $T_4$  mit dem wirkenden Gradienten aus Spannung und Formänderungswiderstand in Abhängigkeit des Entfestigungszustandes zur Bewertung gegenübergestellt.

Grundlegend kann für sämtliche geometrische Gegebenheiten im Ausgangszustand ein vergleichbar wirkender zwei- oder dreiachsiger Druckspannungszustand identifiziert werden, welcher als maßgeblich für die induzierten radialen und tangentialen Stoffflussanteile einzustufen ist. Dieser Spannungszustand ist in seiner Ausprägung abhängig von den jeweiligen geometrischen Charakteristika des Taumel- und respektive des Gegenstempels. Gemeinsam haben alle Anwendungsfälle den zweiachsigen Druckspannungszustand im Bauteilzentrum, wobei jeweils axiale und

tangentiale Anteile vorliegen. Die axiale Spannungskomponente wird ausschließlich bei vorhandenem Stempelkontakt induziert. Dieser liegt aber aufgrund des während der axialen Zustellung zu Prozessbeginn verdrängten Werkstoffs und der anschließenden Winkelanstellung im Bauteilzentrum nicht vor. An diesen Bereich schließt sich die primäre Umformzone des Taumelprozesses für eine maximale Winkelanstellung an, welche von einem betragsmäßigen Maximum der dreiachsigen Druckspannungskomponenten geprägt ist. Die größten Werte liegen dabei im wirkenden Kraftangriffspunkt vor, welcher durch die Verkipfung und die nach außen wandernde Kontaktfläche definiert ist. Im Bereich der Kavität im Gegenstempel liegt analog dem Bauteilzentrum ein zweiachsiger Druckspannungszustand vor. Durch das freie Werkzeugvolumen wird keine axiale Druckspannungskomponente induziert. Die in der Ebene wirkenden radialen und tangentialen Druckspannungen bewirken ein Füllen der Kavität mit verdrängtem Werkstoffvolumen aus der primären Umformzone.

Unter der Annahme eines für die Formänderung notwendigen Gradienten aus wirkender Spannung und vorliegendem Formänderungswiderstand wurden zwei grundlegende Wirkmechanismen abgeleitet. Durch Entfestigung im Zielbereich der Materialaufdickung wird der lokal wirkende Fließwiderstand reduziert und somit der Stofffluss unter Wirkungsweise eines zweiachsigen Druckspannungszustandes in das freie Kavitätsvolumen begünstigt. Bei einer Reduzierung des Fließwiderstands in der primären Umformzone hingegen wird der Stofffluss aus dem entfestigten Bereich unter Wirkungsweise eines dreiachsigen Druckspannungszustandes in die Bereiche mit betragsmäßig geringeren Spannungskomponenten erleichtert.

Auf Basis dieser allgemeingültigen Wirkzusammenhänge zwischen zwei- oder dreiaxigem Druckspannungszustand, der resultierenden Formänderung sowie der zwei zugrundeliegenden Wirkmechanismen eines begünstigten Stoffflusses und eines reduzierten Formänderungswiderstands erfolgt eine abschließende Bewertung der Wirkungsweise von THTB für die untersuchten Geometrien und Layouts. Eine Bewertungsmatrix zur Wirkungsweise der unterschiedlichen Wärmebehandlungs-layouts auf die ursächlichen Spannungszustände, die induzierten Stoffflussanteile und die resultierenden geometrischen Eigenschaften ist in Bild 66 unter Berücksichtigung auftretender Prozessfehler dargestellt.

		Zielgrößen			Prozessfehler		
Geometrie	WB-Layout	$\bar{s}_a$	$d_x$	$d_y$	$\sigma s_a$	Grat	Knick
Einseitige Aufdickung	Aufdickung	▲	▲	⊖	⊖	▼	
	Umformzone	▲▲	▲	▲	▼	⊖	
Beidseitige Aufdickung	Aufdickung	▲	▲	⊖	⊖	⊖	▼▼
	Umformzone	▲▲	▲	▲	▼	⊖	▼
Radiale Position	Aufdickung	▲	▲	⊖	⊖	⊖	
	Umformzone	▲	▲	▲	⊖	⊖	
	Beidseitig	▲▲	▲▲	▲	▼	▼	

**Referenz T4 (ohne WB)**

- ▲▲ Stark positiv
- ▲ Positiv
- ⊖ Neutral
- ▼ Negativ
- ▼▼ Stark negativ

Bild 66: Ganzheitliche Bewertungsmatrix über den Einfluss der Wärmebehandlungslayouts auf definierte Zielgrößen und auftretende Prozessfehler

Bei der in dieser Arbeit untersuchten Referenzgeometrie mit umlaufender Aufdickung lässt sich durch eine lokale Entfestigung im Randbereich eine gesteigerte mittlere Blechdicke in Folge eines reduzierten Fließwiderstandes im Bereich der Kavität erzielen. Dabei bewirkt die lokale Entfestigung im Zielbereich eine Reduktion der Reaktionskräfte und des Fließwiderstandes unter zweiachsiger Druckspannung in der Kavität, was als erster Wirkmechanismus definiert wird. Jedoch wird auch der Prozessfehler der Gratbildung durch einen reduzierten Formänderungswiderstand am Übergang von Stempel und Matrize verstärkt. Der zweite identifizierte Wirkmechanismus beschreibt einen begünstigteren Werkstofffluss aus den entfestigten Bereichen unter Wirkungsweise eines dreiachsigen Druckspannungszustandes. Dies wird gezielt im Rahmen des zweiten Wärmebehandlungslayouts in der primären Umformzone genutzt. Dabei kann der radiale Stofffluss und in Folge die Blechdicke signifikant erhöht werden. Durch den unveränderten Formänderungswiderstand im Randbereich kann zudem eine steigende Gratbildung verhindert werden. Lediglich die Homogenität in der Aufdickung fällt tendenziell geringer aus, was in diesem Anwendungsfall jedoch auf die allgemein unvollständige Formfüllung zurückzuführen ist. Eine Skalierbarkeit auf größere Durchmesser kann unter Berücksichtigung einer gleichen relativen Umformkraft nachgewiesen werden. Die grundlegenden Wirkzusammenhänge können weiterhin auf eine beidseitig liegende Kavität übertragen werden. Durch

eine lokale Entfestigung in Form der zuvor untersuchten Layouts können der radiale Stofffluss und entsprechend die mittlere Blechdicke erhöht werden. Aufgrund der geänderten werkzeugspezifischen Gegebenheiten am Randbereich kann eine weitere Prozessgrenze identifiziert werden. Ein nicht abgestützter Bereich durch das beidseitig der Blechrunde liegende freie Werkzeugvolumen knickt infolge der radialen Druckspannungen aus, wodurch ein Aufschieben mit zunehmender Formfüllung resultiert (Bild 57). Dieser zweifach wirkende Eulersche Knickfall wird signifikant durch eine Entfestigung im Aufdickungsbereich begünstigt, was sich mit den Erkenntnissen zum Taumeln von beidseitig aufgedickten Stahlbauteilen in [213] deckt.

Bei radialer Verschiebung der Position der Materialvorverteilung nach innen ist tendenziell eine geänderte Wirkungsweise der beiden zuvor untersuchten Layouts festzustellen. Bedingt durch das Vorliegen einer zweigeteilten primären Umformzone mit dreiachsigem Druckspannungszustand, was ausführlich in Abschnitt 7.2 diskutiert wird, kann eine Stoffflussumkehr radial nach innen realisiert werden. Weiterhin wird bei dieser Geometrie generell durch das fehlende freie Kavitätsumvolumen im Randbereich die Gratbildung maßgeblich erhöht. Zwar kann ebenfalls durch eine Wärmebehandlung im Zentrum der Stofffluss in die Kavität erhöht werden, allerdings kann durch eine Entfestigung im Zielbereich der Aufdickung durch die nun beidseitig entfestigte primäre Umformzone eine lokale Reduktion der Reaktionskräfte und folglich eine höhere Blechdicke erzielt werden. Die Gratbildung bleibt für beide Layouts, begründet durch die Lage der Entfestigung im Rondeninneren, unverändert hoch. Neben den beiden zuvor untersuchten Layouts besteht zudem die Möglichkeit einer beidseitigen Entfestigung auf Basis des zweiten Wirkmechanismus eines begünstigten Stoffflusses. Dabei kann eine Stoffflussumkehr im Vergleich zum im konventionellen Taumelprozess auftretenden charakteristischen Materialfluss in positiver radialer Richtung erzielt werden, was bereits durch Opel für das Taumeln der selbigen Geometrie unter Einsatz von Stahlwerkstoffen beobachtet werden konnte [17]. Dies lässt sich auf Basis der vorliegenden dreiachsigen Druckspannungskomponenten im äußeren Teil der primären Umformzone mit zunehmenden Werten zum Randbereich hin begründen. Dadurch kann eine weitere Steigerung der mittleren Blechdicke erreicht werden, allerdings wird auch die Gratbildung am Bauteilrand begünstigt.

Grundlegend kann auf Basis der gezeigten Bewertungsmatrix die in Kapitel 5 erarbeitete spannungs- und stoffflussbasierte Modellvorstellung des untersuchten Taumelprozesses als zutreffend bestätigt und deren

Einsatzfähigkeit zur Erarbeitung, Durchführung und Bewertung von Maßnahmen zur Stoffflusssteuerung sichergestellt werden. Unter Berücksichtigung der beiden abgeleiteten zugrundeliegenden Wirkmechanismen kann der Gradient aus wirkender Spannung und Formänderungswiderstand durch lokal entfestigte und feste Bereiche gezielt eingestellt und so der Stofffluss mit dem Ziel einer gesteigerten Formfüllung bei gleichzeitiger Vermeidung der Gratbildung gesteuert werden.

#### **7.4 Ableitung einer Auslegungsmethode zur Stoffflusssteuerung in der Blechmassivumformung**

Für eine potentielle industrienähe Anwendung von THTB zur Stoffflusssteuerung in einem Taumelprozess wird eine allgemeingültige, geometrieunabhängige Auslegungsmethode unter Berücksichtigung der zuvor identifizierten Spannungs- und Formänderungszustände sowie zu vermeidender Prozessfehler abgeleitet. Gerade durch eine grundlegend abweichende Charakteristik hinsichtlich Kontaktfläche, wirkender dreiachsiger Spannungszustände, variierender Umformkräfte und resultierendem dreidimensionalen Formänderungszustand bedarf es einer Erweiterung der in der Blechumformung gültigen Wirkmechanismen. Die übergeordnete Auslegungsmethode ist in Bild 67 dargestellt.

Vorausgesetzt wird ein begründeter Bedarf zur lokalen Eigenschaftsgradierung mittels Entfestigung im Taumelprozess, wie wirtschaftlich oder technologisch nicht zielführend einsetzbare alternative stoffflusssteuernde Maßnahmen. Potentiell in Frage kommende Maßnahmen für Stahlwerkstoffe unterschiedlicher Festigkeitsklassen wurden beispielsweise in [17] und [28] behandelt.

Zur gezielten Auslegung von Wärmebehandlungsstrategien auf Basis der vorgestellten Methode sind eine Reihe von Voruntersuchungen essenziell. Durch Definition von Zielgrößen für das herzustellende prozessangepasste Halbzeug oder Funktionsbauteil wird der Fokus der experimentellen Versuche eingegrenzt und der Aufwand so auf ein Minimum reduziert. Mithilfe eines numerischen Prozessmodells können vorab die maßgeblich für den Stofffluss verantwortlichen dreiachsigen Druckspannungskomponenten und damit die Lage der primären Umformzone identifiziert werden. Um eine Basis möglicher Wärmebehandlungsparameter für die nachfolgende lokale Eigenschaftsgradierung zu generieren und die metallphysikalischen Grundlagen der Kurzzeit-Wärmebehandlung aus Abschnitt 6.1 auf andere ausscheidungshärtbare Legierungssysteme zu übertragen, bedarf es ebenso einer ganzheitlichen Werkstoffcharakterisierung.

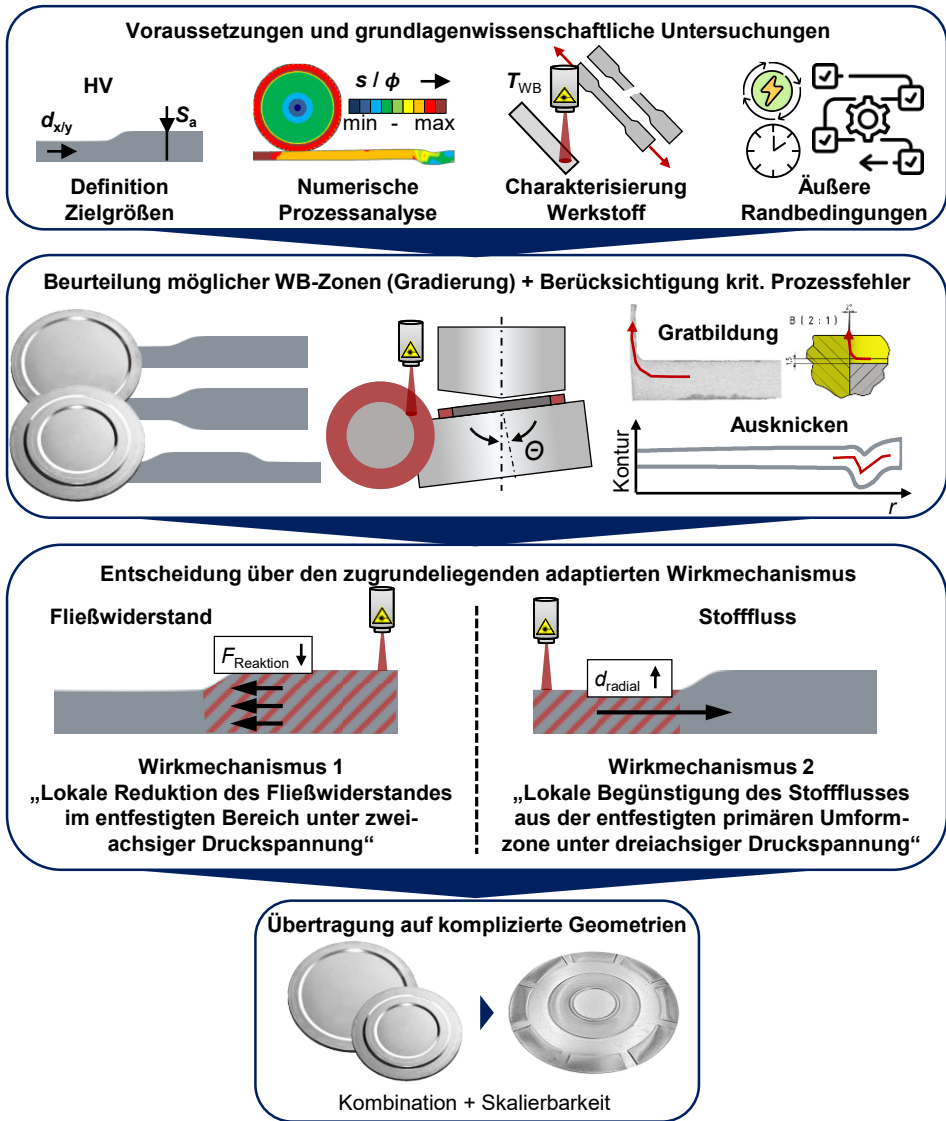


Bild 67: Übergeordnete Auslegungsmethode zum Einsatz von THTB zur Stoffflusssteuerung im Taumelprozess unter Berücksichtigung der grundlegenden Wirkmechanismen und geometrischen Eigenschaften

Neben den prozess- und werkstoffseitigen Eingangsparametern, welche im Rahmen von grundlagenwissenschaftlichen Untersuchungen ermittelt werden müssen, gilt es weiterhin äußere Randbedingungen bei der Auslegung von THTB für die Blechmassivumformung zu berücksichtigen. Dabei stehen vor allem wirtschaftliche und anwendungstechnische Anforderungen sowie Rahmenbedingungen im Fokus. Beispielsweise gilt es mit

dem Hinblick auf eine verkürzte Prozesskette die Wärmebehandlungsstrategie so zu wählen, dass der Vorgang der lokalen Eigenschaftsgradierung von möglichst kurzer Dauer ist und direkt in die Prozesskette integriert werden kann. Weiterhin ist aufgrund des Energieeintrags, der Wärmeübergangzone und des Energieaufwands generell auf eine möglichst lokale Applikation der entfestigten Bereiche zu achten. Eine ganzheitliche Berücksichtigung der nachfolgenden Prozessschritte wie weitere Umformoperationen und Schneid- oder Fügeprozesse sowie die spätere Anwendung sollten bei der Auslegung möglicher THTB-Layouts nach Möglichkeit erfolgen.

Aufbauend auf diesen Voraussetzungen, untersuchten Einfluss- und Prozessgrößen sowie zu beachtenden externen Randbedingungen kann nachfolgend eine geometrieabhängige Beurteilung der lokalen Eigenschaftsgradierung in Form von möglichen Wärmebehandlungszonen durchgeführt werden. Unter Berücksichtigung der beiden grundlegenden Wirkmechanismen können die Bereiche der Blechronden im Taumelprozess in zwei charakteristische Zonen untergliedert werden. Dabei liegt die primäre Umformzone im Zentrum des Kraftangriffspunktes mit vollflächigem Stempelkontakt, in welcher durch die axiale Zustellung des Stempels und einer anschließenden Winkelverkipfung weitestgehend die Plastifizierung während des Prozesses stattfindet. Dies bedingt das Vorliegen eines dreiachsigem Druckspannungszustandes, welcher für das Induzieren eines radialen Stoffflusses verantwortlich ist. Unter Annahme des Gradienten aus wirkender Spannung und vorliegendem Formänderungswiderstand begünstigt eine Entfestigung in diesem Bereich den Stofffluss aus der primären Umformzone in die angrenzenden Randbereiche. Auf Basis des Unterschieds im Druckspannungsniveau in radialer Richtung kann diese Annahme bestätigt werden. Der zweite charakteristische Bereich lässt sich der stempelseitigen Kavität zuordnen. Hier liegt in axialer Richtung ein freies Werkzeugvolumen vor, wodurch bis zum Erreichen der maximalen Formfüllung kein vollständiger Stempelkontakt besteht. Durch Ausknicken des Blechhalbzeugs in die Kavität und zunehmender Formfüllung durch den radialen Stofffluss aus dem Rondenzentrum wird keine axiale Druckspannung aufgebaut. Eine Entfestigung in diesem Bereich zielt schlussendlich nicht auf einen begünstigten Stofffluss, sondern auf eine Reduktion des lokalen Fließwiderstandes in die Kavität ab.

Ebenso müssen bei der Auslegung im Kontext des Taumelprozesses die beiden zuvor maßgeblich auftretenden Prozessfehler der Gratbildung

sowie des Ausknickens im Gegensatz zu Reißern oder kritischer Blech-  
ausdünnung berücksichtigt werden. Entgegen der beim Tiefziehen von  
Karosseriebauteilen auftretenden Rissbildung durch Ausdünnung infolge  
von ungenügend nachfließendem Werkstoff am Tiefziehradius oder einer  
Faltenbildung infolge von tangentialen Druckspannungen am Flansch [48]  
tritt im Taumelprozess durch einen weitgehend dreiachsig wirkenden  
Druckspannungszustand ein verändertes Fehlerbild auf. Zum einen kommt  
es aufgrund der radialen sowie tangentialen Druckspannungen zu einem  
Ausknicken in das freie Kavitätvolumen, zum anderen zu einer  
Gratbildung in den Werkzeugspalt am Bauteilumfang infolge eines zu  
geringen Formänderungswiderstandes.

Aufgrund der wirkenden Spannungs- und Formänderungszustände ist eine  
direkte Entfestigung des primären Umformbereichs nach dem zweiten  
Wirkmechanismus zu bevorzugen. Eine lokale Entfestigung in Kombi-  
nation mit einem dreiachsigen Druckspannungszustand begünstigt den  
Stofffluss aus der Umformzone in die Werkzeugkavität. Hier kann abhän-  
gig vom Anwendungsfall eine Steigerung des Stoffflusses von bis zu Faktor  
2 im Vergleich zur Referenz erzielt werden. Weiterhin lassen sich bei einer  
direkten Entfestigung der primären Umformzone um 30% gesteigerte  
radiale und tangentielle Stoffflussanteile gegenüber einer Entfestigung der  
Zielbereiche realisieren. Folglich lässt sich der zweite Wirkmechanismus  
eines begünstigten Stoffflusses aus der primären Umformzone unter einem  
dreiachsigen Druckspannungszustand als dominierend einstufen. Ist dies  
unter Beachtung der Prozessfehler der Gratbildung oder des Ausknickens  
nicht möglich, empfiehlt es sich, diese Zonen bewusst im festeren Aus-  
gangszustand zu belassen und stattdessen nach dem ersten Wirkme-  
chanismus eine Reduktion des vorliegenden Formänderungswiderstandes  
im Zielbereich zu forcieren. Generell ist festzuhalten, dass beide Wirk-  
mechanismen parallel auftreten und sich auch gegenseitig beeinflussen  
können. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Aluminium kann  
eine Wärmeeinflusszone nicht vollständig vermieden werden. Diese kann  
anhand der Charakterisierungsversuche in Abschnitt 6.3 bestätigt werden,  
wobei bereits ab einer Wärmebehandlungstemperatur von  $T_{WB} = 300\text{ °C}$   
eine signifikante Entfestigung in Form der Härte zu verzeichnen ist.

Im Rahmen der Untersuchungen der vorliegenden Arbeit konnte zwar die  
Notwendigkeit der Adaption der Anwendbarkeit beider Wirkmechanismen  
nach Vogt für die Blechumformung [48] zum Einsatz von THTB in der  
Blechmassivumformung aufgezeigt werden, die generelle Wirkungsweise  
behält allerdings weiterhin seine Gültigkeit. Folglich bietet sich das

Potential zur Anwendung in weiteren Prozessen, welche sich der Prozessklasse der Blechmassivumformung zuordnen lassen. Hierbei gilt es jedoch, wie in der beschriebenen Methode aufgezeigt, die geänderten Randbedingungen zu berücksichtigen. Auf Basis der experimentellen Untersuchungen kann weiterhin das übergeordnete Ziel der Stoffflusssteuerung durch lokale Eigenschaftsgradierung mittels THTB in der Blechmassivumformung umgesetzt werden.

Neben einer Validierung der abgeleiteten Auslegungsmethode in anderen Blechmassivumformprozessen bedarf es zudem der Überprüfung der Anwendbarkeit auf geometrisch kompliziertere Funktionsbauteile unter Berücksichtigung industrienaher Randbedingungen. Damit kann ein erweiterter Anwendungsbereich nachgewiesen und damit die Grundlage zur Anwendung von THTB mit dem Ziel der lokalen Eigenschaftsgradierung in der Blechmassivumformung geschaffen werden.



## 8 Erkenntnistransfer und Qualifizierung der Einsatzeigenschaften

Im Rahmen der vorangegangenen Kapitel konnten die zugrundeliegenden Ursache-Wirkbeziehungen der Formgebung in einem Taumelprozess von Aluminiumlegierungen auf Basis einer spannungs- und stoffflussbasierten Modellvorstellung erarbeitet werden. Eine lokale Eigenschaftsgradierung durch Kurzzeit-Wärmebehandlung ermöglicht dabei die Steuerung des resultierenden Stoffflusses und bietet weiterhin den Vorteil der Vermeidung von Prozessfehlern. Für eine potentielle Anwendung gilt es, die abgeleitete Vorgehensweise sowie die identifizierten Wirkmechanismen auf eine geometrisch komplizierte Demonstratorgeometrie mit industrieller Relevanz zu übertragen. Dafür werden die erarbeiteten Ursache-Wirkbeziehungen anhand von spannungs- und stoffflussbezogenen Kenngrößen analog der vorherigen Kapitel quantifiziert und bewertet. Bezugnehmend auf das unterdrückte Auslagerungsverhalten, welches unter der Wirkungsweise von hohen plastischen Deformationen nach einer Kurzzeit-Wärmebehandlung in Abschnitt 6.1 identifiziert wurde, soll über den Umfang der bisherigen Versuche hinaus das Einsatzverhalten der Funktionsbauteile für eine potentielle Anwendung charakterisiert werden. Durch eine abschließende Prozessbewertung unter Berücksichtigung industrienaher Randbedingungen soll das generierte Wissen dieser Arbeit zusammengefasst und für weitere Einsatzszenarien qualifiziert werden.

### 8.1 Übertragung der Erkenntnisse auf eine industrierelevante Demonstratorgeometrie

Speziell in Getrieben als Herzstück der Kraftübertragung im Antriebsstrang von modernen Fahrzeugen bedarf es neben einer hohen Festigkeit und Verschleißbeständigkeit zudem einer Reduktion der bewegten Massen, um Schaltvorgänge effizient, schnell und für den Passagier komfortabel zu gestalten [1]. In diesem Zusammenhang stellen Mitnehmerscheiben als Grundkomponente einer Kupplungsscheibe ein prominentes Beispiel dar, in welchem hohe Festigkeiten, Funktionsintegration und gleichzeitig Leichtbau kombiniert werden [7]. Mit Fokus auf eine potentielle Anwendung der Funktionsbauteile mit Blechdickengradient gilt es die zuvor identifizierten Ursache-Wirkbeziehungen sowie die Möglichkeit zur Stoffflusssteuerung mittels lokaler Eigenschaftsgradierung nach der abgeleiteten Auslegungsmethode auf eine industrienaher Demonstratorgeometrie zu

übertragen. Diese wurde unter anwendungsspezifischen Gesichtspunkten am Beispiel einer Mitnehmerscheibe eines Kupplungsverbundes definiert [139] und verfügt über eine Kombination verschiedener geometrischer Merkmale aus den vorangegangenen Kapiteln. Die genauen Abmessungen sowie der Demonstrator sind in Bild 68 dargestellt.

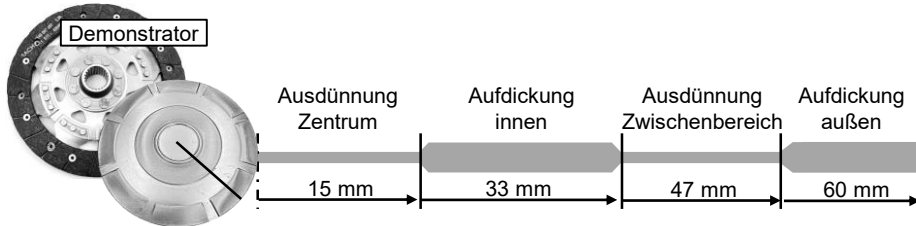


Bild 68: Abgeleitete Demonstratorgeometrie aus einer Kupplungsscheibe

### **Ableitung eines geometrieabhängigen Wärmebehandlungslayouts**

Aufbauend auf der erarbeiteten Auslegungsmethode wird ein geometrieabhängiges Wärmebehandlungslayout für das Demonstratorbauteil abgeleitet. Zielbereiche für die Aufdickung befinden sich beidseitig angebracht an unterschiedlichen radialen Positionen, umlaufend im inneren der Ronde sowie am Bauteilrand. Im Rondenzentrum und im Zwischenbereich liegt die primäre Umformzone, weshalb eine beidseitige Wärmebehandlung auf Basis des stoffflussorientierten Wirkmechanismus ausgewählt wird. Hinsichtlich des radialen Stoffflusses tritt der größte Effekt auf und die Gratbildung wird gleichzeitig unterdrückt. Für die äußere Aufdickung würde mit einer Wärmebehandlung am kritischen Bauteilrand die ohnehin verstärkt auftretende Gratbildung weiter begünstigen werden. Folglich wird für eine lokale Eigenschaftsgradierung zur Stoffflusssteuerung am Beispiel der Demonstratorgeometrie eine Entfestigung im Rondenzentrum von  $0 \text{ mm} < r < 14 \text{ mm}$  sowie entlang eines umlaufenden Kreisrings mit  $r_i = 33 \text{ mm}$  und  $r_a = 47 \text{ mm}$  definiert. Zur Übertragbarkeit werden für die Applikation des Wärmebehandlungslayouts dieselben Laserparameter aus den vorherigen Kapiteln eingestellt und die Laserbahn entsprechend adaptiert. Eine schematische Verdeutlichung des begünstigten Stoffflusses sowie die resultierende Temperatur- und Härteverteilung für das abgeleitete Layout sind in Bild 69 dargestellt. Zur Minimierung der Wärmeinflusszone durch Wärmeleitung innerhalb des Bauteils werden beide kreisförmigen Wärmebehandlungslayouts mit einer Abkühlzeit von 120 s getrennt voneinander appliziert. Für eine direkte Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Qualifizierung der lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung aus Abschnitt 6.2 ist die kumulierte Temperatur zum Prozessende dargestellt.

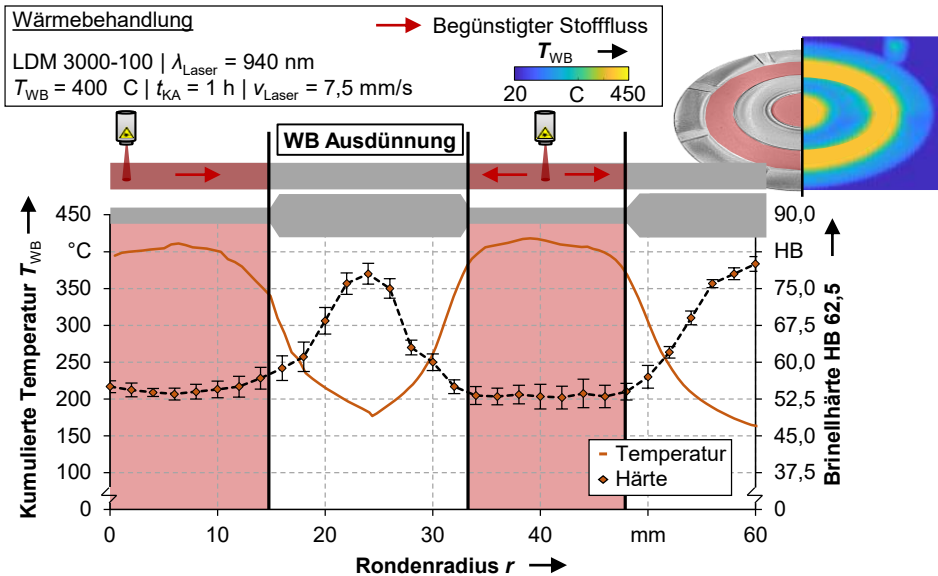


Bild 69: Temperatur- und Härteverteilung für das abgeleitete Wärmebehandlungslayout der Demonstratorscheibe

Für beide Wärmebehandlungsflächen liegen die Werte innerhalb des Temperaturbereichs der maximalen Entfestigung zwischen  $T_{WB} = 350 - 400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Speziell die indirekte Wärmeeinflusszone II im an die Wärmebehandlungszonen angrenzenden Bauteilbereiche ist in der inneren Aufdünnung und am Bauteilrand aufgrund des hohen Energieeintrags während des Prozesses signifikant ausgeprägt. Durch Analyse der Härtegradverteilung kann diese Annahme bestätigt werden. Im Bereich von 15 - 33 mm steigen die Härtewerte bis zu einem mittig liegenden Plateau von 78 HB an. Die WEZ II ist folglich von beiden Seiten ausgehend mit 8 - 9 mm symmetrisch nachweisbar. Im äußeren Randbereich ist die WEZ II bis zum Bauteilrand ausgeprägt, wobei ab 56 mm mit Werten  $> 75 \text{ HB}$  nur noch eine geringe Entfestigung vorliegt und die Gratbildung damit nicht maßgeblich begünstigt wird. Daraus folgend kann die laserinduzierte Kurzzeit-Wärmebehandlung für die Anwendung auf das Demonstratorbauteil für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand der Stoffflusssteuerung eingesetzt werden. Bei einer weiteren gewünschten Verfeinerung, beispielsweise eine lokale Entfestigung der Zwischenbereiche, bedarf es jedoch der Qualifizierung alternativer Wärmebehandlungsmethoden. Nach durchgeführter Wärmebehandlung werden die Blechronden mit  $D = 120 \text{ mm}$  mit der zuvor identifizierten gleichwertigen Umformkraft von  $F = 720 \text{ kN}$  bei sonst gleichen Taumelparametern umgeformt.

### Numerische Analyse der vorliegenden Spannungskomponenten

Analog der vorangegangenen Untersuchungen werden die zum Zeitpunkt der maximalen Winkelanstellung und folglich der minimalsten Kontaktfläche vorliegenden Spannungskomponenten analysiert. Auf Basis der numerischen Identifikation des Druckspannungszustandes kann auf die Lage der primären Umformzone und damit auf die Formänderungszustände geschlossen werden. Die Spannungskomponenten in radialer, tangentialer und axialer Richtung sind qualitativ und quantitativ über den Bauteilradius in Bild 70 dargestellt. Zunächst können die zwei charakteristischen Bereiche mit jeweils einem zwei- oder dreiachsigen Druckspannungszustand festgestellt werden. Bedingt durch den fehlenden Stempelkontakt an den Werkzeugkavitäten sowie den zuvor erfolgten axialen Eindruck im Rondenzentrum liegt in diesen Bereichen lediglich ein zweiachsiger Druckspannungszustand in radialer und tangentialer Richtung vor. Dazwischen liegt die primäre Umformzone, welche sich auf die Bereiche von etwa 4 - 15 mm und 33 - 47 mm aufteilt. Im inneren Bereich liegen dabei minimale Spannungswerte von  $\sigma_{rad} = -693$  MPa,  $\sigma_{tang} = -728$  MPa und  $\sigma_{axial} = -1.009$  MPa vor.

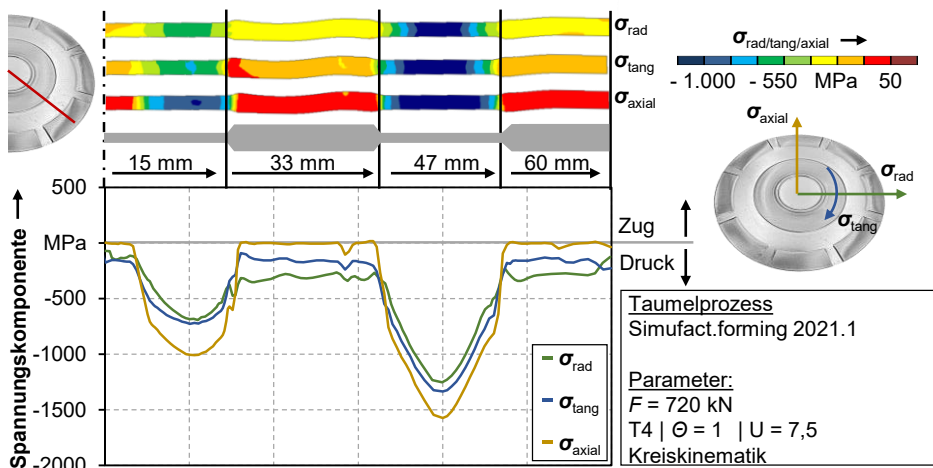


Bild 70: Numerische Identifikation der dreidimensional wirkenden Spannungskomponenten im radialen Schnitt für die Demonstratorgeometrie im Ausgangszustand T<sub>4</sub>

Diese Werte sowie der Verlauf bis zum Beginn der innen liegenden beidseitigen Kavität ist dabei direkt mit den Ergebnissen der variierten geometrischen Eigenschaften aus Kapitel 7 vergleichbar. In der äußeren primären Umformzone liegen, bedingt durch die Winkelverkipfung und den nach außen wandernden Kraftangriffspunkt des Stempels, die globalen Minima der Druckspannungskomponenten. Durch eine beidseitig liegende

Kavität bildet sich ein nahezu symmetrischer Verlauf der Spannungskomponenten zwischen beiden Kavitäten aus. Die betragsmäßig sehr hohen Werte von  $\sigma_{\text{rad}} = -1.252 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{\text{tang}} = -1.336 \text{ MPa}$  und  $\sigma_{\text{axial}} = -1.575 \text{ MPa}$  kommen analog der Geometrie mit nach innen verschobener Aufdickung aus Abschnitt 7.2.3 durch die sehr lokal wirkende Kontaktfläche zustande. Zusammenfassend lassen sich die primäre Umformzone mit einem ausgeprägten dreiachsigen und die dazwischenliegenden Bereiche mit einem zweiachsigen Druckspannungszustand beschreiben. Die Wirkungsweise aus den vorherigen Untersuchungen lässt sich durch Kombination zweier Layouts ebenfalls auf die Demonstratorgeometrie übertragen. Weiterhin gilt es, die Ausprägung der geometrischen Eigenschaften sowie die zugrundeliegenden Stoffflussanteile zu analysieren.

### ***Experimentelle Untersuchung der geometrischen Eigenschaften***

Als quantitativer Wert wird in Übereinstimmung mit den vorherigen Untersuchungen der Blechdickenverlauf der Referenz im Ausgangszustand sowie der lokal entfestigten Ronde über den Radius in Bild 71 dargestellt. Aufgrund der zu Prozessbeginn ausschließlich im Rondenzentrum wirkenden Kontaktfläche bei gleichzeitig erhöhter Umformkraft wird eine ausgeprägte Ausdünnung von  $s_{\text{min}} = 1,47 \text{ mm}$  für die Referenzronde erzielt. Die konische Form des Stempels spiegelt sich im Anstieg bis zum Beginn der Kavität wieder. Aufgrund einer beidseitig angebrachten Kavität in Stempel und Gegenstempel wird entsprechend der Ergebnisse in Abschnitt 7.2 ein lokales Maximum am Einlaufbereich der Aufdickung erreicht. Dies lässt sich durch die beidseitig erfolgende Formfüllung beginnend vom Rondenzentrum durch radialen Stofffluss erklären. Die mittlere Blechdicke im inneren Ring liegt bei  $s_i = 2,20 \pm 0,03 \text{ mm}$ . Ein weiteres lokales Maximum der Blechdicke am Auslaufbereich lässt, basierend auf den Versuchsergebnissen der radial verschobenen Aufdickungsposition, auf einen negativen radialen Stofffluss schließen. Im äußeren Teil der primären Umformzone sinkt der Wert der mittleren Blechdicke auf etwa  $1,80 \text{ mm}$ , bevor dieser am Beginn der zyklisch-symmetrischen Kavität bei  $r = 47 \text{ mm}$  wieder steigt. In der äußeren Aufdickung liegt im konventionellen Prozess eine mittlere Blechdicke von  $s_a = 2,17 \pm 0,02 \text{ mm}$  vor. Unter Berücksichtigung von quantitativen Unterschieden der maximalen Werte kann für die Demonstratorgeometrie eine Übertragbarkeit zwischen der Formgebung der einzelnen Varianten hinsichtlich Verlauf und Lage der Extremstellen bestätigt werden. Eine Gratbildung im aufgedickten Bereich kann aufgrund einer beidseitig vorhandenen Kavität und einer geringen Umformkraft unterdrückt werden.

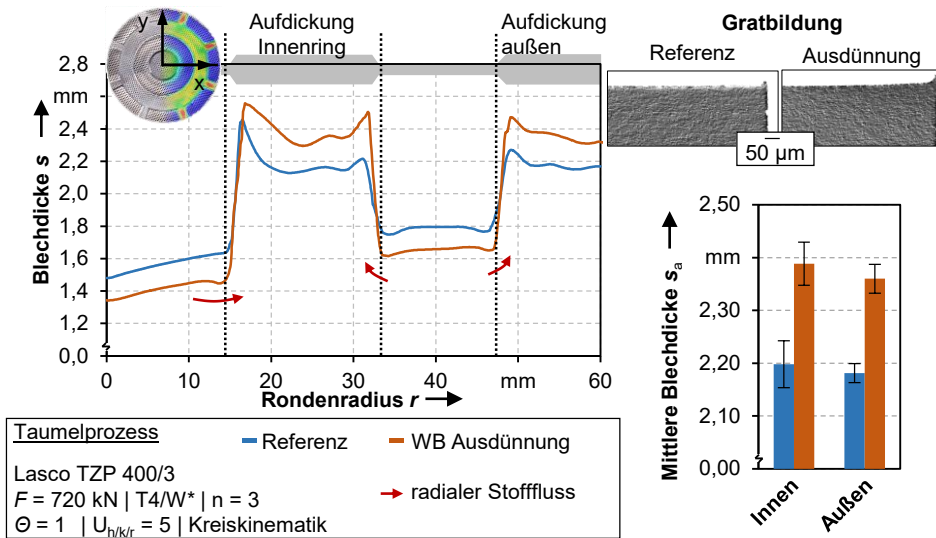


Bild 71: Blechdickenverlauf, mittlere Blechdicke in beiden Aufdickungen und Schlibbild am Bauteilrand für die Referenz sowie für das wärmebehandelte Demonstratorbauteil

Durch eine lokale Eigenschaftsgradierung in Form der zuvor eingebrachten Wärmebehandlung lässt sich die Ausprägung der Aufdickung und unter Berücksichtigung von Volumenkonstanz folglich auch der Ausdünnung signifikant steigern. Eine Entfestigung im inneren Teil der primären Umformzone ist verantwortlich für eine größere Eindringtiefe sowie Materialverdrängung in radialer Richtung, wodurch eine minimale Blechdicke von  $s_{\min} = 1,36 \text{ mm}$  vorliegt. Ursächlich hierfür ist der dreiaxige Druckspannungszustand, welcher den radial innenliegenden Teil der primären Umformzone charakterisiert. Hier kann der Effekt des Center-Thinning besonders deutlich identifiziert werden, welcher bei einer weiter verstärkten Ausdünnung zu einem Prozessfehler in Form von Zentrums-Rissen führen kann [131]. Mit vergleichbarer Steigung nimmt die Blechdicke bis zum Beginn der Kavität zu und erreicht in dieser eine mittlere Blechdicke von  $s_i = 2,38 \pm 0,03 \text{ mm}$ , was einer Steigerung der reinen Aufdickungshöhe von 95% entspricht. Da noch keine vollständige Formfüllung erreicht werden kann, liegt nach wie vor eine relativ hohe Standardabweichung vor. Analog der Ausdünnung im Rondenzentrum wird die Restblechdicke im äußeren Teil der primären Umformzone auf Werte von 1,65 mm verringert. Hier kommt ebenfalls eine reduzierte Fließspannung durch den Einsatz von THTB in Kombination mit dem numerisch identifizierten dreiaxigen Druckspannungszustand zum

Tragen. Im äußeren Aufdickungsbereich kann durch die lokale Entfestigung eine mittlere Blechdicke von  $s_a = 2,36 \pm 0,02$  mm erzielt werden. Hier liegt die Steigerung der Aufdickungshöhe bei 100% und einer vergleichbaren Standardabweichung. Trotz dieser signifikant gesteigerten Formfüllung kann die Gratbildung im Randbereich bedingt durch den zweiachsigen Druckspannungszustand in der Aufdickung nahezu vollständig unterdrückt werden.

### Identifikation der Stoffflussanteile und Stoffflusskontrolle

Um die Möglichkeit der Stoffflusssteuerung durch lokale Eigenschaftsgradierung direkt beurteilen zu können, werden analog der vorangegangenen Untersuchungen ebenso die radialen Stoffflussanteile in Form der Punktverschiebung durch den Umformprozess ausgewertet. Der radiale Stofffluss über den Bauteilradius für die Referenz im Ausgangszustand sowie die wärmebehandelte Probe ist in Bild 72 dargestellt.

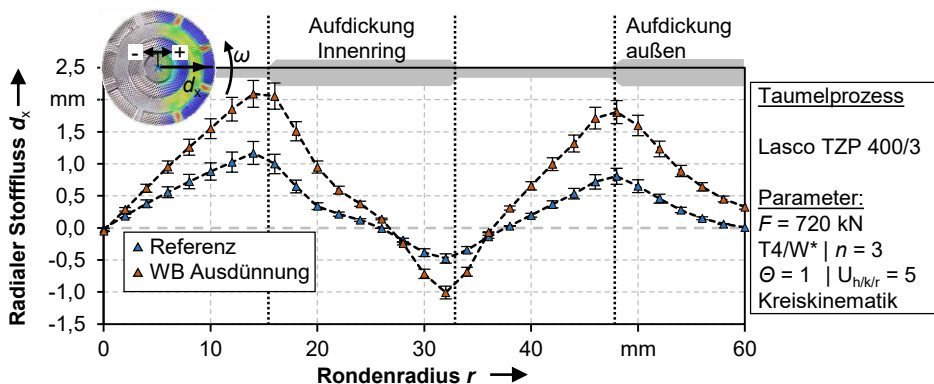


Bild 72: Radialer Stofffluss der Referenz sowie der wärmebehandelten Probe der Demonstratorgeometrie über den Rondenradius

Für die Referenz im Zustand T<sub>4</sub> steigt der radiale Anteil beginnend vom Rondenzentrum durch die radiale Verdrängung annähernd linear bis zum Maximum direkt am Einlauf der Kavität mit  $d_x = 1,12 \pm 0,18$  mm. In der Aufdickung selbst wird bedingt durch das zu füllende Kavitätvolumen kein zusätzliches Material radial verdrängt, weshalb die Werte mit zunehmendem Radius sinken. Der für die radial verschobene Position der Aufdickung im Rahmen der Versuche in Abschnitt 7.2 identifizierte negative Stofffluss in Richtung Rondenzentrum kann analog bei der Demonstratorgeometrie beobachtet und auf Basis der vorliegenden dreiachsigen Druckspannungszustände begründet werden. Mit einem Wert von  $d_{x\min} = -0,51 \pm 0,06$  mm fällt diese Stoffflussumkehr deutlich verstärkt aus, was durch die beidseitig liegende Kavität und die Möglichkeit

der Materialverdrängung begründet werden kann. Im Anschluss an das Ende der Kavität kann ein nahezu linearer Anstieg bis zum Beginn der äußeren Aufdickung bei  $r = 47$  mm mit einem lokalen Maximum von  $d_x = 0,74 \pm 0,05$  mm nachgewiesen werden. Bis zum Matrizenrand sinkt die radiale Verschiebung durch die Kammerwirkung bis zur Nulllinie.

Unter Einsatz der lokalen Entfestigung kann der radiale Stofffluss ebenso wie die resultierende Blechdicke signifikant vergrößert werden. Mit einem ebenso linearen Anstieg mit größerer Steigung wird am Einlaufbereich der inneren Kavität ein maximaler Wert von  $d_{x\max} = 2,10 \pm 0,23$  mm erreicht. Dies entspricht einer Steigerung um den Faktor 1,88. Wie bei der Referenz sinken die Stoffflussanteile bedingt durch einen fehlenden Stempelkontakt und folglich einer ausbleibenden axialen Druckspannungskomponente anschließend bis zur Nulllinie. Nach etwa  $2/3$  der radialen Länge der Kavität stellt sich die zuvor identifizierte Stoffflussumkehr ein, welche in einem lokalen Minimum von  $d_{x\min} = -1,05 \pm 0,04$  mm am äußeren Rand der Kavität resultiert. Dabei kann die Möglichkeit zur Steuerung des radialen Stoffflusses entgegen der konventionellen Prozesscharakteristik durch eine lokale Eigenschaftsgradierung in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Opel [17] bestätigt werden. Als ursächlich können hier ebenfalls der im Zwischenbereich wirkende dreiachsige Druckspannungszustand und der beidseitige Gradient im Spannungsniveau angeführt werden. Ein anschließender linearer Anstieg bis zum lokalen Maximum von  $d_x = 1,72 \pm 0,15$  mm am Beginn der äußeren Kavität untermauert die Steuerbarkeit des Stoffflusses durch eine lokale Wärmebehandlung. Dies entspricht einer Steigerung um den Faktor 2,32 im Vergleich zur Referenz im Ausgangszustand T4. Der Abfall der radialen Verschiebung bis zum Ausgangswert an der Matrizenwand verläuft in Übereinstimmung zur Referenz bedingt durch den zweiachsigen Druckspannungszustand und der Kammerung durch die Matrizenwand.

Aufgrund der rotationssymmetrischen Ausformung des inneren Ringsegments sowie des zur Vermeidung der Gratbildung nicht entfestigten Zwischenbereichs zweier Segmente kann der tangentialer Stofffluss nicht signifikant zu einer gesteigerten Formfüllung beitragen, weshalb an dieser Stelle auf eine ausführliche Analyse der tangentialen Stoffflussanteile verzichtet wird. Eine Übertragbarkeit der Wirkungsweisen der unterschiedlichen geometrischen Varianten hinsichtlich Blechdickenverlauf sowie radialen Stofffluss auf die Demonstratorgeometrie kann durch die vorangegangenen Untersuchungen bestätigt werden. Eine vergleichbare Ausprägung des tangentialen Stoffflusses für die Referenz sowie die

Möglichkeit der Stoffflusssteuerung durch die lokale Entfestigung wird angenommen.

Aufbauend auf den übertragbaren Erkenntnissen bezüglich Formgebung sowie Stoffflusssteuerung durch lokale Eigenschaftsgradierung lässt sich die Zielsetzung einer gesteigerten Stoffflusskontrolle für die Demonstratorgeometrie bestätigen. Durch Einsatz der Wärmebehandlung und folglich einer lokalen Erhöhung des Stoffflusses aus den entfestigten Bereichen kann der Stofffluss im Taumelprozess gesteuert und gleichzeitig der Prozessfehler der Gratbildung unterdrückt werden. Ebenso ist der Einsatz der zuvor abgeleiteten Methode zur Auslegung von THTB unter Berücksichtigung der erzielten Ergebnisse auf die geometrischen Eigenschaften der Demonstratorgeometrie übertragbar.

Die in dieser Arbeit grundlegend untersuchte Maßnahme einer Kurzzeit-Wärmebehandlung zur Stoffflusssteuerung durch lokale Eigenschaftsgradierung in einem Taumelprozess kann zusammenfassend als zielführend eingestuft werden. Allerdings konnte in Abschnitt 6.1 ein nahezu vollständig unterdrücktes Auslagerungsverhalten nach einer Wärmebehandlung unter der Wirkungsweise einer hohen plastischen Deformation nachgewiesen werden. Folglich bedarf es hinsichtlich der Einsatzeigenschaften einer qualitativen Bewertung des Auslagerungsverhaltens der hergestellten Funktionsbauteile.

## 8.2 Qualifizierung der Einsatzeigenschaften

Neben der Möglichkeit zur Stoffflusssteuerung und einer Erhöhung der mittleren Blechdicke bei gleichzeitiger Unterdrückung des identifizierten Prozessfehlers der Gratbildung sind für das Einsatzverhalten speziell die mechanischen Eigenschaften der Bauteile von besonderem Interesse. Ziel in diesem Abschnitt ist deshalb die Analyse des Einflusses des unterdrückten Auslagerungsverhaltens infolge der hohen plastischen Deformation nach der Kurzzeit-Wärmebehandlung auf die vorliegenden mechanischen Eigenschaften der Demonstratorbauteile. Zwar ist für ein verbessertes Umformvermögen beim Einsatz von THTB eine lokale Entfestigung gewünscht, jedoch besteht für viele hochbelastete Komponenten der Anspruch einer möglichst hohen Festigkeit, um den wirkenden Belastungskollektiven über die gesamte Lebensdauer Stand zu halten. Im Rahmen der Blechumformung mit niedrigen bis moderaten Umformgraden wird die eingebrachte Entfestigung über eine spezifische Auslagerungszeit durch erneute Bildung der festigkeitssteigernden Cluster

zurückgenommen [10]. In der Blechmassivumformung wird diese Auslagerung bedingt durch die hohe plastische Deformation und die damit einhergehenden metallphysikalischen Effekte nahezu vollständig unterdrückt, wie anhand der grundlagenwissenschaftlichen Untersuchungen in Abschnitt 6.1 nachgewiesen werden konnte.

Folglich bedarf es für eine ganzheitliche Bewertung des Einsatzpotentials unter Berücksichtigung der vorherigen experimentellen Charakterisierungsversuche zudem der Qualifizierung der resultierenden mechanischen Eigenschaften der Funktionsbauteile. Um den durch die plastische Deformation während des Taumelprozesses induzierten Umformgrad zu bewerten, wird das numerische Prozessmodell um die zu untersuchende Geometrie erweitert. Der Umformgrad nach abgeschlossenem Prozess kann so der Härteverteilung aus dem Experiment im radialen Schnitt gegenübergestellt werden, siehe Bild 73.

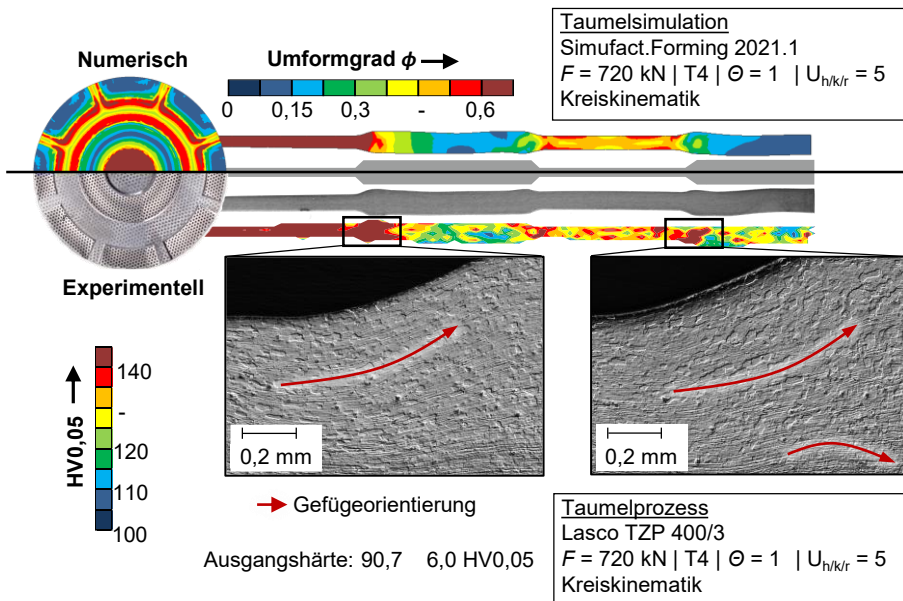


Bild 73: Numerisch ermittelter Umformgrad sowie experimentell gemessene Härteverteilung und Schlichtbilder der getaumelten Demonstratorgeometrie im Ausgangszustand

Der Verlauf des Umformgrads über den Radius kann dabei als charakteristisch für das Taumeln abgeleitet werden und deckt sich mit Ergebnissen zu Stahlwerkstoffen in [139]. Durch das axiale Zustellen zu Prozessbeginn wird Werkstoff primär im Rondenzentrum plastifiziert und radial verdrängt, womit die hohen Werte begründet werden können. Im äußeren Bereich der primären Umformzone findet ebenso eine starke Ausdünnung

statt, wodurch sich die Umformgradverteilung plausibilisieren lässt. Die beiden Zielbereiche werden zwar durch den auftretenden Stofffluss aufgedickt, in diesen findet jedoch bedingt durch das freie Kavitätsvolumen nur eine geringe Umformung statt, entsprechend liegen hier geringere Umformgrade vor.

Durch Vergleich mit den experimentell ermittelten Härtewerten kann das adaptierte numerische Prozessmodell anhand der Umformgradverteilung der Demonstratorgeometrie validiert werden. Sowohl der Verlauf als auch die Lage der Maximalwerte lassen sich qualitativ gegenüberstellen. Am jeweiligen Einlaufbereich der Kavitäten treten lokale Maxima bedingt durch die starke Werkstoffumlenkung auf. Diese Umlenkung kann ebenfalls in Form der Gefügeorientierung in den entsprechenden Schliffbildern nachgewiesen werden. Im Rondenzentrum kann mit einem mittleren Härtewert von  $154,3 \pm 12,2 \text{ HV}_{0,05}$  eine Zunahme von 70% zum Ausgangszustand infolge der Kaltverfestigung erzielt werden. Im äußeren Zwischenbereich liegt die mittlere Härte bei  $133,5 \pm 14,4 \text{ HV}_{0,05}$ .

Zur Charakterisierung des Auslagerungsverhaltens werden ebenso die Härtewerte im Schliffbild für die wärmebehandelte Probe nach einer Auslagerungszeit von  $t_{KA} = 24 \text{ h}$  und zwölf Wochen mit  $t_{KA} = 2.016 \text{ h}$  in Bild 74 gegenübergestellt. Eine Analyse für eine Kaltauslagerungszeit von  $t_{KA} = 1 \text{ h}$  ist aufgrund der Probenpräparation nicht zielführend umsetzbar. Im direkten Vergleich mit der Referenz im kaltausgelagerten Zustand T4 fällt die signifikant reduzierte Festigkeit in den beiden wärmebehandelten Bereichen auf.

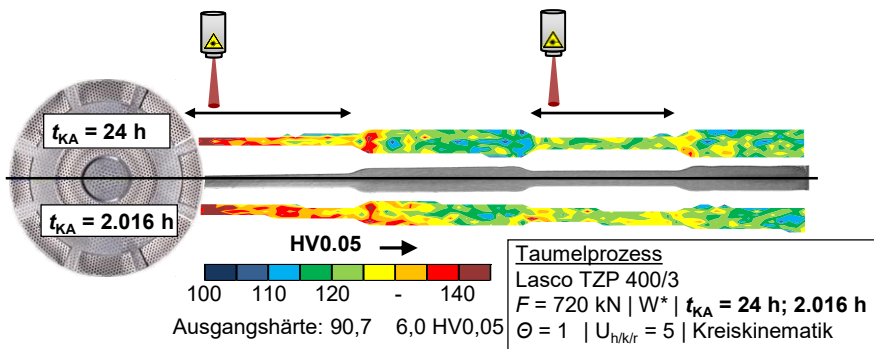


Bild 74: Experimentell ermittelte Härteverteilung der getaumelten Demonstratorgeometrie mit Wärmebehandlung nach unterschiedlichen Auslagerungszeiten

Mit einer durchschnittlichen Härte von  $134,6 \pm 8,3 \text{ HV}_{0,05}$  im Rondenzentrum sowie  $122,7 \pm 5,9 \text{ HV}_{0,05}$  im äußeren Zwischenbereich liegt 24 h nach Umformung eine Verfestigung von 48% und 35% vor. Diese Zunahme

fällt zwar geringer aus als für die Referenz, dies kann jedoch durch einen niedrigeren Festigkeitswert zu Prozessbeginn infolge der lokalen Entfestigung begründet werden. Übereinstimmend mit der identifizierten Unterdrückung des Auslagerungsverhaltens in Abschnitt 6.1 kann nach einer Auslagerungszeit von  $t_{KA} = 2.016$  h keine Steigerung der Festigkeitswerte festgestellt werden. Auf Basis der Mittelwerte von  $136,6 \pm 7,3$  HV<sub>0,05</sub> und  $124,7 \pm 10,3$  HV<sub>0,05</sub> liegt zwar eine tendenziell höhere mittlere Härte vor, im Rahmen der Standardabweichung kann diese allerdings nicht als signifikant eingestuft werden. Zusammenfassend kann durch Analyse der Härtewerte das unterdrückte Auslagerungsverhalten bestätigt werden, welches im Rahmen der Untersuchung der mechanischen Eigenschaften nach einer Wärmebehandlung in Kombination mit hohen eingebrachten Umformgraden in Abschnitt 6.1 nachgewiesen werden konnte. Insgesamt überwiegt der Effekt der Kaltverfestigung im Taumelprozess jedoch, wodurch dennoch eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften im Vergleich zum Ausgangszustand erzielt werden kann, wenn auch in einem geringeren Ausmaß bedingt durch die Kurzzeit-Wärmebehandlung.

Je nach Anwendungsfall wird eine zusätzlich gesteigerte Festigkeit vorausgesetzt. Bei ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen besteht neben der Auslagerung bei Raumtemperatur zudem die Möglichkeit der Warmauslagerung. Dieser als T6 bezeichnete Zustand liefert allgemein höhere Festigkeiten durch eine beschleunigte Ausscheidungskinetik [24]. Diese Methode der Warmauslagerung kann auch auf den quasi-lösungsgeglühten Zustand  $W^*$  im Rahmen einer Kurzzeit-Wärmebehandlung eingesetzt werden, wie beispielsweise in [59] nachgewiesen. Aufgrund der zuvor eingebrachten hohen plastischen Deformation wird allerdings bedingt durch die hohe Versetzungsdichte ebenfalls ein unterdrücktes oder zumindest verändertes Auslagerungsverhalten erwartet, wie beispielsweise in [203] für eine Aluminiumlegierung EN AW-6061 aufgezeigt. Als positiven Begleiteffekt neben einer potentiell gesteigerten Festigkeit durch eine Warmauslagerung kann eine Homogenisierung der Härteverteilung aufgeführt werden. Um diese Möglichkeit abschließend bewerten zu können, bedarf es analog der experimentellen Versuche in Kapitel 6.1 einer ganzheitlichen Charakterisierung.

Die in der späteren Anwendung als kraftübertragender Querschnitt definierten Werkstoffzonen in den aufgedickten Bereichen verfügen über die geringsten Festigkeitswerte im Vergleich zu den stark ausgedünnten Umformzonen. Jedoch wird an diese Stelle mittels des Taumelverfahrens gezielt Material vorverteilt, um mit einer prozessangepassten Blechdicke

auf ein potentielles Belastungskollektiv reagieren zu können. Eine geringere Festigkeit in diesen Bereichen bietet mit Hinblick auf nachfolgende Prozessschritte gegebenenfalls Vorteile hinsichtlich Beschnitt, Fügbarkeit oder weiterer Umformoperationen [70].

Der Einsatz von Wärmestrahlung mittels Laser als Erwärmungsquelle bietet zwar für die Modellversuche im Rahmen dieser Arbeit entscheidende Vorteile hinsichtlich Adaption, Flexibilität und Einstellbarkeit der Parameter, allerdings werden dafür eine aufwendige Probenvor- und nachbereitung sowie ein zusätzlicher Prozessschritt in Kauf genommen. Durch die Qualifikation der Wärmebehandlungsmethode und die Analyse der Wärmeeinflusszone in Abhängigkeit von Laserfahrergeschwindigkeit und Spotgröße kann ebenso eine Prozessgrenze in Form der minimalen Ausprägung der Wärmeeinflusszone abgeleitet werden. Damit sind filigrane Layouts nicht und kombinierte Layouts nur unter langen zwischen-geschalteten Abkühlzeiten realisierbar. Für eine potentielle industrienähe Anwendung der untersuchten Wärmebehandlungsmethode zur Stoffflusssteuerung gilt es in zukünftigen Arbeiten die Integration in bestehende Prozessketten zu adressieren.



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Erarbeitung und Qualifizierung einer Wärmebehandlungsstrategie zur Stoffflusssteuerung durch lokale Eigenschaftsgradierung ausscheidungshärtbarer Aluminiumlegierungen in der Blechmassivumformung.

Für eine zielführende Auslegung und Bewertung von Maßnahmen zur Stoffflusssteuerung in einem Taumelprozess wurde zunächst eine spannungs- und stoffflussbasierte Modellvorstellung erarbeitet. Diese Modellvorstellung berücksichtigt das aus dem Stand der Technik erarbeitete grundlegende Prozessverständnis und wurde auf Basis eines kombiniert numerisch-experimentellen Untersuchungsansatzes mit den zugrundeliegenden Ursache-Wirkbeziehungen hinsichtlich Spannungs- und Formänderungszustand aufgestellt. Im Rahmen experimenteller Versuche zur Steigerung der Formfüllung wurde eine festigkeitsbedingte Prozessgrenze in Form von kritischer Gratbildung am Bauteilumfang identifiziert. Durch eine Rückführung des Fehlerbildes der Gratentstehung auf einen steigenden Gradienten aus lokal wirkender Spannung und vorliegendem Formänderungswiderstand konnte damit die Notwendigkeit von alternativen Maßnahmen zur Stoffflusssteuerung im dreidimensionalen Spannungs- und Formänderungszustand der Blechmassivumformung aufgezeigt werden.

Um die Methode der Tailor Heat Treated Blanks als stoffflusssteuernde Maßnahme in der Blechmassivumformung einsetzen zu können, bedarf es einer ganzheitlichen Analyse der zugrundeliegenden Wechselwirkungen zwischen Wärmebehandlung, Formgebungsprozess und resultierender mechanischen Eigenschaften. Folglich bestand das Ziel des zweiten Teils der Arbeit in einer grundlagenwissenschaftlichen Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften infolge einer Kurzzeit-Wärmebehandlung in Kombination mit nachfolgend definiert eingebrachten Umformgraden. Zur Abbildung der gesamten Prozesskette aus Wärmebehandlung, Umformoperation sowie Kaltauslagern wurde im Anschluss eine gesamtheitliche Charakterisierungsmethode bestehend aus Wärmebehandlung, definiertes Einbringen von Umformgraden mittels Flachwalzprozess, Probenherstellung für den einachsigen Zugversuch und abschließendem Kaltauslagern entwickelt. Mithilfe dieser Methode wurden im Anschluss die mechanischen Eigenschaften infolge der einzelnen Teile der Prozesskette charakterisiert. Dabei konnte die aus dem Stand der Technik bekannte

Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften grundlegend nachgewiesen und durch definierte eingebrachte Umformgrade im Walzprozess auf die Blechmassivumformung übertragen werden. Bedingt durch die hohe Versetzungsdichte nach plastischer Deformation konnte im Rahmen der Beschreibung des Auslagerungsverhaltens eine nahezu vollständige Unterdrückung identifiziert werden. Dieser Effekt wirkt jedoch in Kombination mit der eingebrachten Kaltverfestigung, weshalb die Auswirkung auf die resultierende Festigkeit als gering eingestuft wurde. Neben der grundlegenden Charakterisierung im Modellprozess wurde die Methode der Kurzzeit-Wärmebehandlung zudem hinsichtlich der lokalen Eigenschaftsgradierung von Blechenden anhand des Temperatur- und Härteverlaufs für den späteren Einsatz qualifiziert.

Nach der ganzheitlichen Qualifizierung der Wärmebehandlung zum Einsatz in der Blechmassivumformung wurden im nachfolgenden Kapitel 7 Referenzbauteile analog der vorher untersuchten Geometrie wärmebehandelt und anschließend im Taumelprozess umgeformt. Der Fokus der Auswertung lag dabei auf den ursächlichen Spannungszuständen, den geometrischen Eigenschaften, dem Fehlerbild der Gratausformung sowie der radialen und tangentialen Stoffflussanteile. Während die primäre Umformzone im direkten Kontaktbereich des Stempels durch einen dreiachsigen Druckspannungszustand geprägt ist, liegt in den Aufdickungsbereichen bedingt durch das freie Kavitätavolumen lediglich ein zweiachsiger Druckspannungszustand in radialer und tangentialer Richtung vor, welche beide maßgeblich für die Formänderung verantwortlich sind. Durch eine lokale Reduzierung der Fließspannung mittels THTB konnte jeweils abhängig vom untersuchten Wärmebehandlungslayout ein signifikant verbessertes Umformergebnis erzielt und gleichzeitig die Gratbildung unterdrückt werden. Die bei der Auslegung von THTB in der Blechumformung gültigen kraft- oder stoffflussorientierten Wirkmechanismen konnten unter Adaption in die Blechmassivumformung übertragen werden. Nach dem ersten Mechanismus kann die lokal benötigte Reaktionskraft im Bereich der Kavität durch Reduktion des lokalen Formänderungswiderstands unter der Wirkungsweise eines zweiachsigen Druckspannungszustandes verringert werden. Als zweiter Wirkmechanismus begünstigt eine bei geringeren Spannungswerten erfolgende Plastifizierung des Werkstoffs aufgrund einer lokal reduzierten Anfangsfließspannung des Werkstoffvolumens in der primären Umformzone hingegen den Stofffluss in angrenzende Werkstückzonen. Dieser Wirkmechanismus ist für die größte Wirkung im Gegensatz zur Vermeidung von kritischer Ausdünnung in der Blechumformung gezielt in der primären Umformzone anzuwenden.

Weiterhin ist im Vergleich zur Blechumformung die veränderten Prozessfehler in Form einer Gratbildung und des Ausknickens in das freie Kavitätsvolumen bedingt durch den zwei- bzw. dreiachsigen Druckspannungszustand zu berücksichtigen. Beide Wirkmechanismen sind in ihrer Ausprägung maßgeblich vom vorliegenden Gradienten aus Spannung und Formänderungswiderstand abhängig und entsprechend im Rahmen einer Stoffflusssteuerung mittels THTB beeinflussbar.

Zur Sicherstellung der Allgemeingültigkeit wurden diese auf weiterführende Geometrien angewendet und dabei die Skalierbarkeit nachgewiesen. Aufbauend auf den zusammengefassten Erkenntnissen bezüglich der ursächlichen dreiachsigen Druckspannungszustände sowie der resultierenden Formänderung und einer ganzheitlichen Prozessbewertung konnte abschließend eine Auslegungsmethode für THTB zum Einsatz im Taumelprozess abgeleitet werden. Dabei wurden die für die Blechumformung etablierten Wirkmechanismen unter Berücksichtigung eines dreidimensionalen Spannungs- und Formänderungszustandes sowie der identifizierten Fehlerbilder auf den Einsatz von THTB in der Blechmassivumformung angepasst.

Zur Bewertung der Übertragbarkeit auf geometrisch kompliziertere Geometrien und unter anwendungsnahen Randbedingungen wurde die Auslegungsmethode im abschließenden Teil auf ein industrierelevantes Demonstratorbauteil übertragen und anhand der erzielten Ergebnisse validiert. Neben der Auslegungsmethode wurden zudem die Einsatzeigenschaften in Form der Härteverteilung für eine potentielle Anwendung der Funktionsbauteile qualifiziert und auf Basis der zuvor identifizierten Unterdrückung des Auslagerungsverhaltens diskutiert.

Zusammenfassend konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit, aufbauend auf einer spannungs- und stoffflussbasierten Modellvorstellung des Taumelprozesses, eine Qualifizierung von Wärmebehandlungsmethoden zur Stoffflusssteuerung durch lokale Eigenschaftsgradierung ausscheidungshärtbarer Aluminiumlegierungen durchgeführt werden. Damit konnte neben der Generierung von grundlagenwissenschaftlichen Erkenntnissen sowie einer Zusammenfassung in einer Auslegungsmethode zudem der Grundstein für die Anwendung von höher- und höchstfesten Aluminiumlegierungen in Blechmassivumformoperationen gelegt werden. Ausgehend von dieser Wissensbasis kann der Einsatz auf andere Festigkeitsklassen oder in weitere Blechmassivumformprozesse gelingen. Weiterhin konnte der Einsatz von THTB und die zugrundeliegenden Wirkmechanismen auf den Einsatz in der Verfahrensklasse der Blechmassivumformung unter

dreidimensionalem Spannungs- und Formänderungszustand übertragen werden und so das Anwendungsspektrum entscheidend erweitert werden.

Die abschließende ganzheitliche Prozessbewertung verdeutlicht das Einsatzpotential für die Anwendung von THTB als stoffflusssteuernde Maßnahme in der Blechmassivumformung, zeigt aber dennoch parallel Herausforderungen und weiterführenden Forschungsbedarf auf. Bedingt durch den potentiellen Einsatz der Funktionsbauteile unter hohen Belastungskollektiven stellt die Erweiterung des Prozessverständnisses auf höhere Festigkeitsklassen, wie beispielsweise das Legierungssystem der 7xxx-Serie, einen vielversprechenden Ansatz dar. Ebenso gilt es, die Einsatzfähigkeit von unterschiedlichen Blechdicken grundlagenwissenschaftlich zu untersuchen. Die Erweiterung des numerischen Prozessmodells zum Taumeln um die Möglichkeit der lokalen Eigenschaftsgradierung würde eine ganzheitliche Erschließung der Ursache-Wirkbeziehungen ermöglichen und so zu einer Erweiterung des im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Prozessverständnisses beitragen. Mit Hinblick auf eine potentielle industrienähe Anwendung der Funktionsbauteile sollten die langfristigen Einsatzeigenschaften charakterisiert und eine Bewertung der Möglichkeit zur Einbindung in bestehende Prozessketten durchgeführt werden.

## 10 Summary and outlook

The overall objective of this work is to develop and qualify a heat-treatment strategy for controlling the material flow in Sheet-Bulk Metal Forming processes by means of a local gradation of the mechanical properties of precipitation-hardenable aluminum alloys.

For a systematic layout design and an evaluation of measures for material flow control in an orbital forming process, a stress and material flow-based model was developed. This model concept takes the fundamental process understanding into from the state of the art into account and was set up on the basis of a combined numerical-experimental approach with the corresponding cause-effect relations with regard to stress and deformation state. As part of the experimental investigations to increase die filling, a strength-related process limit in the form of critical burr formation on the circumference of the component was identified. By linking the defect of burr formation with the fundamental operating mechanism of an increased gradient of locally present stresses in combination with the existing resistance against deformation, the necessity of alternative measures for material flow control in the three-dimensional stress and strain state of sheet-bulk metal forming could be highlighted.

In order to transfer the method of Tailor Heat Treated Blanks to the application within sheet-bulk metal forming, the aim of the second part of this thesis was a holistic characterization of the mechanical properties as a result of a short-term heat treatment in combination with a subsequently induced degree of deformation. To simulate the entire process chain consisting of heat treatment, forming operation and cold ageing, a comprehensive characterization method was developed. It consists of a heat treatment, a defined degree of deformation using a rolling process, production of specimens for the uniaxial tensile test and final cold ageing. Due to the high dislocation density after plastic deformation, an almost complete suppression of the ageing behavior could be identified. However, this only has a minor effect on the resulting material strength, due to the combination with the induced strain hardening. In addition to the characterization, the method of a short-term heat treatment was qualified for a local adaption of the mechanical properties of sheet metal blanks based on temperature and hardness curves.

The evaluation focused on the causal stress states, the geometric properties, the defect of burr formation as well as the radial and tangential

material flow components. While the primary forming zone in the direct contact area of the punch is characterized by a triaxial compressive stress state, the thickened areas are subject to a biaxial compressive stress state in radial and tangential direction due to the free cavity volume. These stress states are largely responsible for deformation. By locally reducing the yield stress using THTB, a significantly improved forming result and a suppressed burr formation could be achieved, depending on the heat treatment layout. The force- or material flow-oriented causal mechanisms used in the design of THTB in sheet metal forming could be transferred to sheet-bulk metal forming by adaptation. According to the first causal mechanism, the locally required reaction force in the area of the cavity can be reduced by reducing the local resistance against deformation under the effect of a biaxial compressive stress state. As a second causal mechanism, a plasticization of the material occurring at lower stress values due to a locally reduced initial yield stress of the material volume in the primary forming zone favors the material flow into adjacent work piece zones. In contrast to the avoidance of critical thinning in sheet metal forming, this causal mechanism must be applied directly in the primary forming zone to achieve the greatest effect. Furthermore, in comparison to sheet metal forming, the changed process defects in form of burr formation and buckling in the free cavity volume due to the biaxial or triaxial compressive stress states must be taken into account. The extent of both causal mechanisms is largely depending on the existing gradient of stress state and the resistance against deformation can be influenced accordingly within the scope of material flow control using THTB.

To ensure a universal applicability, these causal mechanisms were applied to further geometries and the scalability in size was proven. Based on the summarised findings regarding the causal triaxial compressive stress state as well as the resulting deformation and a holistic process evaluation, a design method for THTB for use in the orbital forming process was derived. The causal mechanisms established for sheet metal forming were adapted to the use of THTB in sheet-bulk metal forming, taking a three-dimensional stress and strain state as well as the identified defects into account.

To evaluate the transferability to geometrically more complicated geometries under application-related constraints, the design method was applied onto an industrially relevant demonstrator component. In addition, the operating properties in the form of the hardness distribution were qualified for a potential application of the functional component and discussed on the basis of the previously identified suppression of the ageing behavior.

In conclusion, heat treatment methods for a material flow control through locally grading the material properties of precipitation-hardenable aluminium alloys could be qualified, based on a stress and material flow-oriented process model of the orbital forming process. Furthermore, the application of THTB and the causal mechanisms could be transferred to the use in the process class of sheet-bulk metal forming under three-dimensional stress and strain conditions, thus significantly expanding the applicability.

The comprehensive process evaluation illustrates the potential for the use of THTB as a measure to control the material flow in sheet-bulk metal forming, but also highlights challenges and the need for further research. Due to the potential application of the functional components under high load collectives, the extension of the process understanding to higher strength classes, such as the aluminum alloy of the 7xxx series, represents a promising approach. It would furthermore be beneficial to investigate the suitability of the findings within this thesis on different sheet thicknesses. The extension of the numerical process model of the orbital forming process to include the possibility of a local gradation of the mechanical properties would enable a holistic development of the cause-effect relations and thus contributing to an expansion of the process understanding established within this work. With regard to a potential industrial application of the functional components, the operating properties should be characterized and an evaluation of the possibility for the integration into existing process chains should be carried out.



## 11 Literaturverzeichnis

- [1] Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.
- [2] zukunftsInstitut: Megatrend Mobilität. Internet: <https://www.zukunftsinstitut.de/dossier/megatrend-mobilitaet> (aufgerufen am 08.04.2024).
- [3] goClimate: Emissionen nach Sektoren. Internet: <https://www.goclimade.de/glossar/emissionen/sectoren/#co2-emissionen-in-deutschland-nach-sektoren-in-prozent> (aufgerufen am 08.04.2024).
- [4] Umweltbundesamt: Die Treibhausgase. Internet: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase> (aufgerufen am 08.04.2024).
- [5] Achtnicht, M.: German car buyers' willingness to pay to reduce CO<sub>2</sub> emissions. *Climatic Change* 113(2012)3-4, S. 679–697.
- [6] Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen, 2009.
- [7] Siebenpfeiffer, W.: Energieeffiziente Antriebstechnologien. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.
- [8] Merklein, M.; Allwood, J. M.; Behrens, B.-A.; Brosius, A.; Hagenah, H.; Kuzman, K.; Mori, K.; Tekkaya, A. E.; Weckenmann, A.: Bulk forming of sheet metal. *CIRP Annals* 61(2012)2, S. 725–745.
- [9] Woo, M.-A.; Song, W.-J.; Kang, B.-S.; Kim, J.: Evaluation of formability enhancement of aluminum alloy sheet in electrohydraulic forming process with free-bulge die. *Journal of Advanced Manufacturing Technology* 101(2019)1-4, S. 1085–1093.
- [10] Geiger, M.; Merklein, M.; Vogt, U.: Aluminum tailored heat treated blanks. *Production Engineering* 3(2009)4-5, S. 401–410.
- [11] Pischinger, S.; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2021.
- [12] Neugebauer, R.: Ressourceneffizienz. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2017.

- [13] Klein, B.; Gänsicke, T.: Leichtbau-Konstruktion. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2019.
- [14] Öchsner, A.: Leichtbaukonzepte anhand einfacher Strukturelemente. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2019.
- [15] Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.
- [16] Naefe, P.: Einführung in das Methodische Konstruieren - Für Studium und Praxis. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [17] Opel, S.: Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2013.
- [18] Köhler, K. U.: Stahl-Innovationspreis 2006. Düsseldorf: Stahl-Informations-Zentrum, 2006.
- [19] Dresig, H.; Fidlin, A.: Schwingungen mechanischer Antriebssysteme. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2020.
- [20] Henning, F.; Moeller, E.: Handbuch Leichtbau. München: Carl Hanser Verlag, 2020.
- [21] Degischer, H. P.; Lüftl, S. (Hrsg.): Leichtbau - Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten. Weinheim: Wiley-VCH, 2012, 1. Auflage.
- [22] e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg: Leichtbau in Mobilität und Fertigung - Chancen für Baden-Württemberg. Stuttgart: Fraunhofer Informationszentrum IRB, 2012.
- [23] Degner, J.: Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2020.
- [24] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.
- [25] Kammer, C.: Aluminium-Taschenbuch. Berlin: Beuth, 2012.
- [26] Vogel, M.; Lechner, M.: Manufacturing of process adapted tailored blanks by flexible rolling process using aluminum alloy AA6016. *Procedia Manufacturing* 15(2018), S. 1224–1231.
- [27] Henneberg, J.: Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2022.

- [28] Hildenbrand, P.: Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2018.
- [29] Hornbogen, E.: Grundlagen der Wärmebehandlung. In: Hornbogen, E. (Hrsg.): Werkstoffe - Aufbau und Eigenschaften von Keramik, Metallen, Kunststoffen und Verbundwerkstoffen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; SPRINGER, 1983, S. 75–99.
- [30] Binder, H. H.: Lexikon der chemischen Elemente - Das Periodensystem in Fakten, Zahlen und Daten; mit 96 Abbildungen und vielen tabellarischen Zusammenstellungen. Stuttgart, Leipzig: Hirzel, 1999.
- [31] Woher, M.: Wettstreit der Leichtgewichte. Internet: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/aluminium-fuer-die-autobranche-wettstreit-der-leichtgewichte/19756378.html> (aufgerufen am 08.04.2024).
- [32] Ruge, J.; Wohlfahrt, H.: Technologie der Werkstoffe. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.
- [33] Norm DIN EN 573-1: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug - Teil 1: Numerisches Bezeichnungssystem: Beuth, 2005.
- [34] Milkereit, B.: Kontinuierliche Zeit-Temperatur-Ausscheidungs-Diagramme von Al-Mg-Si-Legierungen. Dissertation, Universität Rostock, 2011.
- [35] Keßler, O.: Ausscheidungshärten von Aluminiumlegierungen - Teil 1. Der Wärmebehandlungsmarkt 2(2001), S. 5–8.
- [36] Keßler, O.: Ausscheidungshärten von Aluminiumlegierungen - Teil 2. Der Wärmebehandlungsmarkt 3(2001), S. 5–8.
- [37] Wloka, J.; Hack, T.; Virtanen, S.: Influence of temper and surface condition on the exfoliation behaviour of high strength Al-Zn-Mg-Cu alloys. Corrosion Science 49(2007)3, S. 1437–1449.
- [38] Dilthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2 - Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [39] Norm DIN EN 515-5: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Halbzeug - Bezeichnungen der Werkstoffzustände: Beuth, 2017.

- [40] Graser, M.; Wiesenmayer, S.; Müller, M.; Merklein, M.: Application of Tailor Heat Treated Blanks technology in a joining by forming process. *Journal of Materials Processing Technology* 264(2019), S. 259–272.
- [41] Reed, J. M.; Walter, M. E.: Observations of serration characteristics and acoustic emission during serrated flow of an Al–Mg alloy. *Materials Science and Engineering: A* 359(2003)1-2, S. 1–10.
- [42] Arnold, B.: *Werkstofftechnik für Wirtschaftsingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2017.
- [43] Edwards, G. A.; Stiller, K.; Dunlop, G. L.; Couper, M. J.: The precipitation sequence in Al–Mg–Si alloys. *Acta Materialia* 46(1998)11, S. 3893–3904.
- [44] Chakrabarti, D.; Laughlin, D. E.: Phase relations and precipitation in Al–Mg–Si alloys with Cu additions. *Progress in Materials Science* 49(2004)3-4, S. 389–410.
- [45] Barbosa, C. G. A.; Rebello, J. M. A.; Ascelrad, O.; Dille, J.; Delplancke, J.-L.: Identification of precipitates in 6013 aluminum alloy (Al - Mg - Si - Cu). *Materials Science* 93(2002), S. 208–211.
- [46] Hirsch, J.: *Aluminium Alloys for Automotive Application*. *Materials Science Forum* 242(1997), S. 33–50.
- [47] Merklein, M.; Böhm, W.; Lechner, M.: Tailoring Material Properties of Aluminum by Local Laser Heat Treatment. *Physics Procedia* 39(2012), S. 232–239.
- [48] Vogt, U.: *Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2009.
- [49] Bürgel, R.; Maier, H. J.; Niendorf, T.: Gefügestabilität. In: Maier, H. J. (Hrsg.): *Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik - Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen, Hochtemperaturlegierungen Und -Beschichtungen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2015, S. 37–81.
- [50] Humphreys, F. J.; Hatherly, M.: Recovery After Deformation. In: Hatherly, M. (Hrsg.): *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. London: Elsevier Science & Technology, 2004, S. 169–213.
- [51] Hufnagel, W.: *Aluminium-Taschenbuch*. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1984.

- [52] Borschers, H.; Schwarzmaier, W.: Der Einfluß nachträglicher Wärmebehandlung auf den Aushärtungszustand einer Aluminium-Magnesium-Silizium-Legierung. Zeitschrift für Metallkunde 35(1943), S. 237-242.
- [53] Haase, C.; Wurst, H.: Zur Frage der Kalt- und Warmaushärtung bei Aluminium-Magnesium-Silizium-Legierungen. Z. Metallkunde 22(1941), S. 399-403.
- [54] Hofmann, A.: Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2002.
- [55] Brenner, P.; Kostron, H.: Über die Vergütung der Aluminium-Magnesium-Silizium-Legierungen. Zeitschrift der Metallkunde 31(1939), S. 89-97.
- [56] Geiger, M.; Merklein, M.; Kerausch, M.: Microstructural Investigations of Aluminum Tailored Heat Treated Blanks. Production Engineering 11(2004), S. 47-50.
- [57] Merklein, M.; Vogt, U.: Application of Tailored Heat Treated Blanks under Quasi Series Conditions. Key Engineering Materials 344(2007), S. 383-390.
- [58] Kerausch, M.: Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatinen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2007.
- [59] Graser, M.: Analyse lokaler Kurzzeitwärmebehandlungsmethoden zur Verbesserung des Umformverhaltens und der Bauteileigenschaften von Aluminiumstrangpresshohlprofilen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2023.
- [60] Vollertsen, F.; Lange, K.: Enhancement of Drawability by Local Heat Treatment. CIRP Annals 47(1998)1, S. 181-184.
- [61] Geiger, M.; Merklein, M.; Kerausch, M.: Finite Element Simulation of Deep Drawing of Tailored Heat Treated Blanks. CIRP Annals 53(2004)1, S. 223-226.
- [62] Vogt, U.; Merklein, M.: Design principles of tailored heat treated blanks for the manufacturing of complex car body parts. In: Asnafi, N. (Hrsg.): Proceedings of the IDDRG, 2008, S. 557-568.

- [63] Kahrmanidis, A.; Wortberg, D.; Merklein, M.: Influence of a Short Term Heat Treatment by Conduction and Induction on the Mechanical Properties of AA6014 Alloys. *Physics Procedia* 56(2014), S. 1410–1418.
- [64] Kerausch, M.; Merklein, M.; Geiger, M.: Improved material flow for deep drawing of aluminium blanks by local laser heat treatment. In: Kals, H. J. J.; Shirvani, B.; Sing, U. P.; Geiger, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th International Conference on Sheet Metal*, 2003, S. 73–80.
- [65] Merklein, M.; Göken, M.; Höppel, H.-W.; Maier, V.; Hausöl, T.; Schmidt, C. W.; Nguyen, H.; Böhm, W.: Tailored Heat-treated Accumulative Roll Bonded Aluminum Blanks: Microstructure and Mechanical Behavior. *Metallurgical and Materials Transactions A* 43(2012), S. 3097–3107.
- [66] Herrmann, J.: Kumulatives Walzplattieren - Bewertung der Umform-eigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2020.
- [67] Merklein, M.; Lechner, M.; Schneider, T.; Plettke, R.: Tailored Heat Treated Profiles - Enhancement of the Forming Limit of Aluminum Profiles under Bending Load. *Key Engineering Materials* 504-506(2012), S. 375–380.
- [68] Merklein, M.; Lechner, M.; Kuppert, A.: Enhancement of formability of aluminum alloys in multi-stage forming operations by a local intermediate heat treatment. *Production Engineering* 6(2012)6, S. 541–549.
- [69] Graser, M.; Pflaum, N.; Merklein, M.: Influence of a local laser heat treatment on the bending properties of aluminium extrusion profiles. *Procedia CIRP* 74(2018), S. 780–784.
- [70] Schulte, R.: Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2022.
- [71] Wiesenmayer, S.; Graser, M.; Merklein, M.: Influence of the properties of the joining partners on the load-bearing capacity of shear-clinched joints. *Journal of Materials Processing Technology* 283(2020), S. 1–13.
- [72] Merklein, M.; Tekkaya, A. E.; Brosius, A.; Opel, S.; Koch, J.: Overview on sheet-bulk metal forming processes. In: Hirt, G.; Tekkaya, A. E. (Hrsg.): *Proceedings of the 10th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP)*, 2011, S. 1109–1114.

- [73] Lange, K.: Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft - Band 2: Massivumformung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1988.
- [74] Doege, E.; Behrens, B.-A. (Hrsg.): Handbuch Umformtechnik - Grundlagen, Technologien, Maschinen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [75] Mori, K.; Nakano, T.: State-of-the-art of plate forging in Japan. *Production Engineering* 10(2016)1, S. 81–91.
- [76] Norm DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung: Beuth, 2003.
- [77] Merklein, M.; Schneider, T.; Gröbel, D.; Nürnberger, F.: Blechmassivumformung – vom Halbzeug zum Funktionsbauteil. In: Behrens, B. A. (Hrsg.): 21. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, Industrie und Wissenschaft – Gemeinsam die Zukunft gestalten, 2014, S. 265–280.
- [78] Löffler, M.; Schulte, R.; Freiburg, D.; Biermann, D.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Merklein, M.: Control of the material flow in sheet-bulk metal forming using modifications of the tool surface. *Journal of Material Forming* 12(2019)1, S. 17–26.
- [79] Lange, K.: Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft - Band 3: Blechbearbeitung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1990.
- [80] Merklein, M.; Koch, J.; Opel, S.; Schneider, T.: Fundamental investigations on the material flow at combined sheet and bulk metal forming processes. *CIRP Annals* 60(2011)1, S. 283–286.
- [81] Vierzigmann, H. U.; Merklein, M.; Engel, U.: Friction Conditions in Sheet-Bulk Metal Forming. *Procedia Engineering* 19(2011), S. 377–382.
- [82] Merklein, M.; Löffler, M.; Schneider, T.: Plastic flow and its control in sheet-bulk metal forming of thin-walled functional components. *CIRP Annals* 64(2015)1, S. 245–248.
- [83] Schulte, R.; Hildenbrand, P.; Lechner, M.; Merklein, M.: Designing, Manufacturing and Processing of Tailored Blanks in a Sheet-bulk Metal Forming Process. *Procedia Manufacturing* 10(2017), S. 286–297.
- [84] Hauger, A.: Flexibles Walzen als kontinuierlicher Fertigungsprozeß für Tailor Rolled Blanks. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1999.
- [85] Kopp, R.; Böhlke, P.: A New Rolling Process for Strips with a Defined Cross Section. *CIRP Annals* 52(2003)1, S. 197–200.

- [86] Groche, P.; Taplick, C.; Özel, M.; Mahajan, P.; Stahl, S.: Benefits of stress superposition in combined bending-linear flow splitting process. *International Journal of Material Forming* 11(2018)1, S. 19–29.
- [87] Moneke, M.; Mahajan, P.; Groche, P.: End flare of linear flow split profiles. *Journal of Material Forming* 12(2019)3, S. 429–440.
- [88] Bragança, I.; Silva, C.; Alves, L. M.; Martins, P.: Lightweight joining of polymer and polymer-metal sheets by sheet-bulk forming. *Journal of Cleaner Production* 145(2017), S. 98–104.
- [89] Jirathearanat, S.; Taureza, M.; Atsushi, D.: Successive Forming of Multi-thickness Plates by Using Wedge-shaped Tool. *Procedia Engineering* 207(2017), S. 1147–1152.
- [90] Behrens, B. A.; Hübner, S.; Krimm, R.; Wager, C.; Vucetic, M.; Cahyono, T.: Development of a Hydraulic Actuator to Superimpose Oscillation in Metal-Forming Presses. *KEM* 473(2011), S. 217–222.
- [91] Gerstein, G.; Isik, K.; Gutknecht, F.; Sieczkarek, P.; Ewert, J.; Tekkaya, A. E.; Clausmeyer, T.; Nürnberger, F.: Microstructural characterization and simulation of damage for geared sheet components. *Journal of Physics: Conference Series* 896(2017)1, S. 1–8.
- [92] Slick, E. E.: The Slick Wheel Mill. *The Iron Age* 102(1918)9, S. 491–498.
- [93] Spiers, R. M.: The Massey Rotaform Die Forging Process and Machine. *Forming Equipment Suppliers Symposium*, (1973), S. 26–28.
- [94] Slater, R. A. C.; Barooah, N. K.; Appleton, E.; Johnson, W.: The Rotary Forging Concept and Initial Work with an Experimental Machine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 184(1969)1, S. 577–592.
- [95] Appleton, E.; Slater, R.: Effects of upper platen configuration in the rotary forging process and rotary forging into a contoured lower platen. *International Journal of Machine Tool Design and Research* 13(1973)1, S. 43–62.
- [96] Marciniak, Z.: A rocking-die technique for cold-forming operations. *Machinery and production engineering* 117(1970), S. 792–797.
- [97] Wie, J.; Lu, Q. R.; Wang, Z. R.; Pei, X. H.: New Developments on Rotary Forging in China. In: Kobayashi, M. (Hrsg.): *Proceedings 3rd International Conference on Rotary Metalworking Processes*, 1984, S. 61–70.
- [98] Standring, P. M.; Appleton, E.: Rotary forging developments in Japan I. Machine development and forging research. *Journal of Mechanical Working Technology* 3(1980)3, S. 253–273.

- [99] Shivpuri, R.: Past developments and future trends in the rotary or orbital forging process. *Journal of Materials Shaping Technology* 6(1988)1, S. 55–71.
- [100] Standring, P. M.; Appleton, E.: The development of rotary forging machine design. *Chartered Mechanical Engineer* 26(1979), S. 44–50.
- [101] Kobayashi, M.; Appleton, M.; Standring, P. M.: Entwicklung von Rotations-Schmiedemaschinen. *Draht* 33(1982)7, S. 446–450.
- [102] Standring, P. M.: Neue und zukünftige Entwicklungen im Rotary Forging. In: Siegert, K. (Hrsg.): *Tagungsband Internationale Konferenz Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, 2001*, S. 347–370.
- [103] Sundar Singh Sivam, S. P.; Uma Sekar, V. G.; Mishra, A.; Mondal, A.; Mishra, S.: Orbital Cold Forming Technology - Combining High Quality Forming with Cost Effectiveness - A Review. *Indian Journal of Science and Technology* 9(2016)38, S. 1–7.
- [104] Groche, P.; Fritsche, D.; Tekkaya, E. A.; Allwood, J. M.; Hirt, G.; Neugebauer, R.: Incremental Bulk Metal Forming. *CIRP Annals* 56(2007)2, S. 635–656.
- [105] Stutz, W. R.: Productivity and quality improvements through orbital forming. *Assembly Automation* 23(2003)2, S. 147–152.
- [106] Merklein, M.; Plettke, R.; Opel, S.: Orbital forming of tailored blanks from sheet metal. *CIRP Annals* 61(2012)1, S. 263–266.
- [107] Nagel, W.: Taumelverfahren: Kaltfließpressen unter Anwendung von relativ kleinen Preßkräften. *Maschinenmarkt* 82(1976)99, S. 1922–1923.
- [108] Maicki, J. R.: Orbital forming. *Metallurgie and Metal Forming*, (1977), S. 265–269.
- [109] Kubo, K.; Hirai, Y.: Deformation characteristics of cylindrical billet in upsetting by a rotary forging machine. In: University of Nottingham (Hrsg.): *Proceedings of the 1st International Conference on Rotary Metalworking Processes, 1979*, S. 99–110.
- [110] Lin, S. Y.: Upsetting of a cylindrical specimen between elastic tools. *Journal of Materials Processing Technology* 86(1999)1–3, S. 73–80.
- [111] Standring, P. M.: Advanced technology of rotary forging for novel automotive applications. In: Geiger, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 6th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP), 2008*, S. 1709–1718.
- [112] Standring, P. M.; Arthur, A.: Technologiespeicher für das Taumelpressen. *Umformtechnik* 29(1995)3, S. 184–189.

- [113] Standring, P. M.: Characteristics of rotary forging as an advanced manufacturing tool. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 215(2001)7, S. 935-945.
- [114] Michel, B.: Taumeln spart Energie. Maschine und Werkzeug 91(1990)20, S. 102-111.
- [115] Hawkyard, J. B.; Gurnani, C. K. S.; Johnson, W.: Pressure-Distribution Measurements in Rotary Forging. Journal of Mechanical Engineering Science 19(1977)4, S. 135-142.
- [116] Samołyk, G.: Studies on Stress and Strain State in Cold Orbital Forging a AlMgSi Alloy Flange Pin. Archives of Metallurgy and Materials 58(2013)4, S. 1183-1189.
- [117] Marciniak, Z.: Fließpressen mit taumelndem Gesenk. Werkstatt und Betrieb 103(1970)1, S. 57-61.
- [118] Han, X.; Hua, L.: Comparison between cold rotary forging and conventional forging. Journal of Mechanical Science and Technology 23(2009)10, S. 2668-2678.
- [119] Heinze, R.: Taumelpressen geradzahnter Zylinderräder. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1996.
- [120] Plancak, M. E.; Vilotic, D. Z.; Stefanovic, M. C.; Movrin, D. Z.: Orbital Forging - A plausible Alternative for Bulk Metal Forming. Journal of Trends in the Development of Machinery 16(2012)1, S. 35-38.
- [121] Bernet, A.: Umformen nach dem Taumelverfahren. VDI-Berichte 266(1978), S. 29-35.
- [122] Choi, S.; Na, K. H.; Kim, J. H.: Upper-bound analysis of the rotary forging of a cylindrical billet. Journal of Materials Processing Technology 67(1997)1, S. 78-82.
- [123] Heinrich Schmid Maschinen- und Werkzeugbau AG (jetzt: Feintool Technology AG): Taumeltechnologie in neuer Dimension. Umformtechnik 2(2006)
- [124] Schondelmaier, J.: Grundlagenuntersuchung über das Taumelpressen. Dissertation, Universität Stuttgart, 1992.
- [125] Feng, W.; Yao, W.; Jiang, P.: Influence of Eccentricity on Movements of Orbital Head with Double Eccentric Structure in Orbital Forging. Procedia Engineering 81(2014), S. 2348-2354.
- [126] Han, X.; Zhang, X.; Hua, L.: Calculation of kinetic locus of upper tool in cold orbital forging machine with two eccentricity rings. Journal of Mechanical Science and Technology 29(2015)10, S. 4351-4358.

- [127] Marciniak, Z.; Chodakowski, A.: Erfahrungen über das Kaltfließpressen von Stahlwerkstücken mit taumelndem Gesenk. *Stahl und Eisen* 90(1970)20, S. 1077–1080.
- [128] Peters, A.: Interpolation als Kernidee inner- und außermathematischer Anwendungen -Mathematikdidaktische Analyse und Entwicklung von Unterrichtsmaterialien zum Kontext Computeranimation. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2016.
- [129] Grzeskowiak, J.: Possibility on cold and warm rotary forging of gears. In: University of Nottingham (Hrsg.): Proceedings of the 1st International Conference on Rotary Metalworking Processes, 1979, S. 289–296.
- [130] Liu, G.; Yuan, S. J.; Wang, Z. R.: Finite element simulation of rotary forging. In: Geiger, M. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP), 2008, S. 1727–1732.
- [131] Han, X.; Hua, L.: Investigation on contact parameters in cold rotary forging using a 3D FE method. *Journal of Advanced Manufacturing Technology* 62(2012)9-12, S. 1087–1106.
- [132] Devanathan, R.; Murali, V.: Numerical Simulation of Orbital Cold Forging of a Bevel Gear. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 4(2015)1, S. 191–197.
- [133] Liu, G.; Zhang, L.; Hu, X.; Wang, Z.; Wang, R.; Huang, S.; Tang, Q.: Applications of numerical simulation to the analysis of bulk-forming processes—case studies. *Journal of Materials Processing Technology* 150(2004)1-2, S. 56–61.
- [134] Liu, G.; Yuan, S. J.; Wang, Z. R.; Zhou, D. C.: Explanation of the mushroom effect in the rotary forging of a cylinder. *Journal of Materials Processing Technology* 151(2004)1-3, S. 178–182.
- [135] Calmano, S.; Hesse, D.; Hoppe, F.; Traidl, P.; Sinz, J.; Groche, P.: Orbital Forming of Flange Parts under Uncertainty. *Applied Mechanics and Materials* 807(2015), S. 121–129.
- [136] Oh, H.-K.; Choi, S.: A study on center thinning in the rotary forging of a circular plate. *Journal of Materials Processing Technology* 66(1997)1-3, S. 101–106.
- [137] Samołyk, G.; Tomczak, J.; Bartnicki, J.: Cold Forming of AlCu<sub>4</sub>MgSi Alloy by Orbital Forging. *Archives of Metallurgy and Materials* 57(2012)1

- [138] Oh, H.-K.; Choi, S.: Ductile fracture in the central region of a circular plate in rotary forging. *Journal of Materials Processing Technology* 68(1997)1, S. 23–26.
- [139] Hetzel, A.; Lechner, M.: Orbital Forming of Tailored Blanks for Industrial Application. In: Merklein, M.; Tekkaya, A. E.; Behrens, B.-A. (Hrsg.): SHEET BULK METAL FORMING - Research results of the tcrc73. [S.l.]: SPRINGER, 2021, S. 458–476.
- [140] Vierzigmann, H. U.: Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2016.
- [141] Löffler, M.: Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2018.
- [142] Andreas K.: Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2015.
- [143] Grzeskowiak, J.: Wether in the coming years the rocking die forming can be widely applied on the forging manufacture. In: Kobayashi, M. (Hrsg.): Proceedings 3rd International Conference on Rotary Metalworking Processes, 1984, S. 109–113.
- [144] Jurt, F.: Taumelnd zu höherer Produktivität. In: VDI Fachtagung (Hrsg.): 31. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer, 2016.
- [145] Paramasivam, S. S. S.; Kumaran, P.; Natarajan, H.; Mishra, A.: Numerical Simulation of cold orbital forging process for gear manufacturing. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies* 11(2019)2, S. 126–132.
- [146] Jin, Q.; Gu, Z.; Hua, J.: Preform designing approach in cold orbital forging of flange gear. *Advances in Mechanical Engineering* 10(2018)10, 1–7.
- [147] Han, X.; Hua, L.; Zhuang, W.; Zhang, X.: Process design and control in cold rotary forging of non-rotary gear parts. *Journal of Materials Processing Technology* 214(2014)11, S. 2402–2416.
- [148] Jin, Q.; Han, X.; Hua, L.; Zhuang, W.; Feng, W.: Process optimization method for cold orbital forging of component with deep and narrow groove. *Journal of Manufacturing Processes* 33(2018), S. 161–174.

- [149] Merklein, M.; Lechner, M.; Gröbel, D.; Löffler, M.; Schneider, T.; Schulte, R.; Hildenbrand, P.: Innovative approaches for controlling the material flow in sheet-bulk metal forming processes. *Manufacturing Review* 3(2016)2, S. 1–17.
- [150] Feintool Technologie AG: Taumel-Technologie - Hohe Qualität und Wirtschaftlichkeit beim Umformen. Lyss, Schweiz, 2012.
- [151] Gu, B.; Zhuang, W.; Han, X.: Influences of key process parameters on orbital forging of thin-walled smartphone shell frame of aluminum alloy. *Procedia Manufacturing* 50(2020), S. 303–306.
- [152] Fürst, J.: Taumeln und Präzisionsschmieden treten gegen die Zerspanung an. Internet: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/taumeln-und-praezisionsschmieden-treten-gegen-die-zerspanung-an-a-337456> (aufgerufen am 08.04.2024).
- [153] Industrieverband Massivumformung (Hrsg.): Kaltmassivumformung: Präzision in Serie. Hagen, 2012, Überarb. Ausg.
- [154] Hirschvogel, M.: Sonderverfahren der Kaltmassivumformung. *Werkstatt und Betrieb* 112(1979)10, S. 721–724.
- [155] Kosior, D.: Orbital Cold Forming. *Metalfforming* 31(1997)10, S. 74–80.
- [156] König, W.; Leube, H.; Heinze, R.: Taumelpressen von geradverzahnten Zylinderrädern. *Industrieanzeiger* 91(1986)1, S. 25–35.
- [157] Hetzel, A.; Lechner, M.; Aman, A.; Büdicker, K.; Merklein, M.: Potential of Orbital Formed Tailored Blanks for Industrial Application. In: TEMA Technologie Marketing AG (Hrsg.): Proceedings of the 6th international conference on steels in cars and trucks - SCT2022, 2022, S. 1–8.
- [158] Grosman, F.; Madej, Ł.; Ziółkiewicz, S.; Nowak, J.: Experimental and numerical investigation on development of new incremental forming process. *Journal of Materials Processing Technology* 212(2012)11, S. 2200–2209.
- [159] Nowak, J.; Madej, L.; Ziolkiewicz, S.; Plewinski, A.; Grosman, F.; Pietrzyk, M.: Recent development in orbital forging technology. *Journal of Material Forming* 1(2008)S1, S. 387–390.
- [160] Gu, Z.; Chen, M.; Wang, C.; Zhuang, W.: Static and Dynamic Analysis of a 6300 KN Cold Orbital Forging Machine. *Processes* 9(2021)1, S. 1–20.
- [161] Hua, L.; Chen, M.; Han, X.; Zhang, X.; Zheng, F.; Zhuang, W.: Research on the vibration model and vibration performance of cold orbital forging machines. *Proceedings of the Institution of Mechanical*

- Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 236(2022)6-7, S. 828-843.
- [162] Chen, M.; Zhang, X.; Zhuang, W.; Shu, Y.; Zhou, Z.; Xiong, W.: Kinematics and dynamics simulations of cold orbital forging machines based on ADAMS. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 237(2022)1-2, 250-260.
- [163] Samolyk, G.: Numerical investigation of producing a Ti6Al4V alloy jaw coupling sleeve-disk by orbital forging. Metallurgija 53(2014)4, S. 497-500.
- [164] Bernet, A.: Umformen mit taumelndem Gesenk. Schweizer Maschinenmarkt 78(1978)20, S. 89-91.
- [165] Kopacz, Z.; Muszel, A.: Pressen mit taumelndem Gesenk Neue polnische Maschinen. Bleche, Rohre, Profile 22(1975)5, S. 210-211.
- [166] Boehm, S.: Noiseless orbital forging today. Tooling and Production 44(1978)3, S. 72-75.
- [167] Bernet, A.: Umformen nach dem Taumelverfahren. mav - Kompetenz in der spanenden Fertigung 6(1980)1, S. 19-20.
- [168] Norm DIN EN 573-3: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug - Teil 3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen: Beuth, 2019.
- [169] Gómez-Parra, A.; Álvarez-Alcón, M.; Salguero, J.; Batista, M.; Marcos, M.: Analysis of the evolution of the Built-Up Edge and Built-Up Layer formation mechanisms in the dry turning of aeronautical aluminium alloys. Wear 302(2013)1-2, S. 1209-1218.
- [170] Carl Bechem GmbH: Lubricants for massive forming Cold, semi-hot and hot forging. Internet: [https://www.bechem.de/\\_Resources/Persistent/e/5/d/6/e5d6e73ff34f4c708c9d409f3d1973e6ddd55994/BE-CHEM\\_Lubricants\\_for\\_massive\\_forming\\_en.pdf](https://www.bechem.de/_Resources/Persistent/e/5/d/6/e5d6e73ff34f4c708c9d409f3d1973e6ddd55994/BE-CHEM_Lubricants_for_massive_forming_en.pdf) (aufgerufen am 08.04.2024).
- [171] GOM Metrology: Triangulation: bewährtes Messprinzip mit Zukunft. Internet: <https://www.gom.com/de-de/themen/triangulation> (aufgerufen am 08.04.2024).
- [172] Norm DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur: Beuth, 2017.
- [173] Norm DIN EN ISO 14577-1: Metallische Werkstoffe - Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter - Teil 1: Prüfverfahren: Beuth, 2015.

- [174] Helmut Fischer GmbH: Mikrohärte-Produktlinie - Messsysteme für die Instrumentierte Eindringprüfung. Internet: [https://de.helmut-fischer.com/wp-content/uploads/2022/04/BROC\\_Mikrohaerte\\_de.pdf](https://de.helmut-fischer.com/wp-content/uploads/2022/04/BROC_Mikrohaerte_de.pdf) (aufgerufen am 08.04.2024).
- [175] Norm DIN EN ISO 6507-1: Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren: Beuth, 2018.
- [176] Damoulis, G. L.; Gomes, E.; Batalha, G. F.: New trends in sheet metal forming analysis and optimization through the use of optical measurement technology to control springback. *International Journal of Material Forming* 3(2010)1, S. 29–39.
- [177] Galanulis, K.; Adolf, S.; Friebe, H.: Optical 3D Metrology for Optimization of Sheet Metal Forming Processes. *Key Engineering Materials* 639(2015), S. 3–11.
- [178] Femutec Engineering GmbH: Simulation in der Massivumformung. *Umformtechnik* 4(2007), S. 20–22.
- [179] Klein, B.: FEM - Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode. Wiesbaden: Springer Fachmedien
- [180] Klocke, F.; König, W.: *Fertigungsverfahren 4 - Umformen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [181] Lange, K.: *Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft - Band 4: Sonderverfahren, Prozeßsimulation, Werkzeugtechnik, Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1993.
- [182] Vogel, M.: *Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2022.
- [183] Tsao, C.-S.; Chen, C.-Y.; Jeng, U.-S.; Kuo, T.-Y.: Precipitation kinetics and transformation of metastable phases in Al-Mg-Si alloys. *Acta Materialia* 54(2006)17, S. 4621–4631.
- [184] Merklein, M.; Geiger, M.; Staud, D.; Vogt, U.: Tailored heat treated blanks applied on car body parts under quasi-series conditions. *Journal of Microstructure and Materials Properties* 4(2009)5/6, S. 525–533.
- [185] Fröck, H.; Reich, M.; Milkereit, B.; Kessler, O.: Scanning Rate Extension of Conventional DSCs through Indirect Measurements. *Materials* 12(2019)7, S. 1–21.

- [186] Doan, L. C.; Ohmori, Y.; Nakai, K.: Precipitation and Dissolution Reactions in a 6061 Aluminum Alloy. *Materials Transactions, JIM* 41(2000)2, S. 300–305.
- [187] Seemann, H. J.; Stavenow, F.: Röntgenographische Untersuchungen über das Auftreten von Stapelfehlern in verschiedenen Aluminiumlegierungen. *International Journal of Materials Research* 52(1961)10, S. 667–670.
- [188] Cheng, L. M.; Poole, W. J.; Embury, J. D.; Lloyd, D. J.: The influence of precipitation on the work-hardening behavior of the aluminum alloys AA6111 and AA7030. *Metallurgical and Materials Transactions A* 34(2003)11, S. 2473–2481.
- [189] Dumont, D.; Deschamps, A.; Brechet, Y.: A model for predicting fracture mode and toughness in 7000 series aluminium alloys. *Acta Materialia* 52(2004)9, S. 2529–2540.
- [190] Drossel, G. (Hrsg.): *Aluminium Taschenbuch 2 - Umformung, Gießen, Oberflächenbehandlung, Recycling*. Berlin: Beuth, 2018, 17. Auflage.
- [191] Siebel, G.: Über den Presseffekt der Aluminium-Zink-Magnesium-Legierung HY-43. *Angewandte Chemie*, (1948), S. 215.
- [192] Lenz, D.; Renouard, G. M.: Definition kaltgewalzter Werkstoffzustände mittels Fließkurve und Formänderungsarbeit. *Aluminium* 46(1970), S. 694–699.
- [193] Macherauch, E.; Zoch, H.-W.: *Praktikum in Werkstoffkunde*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.
- [194] Hughes, D. A.; Hansen, N.: High angle boundaries formed by grain subdivision mechanisms. *Acta Materialia* 45(1997)9, S. 3871–3886.
- [195] Prangnell, P. B.; Bowen, J. R.; Apps, P. J.: Ultra-fine grain structures in aluminium alloys by severe deformation processing. *Materials Science and Engineering: A* 375-377(2004), S. 178–185.
- [196] Blum, W.; Zeng, X. H.: A simple dislocation model of deformation resistance of ultrafine-grained materials explaining Hall–Petch strengthening and enhanced strain rate sensitivity. *Acta Materialia* 57(2009)6, S. 1966–1974.
- [197] Altenpohl, D.: *Aluminium und Aluminiumlegierungen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1965.
- [198] Ruppert, M.; Höppel, H.-W.; Göken, M.: Influence of cross-rolling on the mechanical properties of an accumulative roll bonded aluminum

- alloy AA6014. *Materials Science and Engineering: A* 597(2014), S. 122–127.
- [199] Böhm, W.: Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2019.
- [200] Huang, X.; Tsuji, N.; Hansen, N.; Minamino, Y.: Microstructural evolution during accumulative roll-bonding of commercial purity aluminum. *Materials Science and Engineering: A* 340(2003)1-2, S. 265–271.
- [201] Schumacher, P.: Plastisches Verformungsverhalten unterkühlter Aluminiumlegierungen im System Al-Mg-Si. Dissertation, Universität Rostock, 2018.
- [202] Dieter, G. E.: *Mechanical Metallurgy*. London: McGraw-Hill, 1988.
- [203] Chbihi, A.; Vincent, S.; Ribis, J.; Toffolon-Masclat, C.; Garnier, J.: Influence of plastic deformation on the precipitation sequence in an AA6061 alloy. *Journal of Materials Science* 52(2017)10, S. 6063–6073.
- [204] Nabarro, F.: *Dislocations in Solids*, vol. 2. *Dislocations in Crystals*. Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1979.
- [205] Yassar, R. S.; Field, D. P.; Weiland, H.: The effect of cold deformation on the kinetics of the  $\beta''$  precipitates in an Al-Mg-Si alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A* 36(2005)8, S. 2059–2065.
- [206] Vissers, R.; Marioara, C. D.; Anders, S. J.; Holmestad, R. (Hrsg.): *Proceedings of ICAA11*, 2008.
- [207] Teichmann, K.; Marioara, C. D.; Andersen, S. J.; Pedersen, K. O.; Gulbrandsen-Dahl, S.; Kolar, M.; Holmestad, R.; Marthinsen, K.: HRTEM study of the effect of deformation on the early precipitation behaviour in an AA6060 Al-Mg-Si alloy. *Philosophical Magazine* 91(2011)28, S. 3744–3754.
- [208] Gupta, A. K.; Lloyd, D. J.: Quench Path Sensitivity of Super Purity Al-0.8%Mg<sub>2</sub>Si Alloys with and without Excess Silicon. *Materials Science Forum* 396-402(2002), S. 971–976.
- [209] Dutkiewicz, J.; Litynska, L.: The effect of plastic deformation on structure and properties of chosen 6000 series aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A* 324(2002)1-2, S. 239–243.
- [210] Matsuda, K.; Ikeno, S.; Uetani, Y.; Sato, T.: Metastable phases in an Al-Mg-Si alloy containing copper. *Metallurgical and Materials Transactions A* 32(2001)6, S. 1293–1299.

- [211] Andersen, S. J.; Zandbergen, H. W.; Jansen, J.; Træholt, C.; Tundak, U.; Reiso, O.: The crystal structure of the  $\beta''$  phase in Al–Mg–Si alloys. *Acta Materialia* 46(1998)9, S. 3283–3298.
- [212] Herwig, H.: Wärmeübertragung A-Z - Systematische und ausführliche Erläuterungen wichtiger Größen und Konzepte. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2000.
- [213] Hildenbrand, P.; Lechner, M.; Vogel, M.; Herrmann, H.; Merklein, M.: Orbital forming of tailored blanks with two-sided local material thickening. *Journal of Advanced Manufacturing Technology* 97(2018)9-12, S. 3469–3478.

## Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Hetzel, A.; Schulte, R.K.; Vogel, M.; Degner, J.; Merklein, M.: Maßgeschneiderte Halbzeuge – Umformtechnische Herstellung von Funktionsbauteilen zur Realisierung von Leichtbaukomponenten. *wt Werkstattstechnik – Online* 109(2019), S. 745-749.
- [P2] Hetzel, A.; Lechner, M.: Lokale Kurzzeitwärmebehandlung zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen prozessangepasster Halbzeuge der Aluminiumlegierung AA6016. In: Behrens, B-A. (Hrsg.): Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Umformtechnik - 23. Umformtechnisches Kolloquium Hannover 04. und 05. März 2020, TEWISS, 2020, S. 86-93.
- [P3] Hetzel, A.; Merklein, M.; Lechner, M.: Enhancement of the Forming Limits for Orbital Formed Tailored Blanks by Local Short-term Heat Treatment. *Procedia Manufacturing* 47(2020), S. 1197-1202.
- [P4] Hetzel, A.; Schulte, R.K.; Vogel, M.; Lechner, M.; Besserer, H.B.; Maier, H.J.; Sauer, C.; Schleich, B.; Wartzack, S.; Merklein, M.: Functional Analysis of Components Manufactured by a Sheet-Bulk Metal Forming Process. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 5(2021), S. 1-18.
- [P5] Hetzel, A.; Merklein, M.; Lechner, M.: Influence of a local short-term heat treatment on the formability of orbital formed functional components. *Procedia Manufacturing* 53(2021), S. 72-79.
- [P6] Hetzel, A.; Lechner, M.; Merklein, M.: Joining of hybrid semi-finished products from sheet metal by orbital forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L – Journal of Materials - Design and Applications* (2021), S. 1-9.
- [P7] Hetzel, A.; Lechner, M.: Orbital Forming of Tailored Blanks for Industrial Application. In: Merklein, M.; Tekkaya, A.E.; Behrens, B-A. (Hrsg.): *Sheet Bulk Metal Forming*, Springer, 2021, S. 458-476.

- [P8] Römisch, D.; Hetzel, A.; Wituschek, S.; Lechner, M.; Merklein, M.: Pin Extrusion for Mechanical Joining from Orbital Formed Tailored Blanks with Local Material Pre-Distribution. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 6(2022)127, S. 1-15.
- [P9] Hetzel, A.; Sawodny, A.; Lechner, M.; Merklein, M.: Optical forming analysis of functional components manufactured in an orbital forming process. In: Stockinger, M. (Hrsg.): XL. Colloquium on Metal Forming, Zauchensee, Österreich (2022), S. 25-30.
- [P10] Hetzel, A.; Lechner, M.; Merklein, M.: Investigation on a quasi-incremental tool concept to manufacture functional components with sheet thickness gradient. In: TOOLING-ASMET (Hrsg.): 12th Tooling 2022 Conference and Exhibition, Örebro, Schweden (2022), S. 461-468.
- [P11] Hetzel, A.; Lechner, M.; Aman, A.; Büdicker, K.; Merklein, M.: Potential of Orbital Formed Tailored Blanks for Industrial Application. In: TEMA Technologie Marketing AG (Hrsg.): Steel in Cars and Trucks, Mailand, Italien (2022), S. 1-8.
- [P12] Hetzel, A.; Lechner, M.; Merklein, M.: Investigation on the shear cutting of functional components manufactured in an orbital forming process. *Materials Research Proceedings* 25(2023), S. 61-68.
- [P13] Hetzel, A.; Biburger, M.; Lechner, M.; Merklein, M.: Tailored Heat Treatment Strategy for the Orbital Forming of Functional Components from EN AW-7075. In: Mocellin, K.; Bouchard, P.O.; Bigot, R.; Balan, T. (Hrsg.): Proceedings of the 14th International Conference on the Technology of Plasticity - Current Trends in the Technology of Plasticity. ICTP 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham (2024), S. 702-712.
- [P14] Hetzel, A.; Wituschek, S.; Römisch, D.; Sippel, F.; Lechner, M.; Merklein, M.: Investigation on the load-bearing capacity and

joint formation of hybrid functional components joined by orbital forming. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering (2024), S. 1-9.

## Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] Melamed, Margarita: Analyse des Einflusses einer Kurzzeit-Wärmebehandlung der ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierung EN AW-6016 auf die mechanischen Eigenschaften. Bachelorarbeit (2019), Erlangen
- [S2] Harbauer, Lucas Marco: Numerische Simulation eines Taumelprozesses für die industrielle Anwendung. Projektarbeit (2019), Erlangen
- [S3] Reblitz, Jonas: Adaption und Validierung der numerischen Simulation eines Taumelprozesses für die industrielle Anwendung. Masterarbeit (2020), Erlangen
- [S4] Gösseringer, Nils: Auslegung einer Strategie zur Kurzzeitwärmebehandlung von Tailored Blanks der Aluminiumlegierung EN AW-6016 für die industrielle Anwendung. Bachelorarbeit (2020), Erlangen
- [S5] Kittel, Hannes: Analyse des Einflusses von verschiedenen Schneidoperationen auf die Eigenschaften von getaumelten Blechbauteilen. Masterarbeit (2019), Erlangen
- [S6] Kahmann, Julius: Untersuchung des Einflusses einer lokalen Kurzzeitwärmebehandlung auf Umformbarkeit und Schneidfähigkeit von getaumelten Blechbauteilen der Aluminiumlegierung EN AW-6016. Bachelorarbeit (2019), Erlangen
- [S7] Hettler, Larissa: Adaption der Prozesskinematik eines Taumelverfahrens zur Herstellung von Bauteilen mit Blechdickengradient. Masterarbeit (2020), Erlangen
- [S8] Graßl, Sofie: Herstellung und Analyse von Fügeverbindungen an hybriden Bauteilstrukturen durch Einsatz eines Taumelprozesses. Masterarbeit (2021), Erlangen
- [S9] Krumrein, Jakob: Numerische Auslegung eines iterativen Umformprozesses zur Herstellung von Funktionsbauteilen mit Blechdickengradient. Projektarbeit (2020), Erlangen

- [S10] Thoma, Christian: Analyse des Verfestigungsverhaltens von hochfesten Stahlwerkstoffen in der Blechmassivumformung. Masterarbeit (2021), Erlangen
- [S11] Kahmann, Julius: Herstellung wandlungsfähiger Fügeverbindungen an hybriden Bauteilstrukturen aus Blechhalbzeugen durch Adaption eines Taumelprozesses. Projektarbeit (2022), Erlangen
- [S12] Biburger, Michael: Optische Dehnungsmessung von getaumelten Funktionsbauteilen aus hochfestem Aluminiumblech unter Einfluss einer lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung. Masterarbeit (2023), Erlangen
- [S13] Kana Noumedem, Jean Claude: Einflussanalyse variierender Umformgrade auf das Auslagerungsverhalten von ausscheidungs-härtbaren Aluminiumlegierungen nach einer lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung. Projektarbeit (2023), Erlangen
- [S14] Janot, Michael: Erarbeitung und Validierung eines Modells zur Bestimmung des Umformgrades mittels optischer Dehnungs- und Blechdickenmessung in der Blechmassivumformung. Bachelorarbeit (2024), Erlangen



## Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2025):  
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 Flexibilitätsteigerung 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 Hopperditzel**

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 hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung  
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab.  
2000. ISBN 3-87525-138-5.

**Band 103: Stefan Bobbert**

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren  
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

**Band 104: Harald Rottbauer**  
Modulares Planungs- und Fertigungswerkzeug 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-Bordnetze

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 Laserstrahlflügeoperationen

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 Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK  
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

**Band 223: Daniel Craiovan**  
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern  
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

**Band 224: Kay Wagner**  
Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen  
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

**Band 225: Martin Brandhuber**  
Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten  
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

**Band 226: Peter Sebastian Feuser**  
Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte 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 für die Kaltmassivumformung 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 Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen  
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

**Band 235: Thomas Stöhr**  
Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen  
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

**Band 236: Christian Kägeler**  
Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß  
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

**Band 237: Andreas Sulzberger**  
Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen  
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

**Band 238: Simon Opel**  
Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung  
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

**Band 239: Rajesh Kanawade**  
In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer 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 Laserstrahltaiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition  
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

**Band 262: Peter Vatter**  
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode  
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

**Band 263: Florian Klämpfl**  
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung  
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

**Band 264: Matthias Domke**  
Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten  
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

**Band 265: Johannes Götz**  
Community-basierte Optimierung des Anlagenengineering  
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 Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht  
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

**Band 285: Martin Bornschlegl**  
Methods-Energy Measurement - Eine Methode zur Energieplanung für Fügeverfahren im Karosseriebau  
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-409-9.

**Band 286: Tobias Rackow**  
Erweiterung des 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-Laserstrahlsschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie  
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

**Band 292: Alexander Kahrimanidis**  
Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen  
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

**Band 293: Jan Tremel**  
Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren  
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

**Band 294: Ioannis Tsoupis**  
Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung  
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

**Band 295: Sven Hildering**  
Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien  
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

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

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

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

**Band 299: Mario Lušić**  
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender 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 Schneidlinchverfahren

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 Karosserie-rohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

**Band 320: David Meinel**

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge

FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-184-3.

**Band 321: Andrea Zimmermann**

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

**Band 322: Christoph Amann**

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden

LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

**Band 323: Jennifer Tenner**

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

**Band 324: Susan Zöller**

Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-202-4.

**Band 325: Stefan Lutz**

Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation

LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

**Band 326: Tobias Gnibl**

Modellbasierte Prozesskettenabbildung 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 Spinnenprinzip

LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

**Band 330: Stephan Rapp**

Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer 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 Heißcrimpprozesses  
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

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

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

**Band 343: Julia Degner**  
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester 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 elektrischer 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 Umformigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014  
LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

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

**Band 354: Tobias 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 Zylinderring-lagern  
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 Auswertemethodik 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-, Axialschub- 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 Oberflächenmikrostrukturen für geschmierte tribologische Kontakte  
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-439-4.

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

**Band 374: Martin Hohmann**

Machinelles Lernen und hyper-spektrale Bildgebung: Multi-Spektrale Endoskopie im Gastrointestinaltrakt für Hyper-Spektrale Endoskopie LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

**Band 375: Timo Kordaf**

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-äquivalent opto-/elastofluidic in-vitro mikrophysiologische vaskuläre Modelle für translationale Studien optischer Biopsien 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 Völk**

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 Folgerverbund 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 Ziehsicken 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-Durchstrahlsschweißen  
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 Rotationschneidtechnologie 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 Lengfelder**

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 Verstärken 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 Flugrobotersystem 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 Fertigungsautomatisierung  
FAPS, xiv u. 163 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-673-2.

**Band 430: Fabian Knieps**

Finite Elemente Simulation dünnter Verpackungsstähle: Entwicklung einer geeigneten Charakterisierungs- und Validierungsstrategie  
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 sehbeeinträchtigte 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 mehrfach 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 Stoffflusssteuerung beim Fügen durch Umformen von hochfesten Aluminiumlegierungen 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 Herstellung 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 Presshärteprozess durch Verwendung maßgeschneiderter laserimplantierter Werkzeuge  
LFT, viii u. 177 Seiten, 63 Bilder, 7 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-721-0.

**Band 438: Andreas Rohmoser**  
Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses zum Fließpressen betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der Materialpaarung 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 Digitalisierung 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 Messunsicherheitsbestimmung von taktilen Koordinatenmessungen durch Simulation  
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 Messunsicherheitsermittlung für die Messung großer Zahnräder zur Erweiterung des virtuellen 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-Vorwärts-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 Untersuchungen zum Kaltfließpressen 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 alternativen Blechwerkstoffes für flexibel gewalzte und direkt warmumgeformte 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 Hybridbauteilen  
LFT, xxi u. 173 Seiten, 78 Bilder, 6 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-764-7.

**Band 449: Sven Wirsching**  
Numerische Optimierung von sekundären, geschmierten Punkt- und Ellipsenkontakten zur gezielten Auslegung von Rollenlagern  
KTmfk, xxv u. 206 Seiten, 70 Bilder, 16 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-766-1.

**Band 450: Tobias Lechler**  
Der Digitale Zwilling im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme  
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 83 Bilder, 4 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-691-6.

**Band 451: Eva Russwurm**  
Kombinierte Material- und Energieflussimulation gleichstrombasierter, automatisierter Produktionsanlagen  
FAPS, xvi u. 165 Seiten, 67 Bilder, 13 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-770-8.

**Band 452: Janik Schaude**  
Untersuchungen zur rasterkraft- und konfokalmikroskopischen Charakterisierung nanometrologischer Referenzkörper  
FMT, x u. 167 Seiten, 74 Bilder, 4 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-776-0.

**Band 453: Philipp Bräuer**  
Nahinfrarot-Laser-Strukturierung und nasschemische Metallisierung von Aluminiumoxid mittels Laser-Absorptionsschicht  
FAPS, xx u. 152 Seiten, 55 Bilder, 19 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-780-7.

**Band 454: Andreas Michael Müller**  
Definition and applications of the spatially discrete metrological descriptor framework for triangle mesh geometry data in 3D coordinate metrology  
FMT, x u. 220 Seiten, 75 Bilder, 16 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-782-1.

**Band 455: Sina Martin**  
Einstellung anisotroper Eigenschaften dielektrischer Elastomersysteme mittels eines selektiven Druckverfahrens  
FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 76 Bilder, 6 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-789-0.

**Band 456: Manuel Reck**  
Grundlegendes Prozessverständnis zur Herstellung von Bauteilen mit texturierten Oberflächen durch Mikroprägen in einem kombinierten Umformprozess  
LFT, ix u. 170 Seiten, 83 Bilder, 10 Tab. 2025.  
ISBN 978-3-96147-798-2.

**Band 457: Simone Neermann**  
Untersuchung photonischer Sinterverfahren und Entwicklung eines neuen elektrischen Messverfahrens zur Qualifizierung der Sinterung gedruckter Elektronik  
FAPS, xix u. 145 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2025. ISBN 978-3-96147-800-2.

**Band 458: Christian Witzgall**

Berücksichtigung vorausgegangener Ermüdungsschädigung in der Crashsimulation kurzfaserverstärkter Thermoplaste

KTmfk, xxiv u. 201 Seiten, 109 Bilder, 19 Tab. 2025.

ISBN 978-3-96147-802-6.

**Band 459: Lorenz Butzhammer**

3-D-Scantrajektorien für die dimensionelle Röntgen-Computertomographie durch adaptive Messobjektneigung

FMT, xvi u. 212 Seiten, 81 Bilder, 2 Tab. 2025.

ISBN 978-3-96147-812-5.

**Band 460: Benjamin Gerschütz**

Identifikation von Anwendungsfällen und Integration datengetriebener Methoden im Produktentwicklungsprozess

KTmfk, xi u. 209 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2025.

ISBN 978-3-96147-814-9.

**Band 461: Andreas Winkler**

Numerische Verschleißmodellierung von trocken-, misch- und grenzreibungsbehafteten Wälzkontakten

KTmfk, xx u. 263 Seiten, 118 Bilder, 30 Tab. 2025.

ISBN 978-3-96147-816-3

**Band 462: Barbara Hansen**

Methode zur Berücksichtigung von Schwankungen der tribologischen Halbzeugeigenschaften für die umformtechnische Herstellung von Karosseriebauteilen im Serienprozess

LFT, x u. 163 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2025.

ISBN 978-3-96147-820-0

**Band 463: Sebastian Hörlin**

Integration von Kurzzeitspeichern zur Erhöhung der Energieeffizienz von elektrischen Antriebssträngen FAPS, xxiii u. 155 Seiten, 78 Bilder, 38 Tab. 2025.

ISBN 978-3-96147-824-8

**Band 464: Matthias Müller**

Potenziale und Perspektiven eines Ringschmiersystems zur Schmierstoffversorgung von Wälz- und Gleitlagern

KTmfk, xiii u. 237 Seiten, 90 Bilder, 27 Tab. 2025.

ISBN 978-3-96147-826-2

**Band 465: Andreas Hetzel**

Erarbeitung und Qualifizierung einer Wärmebehandlungsstrategie zur Stoffflusssteuerung in der Blechmassivumformung

LFT, xiii u. 203 Seiten, 74 Bilder, 9 Tab. 2025.

ISBN 978-3-96147-830-9

## **Abstract**

Mobility has always been a fundamental human desire and a driver of prosperity and progress. Due to current developments, this is increasingly becoming the focus of social change. As a result, there is a contradictory requirement for components in the drivetrain to be lighter and at the same time more durable, bringing established manufacturing techniques to their limits. The new process class of Sheet-Bulk Metal Forming can extend the process limits by combining the advantages of both processes. The material flow control was identified as a major challenge in an associated orbital forming process. The use of aluminum alloys and their strength-related characteristics in particular requires suitable measures for a material flow control, such as local short-term heat treatment. However, a holistic investigation of the cause-effect relationships in the three-dimensional stress and strain state of Sheet-Bulk Metal Forming is still missing.

Therefore, the aim of this work is to develop and qualify a heat-treatment strategy for controlling the material flow in Sheet-Bulk Metal Forming processes by means of a local gradation of the mechanical properties of precipitation-hardenable aluminum alloys. On the basis of a stress and material flow-based process model and a holistic characterization of the mechanical properties, the material flow control is evaluated and transferred to an industrial relevant demonstrator geometry.

Mobilität ist seit jeher ein Grundbedürfnis der Menschheit und Treiber von Wohlstand und Fortschritt. Aufgrund aktueller Entwicklungen steht diese mehr denn je im Mittelpunkt des gesellschaftlichen Wandels. Folglich erwächst speziell für Komponenten im Antriebsstrang die gegensätzliche Anforderung nach geringerem Gewicht und gleichzeitig höherer Belastbarkeit, welche etablierte Fertigungsverfahren an ihre Grenzen bringt. Die neuartige Verfahrensklasse der Blechmassivumformung kann dabei die Prozessgrenzen durch Kombination der Vorteile beider Verfahren erweitern. Als maßgebliche Herausforderungen in einem zugehörigen Taumelprozess wurde die Stoffflusssteuerung identifiziert. Gerade beim Einsatz von Aluminiumlegierungen bedarf es festigkeitsbedingt geeigneter stoffflusssteuernder Maßnahmen, wie der lokalen Kurzzeit-Wärmebehandlung. Eine ganzheitliche Untersuchung der Wirkzusammenhänge im dreidimensionalen Spannungs- und Formänderungszustand der Blechmassivumformung fehlt bisher jedoch.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist deshalb die Erarbeitung und Qualifizierung einer Wärmebehandlungsstrategie zur Stoffflusssteuerung durch lokale Eigenschaftsgradierung ausscheidungshärtbarer Aluminiumlegierungen in der Blechmassivumformung. Auf Basis einer spannungs- und stoffflussbasierten Modellvorstellung und einer ganzheitlichen Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften wird die Stoffflusssteuerung bewertet und auf eine industrierelevante Demonstratorgeometrie übertragen.

