



FAU Studien aus dem Maschinenbau 444

Andreas Jobst

Eigenspannungen beim Voll-Vorwärts-Fließpressen – Entstehung, Einstellung und Stabilität

Andreas Jobst

Eigenspannungen beim Voll-Vorwärts-Fließpressen –
Entstehung, Einstellung und Stabilität

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 444

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Andreas Jobst

Eigenspannungen beim Voll-Vorwärts-Fließpressen – Entstehung, Einstellung und Stabilität

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

Erlangen
FAU University Press
2024

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

Kontakt: Andreas Jobst, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen- Nürnberg ( <https://ror.org/oof7hpc57>), <https://orcid.org/0000-0002-6998-4760>

Bitte zitieren als

Jobst, Andreas. 2024. *Eigenspannungen beim Voll-Vorwärts-Fließpressen – Entstehung, Einstellung und Stabilität*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 444. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-750-0.

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: 978-3-96147-749-4 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-750-0 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-750-0

**Eigenspannungen beim
Voll-Vorwärts-Fließpressen – Entstehung,
Einstellung und Stabilität**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Andreas Jobst, M.Sc.

aus Regensburg

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

Tag der mündlichen
Prüfung: 09.04.2024

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Prof. Dr.-Ing. habil. Mirko Schaper,
Universität Paderborn

Vorwort

Diese Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT) der Friedrich-Alexander-Universität (FAU) Erlangen-Nürnberg. Grundlegende Aspekte entstanden im Rahmen des Projekts „Untersuchung eigenspannungsrelevanter Elementarvorgänge bei fließgepressten Bauteilen in der Herstellungs- und Betriebsphase“, welches im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Gezielte Nutzung umformtechnisch induzierter Eigenspannungen in metallischen Bauteilen“ (SPP 2013) von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wurde.

Meinen besonderen Dank möchte ich Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein als Ordinaria des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie für die wissenschaftliche Betreuung aussprechen. Weiterhin möchte mich bei ihr für das entgegengebrachte Vertrauen bedanken, das mir stets eine fachliche und persönliche Weiterentwicklung ermöglichte. Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Mirko Schaper für die Übernahme des Zweitgutachtens, Herrn Prof. Dr. Christoph Pflaum für das fachfremde Gutachten und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Hinnerk Hagenah für die Mitwirkung als Prüfungsvorsitzender.

Allen Kollegen am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie sowie allen studentischen Hilfskräften, Bachelor-, Projekt- und Masterarbeitern danke ich für die Unterstützung. Die konstruktive Zusammenarbeit und die kollegiale Arbeitsatmosphäre haben einen großen Teil zu dieser Arbeit beigetragen.

Zuletzt gilt mein größter Dank meinen Eltern, meinen Geschwistern, meiner Freundin und meinen Freunden, die mir durch die bedingungslose Unterstützung stets Rückhalt auf meinem Lebensweg bieten.

Fürth, im April 2024

Andreas Jobst

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung und Technik	3
2.1 Verfahren der Kaltmassivumformung.....	3
2.2 Mechanismen der Eigenspannungsentstehung	6
2.3 Methoden zur Eigenspannungsbestimmung	11
2.4 Auswirkungen auf Betriebsverhalten	18
2.5 Verhalten unter Last	19
2.6 Zusammenfassende Bewertung	23
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	25
4 Verwendete Versuchsaufbauten, Werkstoffe und Methoden.	27
4.1 Umformung und Bauteilherstellung	28
4.2 Werkstoffe und Schmierung	29
4.2.1 Bauteilwerkstoffe	29
4.2.2 Schmierstoffe und Reibungscharakterisierung.....	31
4.3 Numerische Prozesssimulation	33
4.4 Messtechnik	34
4.5 Bauteilprüfung	34
5 Eigenspannungsentstehung im Referenzprozess	37
5.1 Identifikation der Werkstoffeigenschaften	38
5.2 Experimentelle Ergebnisse	44
5.2.1 Eigenspannungsentstehung.....	44
5.2.2 Bauteilcharakterisierung	46
5.3 Numerische Abbildung.....	50
5.3.1 Ergebnisse der Umformsimulation	51
5.3.2 Untersuchung numerischer Einflussgrößen	56
5.3.3 Validierung	62
6 Zielgerichtete Eigenspannungseinstellung	69
6.1 Einfluss des Bauteilwerkstoffs.....	70
6.1.1 Eigenspannungsbestimmung in mehrphasigen Stählen.....	71
6.1.2 Werkstoffabhängige Bauteileigenspannungen	73
6.1.3 Werkstoffbedingte Effekte der Eigenspannungsentstehung	76

6.2	Stoffflusssteuerung über Matrizengeometrie	77
6.2.1	Resultierende Prozesseigenschaften.....	77
6.2.2	Stoffflussbedingte Eigenspannungsentstehung.....	79
6.3	Einfluss des verwendeten Schmierstoffs	83
6.3.1	Charakterisierung der eingesetzten Schmierstoffe	83
6.3.2	Werkstoffabhängige Anwendbarkeit.....	84
6.3.3	Beeinflussung der Prozesseigenschaften.....	86
6.3.4	Schmierstoffbedingte Bauteileigenspannungen	87
6.4	Bestimmung der Prozessrobustheit	90
6.4.1	Einfluss einer Vorverfestigung im Ausgangswerkstoff	90
6.4.2	Einfluss der Schmierstoffauftragsmenge	96
6.5	Abgeleitete Erkenntnisse	99
7	Eigenspannungsstabilität bei typischer Betriebsbelastung ..	103
7.1	Mechanische zyklische Biegebelastung.....	105
7.1.1	Experimentelle Ergebnisse.....	105
7.1.2	Validierung der Methodik	109
7.2	Thermische Belastung	110
7.2.1	Einfluss der Aufheiztemperatur	111
7.2.2	Eigenspannungsänderung durch Abkühlung	113
7.2.3	Temperaturabhängiger Einfluss der Haltezeit	114
7.3	Abgeleitete Erkenntnisse	120
8	Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit	123
8.1	Einfluss fertigungsbedingter Zugeigenspannungen	125
8.2	Einfluss der Herstellvariante	126
8.3	Erkenntnisse	127
9	Eigenspannungssensitive Prozess- und Bauteilauslegung.....	131
9.1	Definierte Eigenspannungseinstellung bei der Bauteilherstellung	131
9.2	Wechselwirkungen im Bauteileinsatz	133
9.3	Einfluss auf Ermüdungseigenschaften.....	135
10	Zusammenfassung und Ausblick	137
11	Summary and future work.....	139
	Literaturverzeichnis	141

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	MPa	Formfaktor
b	-	Parameter des Chaboche-Modells
d	mm	Durchmesser
k_B	J/K	Boltzmannkonstante
k	-	Neigung der Zeitfestigkeitsgerade
k_f	MPa	Fließspannung
$k_{f,o}$	MPa	Anfangsfließspannung
$k_{f,s}$	MPa	Sättigungsfließspannung
l	mm	Abstand
m	-	Exponent
m	-	Reibfaktor
n	-	Anzahl
n	-	Exponent
r	-	Napfhöhenverhältnis
r	mm	Radius
s_1, s_2	mm ² /N	Voigtsche Elastizitätskonstanten
t	s	Zeit
A	-	Amplitudenverhältnis
A	-	Bruchdehnung
C	1/s	Geschwindigkeitskonstante
C	MPa	Konstante zur Beschreibung der Lage der Zeitfestigkeitsgerade
C	MPa	Parameter des Chaboche-Modells
D	m	Gitterabstand
E	MPa	Elastizitätsmodul
F	N	Kraft
L_a	MPa	Lastamplitude

Symbol	Einheit	Beschreibung
$L_{a,NK}$	MPa	Lastamplitude bei Knickschwingspielzahl
N	-	Lastspielzahl
N_K	-	Knickschwingspielzahl
R	-	Spannungsverhältnis
R_∞	MPa	Parameter des Chaboche-Modells
R_a	μm	Arithmetischer Mittenrauwert
$R_{p0,05\%}$	MPa	0,05 %-Dehngrenze
$R_{p0,2\%}$	MPa	0,2 %-Dehngrenze
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
2α	$^{\circ}$	Matrizenöffnungswinkel
γ	-	Parameter des Chaboche-Modells
Δ	-	Umformzonenparameter nach Backofen
ΔH_A	J	Aktivierungsenthalpie
ε	-	Dehnung
$\dot{\varepsilon}$	1/s	Dehnrage
ε_A	-	Flächenabnahme
Θ	$^{\circ}$	Beugungswinkel
λ	m	Wellenlänge
μ	-	Coulombsche Reibzahl
ν	-	Querdehnzahl
σ	MPa	Spannung
σ_ϕ	MPa	Spannung in ϕ -Richtung
σ_{11}, σ_{22}	MPa	Hauptspannung
σ_a	MPa	Spannungsamplitude
σ_{axial}	MPa	Axialspannung
σ_B	MPa	Biegespannung
σ_{ES}	MPa	Eigenspannung
σ_L	MPa	Lastspannung
σ_m	MPa	Mittelspannung

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\sigma_{\max}$	MPa	Maximalspannung
$\sigma_{\min}$	MPa	Minimalspannung
$\sigma_{\text{tangential}}$	MPa	Tangentialspannung
φ	°	Spannungsrichtung
φ	-	Umformgrad
χ	°	Kippwinkel
ψ	°	Kippwinkel
$\varnothing$	mm	Durchmesser

Abkürzung	Beschreibung
+A	Weichgeglühter Werkstoffzustand
+AT	Lösungsgeglühter Werkstoffzustand
+LC	Leicht nachgezogener Werkstoffzustand
DCE	Napf-Vorwärts-Napf-Rückwärts-Fließpressen (Double-Cup-Extrusion)
EBSD	Elektronenrückstreubeugung (Electron Backscatter Diffraction)
FWHM	Halbwertsbreite (Full Width at Half Maximum)
IT	ISO-Toleranzklasse nach DIN EN ISO 286-1
MoS ₂	Molybdändisulfid
ODF	Orientierungsdichtefunktion
Ref.	Referenz
REK	Röntgenographische Elastizitätskonstanten
RMSE	Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (Root of Mean Square Error)

1 Einleitung

Eigenspannungen sind definiert als diejenigen Spannungen, die in einem Körper vorliegen, der keinen äußeren Lasten ausgesetzt ist [1]. Sie sind über das Volumen des Körpers im Gleichgewicht und beeinflussen maßgeblich das Versagensverhalten von technischen Bauteilen. Ein prominentes Beispiel ist das Versagen von Schiffen der *Liberty*-Klasse in den 1940er Jahren. Bei 2708 gebauten Schiffen wurden 1289 Schäden oder Unfälle durch Sprödbruch gemeldet, wobei 233 Schiffe sanken oder irreparabel beschädigt wurden [2]. Diese Sprödbrüche konnten auf thermische Schweiß Eigenspannungen zurückgeführt werden [3]. Auch heute sind Eigenspannungen in vielen Bereichen zu berücksichtigen, wie beispielsweise in Kraftwerken [4] und besonders in Kernkraftwerken [5]. Im medizinischen Bereich sind Eigenspannungen unter Anderem in künstlichen Herzklappen relevant [6].

Eigenspannungen wecken oft dann Interesse, wenn Bauteile unerwartet versagen [7]. Im Bereich der Schadensanalyse erfolgt unter Umständen eine vertiefte Untersuchung, bei der Bauteilauslegung werden Eigenspannungen im Allgemeinen nicht oder lediglich indirekt berücksichtigt [8]. Eine Ausnahme bilden dabei besonders belastete Bauteile im Automobilbau, bei denen Eigenspannungen als Qualitätsgröße berücksichtigt werden [9].

Ein verbessertes Verständnis der Eigenspannungsentstehung kann helfen, die Energie- und Werkstoffeffizienz von Umformverfahren weiter zu steigern. Durch eine Berücksichtigung der Eigenspannungen bei der Prozessauslegung können unter Umständen zeit- und energieintensive Wärmebehandlungsschritte wie das Weichglühen vor oder das Spannungsarmglühen nach der Umformung entfallen. Eigenspannungen entstehen unter anderem durch inhomogene plastische Deformation wie sie auch beim Voll-Vorwärts-Fließpressen auftritt. Da der am Ende der Prozesskette im Bauteil vorliegende Eigenspannungszustand in vielen Fällen entweder unbekannt ist oder Zugeigenspannungen vorliegen, werden kaltmassivumgeformte Bauteile häufig spannungsarmgeglüht. Dieser Prozess ist sowohl ökologisch ungünstig, da große Mengen an Energie notwendig sind, als auch ökonomisch ungünstig, da zusätzlicher Zeit- und Anlagenaufwand eingesetzt werden muss. Können durch prozessseitige Anpassungen gezielt günstige Eigenspannungszustände eingebracht werden, so kann durch kostengünstige Maßnahmen eine Verbesserung der Bauteileigenschaften erreicht werden. Letzteres kann jedoch nur erzielt

werden, sobald die Eigenspannungen einerseits das richtige Vorzeichen und eine günstige Verteilung haben und andererseits, solange sie hinreichend stabil über die Bauteillebensdauer sind.

Im Rahmen dieser Arbeit liegt daher der Fokus auf der Erarbeitung einer Methode zur eigenspannungssensitiven Prozessauslegung. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung der batteriegebundenen Elektromobilität und dem damit einhergehenden Einsatz in korrosiven Umgebungen werden rostfreie Edelstähle als Bauteilwerkstoffe verwendet. Ein wesentliches Merkmal der Untersuchungen liegt in der Schaffung eines Prozessverständnisses zur Eigenspannungsentstehung beim Voll-Vorwärts-Fließpressen. Damit sollen Parameter abgeleitet werden, anhand derer eine gezielte Einstellung des Bauteileigenspannungszustands ermöglicht wird. Zur Bewertung der Auswirkungen wird dessen Stabilität unter typischen Betriebsbelastungen charakterisiert. Die erarbeiteten Methoden sollen abschließend genutzt werden, um umformtechnisch Eigenspannungszustände zu generieren, die eine Verbesserung der Betriebsfestigkeit bewirken. Mit dieser Arbeit soll das Verständnis eigenspannungsrelevanter Vorgänge bei der Herstellung und dem Einsatz von Kaltfließpressteilen erweitert werden, um so eine Verbesserung der Prozess- und Bauteileigenschaften zu ermöglichen.

2 Stand der Forschung und Technik

Die Herstellung von Bauteilen durch Kaltfließpressen bietet neben der hohen Werkstoff- und Energieeffizienz den Vorteil, dass belastungsoptimierte Faserverläufe und aufgrund von Kaltverfestigung hohe Bauteilfestigkeiten erreicht werden [10]. Dabei entstehen aufgrund inhomogener Dehnungsverteilungen jedoch Eigenspannungen, welche das Einsatzverhalten des hergestellten Bauteils beeinflussen können [11]. Seit dem Beginn der wissenschaftlichen Untersuchung von Eigenspannungen, die auf deren Definition im Jahr 1921 von Heyn in [1] datiert wird, ist tiefgreifendes Wissen erarbeitet worden. Im folgenden Kapitel soll ein Überblick gegeben werden über Definitionen und bekannte Forschungserkenntnisse zur Entstehung von Eigenspannungen beim Kaltfließpressen, zu ihrer Stabilität unter Betriebsbedingungen und zum Einfluss auf die Betriebsfestigkeit der hergestellten Bauteile.

2.1 Verfahren der Kaltmassivumformung

Die Massivumformbranche ist ein wirtschaftlich bedeutender Industriezweig. Im Jahr 2016 betrug der Werkstoffeinsatz in der Massivumformindustrie in Deutschland etwa drei Millionen Tonnen, wovon ca. 15 % auf Kaltfließpressteile entfallen [12]. Die hohe Werkstoffeffizienz mit Ausnutzungsgraden bis zu 85 % [13] in der Herstellroute geht mit einem vergleichsweise geringem Energiebedarf des Fertigteils einher. Dieser liegt bei einer typischen Massivumformprozesskette bei etwa 30 MJ/kg [14], während bei spanenden Fertigungsverfahren aufgrund des Zerspanvolumens bis zu 80 MJ/kg erreicht werden.

In der Massivumformung liegen typischerweise dreiachsige Spannungs- und Dehnungszustände vor [15], während die Blechumformung im Gegensatz dazu weitestgehend auf zweiachsige Spannungszustände eingegrenzt ist [16]. Je nach Rohlingstemperatur erfolgt weiterhin eine Unterteilung in Warm-, Halbwarm-, und Kaltmassivumformung. Letztere ist dabei dadurch definiert, dass keine Rekristallisation im Werkstoff stattfindet [17]. Die zulässige Temperatur beträgt dabei 40 % der absoluten Schmelztemperatur [18], was bei Stahl etwa 450 °C entspricht. Alternativ ist die Kaltmassivumformung dadurch definiert, dass das Werkstück vor der Umformung nicht erwärmt wird [19], wobei es sich während der Umformung trotzdem auf bis zu 400 °C erwärmen kann [20].

Bedingt durch die fehlende Möglichkeit zur Rekristallisation akkumulieren bei der Kaltumformung Versetzungen an den Korngrenzen, die deren Bewegung behindern [21]. Daraus resultiert ein erhöhter Widerstand des Werkstoffs gegen Umformung, woraus makroskopisch eine höhere Festigkeit resultiert [22]. Dieses Werkstoffverhalten wird als Kaltverfestigung bezeichnet [23]. Im Bereich der Kaltmassivumformung wird dieses Phänomen gezielt genutzt, um die Festigkeit – und damit die Beanspruchbarkeit – der hergestellten Bauteile gezielt zu erhöhen [24]. Während der Umformung fließt der Werkstoff in die werkzeugseitig gegebene Richtung. Hieraus ergibt sich eine Ausrichtung der Körner in Stoffflussrichtung, was in geätzten Schlißbildern einer faserähnlichen Struktur ähnelt [21]. Dieser Faserverlauf kann die mechanischen Eigenschaften des umgeformten Bauteils ebenfalls positiv beeinflussen [25]. Aufgrund ihrer hohen Beanspruchbarkeit finden Massivumformbauteile daher Einsatz bei hohen Anforderungen an die mechanische Beanspruchbarkeit sowie bei hoher geforderter Sicherheit [26].

Hinsichtlich der geometrischen Genauigkeit können bei üblicher Prozessführung beim Kaltfließpressen ISO-Toleranzklassen (IT) 8 bis 11 nach DIN EN ISO 286-1 erreicht werden, mit Sondermaßnahmen auch IT 6 [26], was in etwa der Genauigkeit beim Fräsen entspricht [27]. Gegenüber zerspanenden Verfahren bieten Massivumformverfahren jedoch den Vorteil einer sehr hohen Material- [28] und Energieeffizienz [29]. Während bei zerspanenden Herstellverfahren aufgrund der Werkstoffverluste je Tonne Fertigteile etwa 8,4 bis 11,4 MWh benötigt werden, liegen Massivumformverfahren bei etwa 2,4 bis 7 MWh [12].

Im Vergleich zur Warmumformung ist der Energiebedarf bei der Kaltmassivumformung zwar durch die – wegen der höheren Festigkeit benötigten – höheren Presskräfte erhöht [30]. Dieser Mehrbedarf wird durch die Energieeinsparung aufgrund der fehlenden Erwärmung jedoch mehr als kompensiert [31]. Die höhere Werkstofffestigkeit führt jedoch zu einer eingeschränkten Möglichkeit der Ausformung feiner Strukturen, wodurch die Gestaltungsfreiheit reduziert wird [19]. Aufgrund der verringerten thermischen Ausdehnung können durch Kaltmassivumformverfahren jedoch bessere geometrische Toleranzen erzielt werden [32]. Durch die niedrigeren Bauteiltemperaturen sind zudem höhere Oberflächengüten erreichbar, da eine Verzunderung vermieden wird.

In der Gruppe der Massivumformung sind die Verfahrensvarianten des Fließpressens die wirtschaftlich bedeutendsten neben Schmieden und Drahtziehen. Abhängig von der Geometrie des Werkstücks wird in Voll-,

Hohl- und Napffließpressen unterschieden. Weiterhin erfolgt eine Unterteilung nach Stoffflussrichtung in Vorwärts-, Rückwärts- und Querfließpressen [33].

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem Voll-Vorwärts-Fließpressen. Dieses Verfahren ist nach dem vorherrschenden Spannungszustand in DIN 8583-6 den Druckumformverfahren zugeordnet. Dabei wird aus einem Vollkörper ein Vollkörper mit reduzierter Querschnittsfläche hergestellt, wobei der Werkstoff in Stempelrichtung fließt [31]. Beim Voll-Vorwärts-Fließpressen tritt in Abgrenzung zum Verjüngen eine größere Querschnittsabnahme von $\varepsilon_A \geq 0,3$ auf [33]. Als Werkstückwerkstoffe können dabei knetbare Legierungen verwendet werden. Stahlrohlinge werden vor der Umformung aufgrund der hohen auftretenden Belastungen häufig weichgeglüht und mit leistungsfähigen tribologischen Systemen beschichtet.

Beim Kaltfließpressen von Stahl treten Flächenpressungen bis 2500 MPa mit Oberflächenexpansionen von bis zu 3000 % auf [34]. Zudem wird eine Gleitgeschwindigkeit bis zu 500 mm/s [35] bei bis zu 100 mm Gleitweg erreicht [36]. Trotz des Umformens bei Raumtemperatur erreichen die Werkzeuge dadurch bis zu 200 °C, wobei Spitzentemperaturen bis 600 °C erreicht werden [34]. Um diesen hohen Belastungen standhalten zu können, werden daher mehrteilige Tribosysteme auf dem Werkstück eingesetzt [33]. Die Schmierstoffträgerschicht sorgt dabei für eine Aufrauhung der Oberfläche und eine chemische Verbindung zwischen ihr und dem Schmierstoff [37]. Bei der Kaltmassivumformung von Stahl wird dabei gewöhnlich Zinkphosphat verwendet [38]. Auf rostfreien Stählen ist jedoch aufgrund der Korrosionsbeständigkeit keine Phosphatierung möglich, weshalb Oxalatschichten Anwendung finden [39].

Der Schmierstoff dient der Trennung der Werkzeug- und Werkstückoberflächen, der Verringerung der Reibung und dem Verhindern von Verschleiß. Aufgrund der hohen Anforderungen werden in der Kaltmassivumformung in den meisten Fällen Festschmierstoffe verwendet. Einsatz finden dabei insbesondere Seifen, Polymere und Molybdändisulfid (MoS_2) [40]. Alkaliseifen gehen mit Phosphatschichten eine chemische Bindung ein, woraus eine gute Haftung resultiert. Bei Aufbringung auf Oxalatschichten tritt hingegen lediglich eine physikalische Bindung mit reduzierter Haftung auf. Aufgrund der Temperaturbeständigkeit bis 270 °C ist der Einsatzbereich von Seifen begrenzt [39]. Mit Polymerschmierstoffen sind aufgrund der Beständigkeit bis etwa 400 °C höhere Umformgrade möglich [41]. Polymer- und Seifenschmierstoffe zeigen vergleichbare Schmierungseigenschaften [42], während mit MoS_2

höhere Reibfaktoren auftreten [43]. MoS₂ besitzt eine hexagonale Gitterstruktur, in der ein Abgleiten der Ebenen möglich ist [41]. Da sich unter mechanischer Belastung eine günstige Textur ausbildet [44], können Oberflächen auch bei sehr hohen Drücken getrennt gehalten werden.

Die Formgebung der beschichteten Rohlinge erfolgt meist ohne Vorwärmen in einer armierten Umformmatrize, welche aus drei Bereichen besteht. Der obere Bereich verfügt über einen geringfügig größeren Durchmesser als der Rohling und dient der Führung des nicht umgeformten Rohlingsbereichs während der Umformung. Über einen Übergangsradius fließt der Werkstoff an der Matrizenschulter entlang, wobei der Querschnitt vom Ausgangs- auf den Zieldurchmesser verringert wird. Typische Matrizenöffnungswinkel 2α liegen dabei zwischen 60° und 120° [33]. Im zylindrischen Fließbund findet die Kalibrierung des umgeformten Durchmessers statt. Nach erfolgter Umformung wird das Bauteil durch einen Auswerfer entgegen der Stempelrichtung aus der Matrize ausgestoßen. Der Freischliff unterhalb der Umformzone weist dabei im Allgemeinen einen höheren Durchmesser als der Fließbund auf, um die Reibkräfte während der Umformung und dem Auswerfen gering zu halten.

Während der Umformung liegt im Werkstoff ein dreidimensionaler Spannungs- und Dehnungszustand vor. Verfahrensbedingt bestehen dabei Unterschiede zwischen dem Kern, dem Rand und der Bauteiloberfläche. Diese inhomogenen Spannungen führen zum Verbleiben von Eigenspannungen, welche das Bauteileinsatzverhalten und die Lebensdauer beeinflussen können.

2.2 Mechanismen der Eigenspannungsentstehung

Nach Heyn [1] sind Eigenspannungen definiert als die Spannungen, die in einem Werkstück ohne äußere thermische oder mechanische Lasten vorhanden und untereinander im Gleichgewicht sind. Abhängig vom Werkstoffvolumen, in dem sie wirken, werden sie aus werkstoffwissenschaftlicher Sicht in drei Arten untergliedert [45]. Eigenspannungen I. Art wirken als Makroeigenspannungen über mehrere Körner hinweg. Mikro-eigenspannungen als II. Art sind im Bereich eines Kornes oder als III. Art im Bereich mehrerer Atome wirksam [46]. Aus technischen Gesichtspunkten erfolgt parallel dazu eine Einteilung nach dem für die Eigenspannungen ursächlichen Prozess, wie beispielsweise Guss-, Füge- oder Umform-eigenspannungen [7].

Zur Entstehung von Eigenspannungen existieren drei grundlegende Methoden, die auf den zugrundeliegenden Mechanismus des Unterdrückens von Dehnungen und inhomogene Dehnungszustände zurückzuführen sind. Die Einbringung der Dehnungszustände kann dabei thermisch, chemisch-physikalisch oder mechanisch erfolgen, wobei auch Kombinationen der einzelnen Mechanismen auftreten [47].

Thermischer Mechanismus

Bei der Erstarrung aus dem schmelzflüssigen Zustand oder der Abkühlung von Bearbeitungs- auf Umgebungstemperatur treten im Bauteil inhomogene Temperaturfelder auf. Durch die inhomogene thermische Schrumpfung entstehen im erkaltenden Randbereich Zug- und im noch warmen Kernbereich Druckspannungen, die bei Überschreiten der lokalen Fließgrenze durch plastische Deformation abgebaut werden. Durch die Abkühlung und Schrumpfung des Kernbereichs verbleiben im erkalteten Bauteil Druckspannungen im Randbereich, die sich mit Zugspannungen im Kern im Gleichgewicht befinden. Im Allgemeinen weisen zuerst abgekühlte Bereiche Druckspannungen auf [48]. Diese Mechanismen sind insbesondere bei Prozessen wie Schweißen [49], Gießen [50] oder Erodieren [51] relevant, in denen Werkstoffbereiche erstarren oder in Verfahren, in denen Bauteilbereiche von hohen Temperaturen abkühlen wie dem Flammrichten [52]. Anwendung zur gezielten Einbringung von definierten Eigenspannungszuständen finden diese Mechanismen beispielsweise beim Vorspannen von Glas durch Anblasen mit kalter Luft [53] oder dem Abschrecken von Aluminiumbauteilen [54].

Chemisch-physikalische Entstehung

Beim Abschrecken von Stählen werden bei geeignetem Temperaturverlauf zusätzlich Eigenspannungen durch eine Änderung der Mikrostruktur eingebracht. Der zugrundeliegende Wirkmechanismus ist dabei eine Volumenänderung von Werkstoffbereichen, welche durch nicht betroffene Bauteilbereiche behindert wird. Dabei können sowohl lokal in einzelnen Bauteilbereichen Makroeigenspannungen [55] als auch innerhalb des Gefüges – beispielsweise bei Duplexstählen [56] – Mikroeigenspannungen erzeugt werden. Die notwendige Volumenänderung auf Kornebene kann durch physikalische Mechanismen wie der Umwandlung der Gitterstruktur induziert werden. Als Beispiel dient hier die Umwandlung von kubisch-flächenzentriertem Austenit in tetragonal-raumzentrierten Martensit [57], welche ein ca. 3 % höheres Volumen aufweist. Sie wird beim Einsatzhärten [55] gezielt genutzt, um eine Oberfläche mit hoher Härte und

günstigem Druckeigenspannungszustand zu erzeugen. Eine weitere Möglichkeit zur Volumenänderung ist das Einbringen von Zwischengitteratomen in das bestehende Gefüge. Dieser Mechanismus wird unter anderem beim Gasnitrieren genutzt, wo durch das Einbringen von Stickstoffatomen lokal eine Volumenexpansion erzeugt wird [58]. Neben dem Einbringen von Atomen ist auch eine Volumenexpansion durch einen Austausch mit größeren Ionen möglich, wie es beim chemischen Vorspannen von Glas Anwendung findet [59].

Mechanische Eigenspannungsentstehung

Eine mechanische Beanspruchung führt zum Verbleib von Eigenspannungen, wenn lokal unterschiedliche Umformgrade vorliegen. Wird ein anfangs spannungsfreier Körper inhomogen plastisch deformiert, liegt im entlasteten Körper ein inhomogener Dehnungs- und Spannungszustand vor. Eine Veranschaulichung ist dazu in Bild 1 anhand eines plastisch verformten Biegebalkens dargestellt.

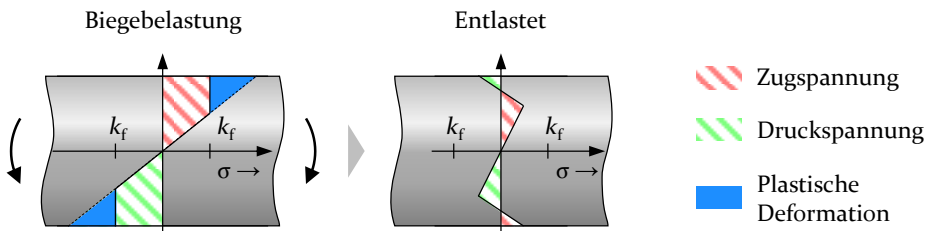


Bild 1: Mechanische Eigenspannungsentstehung am Beispiel eines Biegebalkens

Bei Anlegen eines Biegemoments liegen die Spannungsmaxima an den Rändern des Balkens, während die neutrale Faser in der Balkenmitte spannungsfrei bleibt. Überschreiten die Spannungsmaxima den elastischen Bereich, werden sie in den Randbereichen durch plastische Deformation abgebaut, während der Kernbereich elastisch bleibt. Nach der Entlastung stellt sich aufgrund der Wiederherstellung des Spannungsgleichgewichts der in Bild 1, rechts gezeigte Spannungszustand ein. Im Zugbereich entstehen dabei Druckeigenspannungen, während im Druckbereich Zugeigenspannungen verbleiben.

Neben der lokalen und inhomogenen Plastifizierung ist eine Eigenspannungsentstehung auch durch inhomogene Verfestigung möglich. Dieser Mechanismus tritt insbesondere bei Kaltmassivumformverfahren wie dem Fließpressen auf, bei dem der vollständige Rohlingsquerschnitt plastisch verformt wird [P1].

Fließpressen

Bei einem korrekt ausgelegten Vorwärts-Fließpressprozess, bei welchem keine Zentralbrüche auftreten, wird der Werkstoffzusammenhalt im Werkstück beibehalten. Bei der Umformung wird der Rohlingsquerschnitt in der Matrizenschulter reduziert, woraus eine Werkstoffbewegung in radialer und axialer Richtung resultiert. Die neutrale Faser im Kern erfährt lediglich eine axiale Dehnung, während der Randbereich axial und radial fließt. Diese Dehnungsinhomogenität über den Querschnitt führt zum Verbleiben von Eigenspannungen nach der Entlastung. Im Kernbereich des umgeformten Schafts liegen dabei Druckeigenspannungen in axialer, tangentialer und radialer Richtung vor, welche mit Zugeigenspannungen im Randbereich im Gleichgewicht sind [60]. An der Bauteiloberfläche liegen aufgrund der freien Oberfläche keine Radialeigenspannungen vor.

Beim Wegnehmen der Stempelkraft nach der Umformung in der Matrize tritt prozessabhängig eine mehr oder weniger stark ausgeprägte elastische Rückfederung der Matrize auf. Wird das Bauteil entgegen der Stempelrichtung durch den im Durchmesser verringerten Fließbund ausgeworfen, kann eine weitere geringe plastische Verformung der Oberfläche erfolgen, wodurch die oberflächennahen Eigenspannungen im umgeformten Schaft erneut beeinflusst werden [61]. Abhängig vom Betrag der Rückfederung kann dadurch eine ausgeprägte Reduktion der umformbedingten Zugeigenspannungen bewirkt werden [62].

Midha und Modlen haben in [63] die Eigenspannungsentstehung in weichem Stahl für Matrizenöffnungswinkel von 60° , 90° und 120° bei Umformgraden von 0,8, 1, 1,3 und 1,4 untersucht. Dabei wurden bei sämtlichen Varianten im Kernbereich axiale Druckeigenspannungen ermittelt, welche mit Zugeigenspannungen im Rand im Gleichgewicht sind. Das Zugspannungsmaximum wurde dabei unter der Oberfläche identifiziert, während das Druckspannungsmaximum mit $\varphi \geq 1$ im Kern war. Ähnliche Verläufe mit geringeren Beträgen wurden für die Tangential-eigenspannungen identifiziert. Durch einen zusätzlichen Umformschritt mit 2 % Flächenabnahme konnten die Zugeigenspannungen im Randbereich reduziert und Druckeigenspannungen erzeugt werden. Als maßgebliche Größe der Eigenspannungsentstehung wurde der Stofffluss identifiziert.

Von Tekkaya [60] wurden umfangreiche numerische Untersuchungen der Eigenspannungsentstehung beim Voll-Vorwärts-Fließpressen des Stahls Ck15 (1.1141) mit einem Schulteröffnungswinkel von $2\alpha = 90^\circ$ durchgeführt.

Weiterhin wurden die Matrizenrückfederung, der Schulteröffnungswinkel 2α und die Flächenabnahme ε_A als Einflussfaktoren bei der Eigenspannungsentstehung identifiziert. Die Notwendigkeit der Untersuchung des Auswerfens wurde sowohl für das Voll-Vorwärts-Fließpressen als auch für weitere Kaltmassivumformverfahren gezeigt [64].

In [65] wurde von Genzel et al. die Eigenspannungsentstehung beim Kaltfließpressen von ferritischem Stahl C15 (1.0401) mit einem Schulteröffnungswinkel von $2\alpha = 90^\circ$ und Umformgraden von $\varphi = 0,5, 1,2$ und $1,6$ untersucht. Die experimentellen Ergebnisse zeigten eine Übereinstimmung mit den numerischen Untersuchungen in [60]. Mit einem ähnlichen Versuchsaufbau konnten Zucko et al. in [66] mit zunehmender Flächenabnahme während des Umformprozesses einen Abbau der oberflächennahen Zugeigenspannungen bis hin zur Entstehung von Druckeigenspannungen nachweisen. Pyzalla [67] hat zudem für diesen Prozess nachgewiesen, dass die Körner im Kernbereich lediglich gelängt werden, während der Werkstoff im Rand zunächst komprimiert und anschließend gelängt wird.

Zur gemeinsamen Bewertung der Einflüsse von Matrizenöffnungswinkel und Flächenabnahme wird die Umformzone durch den Parameter Δ als Verhältnis des mittleren Durchmessers zur Kontaktlänge beschrieben [68]. Eine Verringerung der Flächenabnahme führt wie eine Erhöhung des Matrizenöffnungswinkels 2α zu einer Zunahme von Δ . Nach [69] werden mit höherem Δ höhere Eigenspannungen erzeugt. Mit Werten von $\Delta \leq 1$ entstehen aufgrund einer gleichmäßigen Verformung geringe Eigenspannungen [70]. Mit hohen Δ -Werten hingegen liegen Zugeigenspannungen an der Oberfläche vor, die mit Druckeigenspannungen im Kern im Gleichgewicht stehen [70].

Zdunek et al. haben in [71] die Eigenspannungs- und Texturentstehung im ferritisch-austenitischen Duplexstahl 1.4462 beim mehrstufigen hydrostatischen Fließpressen untersucht. Dabei wurde bei einem Umformgrad von $\varphi = 1,4$ gezeigt, dass die Austenitphase höhere Spannungen aufnimmt als die Ferritphase. Bei höheren Umformgraden bis $\varphi = 3,8$ wurde gezeigt, dass im Ferrit eine höhere Dehnung aufgenommen wird. Dies wurde zusätzlich von der Entstehung von Umwandlungsmartensit begünstigt.

Merklein et al. haben in [72] das Fließpressen des Stahls C35 (1.0501) numerisch abgebildet und die Dehnungsverteilung im umgeformten Bauteil untersucht. Dabei wurden die Matrizenöffnungswinkel auf den zwei Stufen 60° und 90° und Übergangsradien zwischen der Matrizen Schulter und dem Fließbund von $0,5\text{ mm}$ bis 1 mm variiert. Ein

Matrizenöffnungswinkel von 90° führte zu höheren Dehnungen im Bauteil sowie zu einer höheren Inhomogenität der Dehnungsverteilung. Eine Verringerung des Übergangsradius führte zu geringfügig höheren Dehnungen.

Neben der Eigenspannungserzeugung durch inhomogene Dehnungszustände während der Umformung können auch weitere Faktoren die Entstehung beeinflussen. Durch das Aufbringen einer Gegenkraft auf den umgeformten Schaft kann der Spannungszustand während der Umformung beeinflusst werden, wodurch eine Reduktion der oberflächennahen Zugeigenspannungen erzielt wird [73]. Bei hinreichend schneller Umformung entstehende Temperaturgradienten können bei der Abkühlung zusätzlich Eigenspannungen im umgeformten Bauteil erzeugen. Im Allgemeinen spielt dieser Mechanismus jedoch eine untergeordnete Rolle [70].

2.3 Methoden zur Eigenspannungsbestimmung

Mechanische Spannungen können nicht direkt gemessen werden. Verfahren zu deren Ermittlung verfolgen daher den Ansatz der Messung der spannungsinduzierten Dehnung oder Verschiebung [74]. Die Bestimmung der anliegenden Last- oder Eigenspannung erfolgt rechnerisch anhand des Modells von *Hooke* mittels geeigneter Elastizitätskonstanten. Anwendung finden dabei zerstörende und zerstörungsfreie Verfahren, über welche im folgenden Abschnitt ein Überblick gegeben wird.

Zerstörende Verfahren

Das Grundprinzip der Spannungsbestimmung mittels zerstörender Verfahren liegt in der lokalen Auflösung gegebener Spannungszustände durch Trennen des Werkstoffzusammenhalts [75]. Die Wiederherstellung des Spannungsgleichgewichts erfolgt über Dehnungen oder Verschiebungen, welche gemessen werden und aus denen auf den ursprünglichen Spannungszustand rückgerechnet wird.

Eine kostengünstige Methode zur Bestimmung tiefenabhängiger Spannungsverläufe ist die *Bohrlochmethode* [74]. Dabei werden durch Einbringen einer Bohrung lokal Spannungen aufgelöst. Mit fertigungstypischen Bohrparametern können dabei lokale Plastifizierungen auftreten, welche die Ergebnisse beeinflussen [76]. Aus diesem Grund werden daher Verfahren wie das elektrochemische Abtragen [77] oder Bohren mit sehr hohen Drehzahlen verwendet [78]. Während des

Einbringen der Bohrung wird die durch die Spannungsauflösung hervorgerufene Dehnung an der Bauteiloberfläche gemessen. Während dafür traditionell Rosetten aus Dehnungsmessstreifen eingesetzt werden, führen neuere Entwicklungen auch zum Einsatz optischer Verfahren [79]. Mittels geeigneter Elastizitätskonstanten können aus den gemessenen Dehnungen die anliegenden Spannungen als Mittelwert des abgetragenen Volumens berechnet werden [80]. Dabei ist zudem die Ermittlung tiefenabhängiger Verläufe bis zu einer Tiefe möglich, die in etwa dem Bohrungsdurchmesser entspricht [74]. Anwendbar ist das Verfahren in sämtlichen isotropen Werkstoffen, solange sie mechanisch bearbeitbar sind. Die maximale verlässlich bestimmbare Spannung liegt bei etwa 60 % bis 70 % der lokalen Fließgrenze [75], im Verfahren nach ASTM E837-99 sind 50 % zulässig [81].

Als Weiterentwicklung der Bohrlochmethode existieren verschiedene Varianten [82]. Bei der *Ringkernmethode* wird – umgekehrt zur Bohrlochmethode – eine Kernbohrung eingebracht und die Dehnungsänderung im Kern gemessen [83]. Dabei entstehen höhere Dehnungen, weswegen höhere Spannungen gemessen werden können [74]. Nachteilig sind dabei jedoch eine größere Bauteilbeschädigung und die aufwändigere Implementation [74].

Bei der *Tieflochbohrmethode* wird eine Bohrung durch das gesamte Bauteil eingebracht [84]. Konzentrisch dazu wird elektrochemisch eine Kernlochbohrung mit größerem Durchmesser eingebracht und so ein Hohlzylinder aus dem Bauteil extrahiert. Die Spannungsbestimmung entlang des Bohrungspfads erfolgt durch einen Vergleich des Durchmesserungsverlaufs der ersten Bohrung vor und nach der Einbringung der Kernbohrung [85].

Die *Konturmethode* basiert wie Zerlegeverfahren [86] auf der Auflösung des gegebenen Eigenspannungszustand durch Trennen des Werkstoffzusammenhalts. Dabei wird das Bauteil inkrementell in zwei Teile getrennt und die Dehnungen gemessen, welche bei der Wiederherstellung des Spannungsgleichgewichts entstehen [87]. Die Rückrechnung auf den Bauteileigenspannungszustand erfolgt numerisch mittels eines geeigneten Finite-Elemente-Modells [88].

Nachteilig bei sämtlichen zerstörenden Verfahren ist jedoch, dass die zu untersuchenden Werkstücke lokal zerstört oder beeinflusst werden und nur eingeschränkt weiterverwendet werden können. Aus diesem Grund finden im praktischen Einsatz häufig zerstörungsfreie Verfahren Anwendung.

Röntgendiffraktometrie

Im Gegensatz zu zerstörenden Verfahren werden bei den zerstörungsfreien Verfahren die vorhandenen Spannungen aus den im Werkstoff vorliegenden Dehnungen bestimmt. Eines der meistgenutzten Verfahren ist die Diffraktometrie. Dieses Bestimmungsverfahren basiert auf der Beugung von Strahlung mit geeigneter Wellenlänge durch die Netzebenen eines Kristallgitters [89]. Die Grundlage dafür bilden die von Laue [90] entdeckten nobelpreisdotierten Wechselwirkungen zwischen Röntgenstrahlung und dem Werkstoffgitter von Metallen. Darauf aufbauend wurde von Bragg [91] der in (1) dargestellte ebenfalls nobelpreisprämierte Zusammenhang zwischen einem ganzzahligen Vielfachen n der Wellenlänge λ der verwendeten Strahlung, dem Gitterabstand D des untersuchten Werkstoffs und dem Beugungswinkel Θ identifiziert.

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot D \cdot \sin \Theta \quad (1)$$

Bei Anliegen einer mechanischen Spannung ändert sich der Netzebenenabstand, woraus eine Änderung des Beugungswinkels Θ resultiert. Eine Bestrahlung der Bauteiloberfläche ermöglicht so mit einer Messung des Beugungswinkels die Bestimmung der Abstände von oberflächenparallelen Gitterebenen. Da an der freien Oberfläche – aufgrund der geringen Eindringtiefe der Strahlung – keine Spannungen senkrecht zur Oberfläche vorliegen, kann aus dem Gitterabstand senkrecht zur Oberfläche die Summe der Hauptspannungen parallel zur Oberfläche berechnet werden [89]. Zur Bestimmung von Spannungskomponenten in beliebige Richtung φ parallel zur Oberfläche wurde von Macherauch [92] das $\sin^2\psi$ -Verfahren entwickelt, dessen Grundlagen in Bild 2 dargestellt sind.

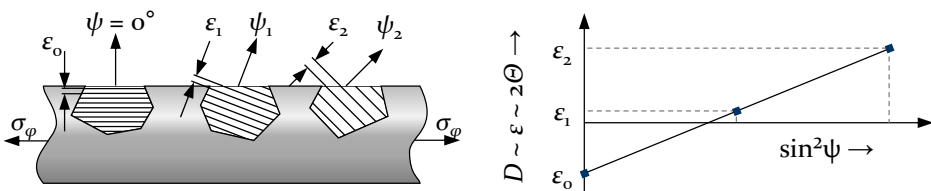


Bild 2: Grundlagen der röntgenographischen Spannungsanalyse mit der $\sin^2\psi$ -Methode

Zur Bestimmung von Spannungen in beliebige Richtungen φ werden die Dehnungen in Gitterebenen bestimmt, die unter einem Winkel ψ zur Oberfläche liegen. Unter Annahme der Spannungsfreiheit senkrecht zur Oberfläche liefert die Grundgleichung der röntgenographischen Spannungsanalyse (2) den Zusammenhang zwischen den ermittelten

Gitterdehnungen ε , den Hauptspannungen σ_{11} und σ_{22} und der zu ermittelnden Spannungskomponente σ_φ [93].

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = \frac{1}{2}s_2\sigma_\varphi \sin^2 \psi + s_1(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (2)$$

Dabei werden die Voigtschen Elastizitätskonstanten $s_1 = -\nu/E$ und $s_2 = (\nu+1)/E$ verwendet, die aus dem Elastizitätsmodul E und der Querdehnzahl ν berechnet werden [89]. In Bild 2 ist dieser Zusammenhang veranschaulicht dargestellt. Mit den bestimmten Gitterdehnungen bei definiertem $\sin^2 \psi$ kann die Summe der Hauptspannungen σ_{11} und σ_{22} mit (3) aus dem Ordinatenabschnitt berechnet werden.

$$\varepsilon_{\varphi,\psi=0} = s_1(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (3)$$

Die Spannungskomponente in φ -Richtung wird nach (4) aus der Steigung der Interpolationsgeraden berechnet.

$$\frac{\partial \varepsilon_{\varphi,\psi}}{\partial \sin^2 \psi} = \frac{1}{2}s_2\sigma_\varphi \quad (4)$$

An Stelle der Dehnung ε ist auch eine Auswertung anhand der Gitterebenenabstände D und des Beugungswinkels 2Θ möglich. Die Umrechnung erfolgt über den in (5) gezeigten Zusammenhang.

$$\frac{\partial \varepsilon_{\varphi,\psi}}{\partial \sin^2 \psi} = \frac{1}{D_0} \frac{\partial D_{\varphi,\psi}}{\partial \sin^2 \psi} = -\frac{1}{2 \tan \theta_0} \frac{\partial 2\Theta_{\varphi,\psi}}{\partial \sin^2 \psi} \quad (5)$$

Zur Spannungsmessung in Metallen wird monochromatische Röntgenstrahlung verwendet, deren Wellenlänge im Bereich der Gitterabstände der untersuchten Werkstoffe liegt. Diese ist aus dem $K_{\alpha 1}$ -, dem $K_{\alpha 2}$ - und dem K_{β} -Anteil zusammengesetzt [94]. Im technischen Einsatz wird aufgrund der hohen Intensität lediglich der K_{α} -Anteil verwendet, während der K_{β} -Anteil mit geeigneten Monochromatoren entfernt wird [95]. Zur Messung in ferritischem, martensitischem und austenitischem Stahl werden als Anodenmaterial häufig Chrom und Kobalt verwendet.

Abhängig vom Anodenmaterial und der untersuchten Gitterebene wird der Röntgenstrahl unter einem charakteristischen Winkel gebeugt. In [96] ist ein Überblick über verwendbare Anodenmaterialien und werkstoff- und gitterebenenabhängige Beugungswinkel gegeben. Die Messung der Intensität des gebeugten Strahls erfolgt mittels Detektoren. Einsatz finden dabei Szintillationszähler zur punktförmigen Messung oder Linien- oder Flächendetektoren zur positionssensitiven Detektion. Zur Spannungsbestimmung wird in der Praxis der Beugungswinkel 2Θ zwischen dem Primär- und gebeugtem Strahl verwendet [93]. Zu dessen Bestimmung aus

den gemessenen Intensitätskurven finden mathematische Funktionen Anwendung. Typische Ansätze basieren dabei auf einer *Pseudo-Voigt*-Funktion [97], dem *Pearson-VII*-Ansatz [98] oder auf der Schwerpunktsbestimmung [99]. Neben dem Beugungswinkel werden in der Praxis auch weitere Ergebnisse wie die Halbwertsbreite (*FWHM: Full width at half maximum*) der Peaks ausgeleitet und zur Bewertung des Eigenspannungszustands verwendet [100]. Eine ausführliche und weiterführende Beschreibung der Röntgenbeugung ist unter anderem in [101] gegeben. Anwendungshinweise und sinnvolle Einstellungen sind beispielsweise in DIN 15305 und [102] gegeben.

Die röntgenographische Spannungsbestimmung ist prozessbedingt für oberflächennahe Spannungszustände geeignet [103]. Aufgrund der Schwächung der Röntgenstrahlung im Werkstoff ist das untersuchbare Werkstoffvolumen auf wenige Mikrometer begrenzt. Bei Stahl beträgt die Eindringtiefe typischerweise weniger als 10 μm , bei Aluminium weniger als 40 μm [96]. Spannungsbestimmungen in tieferen Werkstoffschichten sind mit elektrochemischem Abtragen kleiner Oberflächenbereiche möglich [9]. Eine zerstörungsfreie tiefenabhängige Spannungsermittlung ist aufgrund der notwendigen Strahlungscharakteristik lediglich mit Neutronen möglich [104].

Grundsätzlich liefert die Auswertung mittels der $\sin^2\psi$ -Methode über das Messvolumen gemittelte Spannungswerte [105]. Die Bestimmungsgenauigkeit der Spannungen wird von einer hohen Anzahl an Faktoren beeinflusst [106]. Eine Einflussgröße liegt in der verwendeten Messausrüstung, wie beispielsweise der Ausrichtung des Diffraktometers, der Geometrie des Röntgenstrahls und der Messgenauigkeit des Detektors. Dieser Fehler kann jedoch durch regelmäßiges Kalibrieren beträchtlich verringert werden [107]. Eine Krümmung in der zu untersuchenden Oberfläche führt zu einer Erhöhung der Messunsicherheit, da das Auftreffen des Röntgenstrahls unter einem definierten Winkel ψ nur eingeschränkt gewährleistet werden kann [108]. Unterschreitet der Durchmesser des Messflecks das 0,4-fache des Krümmungsradius, ist eine mathematische Korrektur der Ergebniswerte notwendig [109]. Ein weiterer Faktor ist die Oberflächenrauheit der Probe. Ihr Einfluss ist jedoch gering, sobald die Rautiefe kleiner als die Eindringtiefe der Röntgenstrahlung ist [110]. Eine hohe Korngröße des untersuchten Werkstoffs führt dazu, dass weniger Körner zu den Intensitätskurven beitragen [111]. Daraus resultiert eine geringe Intensität und eine verringerte Genauigkeit bei der Identifikation der Peakposition [112]. Ähnliche Effekte treten unter ungünstigen Kippwinkeln bei Vorliegen einer ausgeprägten Textur im Werkstoff auf [113]. Im

praktischen Einsatz wird im Allgemeinen eine Messunsicherheit von ± 20 MPa [114] bis ± 50 MPa [115] angenommen.

Neben der Spannungsanalyse sind mit Röntgendiffraktometern im Allgemeinen weitere Analysen möglich wie die Bestimmung von Kristallitgrößen [116], der Versetzungsdichte über die Halbwertsbreiten der aufgenommenen Peaks [117] oder die Identifikation von Werkstoffphasen [118]. Neuere Entwicklungen in der röntgenographischen Werkstoffuntersuchung fokussieren eine Verringerung der benötigten Messzeit durch den Einsatz zweidimensionaler Detektoren. Insbesondere wird die Entwicklung der $\cos\alpha$ -Methode [119] vorangetrieben, bei der zweidimensionale Aufnahmen von Debye-Ringen zur Bestimmung des Spannungszustands genutzt werden [120].

Sonderverfahren

Neben den beschriebenen etablierten Methoden existieren diverse Sonderverfahren zur Spannungsanalyse. Die Spannungsbestimmung durch *Neutronenbeugung* basiert auf denselben physikalischen Grundlagen wie die röntgenographische Spannungsanalyse [121]. Mit Neutronenstrahlung sind jedoch aufgrund des geringeren Schwächungskoeffizienten höhere Eindringtiefen im Bereich von 30 mm bis 40 mm möglich [122]. Im Gegensatz zur röntgenografischen Analyse können daher tiefenabhängige Spannungsverläufe und dreidimensionale Texturen zerstörungsfrei aufgenommen werden [123]. Aufgrund des hohen Aufwands zur Erzeugung geeigneter Neutronenstrahlung in Forschungsreaktoren findet das Verfahren nur in Sonderfällen Anwendung [124]. Ähnliche Vorteile bietet die Beugung von *Synchrotronstrahlung*, wobei jedoch auch kleinere Messvolumina aufgelöst werden können [125].

Eine Möglichkeit zur Spannungsmessung in ferromagnetischen Werkstoffen liegt in der Analyse des *Barkhausenrauschens* [126], welches durch Spannungsfelder im Material beeinflusst wird. Der Einsatzbereich des Verfahrens ist zum einen auf ferromagnetische Werkstoffe begrenzt [127]. Zudem ist eine Analyse hoher Spannungen nicht möglich, da das Rauschsignal bei ca. ± 500 MPa einen Sättigungszustand erreicht [128]. Nach einer Kalibrierung ist das Verfahren jedoch geeignet, um das Vorzeichen der vorliegenden Spannungen zu bestimmen [128].

Mechanische Spannungszustände bewirken eine Anisotropie der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in Werkstoffen [129], was die Grundlage für die *Ultraschall-Spannungsmesstechnik* bildet. Mit dieser Methode können tiefenabhängige Spannungsverläufe identifiziert

werden [130], aufgrund der notwendigen Doppelbrechung sind die untersuchbaren Geometrien auf Bauteile mit zwei parallelen Oberflächen beschränkt [131]. Aktuelle Entwicklungen fokussieren jedoch auch die Messung entlang der Oberfläche [132].

Mittels *Nanoindentation* ist eine Spannungsbestimmung an Bauteilen und dünnen Schichten möglich. Das Verfahren basiert auf einer Änderung der Fließspannung des Werkstoffs durch Überlagerung mit Last- oder Eigenspannungen [133]. Dies führt zu einer Beeinflussung des Be- und Entlasteverhaltens [134] sowie der ermittelten Härte bei der Eindringhärteprüfung [135]. Mit dieser Methode ist auch die Spannungsbestimmung in nicht-kristallinen Werkstoffen möglich. Nachteilig ist hingegen eine geringe Sensitivität gegenüber kleinen Spannungsänderungen sowie eine hohe Messunsicherheit [136].

Weiterhin existieren diverse weitere Verfahren, die jedoch weitgehend in Sonderfällen Anwendung finden. Neuere Entwicklungen fokussieren die Anwendung optischer Technologien zur Dehnungsbestimmung bei zerstörender Prüfung [137]. Bei der röntgenografischen Spannungsanalyse liegen Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte in der Reduzierung der Messunsicherheit sowie in der Abbildung dreidimensionaler Spannungszustände [138].

Vergleich der Methoden

Mit mechanischen Verfahren können lediglich Makroeigenspannungen bestimmt werden, während mit Beugungsverfahren sowohl Makro- als auch Mikrospannungen identifiziert werden können [139]. Zerlegeverfahren sind geeignet zur Bestimmung des Eigenspannungszustands über das gesamte Bauteil, während mit Bohrloch- und Beugungsmethoden nur lokale Eigenspannungsbestimmung erlauben [140].

Die Bohrlochmethode erlaubt eine vergleichsweise einfache tiefenabhängige Messung. Mittels der Röntgenbeugung können Spannungen lediglich unmittelbar an der Oberfläche ermittelt werden, weshalb zur tiefenabhängigen Messung ein separates und iteratives Abtragen durch elektrochemisches Polieren notwendig ist. Zum Vergleich von Bohrloch- und Beugungsmethoden liegen unterschiedliche Erkenntnisse vor. Während in [111] hohe oberflächennahe Streuungen auftreten, werden in [141] vergleichbare Messergebnisse erzielt.

Mit Neutronendiffraktion sind hohe Eindringtiefen möglich, während mit Röntgendiffraktion nur die Oberfläche untersucht werden kann [79]. In

Industrie und Wissenschaft finden die Röntgendiffraktometrie, die Bohrlochmethode und Zerlegeverfahren am meisten Anwendung.

2.4 Auswirkungen auf Betriebsverhalten

Eigenstressen stehen untereinander über das gesamte Bauteil im Gleichgewicht. Nach dem Entfernen von eigenspannungsbehafteten Werkstoffbereichen stellt sich daher ein neuer Gleichgewichtszustand ein, bei dem einzelne Bauteilbereiche plastisch verformt werden können. Dies führt insbesondere bei größeren Bauteilen zu unerwünschten Abweichungen von der Sollgeometrie [142]. In Schweißnähten können thermisch induzierte Eigenstressen zu Heiß- und Kaltrissen führen [143] oder die Wasserstoffversprödung begünstigen [144]. Weiterhin kann die Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit durch den oberflächennahen Eigenstressenzustand beeinflusst werden [145].

Im Einsatz des hergestellten Bauteils tritt eine Überlagerung des Eigenstressens- mit dem betriebsbedingten Lastspannungszustand auf. Bei unterschiedlichen Vorzeichen können die Eigenstressen die wirksamen Lastspannungen verringern und so zu einer erhöhten Bauteillebensdauer führen. Umgekehrt ist jedoch auch eine Verstärkung der Lastspannung bei gleichen Vorzeichen möglich. Zur Bewertung der Auswirkungen von Eigenstressen ist demnach die anliegende Lastart und -höhe mitentscheidend.

Eine Überlagerung einer statischen Last mit einem ausgeprägten Eigenstressenzustand gleichen Vorzeichens führt bei duktilen Werkstoffen zu einer geringfügigen Senkung der 0,005 %-Dehngrenze $R_{p0,005\%}$, während die 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2\%}$ nicht beeinflusst wird [8]. Dies führt in Strukturen mit dünnen Schichten zu einer Beeinflussung des Spannungszustands an der Grenzfläche, der Bruchenergie und des Ablöseverhaltens [146]. In der Praxis sind dabei jedoch nur Eigenstressen relevant, die über größere Bauteilbereiche vorliegen [147]. Da der ursprüngliche Eigenstressenzustand bei Plastifizierung aufgehoben wird, hat er keine weiteren Auswirkungen auf die Werkstofffestigkeit.

Die häufigste Schadensursache bei zyklisch mechanisch belasteten Komponenten sind Ermüdungsbrüche [148]. Eine Überlagerung angreifender Lastspannungen mit dem im Bauteil vorliegenden Eigenstressenzustand resultiert in einer Verschiebung der Mittellast unter schwingender Belastung [149]. Während der Rissbeginn maßgeblich von der Spannungsamplitude abhängt, wird das Risswachstum von der Mittellast

und damit den Eigenspannungen beeinflusst [150]. Dabei bewirken plastische Wechselverformungen mikrostrukturelle Veränderungen, welche zu Werkstoffversagen führen [151]. Die ertragbare zyklische Last wird insbesondere von den oberflächennahen Eigenspannungen beeinflusst, da Ermüdungsrisse im Allgemeinen an der Oberfläche entstehen [149]. Hinsichtlich des Bauteilversagens beeinflussen Eigenspannungen sowohl die Rissinitiierung als auch die Rissausbreitung [152]. Dabei sind zyklische Lastspannungen im Zugbereich aufgrund des begünstigten Rissfortschritts kritischer als Drucklastspannungen [153]. Dieser Eigenspannungseffekt ist bei hohen Werkstofffestigkeiten ausgeprägter [143]. Bei schwellender Druckbeanspruchung ist die Schwingfestigkeit unabhängig von der Höhe der Eigenspannungen [154]. In Analogie zum statischen Lastfall haben Eigenspannungen wenig Einfluss auf die Kurzzeitfestigkeit, da sie aufgrund der hohen Lastspannung durch plastische Deformation aufgelöst werden [155]. Im Zeit- und Langzeitfestigkeitsbereich mit hohen Schwingspielzahlen liegt jedoch eine ausgeprägte Sensitivität gegenüber Eigenspannungen vor [155].

2.5 Verhalten unter Last

Eigenspannungen beeinflussen durch Überlagerung mit angreifenden Lastspannungen maßgeblich das Einsatz- und Versagensverhalten von Bauteilen. Umgekehrt ist jedoch auch eine Beeinflussung des Eigenspannungszustands durch die Einsatzbedingungen möglich [156].

Relaxation beschreibt das zeitabhängige Phänomen der Abnahme mechanischer Spannungen in einem Bauteil, das einem konstanten Dehnungszustand ausgesetzt ist. Die Gesamtdehnung bleibt dabei gleich, jedoch wird ein Teil der elastischen Dehnung in plastische Dehnung umgewandelt. In eigenspannungsbehafteten Bauteilen mit inhomogenen Dehnungszuständen findet dabei ein Ausgleich zwischen zug- und druckeigen-spannungsbehafteten Bereichen statt [157].

Durch verbesserte Kenntnisse dieser Zusammenhänge ist eine Abschätzung der Auswirkung von Eigenspannungen über die Bauteillebensdauer möglich. Weiterhin können damit kritische Neubewertungen bestehender Prozessketten durchgeführt werden, um beispielsweise die Notwendigkeit von Wärmebehandlungsschritten zu evaluieren. Umgekehrt kann aber auch der Nutzen gezielt eingebrachter Eigenspannungszustände bewertet und Anforderungen an diesen definiert werden. Im Bauteileinsatz haben mechanische und thermische Lasten das Potential, den Bauteileigenspannungszustand zu beeinflussen.

Mechanische Belastung

Ein gezielter Abbau von Eigenspannungen ist durch plastische Deformation möglich. Unter quasistatischer oder zyklischer Last tritt ein Eigenspannungsabbau auf, wenn die Summe der Last- und Eigenspannungen die statische bzw. zyklische Beanspruchbarkeit erreicht oder überschreitet [158]. Bei Erreichen der Streckgrenze wird der Werkstoff lokal plastisch verformt, wodurch die Dehnungsverteilung beeinflusst wird. Vorhandene Eigenspannungen werden dabei vollständig abgebaut. Nach der elastischen Rückfederung stellt sich ein neuer Eigenspannungszustand ein. Unter zyklischer Belastung werden vorhandene Eigenspannungen durch Mikroplastifizierung abgebaut [159]. Zyklische Beanspruchung kann jedoch durch plastische Deformation an der Rissfront auch zum Aufbau von lokalen Druckeigenspannungen führen, welche die weitere Rissausbreitung hemmen [160].

Das Eigenspannungsverhalten unter zyklischer mechanischer Belastung kann in drei Arten eingeteilt werden [161]. Stabile Eigenspannungen liegen vor, sobald im Ausgangszustand lediglich geringe Beträge vorhanden oder die Lastspannungen gering sind. Ein zyklischer Abbau wird bei höherfesten Werkstoffen beobachtet, bei denen sich die zyklische Festigkeit stark von der statischen unterscheidet. Bei geringer Werkstofffestigkeit und hohen Eigenspannungen erfolgt in den ersten Belastungszyklen ein quasistatischer Abbau. Da bei weichen duktilen Werkstoffen die zyklische Festigkeit nahe der Streckgrenze liegt, ist das quasistatische Überschreiten der Streckgrenze der wichtigste Mechanismus des Eigenspannungsabbaus bei diesen [158].

Dalaei et al. [162] haben an kugelgestrahlten Umlaufbiegeproben aus mikrolegiertem Stahl gezeigt, dass die Druckeigenspannungen an der Oberfläche von der Lastspannung beeinflusst werden. Für eine plastische Dehnungsamplitude von 1,0 % wurde ein nahezu vollständiger Abbau der Eigenspannungen im ersten Lastzyklus nachgewiesen, während bei 0,6 % Dehnung bei 100 Zyklen das Eigenspannungsniveau auf 20 % reduziert wurde. Im Kurzzeit- und Zeitfestigkeitsbereich mit Dehnungen unterhalb 0,4 % wurde ein ausgeprägter Eigenspannungsabbau im ersten Lastzyklus nachgewiesen, gefolgt von einer logarithmischen Reduzierung mit zunehmender Schwingspielzahl. Mit hohen Lastamplituden konnte kein Einfluss der Eigenspannungen auf die Schwingfestigkeit ermittelt werden, während die Bruchlastspielzahl bei niedrigen Lastamplituden signifikant erhöht wurde.

Schulze et al. haben in [163] die Eigenspannungsstabilität unter quasi-statischer Zug- und Druckbelastung in kugelgestrahlten Proben aus 42CrMo4 untersucht. Unter Druckbelastung wurde dabei ein früherer Eigenspannungsabbau beschrieben, während eine Zugbelastung zu einer ausgeprägt höheren Abbaurate führt.

James [159] hat an einer Aluminiumlegierung den Einfluss einer Biegebelastung auf die Bauteileigenspannungen untersucht. Abhängig von der Lasthöhe wurden die größten Änderungen in den ersten 1000 bis 10 000 Lastwechseln beobachtet. Bei Belastung nahe der Fließgrenze wurde in den ersten 40 000 Lastwechseln ein abwechselnder Ab- und Aufbau von Druckeigenspannungen identifiziert, was auf eine Umlagerung der oberflächennahen Eigenspannungen zurückgeführt wurde. Bei steilen randnahen Eigenspannungsgradienten wurde ein beschleunigter Eigenspannungsabbau nachgewiesen.

Kohlenbecker [164] hat die Eigenspannungsstabilität unter kombinierter thermisch-mechanischer Last an autofrettierten Aluminiumbauteilen untersucht. Dabei wurde unter schwellender mechanischer Belastung ein stabiler Eigenspannungszustand nachgewiesen. Für zyklische Beanspruchungen, in denen die maximale Vergleichsspannung die statische oder zyklische Streckgrenze überschreitet, wurde jedoch eine ausgeprägte Änderung des Eigenspannungszustands ermittelt.

Thermische Belastung

Unter thermischer Belastung führen verschiedene Mechanismen zu einer Beeinflussung des Eigenspannungszustands im Werkstoff [165]. Durch Glühen bei 50 % der absoluten Schmelztemperatur in Kelvin für mehrere Stunden und anschließendes langsames Abkühlen kann eine nahezu vollständige Auflösung von Eigenspannungen erzielt werden [166]. Oberhalb der Rekristallisationstemperatur findet eine Neubildung des Gefüges statt, wodurch die ursprünglichen Eigenschaften des Werkstoffs wiederhergestellt werden [167]. Vorhandene Eigenspannungszustände werden dabei vollständig aufgelöst.

Unterhalb der Rekristallisationstemperatur werden durch das Anliegen der Eigenspannungen Kriechvorgänge ausgelöst. Sie bewirken eine lokale Plastifizierung des Werkstoffs, wodurch sowohl Makro- als auch Mikro-eigenspannungen abgebaut werden [165]. Dabei können abhängig von der Bauteilgeometrie sowie Reichweite und Ausprägung des Eigenspannungszustands starke Verzerrungen des Bauteils auftreten. Die Kornstruktur und das Gefüge bleiben dabei erhalten.

Erholungsvorgänge führen zur Ausheilung vorzeichenfremder Versetzungen, was sich in einem Abbau der Mikroeigenstressungen kenntlich macht. Dabei treten keine Gefügeänderungen und makroskopisch beobachtbare Verformungen auf, da der Werkstoff lediglich innerhalb der Körner plastifiziert wird [165]. Dieser Mechanismus tritt bei Stahl ab 300 °C auf, bei Aluminium teilweise bereits ab Raumtemperatur.

Diese Mechanismen werden in der Praxis beim Spannungsarmglühen genutzt, um durch Anlegen einer thermischen Last Eigenstressungen gezielt abzubauen. Dabei wird der Werkstoff hinreichend lange bei Temperaturen oberhalb der halben Solidustemperatur in Kelvin gehalten und anschließend langsam auf Umgebungstemperatur abgekühlt [168]. Bei Stahl entspricht dies einem Temperaturbereich von 550 °C bis 650 °C.

Auch bei Temperaturen, die unter diesen Werten liegen, kann der vorliegende Eigenstressungszustand beeinflusst werden. Holzapfel et al. liefern auf Basis von Untersuchungen an verfestigungsgestrahlten Proben aus 42CrMo4 den in (6) dargestellten Avrami-Ansatz [169].

$$\sigma_{ES}(t, T) = \sigma_{ES,0} \cdot \exp \left(- \left(C \cdot t \cdot \exp \left(- \frac{\Delta H_A}{kT} \right) \right)^m \right) \quad (6)$$

Die von der Glüh Temperatur T und der Haltezeit t abhängigen Eigenstressungen σ_{ES} werden dabei als Funktion der ursprünglichen Eigenstressungen $\sigma_{ES,0}$, der Aktivierungsenthalpie ΔH_A für die Eigenstressungsrelaxation, einer Geschwindigkeitskonstante C , der Boltzmann-Konstante k und einem Exponenten m beschrieben.

Ein neueres Modell von Bai et al. kombiniert versetzungsbedingte Mechanismen mit der Plastizitätstheorie [170]. Es wurde an kaltgewalztem Kupfer erarbeitet und mit zerstörenden und zerstörungsfreien Eigenstressungsmessungen verifiziert. Dabei wurde gezeigt, dass sowohl die Kaltverfestigung des Werkstoffs als auch die Versetzungsdichte die Eigenstressungsstabilität signifikant beeinflussen.

Zur Eigenstressungsstabilität liegen in der Praxis Erfahrungen für verschiedene Werkstoffe vor. Epp et al. haben das Eigenstressungsverhalten in kaltgewalztem und in zerspantem Wälzlagerstahl untersucht [171]. Dabei konnte ein geringer Abbau der Eigenstressungen bereits bei einmaligem Aufheizen ab 300 °C nachgewiesen werden. Bei Temperaturen von 600 °C und mehr lag eine vollständige Relaxation vor. Als ursächliche Mechanismen wurden die Umlagerung von Versetzungen unterhalb dem 0,4- bis 0,5-fachen der absoluten Schmelztemperatur und oberhalb

Versetzungskriechen, Korngrenzengleiten, Diffusionskriechen und Rekristallisation identifiziert.

Nikitin et al. haben die Eigenspannungsstabilität von festgewalztem austenitischem Stahl untersucht [172]. Während bereits ab 150 °C ein beginnender Abbau festgestellt wurde, waren bei 600 °C lediglich noch 70 % der ursprünglichen Eigenspannungen vorhanden. In laserverfestigten Bauteilen wurde bereits ab 100 °C eine Reduktion festgestellt [173]. Als Ursache dafür wurde thermisch aktiviertes Versetzungsgleiten identifiziert.

Prevéy et al. haben die Eigenspannungsstabilität in verfestigungsgestrahlten Bauteilen aus Inconel und einer Titanlegierung untersucht [174]. Dabei wurde eine erste Phase beobachtet, in der ein rascher Spannungsabbau in einem kurzen Zeitraum auftritt. Daran angeschlossen ist eine zweite Phase, in welcher das Verhalten der Eigenspannungen durch ein Avrami-Modell abgebildet wird.

Daichendt [175] hat an aushärtbaren Aluminiumlegierungen die Langzeitstabilität von Kugelstrahleigenspannungen unter kombinierter thermisch-mechanischer Belastung untersucht. Ein thermischer Abbau konnte ab 150 °C nachgewiesen und mit einer Avrami-Beziehung beschrieben werden.

2.6 Zusammenfassende Bewertung

Eigenspannungen beeinflussen maßgeblich das Einsatz- und Versagensverhalten umgeformter Bauteile. Insbesondere unter Korrosions- und Ermüdungsbeanspruchung können ungünstige Eigenspannungszustände unvorhersehbare Auswirkungen haben. Andererseits ist mit belastungsangepassten Spannungszuständen eine Verbesserung der Prozess- und Bauteileigenschaften möglich.

Zur Eigenspannungsentstehung beim Voll-Vorwärts-Fließpressen liegen einzelne Untersuchungen vor. Grundlegende Zusammenhänge sind bekannt, so dass der im Bauteil erzeugte Spannungszustand vorhergesagt werden kann. Zur gezielten Beeinflussung der oberflächennahen Eigenspannungen im Umformprozess liegen jedoch wenige und teilweise widersprüchliche Erkenntnisse vor. Neben der Umformung von rostfreiem Edelstahl liegt Forschungspotential in der Beeinflussung der Eigenspannungen durch Anpassung der tribologischen Bedingungen.

Im Bauteileinsatz findet eine wechselseitige Beeinflussung der Eigenspannungen mit den angreifenden Lastspannungen statt. Einflüsse auf das

Ermüdungsverhalten können nur auftreten, solange die Eigenspannungen über die Belastungsdauer hinreichend stabil sind. Zu deren Stabilität unter thermischen Lasten existieren Forschungsarbeiten und Ansätze zur Vorhersage. Zur mechanischen Eigenspannungsrelaxation liegen grundlegende Erkenntnisse vor, wobei eine ausgeprägte Abhängigkeit vom vorliegenden Bauteileigenspannungszustand indiziert ist. Vorliegende Forschungsarbeiten sind oft auf Eigenspannungen fokussiert, die durch thermische Fügeverfahren und durch Oberflächenbehandlungen wie Kugelstrahlen eingebracht sind. Forschungslücken existieren bei der Bewertung der Stabilität von Fließpresseigenspannungen in rostfreien Stählen.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Zentraler Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit sind beim Voll-Vorwärts-Fließpressen von rostfreiem Stahl erzeugte Eigenspannungen. Die im hergestellten Bauteil verbleibenden Eigenspannungen haben das Potential, nachfolgende Prozessschritte und die Bauteileigenschaften sowohl positiv als auch negativ zu beeinflussen.

Das übergeordnete Ziel ist die Erarbeitung einer Methode zur eigenspannungssensitiven Prozessauslegung. Dabei wird als erstes Teilziel die Identifikation von Mechanismen zur Eigenspannungsentstehung beim Voll-Vorwärts-Fließpressen verfolgt. Darauf aufbauend sollen Prozessgrößen qualifiziert und deren Einfluss quantifiziert werden, durch welche eine gezielte Einstellung eines definierten Eigenspannungszustands ermöglicht werden kann. Die Stabilität des umformtechnisch eingebrachten Spannungszustands soll unter typischen Betriebsbelastungen charakterisiert werden. Darauf aufbauend soll der Einfluss der Bauteileigenspannungen auf die Betriebsfestigkeit identifiziert und von anderen wirkenden Effekten separiert werden. Zur Erreichung der Ziele wird die in Bild 3 gezeigte Vorgehensweise verfolgt.

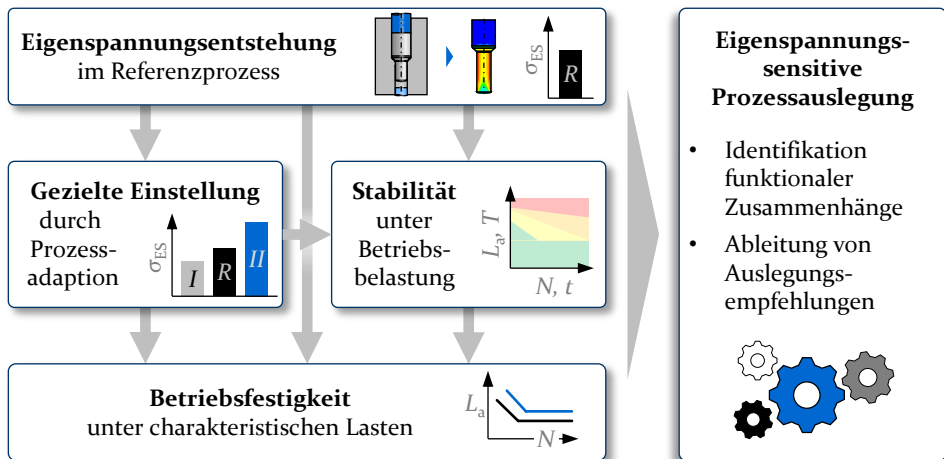


Bild 3: Methodische Vorgehensweise

Die Entstehung von Eigenspannungen bei der Bauteilherstellung durch Voll-Vorwärts-Fließpressen soll anhand eines Referenzprozesses untersucht werden. Neben der Analyse des Prozesses und der einzelnen Schritte liegt dabei der Fokus auf Identifikation von werkstofflichen Mechanismen,

welche nach dem Umformen und Auswerfen zum Verbleiben von Eigenspannungen im Werkstück führen. Dabei soll ein grundlegendes Verständnis der Eigenspannungsentstehung im untersuchten Prozess geschaffen werden.

Zur Ermöglichung einer gezielten Einstellung der Bauteileigenspannungen sind anhand des Referenzprozesses eigenspannungsrelevante Steuergrößen zu identifizieren, deren Einfluss experimentell qualifiziert werden soll. Zudem sollen Einflüsse potentieller Störgrößen quantifiziert werden, um eine Erhöhung der Prozessrobustheit zu erzielen. Aus den Erkenntnissen sollen Parametersätze abgeleitet werden, mit denen Eigenspannungszustände eingebracht werden können, die der Verbesserung der Bauteileigenschaften dienen.

Um eine Verbesserung der Bauteileigenschaften durch die umformtechnisch eingebrachten Eigenspannungen zu bewirken, müssen diese hinreichend stabil über die gesamte Produktlebensdauer sein. Daher soll die Stabilität der Bauteileigenspannungen experimentell unter typischen Betriebsbeanspruchungen charakterisiert werden. Dabei ist der Einfluss der Betriebstemperatur ebenso zu untersuchen wie die Auswirkungen mechanischer Belastungen.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen soll eine Bestimmung der Betriebsfestigkeit erfolgen. Ausgehend von der Referenzvariante sollen die Einflüsse der prozessbedingten Eigenspannungsänderungen auf das Ermüdungsverhalten bestimmt werden. Da neben den Eigenspannungen auch die Einflüsse aus der Festigkeitsverteilung entstehen, ist eine Separation der beiden Einflussgrößen notwendig. Aus den Erkenntnissen soll eine Methode zur eigenspannungssensitiven Prozessauslegung abgeleitet werden. Dazu werden aus den Untersuchungen funktionale Zusammenhänge identifiziert, woraus Auslegungsmethoden abgeleitet werden.

Diese Methodik bietet das Potential, eine Verbesserung der umformbedingten Eigenspannungszustände oder eine kritische Bewertung des gegebenen der Bauteileigenspannungen zu bewirken. Dadurch kann unter Umständen auf thermische Spannungsarmglühbehandlungen verzichtet und so die Wirtschaftlichkeit des Herstellprozesses gesteigert werden.

4 Verwendete Versuchsaufbauten, Werkstoffe und Methoden

Zur Analyse eigenspannungsrelevanter Vorgänge werden Untersuchungen anhand des Kaltfließpressens von rostfreien Stählen durchgeführt. Der typische Prozessablauf des untersuchten Voll-Vorwärts-Fließpressprozesses ist schematisch in Bild 4 abgebildet.

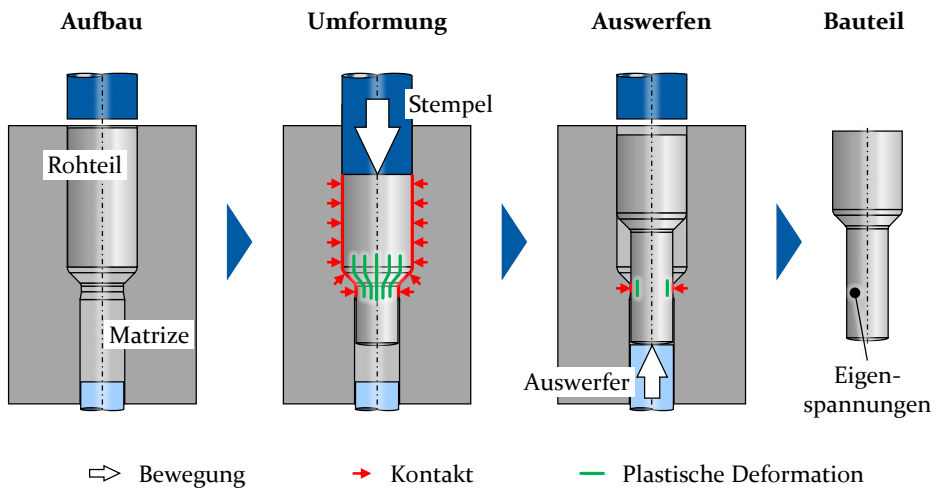


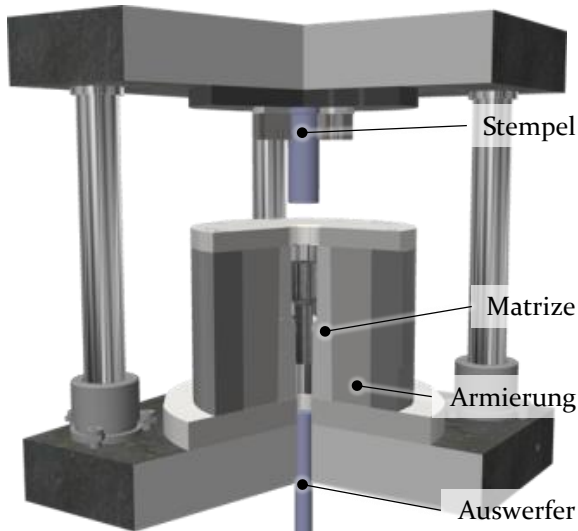
Bild 4: Schematischer Ablauf des Voll-Vorwärts-Fließpressens

Während der Umformung des zylindrischen Rohlings wird der Werkstoff in der Umformzone plastisch deformiert. Aufgrund inhomogener Dehnungsverteilungen entstehen dabei Eigenspannungen im Werkstück. Durch den Innendruck wird die Matrize dabei elastisch aufgeweitet. Während des Auswerfens wird das Werkstück entgegen der Stempelrichtung aus der Matrize ausgeschoben, wobei die elastische Rückfederung des Werkzeugs eine Beeinflussung des Eigenspannungszustands bewirken kann. Im nachfolgenden Kapitel werden die zur Bauteilherstellung, -charakterisierung und -prüfung verwendeten Werkstoffe und Versuchswerkzeuge beschrieben. Zudem wird das zur numerischen Abbildung verwendete Simulationsmodell mit zugehörigen Eingangsgrößen dargestellt.

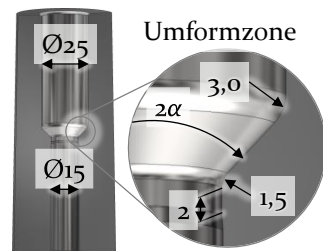
4.1 Umformung und Bauteilherstellung

Die Herstellung der Bauteile erfolgt aufgrund der hohen notwendigen Presskräfte an der hydraulischen Tiefziehpresse *Lasco TZP 400/3*, welche eine maximale Stempelkraft von 4000 kN bietet. Die Auswerferkinematik wird über das Ziehkissen mit einer Maximalkraft von 1600 kN realisiert. Der Voll-Vorwärts-Fließpressprozess wird mit dem in Bild 5 dargestellten Werkzeugsystem umgesetzt.

a) Werkzeugsystem



b) Matrize



c) Bauteil

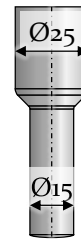


Bild 5: Experimenteller Versuchsaufbau zur Bauteilherstellung. Abmessungen in mm.

Das Werkzeugsystem a) besteht aus einem Säulenführungsgestell, in dem die einzelnen Elemente montiert sind. Die Presskraft wird durch einen am Oberwerkzeug montierten Hartmetallstempel auf den Rohling übertragen. Die Formgebung erfolgt in der Matrize b) aus Schnellarbeitsstahl HS 2-2-2 (1.3397). Sie ist in einen Armierungsring aus Warmarbeitsstahl X38CrMoV5 (1.2367) eingepresst, um die radiale Ausdehnung während der Umformung zu begrenzen. Zur Auslegung der Aktivteile werden typische Auslegungsrichtlinien verwendet [176]. Die Übergangsradien in der Umformzone betragen 3 mm am Schulteranfang und 1,5 mm am Übergang zum 2 mm langen Fließbund. Unterhalb der Umformzone ist ein Freischliff mit einem Durchmesser von 15,2 mm, wodurch der Kontakt zwischen Bauteil und Matrize beim Auswerfen auf den Fließbund beschränkt ist. Zur Verbesserung der tribologischen Verhältnisse ist die gesamte Matrizenbohrung extrudergehont. Das hergestellte Bauteil c) besteht aus einem nicht umgeformten Schaft mit Ø 25 mm, einem Übergangsbereich, welcher

die Fließschulter abbildet und einem umgeformten Schaft mit $\varnothing 15$ mm. Die Flächenabnahme von 64 % entspricht einem Umformgrad von etwa $\varphi = 1$. Die Länge des umgeformten Schafts beträgt 45 mm, so dass nach [60] Bereiche mit homogenen Eigenspannungen vorliegen.

4.2 Werkstoffe und Schmierung

Zur Herstellung der Bauteile werden Rohlinge mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Höhe von 50 mm verwendet. Zur Gewährleistung der Umformbarkeit werden sie geglüht und mit einem zweiteiligen Schmier-system beschichtet. Die verwendeten Werkstoffe und Schmierstoffe sind nachfolgend dargestellt.

4.2.1 Bauteilwerkstoffe

Im Rahmen dieser Arbeit werden drei rostfreie Stähle untersucht. Als Referenzwerkstoff dient aufgrund der guten Umformbarkeit der einphasige ferritische Stahl 1.4016. Aufgrund des häufigen Einsatzes wird zudem der austenitische Stahl 1.4301 untersucht. Zur Übertragung auf komplexere Werkstoffzustände werden ausgewählte Untersuchungen anhand des ferritisch-austenitischen Duplexstahls 1.4462 durchgeführt. Die Umform-eigenschaften der Werkstoffe werden wesentlich durch die Legierungselemente der Stähle beeinflusst. Die chemische Zusammensetzung der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Bauteilwerkstoffe nach DIN EN 10088-3 ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffe nach DIN EN 10088-3:2014-12. Zahlenwerte: Maximaler Massenanteil in %.

	X6Cr17 1.4016	X2CrNiMoN22-5-3 1.4462	X5CrNi18-10 1.4301
C	0,08	0,03	0,07
Si	1,00	1	1
Mn	1,00	2	2
P	0,04	0,035	0,045
S	0,03	0,015	0,03
Cr	16 – 18	21 – 23	17,5-19,5
Mo	-	2,5 – 3,5	-
Ni	-	4,5 – 6,5	8 – 10,5
N	-	0,1 – 0,22	-

Basis für die Untersuchungen sind der weichgeglühte Zustand für den Werkstoff 1.4016 und der lösungsgeglühte Zustand für 1.4301 und 1.4462, da die Werkstoffe in der Massivumformung üblicherweise in diesen Zuständen verwendet werden [19].

Eine Charakterisierung der Mikrostruktur der Werkstoffe ist anhand der Körner in der Ätzung einer geschliffenen Probe möglich. Dazu wird eine Probe an einer definierten Ebene getrennt. Die Schnittfläche wird durch Schleifen und Polieren präpariert, um einen homogenen Angriff des Ätzmittels und eine optische Untersuchung ohne Interferenzen durch Schleifriefen zu ermöglichen. Durch Ätzung mit werkstoffspezifischen Substanzen werden die Korngrenzen hervorgehoben. Die in einer lichtmikroskopischen Untersuchung identifizierte Mikrostruktur der Werkstoffe ist in Bild 6 gezeigt.

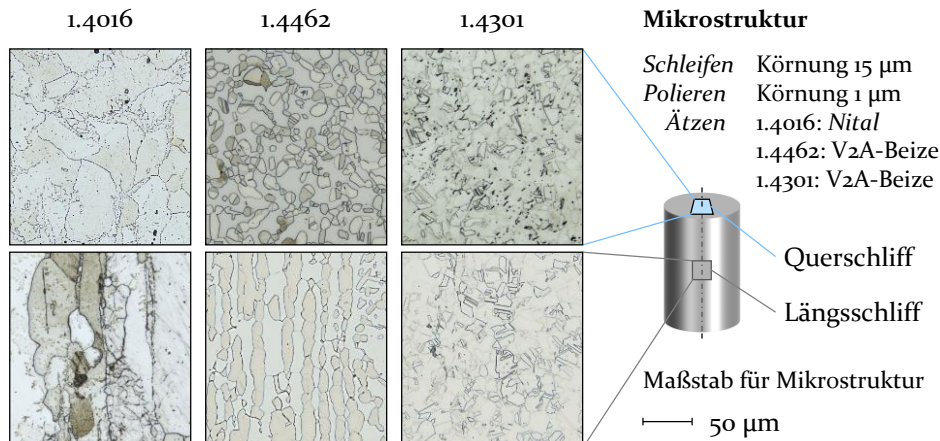


Bild 6: Mikrostruktur der verwendeten Bauteilwerkstoffe

Im Stahl 1.4016 liegt ein ferritisches Gefüge mit vergleichsweise großen Körnern vor. Im Längsschliff ist eine leichte Zeiligkeit zu erkennen, die auf die Herstellung des Stangenmaterials zurückzuführen ist. Das Gefüge des Duplex-Stahls 1.4462 besteht aus Ferrit- und Austenitkörnern, die volumenmäßig nahezu gleichverteilt sind. Die Austenitphase ist durch die Zwillingsbildung erkennbar. Die Stangenherstellung führt zu einer ausgeprägten Zeiligkeit des Gefüges. Der Stahl 1.4301 weist ein typisches austenitisches Gefüge auf. Die erkennbare Zwillingsbildung ist auf eine schnelle Abkühlung beim Lösungsglühen oder Schubspannungen bei der Herstellung der Stangen zurückzuführen.

Aus der Stahlzusammensetzung und der Mikrostruktur ergeben sich werkstoffspezifische Eigenschaften. Tabelle 2 zeigt die Spezifikation der

mechanischen Eigenschaften bei Raumtemperatur nach DIN EN 10088-3:2014-12 für Werkstoff mit einem Durchmesser von 25 mm.

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe nach DIN EN 10088-3:2014-12 im weich- (+A) bzw. lösungsgeglühten (+AT) Zustand

	X6Cr17 1.4016	X2CrNiMoN22-5-3 1.4462	X5CrNi18-10 1.4301
Härte (max.) / HBW	200	270	215
$R_{p0,2\%}$ (min.) / MPa	240	450	190
R_m / MPa	400 – 630	650 – 880	500 – 700
A / %	20	25	45

Der ferritische Referenzwerkstoff 1.4016 weist mit einer Streckgrenze von 240 MPa und einer Zugfestigkeit bis 630 MPa eine gute Umformbarkeit auf. Die Gleichmaßdehnung ist mit einem Wert von 20 % jedoch vergleichsweise gering. Der Duplex-Stahl 1.4462 verfügt über die höchste Festigkeit der untersuchten Werkstoffe. Der austenitische Stahl 1.4301 ist durch die niedrigste Streckgrenze und eine vergleichsweise hohe Gleichmaßdehnung gekennzeichnet. Sämtliche Versuchswerkstoffe sind beständig gegen interkristalline Korrosion.

4.2.2 Schmierstoffe und Reibungscharakterisierung

Bei der Kaltumformung von nichtrostenden Stählen treten hohe Flächenpressungen zwischen Werkstück und Werkzeug auf. Aus diesem Grund werden zweiteilige Schmierungssysteme eingesetzt. Auf die Oberfläche der Rohlinge wird chemisch eine Schmierstoffträgerschicht aus Eisen-III-Oxalat mit einem Gewicht von ca. 9,5 g/m² aufgebracht. Für die Oxalatierung wird *ZWEZ Coat 1039* eingesetzt. Als Referenzschmierstoff wird der molybdändisulfidbasierte *ZWEZ-Lube MD230* mit ca. 7,3 g/m² verwendet. Für die Bestimmung des Einflusses der Schmierung auf die Eigenspannungen werden zudem der seifenbasierte *ZWEZ Lube Z* und der polymerbasierte *ZWEZ Lube PD* eingesetzt.

Die Reibfaktoren m der verwendeten Schmiersysteme werden mit Hilfe des *Double-Cup-Extrusion*-Versuchs (DCE) ermittelt, welcher ein kombiniertes Napf-Vorwärts-Napf-Rückwärts-Fließpressen darstellt. Beim DCE-Versuch dringt ein beweglicher Oberstempel in den Rohling ein, der auf dem feststehenden Unterstempel positioniert ist [177]. Die Reibung zwischen der Oberfläche des Werkstücks und der Matrizenbohrung, die durch das

verwendete tribologische System gegeben ist, beeinflusst den Materialfluss in axialer Richtung. Im theoretischen Fall der Reibungsfreiheit mit $m = 0$ wird der Materialfluss nicht behindert, wobei sich auf der Ober- und Unterseite des Rohlings symmetrische Näpfe bilden. Im Fall der Adhäsion mit $m = 1$ hingegen wird nur der obere Napf ausgeformt. Der Ansatz zur Bestimmung des Reibungsfaktors besteht aus einer numerischen Bestimmung der Zusammenhänge zwischen Reibfaktor m und Napfhöhenverhältnis r und einem experimentellen Versuchsaufbau zur Bestimmung des letzteren. Die Grundlagen des Verfahrens sind in Bild 7 dargestellt.

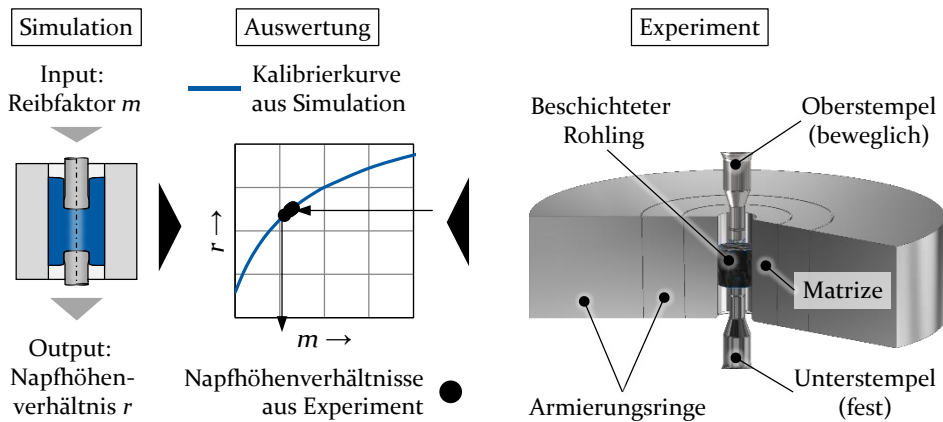


Bild 7: Bestimmung des Reibfaktors durch einen numerisch-experimentell gekoppelten Ansatz im *Double-Cup-Extrusion*-Versuch

In der Simulation wird der Napfvorwärts-Napfrückwärts-Fließpressprozess in einem parametrisierten Umformmodell numerisch abgebildet. Ziel ist die Identifikation eines Zusammenhangs zwischen den Reibfaktoren m als Eingangsgröße und den resultierenden Napfhöhenverhältnissen r als Ausgabegröße, die dem Verhältnis der Tiefe des oberen zum unteren Napf entsprechen. Für die Simulation wird das in [178] validierte Modell in der Software *Simufact.Forming* verwendet. Das Napffließpressen wird mit verschiedenen Werten von m im relevanten Bereich von 0 bis 0,2 simuliert, in dem die Reibfaktoren erwartet werden.

Im Experiment werden mit dem zu untersuchenden Tribosystem beschichtete zylindrische Proben umgeformt und die resultierenden Napfhöhenverhältnisse bestimmt. Mit Hilfe der numerisch ermittelten Kalibrierkurve wird anschließend der Reibfaktor berechnet. Die experimentelle Umsetzung erfolgt in der elektromechanischen Prüfmaschine *Schenck-Trebel RM400* mit einer maximalen Nennkraft von 400 kN. Die

Matrize besteht aus Schnellarbeitsstahl HS 2-2-2 (1.3397) mit einer gehonten Bohrung - entsprechend dem Umformwerkzeug. Sie wird in zwei Armierungsringe aus Warmarbeitsstahl X38CrMoV5 (1.2367) gepresst, um ihre radiale Ausdehnung zu begrenzen. Die für die DCE-Versuche verwendeten Proben werden in der gleichen Charge wie die Umformproben beschichtet. Um zuverlässige Ergebnisse zu erzielen, werden für jeden Schmierstoff mindestens $n = 7$ Prüfungen durchgeführt. Die Bestimmung der für jeden Schmierstoff vorhandenen Reibfaktoren erfolgt durch eine numerische Identifizierung mit Hilfe der Kalibrierkurve und eine anschließende Simulation mit den ermittelten Werten.

4.3 Numerische Prozesssimulation

Die numerische Prozessabbildung zur Erarbeitung eines Prozessverständnisses erfolgt mithilfe der Finite-Elemente-Methode. Dabei wird die kontinuierliche Geometrie der Werkzeuge und Werkstücke diskretisiert, also in endlich große – finite – Elemente unterteilt. Durch die Aufprägung von Randbedingungen wie Lagerungsbedingungen, Krafteinleitungsorte, etc. werden Werkzeug- und Prozesseigenschaften festgelegt. Die Berechnung des Umformprozesses erfolgt durch das numerische Lösen des Gleichungssystems, das aus der Koeffizientenmatrix als Summe der Steifigkeitsmatrizen der einzelnen Elemente resultiert. Die Ergebnisdaten ermöglichen eine Bewertung der Bauteil- und Prozesseigenschaften, wie Reaktionskräfte oder Spannungs- und Dehnungsverteilungen [179].

Zur Umsetzung wird die kommerzielle Software *Simufact.Forming 16.0* verwendet. Der Prozess wird unter Ausnutzung der Rotationssymmetrie abgebildet, um den notwendigen Rechenaufwand zu verringern. Die Umformmatrize und der zugehörige Armierungsring sind als rein elastische Körper modelliert, um deren Rückfederung abzubilden und so eigenspannungsrelevante Vorgänge beim Ausstoßen mit berücksichtigen zu können. Der Stempel und der Auswerfer sind abstrahiert und als Starrkörper abgebildet, da deren Elastizität nicht zur Eigenspannungsentstehung beiträgt. Die Modellierung der mechanischen Eigenschaften des Werkstückwerkstoffs erfolgt durch Fließkurven, welche im einachsigen Druckversuch ermittelt und mit üblichen Methoden auf höhere Umformgrade extrapoliert werden. Aufgrund der hohen Kontaktdrücke findet das Reibfaktormodell Anwendung.

4.4 Messtechnik

Die Bestimmung der Eigenspannungen erfolgt mit dem Röntgendiffraktometer *Seifert XRD 3003*. Als Anodenmaterial der Röntgenröhre wird Chrom verwendet, da damit Messungen sowohl in Austenit als auch in Ferrit möglich sind. Als K_{β} -Filter wird Vanadium verwendet. Die Primärblende besitzt einen Durchmesser von 1,0 mm, woraus ein Messfleckdurchmesser von 0,8 mm resultiert. Zur Vermeidung von Defokussierungseffekten und Einflüssen aus veränderlichen Spotgrößen [101] findet das χ -Verfahren Anwendung. In ψ -Richtung werden Messungen bei 13 Kippwinkeln durchgeführt, die nach konstantem $\sin^2\psi$ unterteilt sind. Die maximale Auslenkung beträgt 50° , die Belichtungsdauer 10 s. Die Spannungsbestimmung erfolgt in Austenit an der $\{2\ 2\ 0\}$ - und in Ferrit an der $\{2\ 1\ 1\}$ -Gitterebene aufgrund der hohen 2Θ -Winkel und der damit einhergehenden geringen Defokussierung.

Die Auswertung der Messung erfolgt nach dem $\sin^2\psi$ -Verfahren mit der Software *Rayflex Analyze*. An den aufgenommenen Intensitätskurven erfolgt nach einer Glättung ein linearer Hintergrundabzug. Die Linienlagen werden mit einer *Pseudo-Voigt*-Funktion ermittelt. Bei der Auswertung wird ein fixer *Bragg*-Winkel verwendet. Die verwendeten Parameter und röntgenographischen Elastizitätskonstanten (REK) sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Zur Spannungsberechnung verwendete Parameter und röntgenographische Elastizitätskonstanten (REK)

Parameter	Ferrit	Austenit
Untersuchte Gitterebene	$\{2\ 1\ 1\}$	$\{2\ 2\ 0\}$
Bragg-Winkel $2\Theta_0 / ^\circ$	156,09	127,78
REK $-s_1 / 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$	1,27	1,36
REK $\frac{1}{2}s_2 / 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$	5,81	6,19

4.5 Bauteilprüfung

Zur Charakterisierung der Eigenspannungsstabilität und der Lebensdauer werden die Bauteile einer mechanischen Last unterzogen. Um eine definierte Zugspannung in der Bauteiloberfläche zu erzeugen, wird ein modifizierter Drei-Punkt-Biegeversuch durchgeführt. Der dabei verwendete Versuchsaufbau ist in Bild 8 dargestellt.

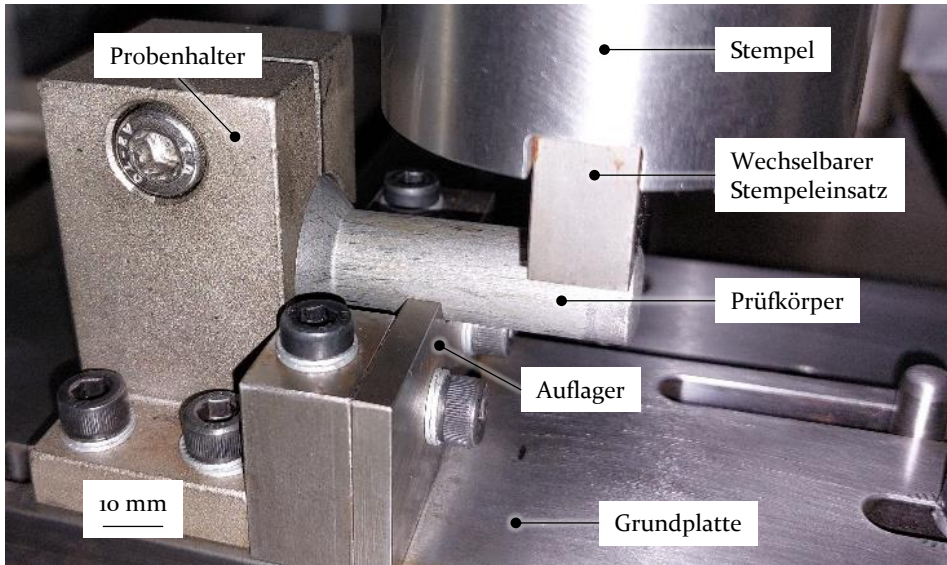


Bild 8: Auf Drei-Punkt-Biegung basierende Prüfvorrichtung zur Verwendung im Resonanzpulsator

Der nicht umgeformte Bauteilbereich wird kraftschlüssig mit einem T-förmigen Wellenhalter befestigt. Der umgeformte Schaft liegt formschlüssig auf einem Auflager auf, das sich unter dem Testpunkt befindet. Durch das Ausüben einer Kraft auf die Bauteilspitze durch den Stempel wird ein Biegemoment generiert, woraus in der Oberfläche der Bauteiloberseite eine Zugspannung in axialer Richtung resultiert. Die Biegespannung σ_B wird nach (7) über die Stempelkraft F und den Abstand l zwischen Auflage und Stempel eingestellt. In der praktischen Umsetzung wird l konstant gehalten, während F in Abhängigkeit vom gemessenen Bauteildurchmesser d variiert wird.

$$\sigma_B = \frac{32 \cdot F \cdot l}{\pi \cdot d^3} \quad (7)$$

Ein Testzyklus besteht aus einer Belastung bis zu einer definierten Maximalkraft $F_{\max}$, bei welcher die maximale Zugspannung σ_L erreicht wird, und einem vollständigen Entlasten. Hinsichtlich der Nomenklatur der Ermüdungsprüfung entspricht dies einer schwellenden Beanspruchung mit einer Maximalspannung von $\sigma_{\max} = \sigma_L$, einer Minimalspannung von $\sigma_{\min} = 0$, einem Spannungsverhältnis von $R = 0$ und einem Amplitudenverhältnis von $A = 1$ bei einer Mittelspannung von σ_m und einer Spannungsamplitude von $\sigma_a = \sigma_L/2$. Für die Versuche wird der Hochfrequenzpulsator *Roell*

Amsler HFP5100 verwendet. Damit können die Bauteile sowohl im Einzelhub geprüft werden als auch in Ermüdungsversuchen mit einer hohen Anzahl an Lastzyklen.

5 Eigenspannungsentstehung im Referenzprozess

Die Grundlage für die Untersuchungen bildet die Analyse zur Eigenspannungsentstehung. Ziel dabei ist die Schaffung eines Verständnisses der Mechanismen und Wechselwirkungen, die beim Voll-Vorwärts-Fließpressen eines gegebenen Werkstoffs zum Verbleiben von Eigenspannungen im Bauteil führen. Das grundlegende Vorgehen ist in Bild 9 dargestellt.

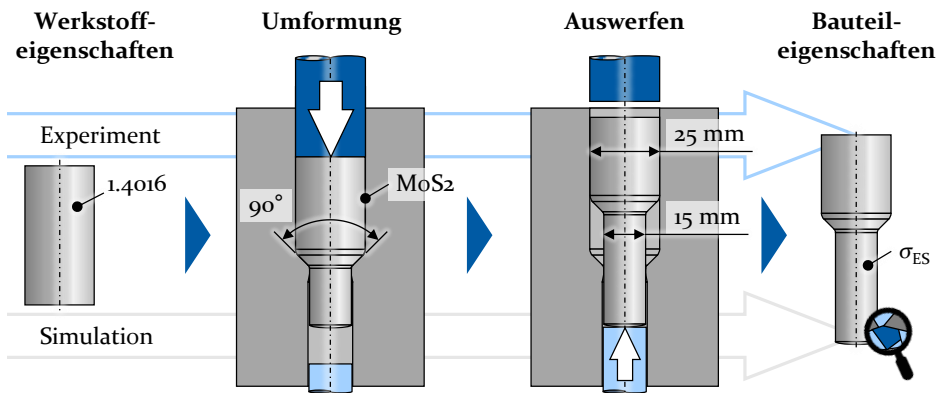


Bild 9: Untersuchung der Eigenspannungsentstehung im Referenzprozess

Zunächst erfolgt die Identifikation der Werkstoffeigenschaften, um für die Eigenspannungsentstehung relevante Materialparameter ableiten zu können. Anhand eines Referenzprozesses wird anschließend eine grundlegende experimentelle Untersuchung der Einflüsse der einzelnen Teilschritte des Umformverfahrens durchgeführt. Der Prozess wird numerisch abgebildet, um ein tiefergreifendes Verständnis zu generieren.

Als Referenzprozess wird das Voll-Vorwärts-Fließpressen des rostfreien Stahls 1.4016 untersucht. Die Formgebung der Rohlinge erfolgt in einer einfacharmierten Matrize mit einem Schulteröffnungswinkel von $2\alpha = 90^\circ$. Die Schmierung und Trennung der Oberflächen erfolgt durch eine Beschichtung des Rohlings mit Eisenoxalat und einem MoS_2 -basierten Schmierstoff. Zur Entnahme des Bauteils wird es nach der Umformung entgegen der Stempelrichtung aus der Matrize ausgeworfen. Die experimentelle Bestimmung der Eigenspannungen erfolgt röntgenografisch an der Oberfläche des umgeformten Schafts. Zudem werden zur Bestimmung

der Eigenschaften im Bauteilvolumen das Gefüge und die Mikrohärteverteilung am Längsschliff untersucht.

Zur Erweiterung des Verständnisses wird der Prozess begleitend numerisch in *Simufact.Forming 16.0* abgebildet. Diese simulativen Ergebnisse erlauben eine vertiefte Untersuchung der relevanten Vorgänge im Werkstoff, welche experimentell nicht abbildbar sind. Um eine hohe Abbildungsgenauigkeit zu erreichen, wird zudem der Einfluss numerischer Parameter auf die Simulationsergebnisse untersucht.

5.1 Identifikation der Werkstoffeigenschaften

Die Grundlage für die experimentellen Untersuchungen bilden die Verfestigungseigenschaften des verwendeten Werkstoffs, welche in diesem Abschnitt identifiziert werden. Sie bestimmen durch die Festigkeit und die Kaltverfestigung das Materialverhalten während der Umformung und sind daher unerlässlich für die Identifikation eigenspannungsrelevanter Mechanismen. Das Voll-Vorwärts-Fließpressen ist durch einen Druckspannungszustand charakterisiert, weshalb Werkstoffcharakterisierungsverfahren mit Druckspannungszustand verwendet werden.

Druckfließkurven

Eine Möglichkeit zur Charakterisierung des Fließ- und Verfestigungsverhaltens liegt im einachsigen Druckversuch nach DIN 50106. Im Gegensatz zum in der Umformtechnik häufig angewendeten Zugversuch sind dabei höhere Umformgrade erreichbar. In Bild 10 ist die damit identifizierte Druckfließkurve des verwendeten Referenzwerkstoffs 1.4016 dargestellt.

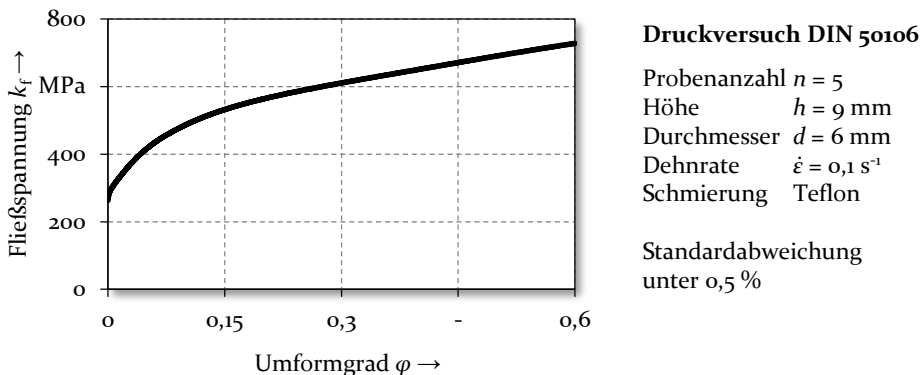


Bild 10: Fließkurve des Referenzwerkstoffs 1.4016 aus dem einachsigen Druckversuch nach DIN 50106

In diesem Verfahren wird ein zylindrischer Rohling zwischen zwei parallelen Stauchbahnen entlang seiner Symmetrieachse gestaucht. Zur Verringerung reibungsbedingter Abweichungen durch Ausbauchen der Probe wird Teflonfolie zur Schmierung an den Stirnflächen der Rohlinge verwendet. Aus den aufgenommenen Kraft- und Wegsignalen wird nach Abzug des elastischen Anteils die Fließkurve bei plastischer Deformation ermittelt. Aus den Daten wird eine Anfangsfließspannung von 263 MPa identifiziert. Dies entspricht den Werten aus DIN EN 10088-3:2014-12, in der eine Mindestfließgrenze von 240 MPa gefordert ist. Durch Kaltverfestigung ist eine anfangs starke und mit zunehmendem Umformgrad weniger ausgeprägte Zunahme der Festigkeit zu erkennen. Bei einem Umformgrad von 0,5 beträgt die Fließspannung 691 MPa. Die Abweichungen der benötigten Prüfkraft und der berechneten Fließspannungen betragen zwischen den $n = 5$ Proben weniger als 0,5 %.

Während der Bauteilherstellung im Referenzprozess wird der Rohlingsdurchmesser von 25 mm auf 15 mm reduziert, was einem Umformgrad von $\varphi = 1$ entspricht. Lokal ist zudem das Auftreten deutlich höherer Werte möglich. Zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens und zur Extrapolation der experimentellen Ergebnisse auf höhere Umformgrade existieren verschiedene Methoden. Häufig in der Praxis eingesetzt werden dabei die Materialmodelle von *Ludwik* [180], *Hollomon* als angepasste Form [181], *Voce* [182] und *Hockett-Sherby* [183]. Die Modelle und deren Parameter für den Referenzwerkstoff 1.4016 sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Gleichungen der Materialmodelle von *Hollomon*, *Ludwik*, *Voce* und *Hockett-Sherby* sowie deren Parameter für den Stahl 1.4016

Hollomon		$k_f = a \cdot \varphi^n$	
$a = 803,0 \text{ MPa}$		$n = 0,2137$	
Ludwik		$k_f = k_{f,0} + a \cdot \varphi^n$	
$k_{f,0} = 257,94 \text{ MPa}$	$a = 583,78 \text{ MPa}$	$n = 0,4207$	
Voce		$k_f = k_{f,s} - (k_{f,s} - k_{f,0}) \cdot e^{-m\varphi}$	
$k_{f,0} = 314,61 \text{ MPa}$	$k_{f,s} = 757,89 \text{ MPa}$	$m = 4,1048$	
Hockett-Sherby		$k_f = k_{f,s} - (k_{f,s} - k_{f,0}) \cdot e^{-m\varphi^n}$	
$k_{f,0} = 263,43 \text{ MPa}$	$k_{f,s} = 1217,33 \text{ MPa}$	$m = 0,8670$	$n = 0,5276$

Die Parameteridentifikation erfolgte mit Hilfe der Excel-Erweiterung *Solver*. Ausgehend von den experimentellen Daten wurden die Parameter

hinsichtlich einer Minimierung der Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (*Root of Mean Square Error*, RMSE) angepasst. Das Modell von *Hollomon* basiert auf einer Exponentialfunktion mit dem Formfaktor a und dem Verfestigungsexponenten n , weshalb die Fließkurve bei diesem Modell bei 0 MPa beginnt. *Ludwik* verwendet zusätzlich eine Anfangsfließspannung $k_{f,0}$. *Voce* hingegen basiert auf einer natürlichen Exponentialfunktion mit dem werkstoffabhängigen Formfaktor m und verwendet sowohl eine Anfangsfließspannung $k_{f,0}$ als auch eine Sättigungsfließspannung $k_{f,s}$. Im Modell von *Hockett-Sherby* wird zusätzlich eine Exponentialfunktion mit dem materialspezifischen Exponenten n im Exponenten einer natürlichen Exponentialfunktion verwendet. Die mit diesen Modellen auf höhere Umformgrade extrapolierten Fließkurven sind für den Werkstoff 1.4016 in Bild 11 dargestellt.

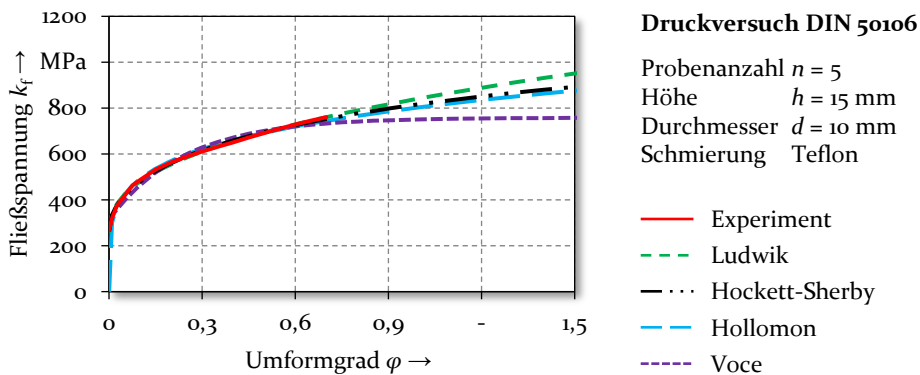


Bild 11: Fließkurve des verwendeten Stahls 1.4016. Experimentell ermittelte Daten aus einachsigem Druckversuch und Extrapolation mit verschiedenen Methoden

Mit den identifizierten Parametern zeigt das *Voce*-Modell die niedrigste Fließspannung bei höheren Dehnungen, während *Hollomon*, *Hockett-Sherby* und *Voce* höhere Spannungen vorhersagen. Das Modell von *Hockett-Sherby* zeigt die geringste Abweichung zu den experimentellen Daten, weshalb es für die numerischen Untersuchungen verwendet wird.

Die identifizierten Werkstoffkennwerte sind ähnlich zu Literaturkennwerten, welche für Blechwerkstoffe vorliegen. In [184] werden die Plastifizierungseigenschaften mit dem Modell nach *Hollomon* beschrieben. Der ermittelte Verfestigungsexponent liegt mit einem Wert von $n = 0,219$ im Bereich des in dieser Arbeit identifizierten Wertes. Die in [184] dargestellten höheren Werte für Fließbeginn und *Hollomon*-Koeffizient C sind auf die Verwendung von kaltgewalztem und damit verfestigtem Blech zurückzuführen. Ebenfalls für Blechhalbzeug werden in [185] Werte von $C = 717 \text{ MPa}$ und $n = 0,194$ verwendet, welche im einachsigen Zugversuch

ermittelt wurden. In [186] wird an warmgewalztem Blech im Zugversuch eine Anfangsfließspannung zwischen 294 MPa und 328 MPa bestimmt. Diese Literaturwerte liegen im Bereich der in dieser Arbeit identifizierten Parameter. Vorliegende Unterschiede sind auf die Verwendung von massiven Halbzeugen und notwendigerweise unterschiedliche Charakterisierungsmethoden zurückzuführen.

Wechselplastifizierungseigenschaften

Das Voll-Vorwärts-Fließpressen ist durch einen Druckspannungszustand charakterisiert, weshalb keine Werkstoffcharakterisierungsverfahren mit reinem Zugspannungszustand wie der einachsige Zugversuch verwendet werden. Aus einachsigen Druckversuchen abgeleitete Daten bilden jedoch nur das isotrope Materialverhalten bei gleicher Lastrichtung ab. Im Umformprozess wird der Werkstoff jedoch während des Auswerfens in entgegengesetzter Richtung belastet. Um diesen Lastwechsel zu berücksichtigen ist ein kombiniert isotrop-kinematisches Materialmodell notwendig. Während für Blechwerkstoffe Charakterisierungsverfahren existieren, liegen für massive Halbzeuge keine standardisierten Methoden vor.

Bei der Werkstoffprüfung von Stangenmaterial treten verschiedene Herausforderungen auf. Eine formschlüssige Kraftübertragung ist notwendig, um Messfehler zu vermeiden, die durch ein Gleiten der Probe in der Einspannvorrichtung auftreten. Für eine zentrische Krafteinleitung und zur Vermeidung von Ausknicken ist eine exakte Positionierung der Proben zu gewährleisten. Um diesen Anforderungen hinsichtlich der zyklischen Plastifizierungsversuche gerecht zu werden, wurden der in Bild 12 abgebildete Versuchsaufbau und die dargestellte Probengeometrie entwickelt. Ein ähnlicher Versuch ist in [187] beschrieben.

Der Versuchsaufbau ist zur Verwendung in einer elektromechanischen Universalprüfmaschine Zwick Zi100 entwickelt. Die Verbindung zur Traverse und dem Maschinentisch erfolgt über zwei zueinander zentrierte Stempel. Die Pressenkraft wird während des Druckzyklus über die Stirnseite und während der Zugbelastung über einen Absatz übertragen. Um eine zentrische Krafteinleitung zu gewährleisten, ist die Verbindung der Probe zur Halterung mit einer Passung ausgelegt. Die Probengeometrie ist rotations- und spiegelsymmetrisch und besteht aus drei Durchmessern. Der Prüfbereich in der Bauteilmitte ist zylindrisch mit einem Durchmesser von 8 mm und einer Höhe von 15 mm. Das Höhen-Durchmesser-Verhältnis liegt zur Vermeidung von Ausknicken im durch die DIN 50106

vorgegebenen Bereich für den einachsigen Druckversuch. Der Übergang zur Passfläche mit Durchmesser 16 mm wird zur guten optischen Zugänglichkeit über einen Radius hergestellt. Über den anschließenden Absatz wird die Zugkraft übertragen. Der eingespannte Bereich hat entsprechend dem für die Umformproben verwendeten Stangenmaterial einen Durchmesser von 25 mm.

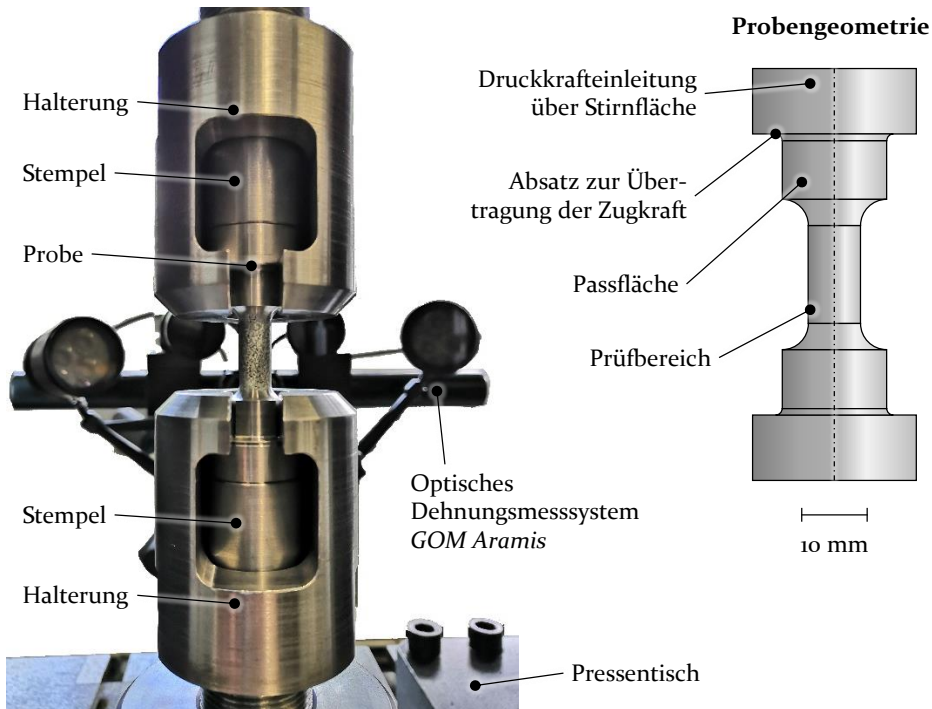
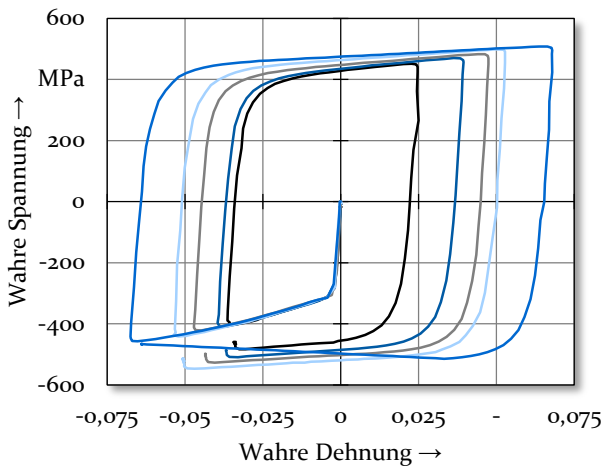


Bild 12: Wechsellastplastifizierungsversuche nach [P2], Versuchsaufbau und Probengeometrie

Während der Prüfung werden die Dehnungen durch ein optisches Dehnungsmesssystem *GOM Aramis* bestimmt. Dazu wird ein stochastisches Punktemuster auf die Oberfläche des Prüfbereichs gesprüht. Die zur Umformung notwendige Kraft wird durch die in der Prüfmaschine verbaute Kraftmessdose gemessen. Die wahre Spannung wird aus den gemessenen Kräften und Dehnungen berechnet. Mit diesem Versuchsaufbau werden die Proben in drei Lastzyklen geprüft, wobei der erste und dritte Zyklus im Druck- und der zweite Zyklus im Zugbereich stattfindet. Die Lastaufbringung ist dehnungsgeregelt mit einer Geschwindigkeit von $0,01 \text{ s}^{-1}$. Die Dehnungssteuerung wird durch die Software *testXpert* der Prüfmaschine bereitgestellt. Sowohl symmetrische als auch asymmetrische Umkehrpunkte werden angefahren. Die Ergebnisse der Wechsellastplastifizierungsversuche sind in Bild 13 gezeigt.

**Wechselplastifizierung**

Werkstoff 1.4016 (Ref.)

Prüfmaschine Zwick Z100

Dehnungsmessung mittels
GOM AramisKraftmessung über
Messdose in PresseSpannungsberechnung
durch GOM Inspect

Zyklus	Erreichte Dehnung / -			Maximalspannung/ MPa		
	I	II	III	I	II	III
A	-0.036	0.025	-0.034	-402	451	-483
B	-0.040	0.039	-0.037	-410	470	-509
C	-0.047	0.047	-0.044	-421	483	-527
D	-0.054	0.053	-0.051	-442	498	-547
E	-0.067	0.068	-0.064	-458	508	-497

Bild 13: Ergebnisse der Wechselplastifizierungsversuche

In Kurve A wurde eine Dehnung von etwa 0,035 im Druckbereich und 0,025 im Zugbereich erreicht. Für die Kurven B, C und D wurde ein symmetrischer Dehnungsbereich verwendet. Die geringen Abweichungen in den erreichten Dehnungsmaxima sind der Elastizität des Versuchsaufbaus und geringen Unsicherheiten der Wegmessung geschuldet. Bei Kurve E wurde die höchste Dehnung angestrebt. Im dritten Zyklus, der zweiten Druckbelastung, ist ein Abfallen der wahren Spannung zu erkennen, welcher auf ein Ausknicken der Probe aufgrund der hohen Dehnung zurückzuführen ist. Die Daten der ersten beiden Zyklen können jedoch zur Identifikation der Parameter herangezogen werden.

Im Zyklus I, der ersten Druckbelastung, liegen lediglich sehr geringe Abweichungen zwischen den verschiedenen Kurven vor. Dies zeigt die Zuverlässigkeit der Spannungs- und Dehnungsbestimmung und das Vorliegen homogener Werkstoffeigenschaften in den Proben. Die in den Zyklen II und III auftretenden Abstände zwischen den Kurven belegen das Auftreten von kinematischer Verfestigung im Werkstoff.

Aus den experimentell bestimmten Spannungs-Dehnungs-Kurven wurden durch eine numerische Abbildung des Prüfprozesses die Parameter des Chaboche-Werkstoffmodells [188] kalibriert. Mit Werten von $R_{\infty} = 195,421$ MPa, $b = 6,11767$, $C = 9899$ MPa und $\gamma = 85,8351$ wurde eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Kraft-Weg-Verläufen erzielt [P2].

5.2 Experimentelle Ergebnisse

Im Referenzprozess werden Rohlinge aus dem rostfreien Stahl 1.4016 (X6Cr17) durch Voll-Vorwärts-Fließpressen umgeformt. Dabei wird der Durchmesser in einer Matrize mit einem Schulteröffnungswinkel von $2\alpha = 90^\circ$ von 25 mm auf 15 mm verringert, was einem Umformgrad von $\varphi = 1$ entspricht. Nach der Umformung wird das Bauteil entgegen der Stempelrichtung aus der Matrize ausgeworfen. Im folgenden Kapitel erfolgt eine Analyse der Eigenspannungsentstehung sowie eine Charakterisierung der hergestellten Bauteile zur Identifikation der vorliegenden Mechanismen der Eigenspannungsentstehung.

5.2.1 Eigenspannungsentstehung

Nach dem Einpressen des Rohlings in die Matrize wurde der Armierungsverbund aus dem Werkzeugsystem entnommen und gelöst. Auf diese Weise ist ein Entnehmen des umgeformten Bauteils aus der Matrize ohne Beeinflussung durch das Auswerfen und die Rückfederung des Fließbunds möglich. Im umgeformten Schaft entsteht dabei der in Bild 14 dargestellte Eigenspannungszustand [P3].

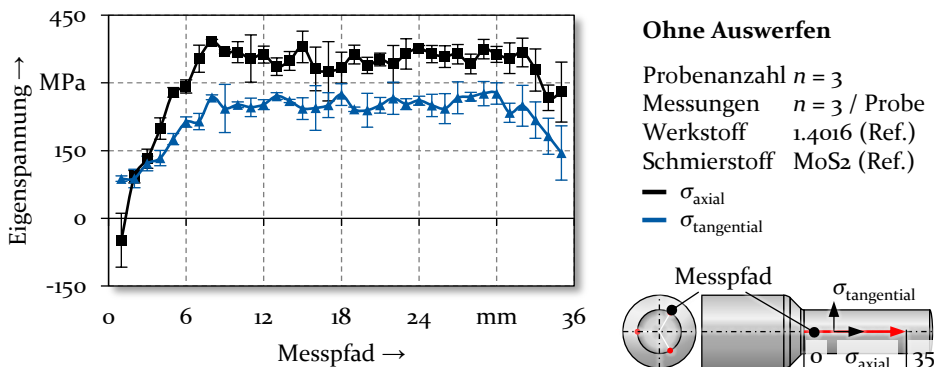


Bild 14: Eigenspannungen im umgeformten Schaft nach Entnahme des Bauteils ohne Auswerfen

Im Kontaktbereich von Bauteil und Fließbund liegen in axialer Richtung geringe Druckeigenspannungen vor. Die vergleichsweise hohe Streuung der Eigenspannungen im ersten Messpunkt ist durch die Werkzeugeigenschaften bei der Entlastung zu erklären. Nach dem Wegnehmen der Stempelkraft federt die Matrize elastisch zurück, wobei der Durchmesser des Fließbunds geringfügig verringert wird. Mit zunehmendem Abstand vom Fließbund treten ausgeprägte Zugeigenspannungen auf, wobei ab einem Abstand von ca. 8 mm ein konstanter Spannungszustand in der Oberfläche des umgeformten Schafts vorliegt. Hier entstehen durch den quasistationären Umformverlauf konstante Eigenschaften entlang des Bauteils. Zur Spitze hin ist ab einem Abstand von etwa 34 mm eine Abnahme der Zugspannungen zu erkennen. Dieser Verlauf entspricht den Erwartungen aus der Literatur, wonach ab einem Abstand von $0,5 \times d$ vom Fließbund konstante Spannungen vorliegen, welche zur Spitze hin abnehmen [60].

Nach der Formgebung in der Matrize wird das Bauteil entgegen der Stempelrichtung ausgeworfen. Dabei gleitet der umgeformte Schaft entlang des Fließbundes der Matrize. Der dabei entstehende Spannungszustand ist in Bild 15 dargestellt.

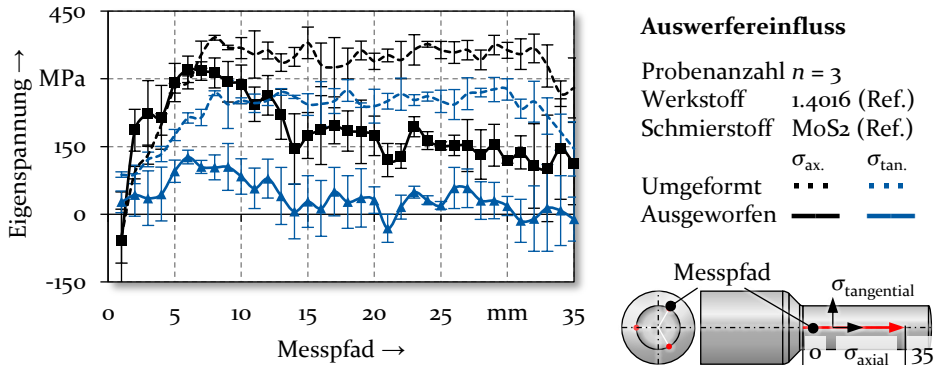


Bild 15: Eigenspannungen im umgeformten Schaft nach Auswerfen des Bauteils

In beiden Hauptspannungsrichtungen werden die Zugeigenspannungen während des Auswerfens verringert. Nahe des 2 mm langen Fließbunds tritt eine geringe Veränderung auf, mit zunehmendem Abstand werden die Eigenspannungen stärker reduziert. Ab einem Abstand von etwa 15 mm liegen in Axial- und Tangentialrichtung konstante Eigenspannungen vor. In Axialrichtung verbleiben etwa 150 MPa, während in Umfangsrichtung mit etwa 40 MPa ein nahezu spannungsfreier Zustand vorliegt. Der Grund für diese Abnahme liegt in den Spannungsverhältnissen während des

Auswerfvorgangs. Nach dem Wegnehmen der Stempelkraft tritt eine elastische Rückfederung der Matrize auf, wodurch der Fließbunddurchmesser verringert wird. Während des Ausstoßens wird dadurch die Oberfläche des umgeformten Schafts mit geringer Flächenabnahme plastifiziert, was eine Abnahme der Zugeigenspannungen bedingt [61]. Nahe des Fließbunds werden die Eigenspannungen nur geringfügig beeinflusst, während ab einem Abstand von 15 mm vom Fließbund ein konstanter Spannungszustand vorliegt.

Eine mögliche Erklärung hierfür liegt in einer Stützwirkung des nicht umgeformten Bereichs. Nach dem Wegnehmen der Stempelkraft liegt die Kontaktzone zwischen Bauteil und Matrize im Fließbund, in der Werkzeugschulter und an der Mantelfläche des nicht umgeformten Bauteilbereichs. Da die Matrizenbohrung im oberen Bereich geringfügig konisch ausgeführt ist, nimmt die Kontaktfläche zwischen Mantelfläche und Matrizenbohrung mit zunehmendem Auswerferweg ab, woraus eine zunehmende Matrizenrückfederung resultiert. Dies spiegelt sich in der zunehmenden Reduktion der Bauteileigenspannungen wider, bis ab 15 mm ein konstantes Verhalten auftritt.

Diese Ergebnisse decken sich mit ähnlichen Arbeiten. In [62] wird das Fließpressen und Auswerfen des austenitischen Stahls 1.4404 untersucht. Nach dem Umformen vorliegende oberflächennahe Zugeigenspannungen werden durch den Auswerfvorgang signifikant reduziert.

5.2.2 Bauteilcharakterisierung

Während des Einpressens des Rohlings in die Umformmatrize wird der Durchmesser an der Matrizenschulter reduziert. Dabei fließt der Werkstoff in radialer und axialer Richtung und erfährt dabei eine Kaltverfestigung. Während des anschließenden Auswerfens wird die Oberfläche des umgeformten Schafts durch die Matrizenrückfederung erneut beansprucht. Zur Ergründung der Ursachen der Eigenspannungsentstehung erfolgt eine vertiefte Untersuchung der hergestellten Bauteile.

Stofffluss

Eine Charakterisierung des Werkstoffflusses ist anhand der Körner in der Ätzung einer längsgeschliffenen Probe möglich. Durch die Umformung werden die Körner gelängt, wodurch der Werkstofffluss durch parallel verlaufende Korngrenzen identifiziert werden kann. In Bild 16 sind die so ermittelten Fließlinien dargestellt.

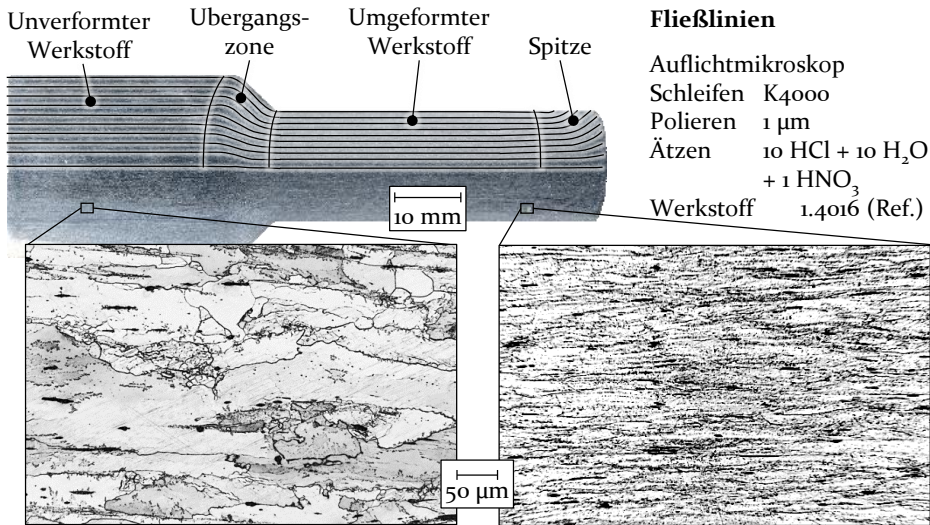


Bild 16: Fließlinien im umgeformten Bauteil

In der Lichtmikroskopaufnahme sind verschiedene Bauteilbereiche erkennbar. Im unverformten Werkstoffbereich wird die zeilige Struktur des Materials mit leicht gelängten Körnern in axialer Richtung deutlich, welche auf die Stangenherstellung zurückzuführen ist. Im geglühten Ausgangszustand zeigen die Kern- und Randbereiche eine homogene Kornverteilung mit Korngrößen von etwa 24 µm in radialer Richtung. Dies entspricht dem typischen Gefügebild des ferritischen 1.4016 [189]. In der Übergangszone im Bereich der Matrizenschulter findet die Umformung statt. In diesem Abschnitt fließt der randnahe Werkstoff zur Mitte und in axialer Richtung, während das Material im Kern lediglich in axialer Richtung gedehnt wird. Dadurch entsteht ein Gefüge mit zunehmend langgestreckten Körnern [P2].

Im ca. 36 mm langen Bereich "umgeformtes Material" liegt ein homogenes Gefüge in axialer Richtung mit stark gelängten, parallelen Körnern vor. Im Randbereich sind mit einer Größe von 9 µm dünnere Körner vorhanden als mit 12 µm im Kern, was sich durch die Deformation beim Passieren der Matrizenschulter erklären lässt. Während der Kernbereich nur axial gestreckt wird, wird der Randbereich in axialer Richtung gedehnt und zusätzlich in radialer Richtung gestaucht. Anders als bei der Eigenspannungsverteilung sind hinsichtlich des Gefüges keine ausgeprägten Unterschiede im Bereich des umgeformten Werkstoffs zu erkennen. Im Bereich der Spitze liegen inhomogene Fließlinien vor, die im Randbereich enden, da sich hier die ursprüngliche Stirnfläche des Rohlings und dessen Rand befinden.

Polfiguren

Die Textur beschreibt die Orientierungen der Kristallite eines polykristallinen Werkstoffs. Sie wird analytisch durch die dreidimensionale Orientierungsdichtefunktion (ODF) beschrieben, in der die Häufigkeiten der einzelnen Ausrichtungen hinterlegt sind. Die experimentelle Bestimmung der ODF erfolgt röntgenografisch durch Bestrahlung unter verschiedenen Winkeln φ und χ , die den Winkeln bei der röntgenografischen Spannungsanalyse entsprechen, und Aufnahme der Intensität des gebeugten Strahls. Neben dem für die Spannungsanalyse verwendeten $\{2\ 1\ 1\}$ -Reflex wird zusätzlich der $\{2\ 0\ 0\}$ -Reflex untersucht. Zur grafischen Darstellung der dreidimensionalen ODF werden Polfiguren als deren zweidimensionale Projektionen verwendet. Bild 17 zeigt die an den umgeformten Proben der Referenzvariante identifizierten Polfiguren.

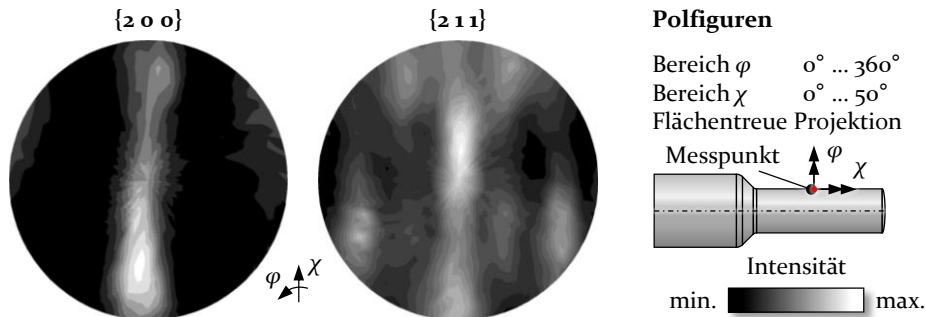


Bild 17: Am umgeformten Schaft ermittelte Polfiguren

Die klare Abgrenzung zeigt eine stärkere Ausprägung der Ziehtextur im $\{2\ 0\ 0\}$ -Reflex als im $\{2\ 1\ 1\}$ -Reflex. Aus den Polfiguren ist zu erkennen, dass die Vorzugsrichtung der Kristallite in Richtung der Umformung liegen. Diese Textur entspricht im Ansatz der in [190] dargestellten Ziehtextur, die bei der plastischen Verformung von Zugproben ermittelt wurde.

Härteverteilung

Anhand der Fließlinien ist eine Identifikation des Stoffflusses möglich. Zur Ergründung der Ursachen der Eigenspannungsentstehung sind jedoch zusätzlich Informationen zur Dehnungsverteilung notwendig, welche nicht direkt bestimmt werden kann. Mit zunehmender Dehnung des Werkstoffs steigt dessen Festigkeit aufgrund von Kaltverfestigung, woraus durch den erhöhten Eindringwiderstand eine erhöhte Werkstoffhärte resultiert. Über Eindringhärteprüfungen am Längsschliff des Bauteils ist so

eine qualitative Abbildung der Umformgradverteilung möglich. In Bild 18 ist die Verteilung der Mikrohärtigkeit über das Bauteil dargestellt.

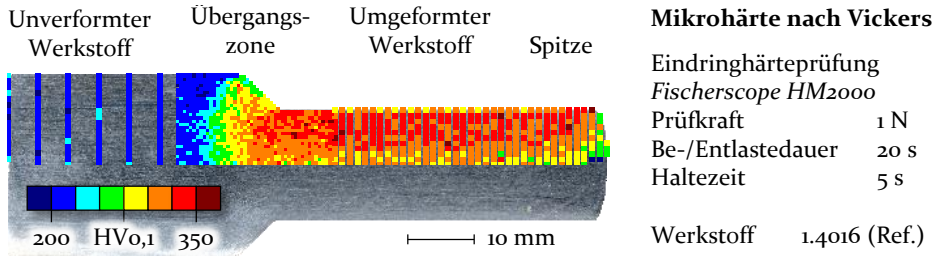


Bild 18: Mikrohärtigkeitsverteilung im umgeformten Bauteil

In der Abbildung sind definierte Werkstoffbereiche erkennbar. Im unverformten Werkstoffvolumen liegt eine homogene Härteverteilung mit Werten von 210 HVo,1 vor. Durch das Weichglühen liegen weder in radiale noch in axiale Richtung Härteunterschiede vor. Die Härte ist gegenüber dem Ausgangsmaterial leicht erhöht, was auf ein im diesem Prozess typisches geringfügiges Anstauchen im Einlegebereich der Matrize zurückzuführen ist [191]. In der Übergangszone ist eine Zunahme der Härte mit zunehmender axialer Position zu erkennen. Dies ist auf die mit plastischer Dehnung einhergehende Kaltverfestigung zurückzuführen. Entlang der Matrizenschulter weist die unmittelbare Randschicht geringere Härtewerte auf als tieferliegende Werkstoffbereiche. Eine mögliche Ursache dafür ist das Gleiten der Rohlingsoberfläche auf der Matrizenwand. Die Reibung zwischen Bauteil und Matrize ist aufgrund des Schmierstoffs und der getrennten Oberflächen geringer als die innere Reibung des Werkstoffs. Dadurch kann ein Teil der eingebrachten Kraft an der Oberfläche in Bewegung umgewandelt werden, während der Anteil von plastischer Deformation und Kaltverfestigung im Bauteilinneren größer ist.

Ab dem Fließbund liegt im Bereich des umgeformten Werkstoffs in axialer Richtung eine homogene Härteverteilung vor. In radialer Richtung treten jedoch ausgeprägte Unterschiede auf. Die geringsten Härtewerte von etwa 290 HVo,1 treten im Kern des Bauteils auf. Zum Rand hin wird ein Anstieg der Härte gemessen. Nahe der Oberfläche liegt eine Härte von 320 HVo,1 vor, während das Maximum von 335 HVo,1 etwa 1,5 mm unter der Oberfläche liegt. Diese Verteilung ist eine Folge der beschriebenen Fließbedingungen in der Matrizenschulter, bei der die Randschicht weniger verfestigt als tieferliegende Bereiche. An der Spitze des Bauteils liegt aufgrund der geringeren Umformung eine geringere Härte vor.

Zur Bestimmung des Verfestigungsverhaltens einzelner Bauteilbereiche wird die Härteverteilung entlang der Fließlinien untersucht. Sie bildet die Zunahme der Mikrohärtigkeit beim Durchlaufen der Matrzenschulter ab und ist in Bild 19 für 50 %, 90 % und 99 % des Radius dargestellt.

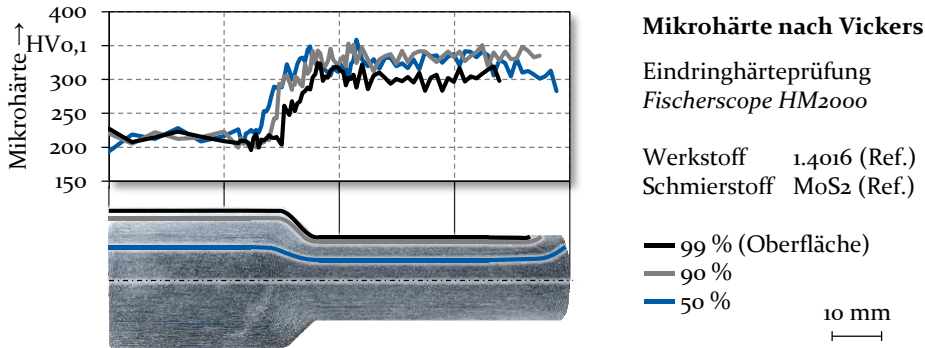


Bild 19: Härteverteilung entlang der Fließlinien

Bei sämtlichen Härteverteilungen entlang der Fließlinien ist im Bereich der Umformzone eine Zunahme der Härte zu erkennen. Entlang der Linien bei 50 % und bei 90 % des Radius liegt nach dem Durchlaufen der Matrzenschulter eine höhere Härte vor als in der Oberfläche. Diese Verfestigungsinhomogenität über das Bauteilvolumen bildet die Grundlage für das Vorhandensein der Eigenspannungen. Zur Schaffung eines tiefergreifenden Verständnisses der Eigenspannungsentstehung wird eine numerische Abbildung des Umformprozesses genutzt.

5.3 Numerische Abbildung

Die numerische Simulation des Umformprozesses erfolgt in der speziell für Massivumformprozesse entwickelten Software *Simufact.Forming* 16.0. Dazu wurde das in Bild 20 abgebildete Modell aufgebaut.

Zur Verringerung der Rechenzeit wird der Umformprozess zweidimensional unter Ausnutzung der Rotationssymmetrie simuliert. Stempel und Auswerfer sind dabei abstrahiert als Starrkörper modelliert. Die Matrize sowie der zugehörige Armierungsring sind als deformierbare Werkzeugkörper eingebunden, die eine elastische, aber keine plastische Deformation zulassen. Als Elastizitätsmoduln sind gemäß Datenblatt Werte von 220 GPa für die Matrize aus Schnellarbeitsstahl [192] und 210 GPa für die Armierung aus Warmarbeitsstahl [193] hinterlegt. Das Aufbringen der Vorspannung erfolgt über die Kontakttable, in der eine Überschneidung von 0,125 mm hinterlegt ist, was dem Übermaß von 5 % entspricht.

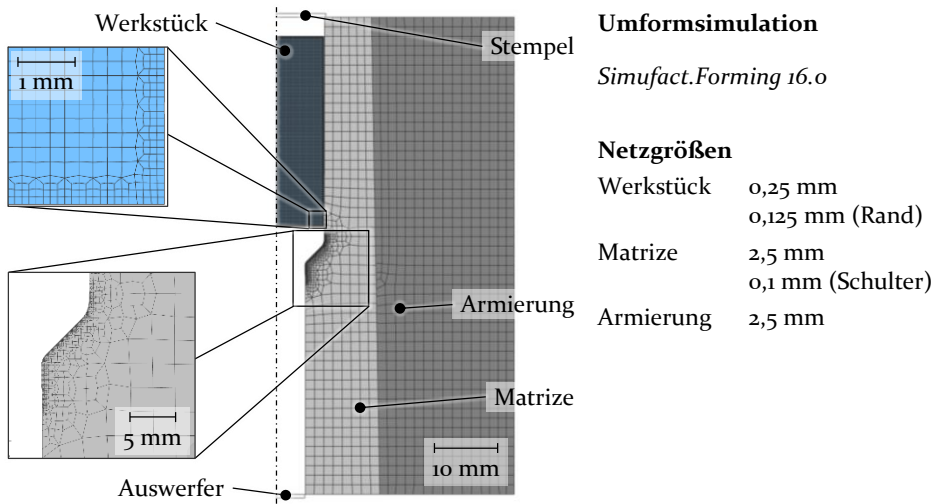


Bild 20: Modellierung der numerischen Umformsimulation

Die Netzgröße in Matrize und Armierung beträgt 2,5 mm, wobei im Kontaktbereich in der Matrizenschulter eine Netzverfeinerung auf 0,1 mm Kantenlänge erfolgt. Im Werkstück wird zur möglichst genauen Abbildung der Umformvorgänge eine Netzgröße von 0,25 mm verwendet, die im Randbereich auf 0,125 mm verringert wird.

5.3.1 Ergebnisse der Umformsimulation

Die Bauteilherstellung wird durch die Simulation der Umformung des Rohlings in der vorgespannten Matrize abgebildet. Zunächst wird die Eigenspannungsentstehung bei der Umformung untersucht. Dazu werden nach der Formgebung sämtliche numerisch abgebildeten Werkzeuge, also Stempel, Matrize und Armierung nacheinander entfernt. Aus der Neuberechnung des Spannungsgleichgewichts im freigestellten Bauteil resultiert der in Bild 21 dargestellte Eigenspannungszustand.

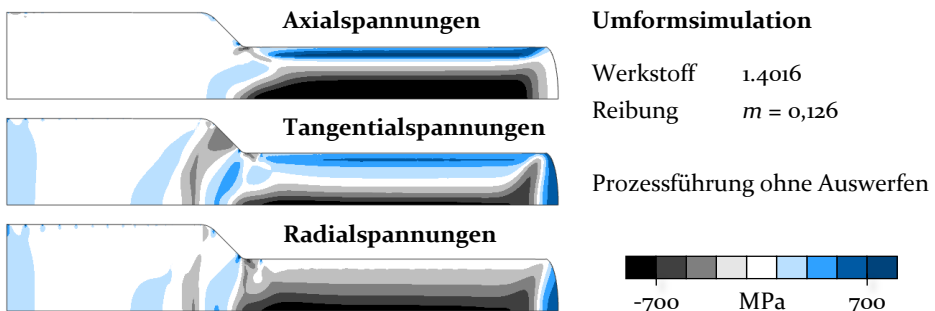


Bild 21: Aus der Umformung resultierender Eigenspannungszustand

Sowohl in Axial- als auch in Tangentialrichtung liegen im Kern Druckeigenspannungen vor, die mit Zugeigenspannungen im Randbereich im Gleichgewicht sind. Das Zugeigenspannungsmaximum liegt dabei unter der Oberfläche. In Radialrichtung liegen ebenfalls Druckeigenspannungen im Kern vor, welche nach außen hin abnehmen. Der Rand ist aufgrund der freien Oberfläche in radialer Richtung spannungsfrei. Im nicht umgeformten Bereich werden geringe Eigenspannungen in Tangential- und Radialrichtung berechnet, welche auf kontaktbedingte Fehler beim Lösen der Werkzeuge in der Simulation zurückzuführen sind.

Qualitativ entspricht diese Spannungsverteilung typischen beim Voll-Vorwärts-Fließpressen vorliegenden Eigenspannungszuständen [60]. Die in der Umformsimulation berechneten oberflächennahen Eigenspannungen sind in Bild 22 dargestellt.

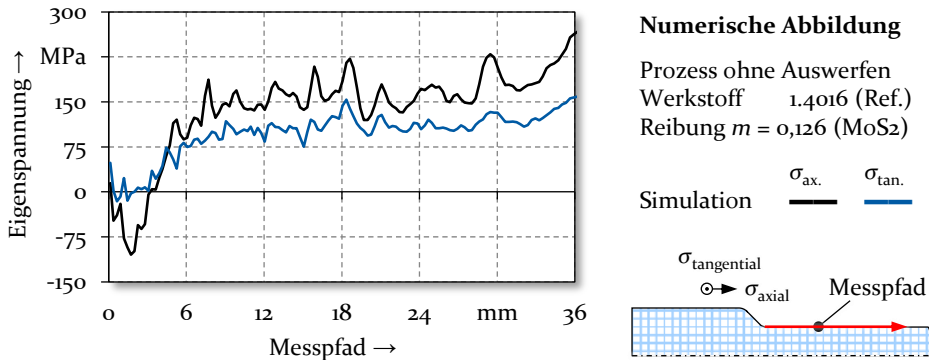


Bild 22: Numerisch ermittelte bei der Umformung ohne Auswerfen entstehende oberflächennahe Bauteileigenspannungen

In der Simulation liegen wie im Experiment oberflächennahe Zugeigenspannungen vor, die mit zunehmendem Abstand vom Fließbund zunächst zunehmen und entlang des Schafts konstant bleiben. Während die Axialspannungen auf einem Niveau von 200 MPa sind, liegen in Tangentialrichtung Zugspannungen um 120 MPa vor. An der Spitze tritt ein geringfügiger Anstieg der Eigenspannungen auf, welcher auf die Unstetigkeit im Bereich der ursprünglichen Rohlingskante zurückzuführen ist, welche sich im zylindrischen Teil des umgeformten Schafts befindet.

Einfluss des Auswerfens

Nach der Umformung erfolgt der Auswerfvorgang entgegen der Stempelrichtung. Durch die Modellierung von Matrize und Armierung als elastische Körper werden durch die Matrizenauflfederung bedingte Effekte

mit abgebildet. Der nach dem Auswerfen im Werkstück vorliegende berechnete Eigenspannungszustand ist in Bild 23 abgebildet.

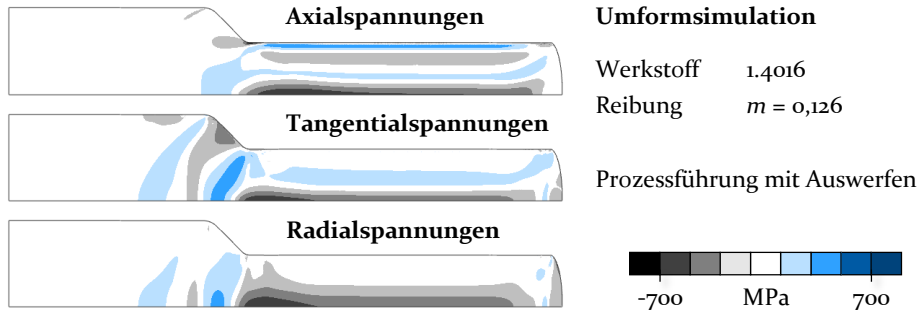


Bild 23: Berechneter Bauteileigenspannungszustand nach dem Auswerfen

In Axialrichtung ist ein ausgeprägter Einfluss des Auswerfvorgangs zu erkennen. Während das Zugeigenspannungsmaximum betragsmäßig reduziert und nach außen verschoben wird, entsteht etwa 2 mm unter der Bauteiloberfläche zusätzlich ein lokales Druck- sowie ein weiteres lokales Zugspannungsmaximum in einer Tiefe von 4,5 mm. In Tangentialrichtung wird das Zugspannungsmaximum von der Oberfläche in das Bauteilinnere verschoben. Die Axialeigenspannungen werden verringert. Die qualitative Bewertung der Eigenspannungsänderung erfolgt anhand der Eigenspannungen im quasistatischen Bereich des umgeformten Schafts, welche in Bild 24 dargestellt sind.

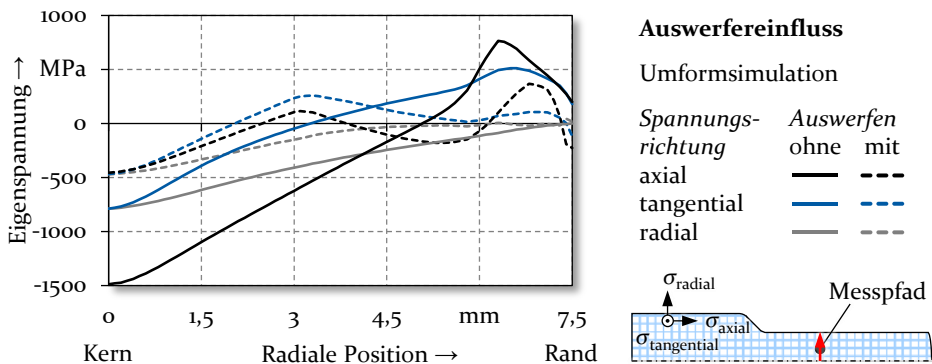


Bild 24: Berechnete quantitative Eigenspannungsverläufe im umgeformten Schaft

In Axialrichtung werden die Druckspannungen im Kern von etwa 1450 MPa auf 500 MPa reduziert. Das Zugeigenspannungsmaximum 1 mm unter der Oberfläche wird von 750 MPa auf 360 MPa verringert und liegt etwa 0,5 mm näher am Rand. Zudem entstehen lokale Spannungsmaxima bei

2 mm und 4 mm unter der Oberfläche. Die nach dem Umformen in Tangentialrichtung vorhandenen Eigenspannungen werden ebenfalls deutlich reduziert. Ähnlich wie in Axialrichtung werden sie randnah abgebaut und um ein lokales Druckspannungsmaximum erweitert. Im Kern ist eine markante Reduktion gegeben. Die Radialspannungen werden bis in eine Tiefe von 3 mm vollständig abgebaut. Im Kernbereich liegt analog zu den beiden anderen Spannungskomponenten eine Reduktion vor. Zur Abbildung des Auswerfereinflusses sind in Bild 25 die Spannungsverläufe an der Oberfläche im quasistatischen Bereich des umgeformten Schafts gezeigt.

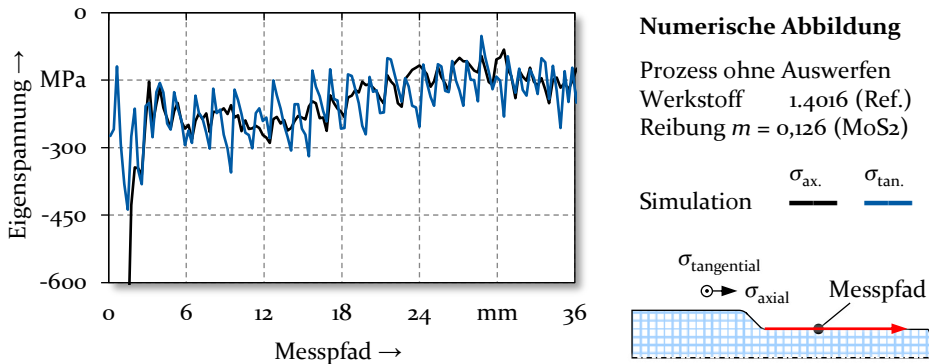


Bild 25: Bauteileigenspannungen in der Oberfläche des umgeformten Schafts nach dem Auswerfen

Während nach der Berechnung des Umformvorgangs Zugeigenspannungen in der Bauteiloberfläche vorliegen, bewirkt das Auswerfen in der Simulation eine Verschiebung des Eigenspannungswertes in den Druckbereich entlang des umgeformten Schafts. Die Ursache für diese ausgeprägte Eigenspannungsänderung bei der Simulation des Auswerfens ist der in Bild 26 dargestellte Umformgradverlauf im umgeformten Schaft.

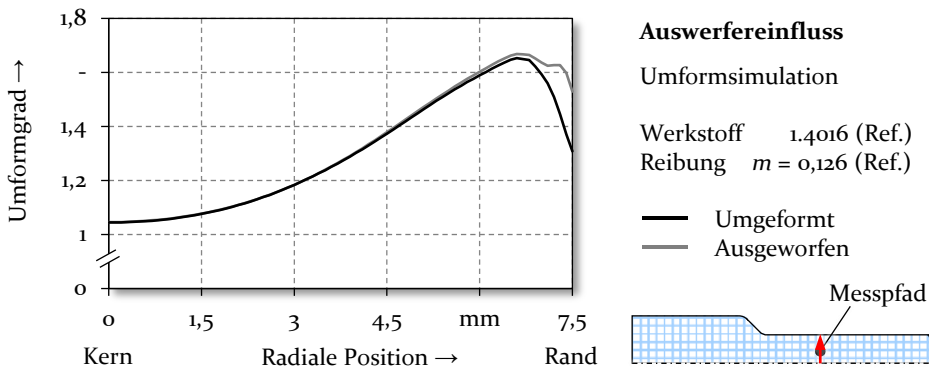


Bild 26: Beeinflussung des Umformgrads im umgeformten Schaft durch das Auswerfen

Nach der Umformung liegt im Kern ein Umformgrad von 1,04 vor, was geringfügig vom theoretischen Wert von 1,02 abweicht. Zum Rand hin ist ein Anstieg zu erkennen, wobei der maximale Wert von 1,63 etwa 1 mm unter der Oberfläche liegt. An der Oberfläche liegt ein Umformgrad von 1,24 vor. Durch das Auswerfen entgegen der Stempelrichtung wird dieser Wert auf 1,44 erhöht. Die plastische Deformation beim Auswerfen ist auf die Randschicht beschränkt. In einer Tiefe von 0,7 mm ist der Umformgrad um 0,02 erhöht, in einer Tiefe von 1,5 mm um 0,01. Das Umformgradmaximum ist mit einem Wert von 1,64 gegenüber der umgeformten Variante geringfügig erhöht.

Diskussion und Bewertung

In der Literatur werden für Fließpressvorgänge mit anderem Prozessaufbau grundlegend ähnliche Vorgänge beschrieben. Tekkaya [60] hat das Kaltfließpressen des Einsatzstahls Ck15 (1.1141) mit einem Umformgrad von $\varphi = 0,7$ und einem Matrizenöffnungswinkel von $2\alpha = 60^\circ$ numerisch untersucht. Mit einer Anfangsfließspannung von 240 MPa liegen ähnliche mechanische Eigenschaften vor wie bei dem in dieser Arbeit verwendeten Stahl 1.4016. Aus der Umformung resultieren qualitativ ähnliche Eigenspannungsverläufe wie hier gezeigt. Im Kern liegen Druckspannungsmaxima in axialer, tangentialer und radialer Richtung vor, die quantitativ jedoch deutlich geringer als in den hier gezeigten Untersuchungen sind. Nahe der Oberfläche werden Zugeigenspannungen in Axial- und Tangentialrichtung beschrieben, deren Maximum näher an der Oberfläche liegt. Durch das Auswerfen werden die Druckspannungen im Kern in alle Raumrichtungen reduziert. Nahe der Oberfläche werden die axialen Zugeigenspannungen vollständig abgebaut, während die Tangentialspannungen von etwa 400 MPa auf 150 MPa reduziert werden. Anders als bei den Untersuchungen in dieser Arbeit weisen die Axialspannungen nach dem Auswerfen lediglich ein Zugeigenspannungsmaximum entlang des Radius auf. In den Untersuchungen von Tekkaya wurde zudem der Einfluss der Netzgröße auf die Berechnungsergebnisse gezeigt. Mit zunehmender Elementanzahl, also abnehmender Netzgröße tritt eine zunehmende Verschiebung des oberflächennahen Zugeigenspannungsmaximums in das Bauteilinnere auf, was dem in dieser Arbeit nachgewiesenen Eigenspannungszustand entspricht.

Zucko [66] hat das Voll-Vorwärts-Fließpressen von weichgeglühtem Stahl C15 mit Matrizenöffnungswinkeln zwischen $2\alpha = 30^\circ$ und $2\alpha = 150^\circ$ und Umformgraden φ zwischen 0,5 und 1,6 numerisch untersucht. Simulationen mit $2\alpha = 90^\circ$ und $\varphi = 0,9$ zeigen nach der Umformung einen linearen

Tangentialspannungsverlauf entlang des Radius. Der Axialspannungsverlauf weist eine gute qualitative Übereinstimmung mit dem in dieser Arbeit berechneten Verlauf auf. Nach dem Auswerfen liegen Eigenspannungsverläufe vor, die qualitativ gut mit den in Bild 24 gezeigten übereinstimmen. Druckeigenspannungen im Kern gehen dabei zum Rand hin in Zugeigenspannungen über. Das Zugeigenspannungsmaximum liegt jeweils etwa 0,5 mm unter der Oberfläche. Zwischen dem globalen Minimum und dem globalen Maximum liegen ein lokales Maximum und ein lokales Minimum.

Fazit

Die Umformsimulation bildet die Oberflächeneigenspannungen nicht zufriedenstellend ab. Während im Experiment ausgeprägte Zugeigenspannungen vorliegen, treten bei der Berechnung Druckeigenspannungen auf. Die Eigenspannungsverläufe im Bauteilinneren stimmen teilweise mit den in der Literatur beschriebenen überein und sind insofern als plausibel zu bewerten. Zur Erhöhung der Abbildungsgenauigkeit der Simulation an der Oberfläche erfolgt daher eine Untersuchung der numerischen Einflussgrößen, um so eine Kalibrierung des Modells und eine realitätsnahe Abbildung der Eigenspannungszustände zu ermöglichen.

5.3.2 Untersuchung numerischer Einflussgrößen

Zur Erhöhung der Abbildungsgenauigkeit der Simulation sind Kenntnisse zu deren Beeinflussung notwendig. Vor diesem Hintergrund erfolgt eine Untersuchung der Auswirkungen numerischer Einflussgrößen. Dazu werden zentrale Parameter geändert und die resultierenden Einflüsse auf die Abbildungsgenauigkeit untersucht. Die Abbildung der Verfestigung mittels des Materialmodells bestimmt maßgeblich die im Bauteil vorliegende Verfestigungsinhomogenität und damit die Eigenspannungen. Über die Netzgrößen wird die örtliche Auflösung der Simulationsergebnisse festgelegt. Die Werkzeugmodellierung bestimmt die Rückfederung des Umformwerkzeugs und damit die Eigenspannungsbeeinflussung beim Auswerfen. Durch die Reibungsmodellierung wird insbesondere der oberflächennahe Spannungszustand beeinflusst.

Materialmodell

Die Festigkeit und das Verfestigungsverhalten des Werkstoffs beeinflussen die Eigenspannungsentstehung maßgeblich. Die Modellierung der Werkstoffeigenschaften kann daher Einfluss auf die Berechnung des

Umformprozesses haben. Neben dem in der Ausgangsvariante verwendeten isotropen Materialmodell, bei dem die Extrapolation mit der Methode von Hockett-Sherby erfolgt, werden daher die Einflüsse der Verwendung anderer Materialmodelle untersucht. Als weitere isotrope Modelle finden die Extrapolationsmethoden nach Voce und nach Ludwik Anwendung. Wie im Abschnitt 0 gezeigt bilden diese beiden Modelle die obere und untere Grenze der vorhergesagten Verfestigung. Zudem findet ein kombiniert isotrop-kinematisches Materialmodell nach Chaboche Anwendung. Die Ergebnisse sind in Bild 27 abgebildet.

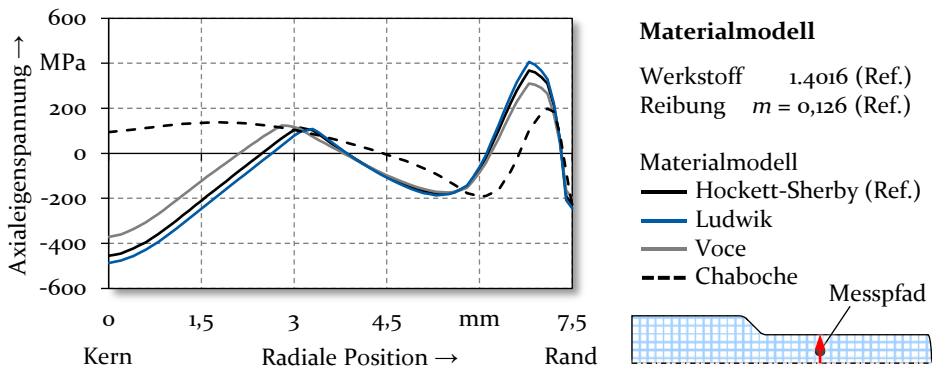


Bild 27: Einfluss des Materialmodells auf den berechneten Axialeigenspannungsverlauf

Aus den Axialeigenspannungsverteilungen ist ein deutlicher Einfluss des für die Berechnung verwendeten Materialmodells zu erkennen. Die isotropen Materialmodelle von Hockett-Sherby, Voce und Ludwik bewirken einen ähnlichen Spannungsverlauf. Mit dem Modell von Voce werden im Vergleich zu den anderen beiden isotropen Modellen betragsmäßig geringere Eigenspannungen berechnet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit diesem Modell bei der Extrapolation auf höhere Umformgrade eine geringere Verfestigung vorhergesagt wird. Aus diesem Grund resultiert das Modell von Ludwik in höheren Spannungsbeträgen, da es geringfügig höhere Festigkeiten vorhersagt als das Modell von Hockett-Sherby. Mit dem kombiniert isotrop-kinematischen Modell von Chaboche ist hingegen ein markant unterschiedlicher Axialeigenspannungsverlauf zu beobachten. Anstelle des Druckeigenspannungsmaximums im Kern treten Zugeigenspannungen, die mit dem sonst beobachteten lokalen Zugeigenspannungsmaximum verschmelzen. Das lokale Druckeigenspannungsmaximum ist etwa 1 mm zum Rand hin verschoben, aber auf einem ähnlichen Niveau wie bei den isotropen Modellen. Das oberflächennahe Zugeigenspannungsmaximum ist geringer ausgeprägt und etwa 0,5 mm näher an der

Oberfläche. In einer etwa 0,5 mm tiefen Randschicht liegen vergleichbare Spannungszustände vor.

Diese Unterschiede der Berechnungsergebnisse sind zum einen auf die Charakteristiken der Verfestigungsmodellierung zurückzuführen. Im Gegensatz zum isotropen Modell resultiert mit dem kinematischen Ansatz aus einer Lastumkehr eine Reduktion der Fließspannung. Eine weitere mögliche Ursache für die ermittelten Unterschiede liegt in Unsicherheiten bei der Materialcharakterisierung. Die Werkstoffeigenschaften des isotropen Modells konnten experimentell für Dehnungen bis 0,7 ermittelt werden. Aufgrund der Notwendigkeit der Lastumkehr sind die maximal erreichbaren Dehnungen in den Wechsellastversuchen mit 0,07 deutlich geringer. Dies führt zu einer erhöhten Unsicherheit der Berechnungsergebnisse.

Netzgrößen

Die Größe des in der Simulation verwendeten Netzes legt die Auflösung fest, mit welcher die Ergebnisse analysiert werden können. Da insbesondere in randnahen Bereichen in der Umformsimulation ein hoher Spannungsgradient ermittelt wurde, erfolgt eine Untersuchung des Einflusses der Netzgröße auf die Berechnungsergebnisse.

In der Ausgangsvariante wird eine Netzgröße von 0,25 mm verwendet, die im Rand auf 0,125 mm verringert wird. Um den Einfluss der Vernetzung zu identifizieren, wird die Umformung mit einem größeren Netz mit Abmessungen von 0,75 mm im Kern und 0,375 mm am Rand simuliert. Zudem wird der Einfluss einer globalen Netzverfeinerung auf 0,1 mm und einer lokalen Netzverfeinerung auf 0,033 mm im Randbereich untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 28 dargestellt.

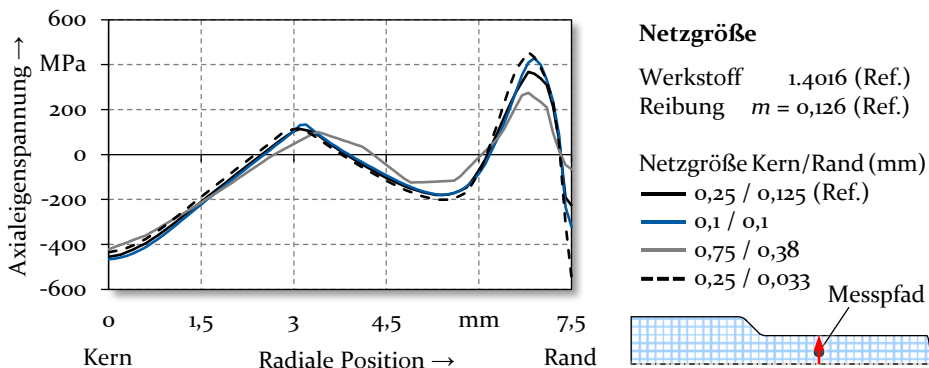


Bild 28: Einfluss der Netzgröße auf die berechneten Eigenspannungen

Grundsätzlich werden mit sämtlichen verwendeten Netzgrößen qualitativ ähnliche Eigenspannungsverteilungen berechnet. Umformung und Auswerfen bewirken ein Druckeigenspannungsmaximum im Kern und ein Zugspannungsmaximum unter der Oberfläche. Zur Oberfläche hin ist bei sämtlichen untersuchten Netzgrößen ein Abfallen der Eigenspannungen zu erkennen. Je geringer die Netzgröße, desto höher sind die in der Bauteiloberfläche nach dem Auswerfen berechneten Druckspannungen. Eine Erhöhung der Netzgröße führt zudem zu einer Verringerung der lokalen Spannungsmaxima, was auf die gröbere Auflösung zurückzuführen ist.

Werkzeugmodellierung

Die Modellierung der formgebenden Werkzeuge beeinflusst deren geometrische Genauigkeit während der Umformung und damit die Eigenspannungsentstehung. Während der Umformung bewirkt der Matrizeninnendruck eine elastische Aufweitung, welche nach dem Wegnehmen der Stempelkraft rückfedert. Dadurch ist der Fließbunddurchmesser während des Auswerfens reduziert, woraus eine weitere Umformung des Bauteils resultiert. Aus diesem Grund wird der Einfluss der Matrizensteifigkeit auf die berechneten Eigenspannungen untersucht.

In der Ausgangsvariante wird das formgebende Werkzeug als elastischer Körper eingebunden, um die bei der Umformung entstehende Aufweitung und daraus resultierende Einflüsse mit abbilden zu können. Matrize und Armierung werden dabei mit einem stahltypischen E-Modul von 210 GPa modelliert. In der Praxis wird die Matrizen- und Armierungsauffederung jedoch durch den zur Verfügung stehenden Raum begrenzt. Hier sind insbesondere das radiale Einbauspiel sowie die axiale Vorspannung relevant. Um die Matrizenauffederung in der Simulation zu regeln, werden die Werkzeuge mit verschiedenen E-Moduln von 500 GPa bis 2000 GPa modelliert. Der Einfluss einer fehlenden Auffederung wird durch eine Simulation mit einem starren Werkzeug ermittelt. Die aus dem Auswerfen resultierenden berechneten Axialspannungen sind in Bild 29 dargestellt.

Eine Änderung der Werkzeugsteifigkeit bewirkt eine ausgeprägte Änderung des Eigenspannungsverlaufs nach der Simulation des Auswerfens. Mit abnehmendem Elastizitätsmodul wird das Zugeigenspannungsmaximum reduziert und der Zugspannungsbereich erweitert. Aufgrund des notwendigen Spannungsgleichgewichts wird das Druckeigenspannungsmaximum im Kern ebenfalls reduziert. Unterhalb 1000 GPa treten lokale Druck- und Zugspannungsmaxima an die Stelle des Zugspannungsbereichs.

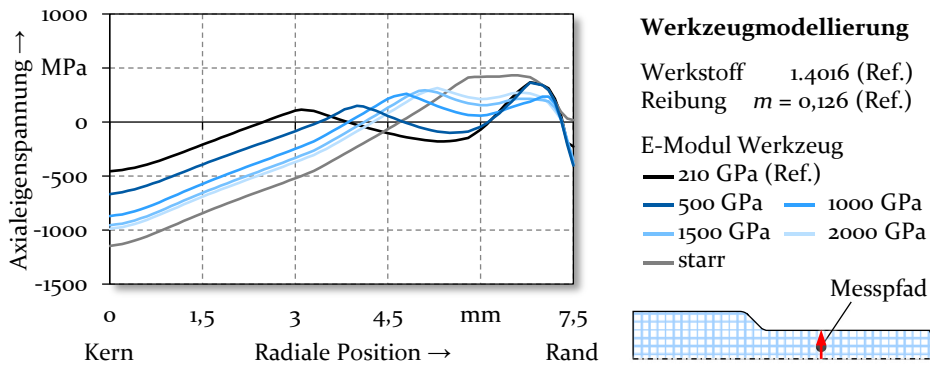


Bild 29: Einfluss der Werkzeugauffederung auf die Bauteileigenspannungen nach dem Auswerfen

Das oberflächennahe Zugeigenspannungsmaximum nimmt mit abnehmender Matrizensteifigkeit zunächst ab und anschließend wieder zu. Diese Eigenspannungsänderungen sind auf die zunehmende Umformung während des Auswerfens zurückzuführen. In Bild 30 ist dazu die Umformgradverteilung nach dem Auswerfen dargestellt.

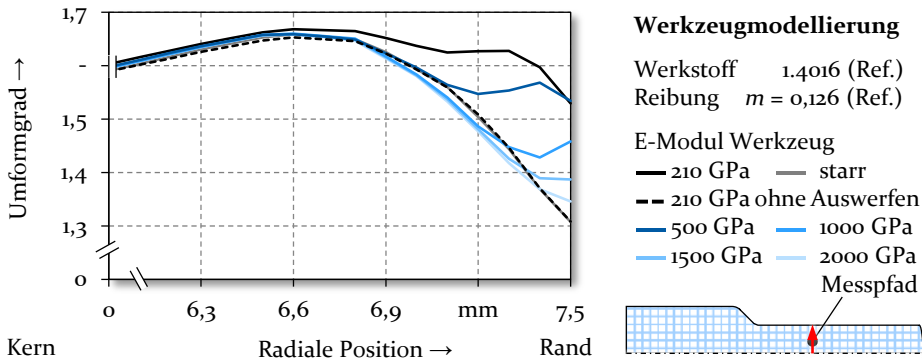


Bild 30: Einfluss der Werkzeugmodellierung auf die berechnete Umformgradverteilung im umgeformten und ausgeworfenen Bauteil

Die Verwendung eines ideal starren Werkzeugs führt dazu, dass der Fließbunddurchmesser während des Auswerfens aufgrund der fehlenden Matrizenrückfederung nicht verringert wird. Die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück bewirkt jedoch einen Widerstand beim Auswerfen. Die Querdehnung des Werkstücks aus dem elastischen Aufstauchen führt während des Auswerfens trotz Verwendung eines starren Werkzeugs zu einer geringfügigen Änderung des Bauteileigenspannungszustands. Der Umformgradverlauf nach Umformung und Auswerfen mit starrem Werkzeug entspricht größtenteils dem Spannungszustand nach der Umformung

mit einem elastischen Werkzeug. Ausgehend von einem starren Werkzeug führt eine Verringerung des Elastizitätsmoduls des Werkzeugs zu einer Erhöhung der elastischen Auffederung. Daraus resultiert eine zunehmende plastische Deformation des Bauteils während des Auswerfvorgangs. Diese zusätzliche Umformung ist auf eine bis zu 1 mm dicke Randschicht beschränkt. Mit abnehmendem E-Modul wird zudem das Bauteilinnere stärker umgeformt. Dies begründet die dargestellte Entstehung der lokalen Spannungsmaxima sowie die Verschiebung des Zugeigenspannungsbereichs in das Bauteilinnere.

Reibung

Oberflächennahe Schubspannungen tragen mit zur Eigenspannungsentstehung bei. Eine Beeinflussung der Reibverhältnisse führt zu einer Veränderung des oberflächennahen Spannungszustands während der Umformung und dem Auswerfen [194]. Aus diesem Grund erfolgt eine Untersuchung des Einflusses der Reibungsmodellierung während der numerischen Umformsimulation.

In der Ausgangsvariante wird ein kombiniertes Reibmodell eingesetzt, in dem für geringe Flächenpressungen das Coulombsche und für höhere Kontaktdrücke das Reibfaktormodell verwendet wird. Für den Coulombschen Reibanteil ist dabei eine Reibzahl von $\mu = 0,06$ definiert, der Reibfaktor beträgt $m = 0,126$, wie im DCE-Test identifiziert. Zur Identifikation des Einflusses des verwendeten Reibmodells auf das Berechnungsergebnis werden verschiedene Varianten simuliert. Neben dem kombinierten Modell erfolgt je eine Simulation, in der nur einer der Ansätze verwendet wird. Zudem besteht in *Simufact.Forming* die Möglichkeit der Auswahl eines automatischen Modus. Im automatischen Spezifikationsmodus ist eine qualitative Einstellung der Reibverhältnisse zwischen Haften bei einem Wert von 1 und der Reibungsfreiheit bei 0 möglich, wobei ein Skalierungsparameter von 0,126 festgelegt wird. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Bild 31 gezeigt.

In der Referenzvariante mit kombiniertem Reibungsmodell wird der gleiche Eigenspannungszustand berechnet wie bei ausschließlicher Verwendung des Reibfaktormodells. Eine Verwendung des Reibzahlmodells liefert geringere Druckeigenspannungen im Kern, aber ein etwa 50 MPa höheres Zugeigenspannungsmaximum im Randbereich. An der Bauteiloberfläche werden mit Reibfaktor-, Reibzahl- und kombinierter Modellierung ausgeprägte Druckeigenspannungen von etwa -250 MPa berechnet.

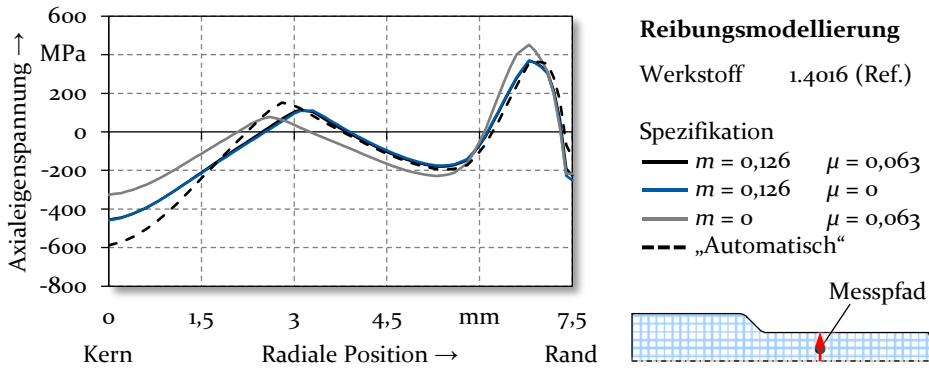


Bild 31: Einfluss der Reibmodellierung auf die Axialeigenspannungsverteilung

Bei Verwendung des automatischen Modus treten höhere Druckeigenspannungen im Kern, eine Verschiebung des lokalen Zugspannungsmaximums zum Kern hin und etwas geringere Druckeigenspannungen an der Bauteiloberfläche auf. Dies ist auf die Reibungsmodellierung im automatischen Modus zurückzuführen, in welchem Reibfaktoren aus drei vordefinierten Tabellen eingesetzt werden. Bei „guten“ Schmierungsverhältnissen mit einem Skalierungsparameter von 0,1 wird ein Reibfaktor von 0,05 verwendet, bei „mittleren“ mit 0,4 wird $m = 0,12$ eingesetzt. Bei Verwendung eines Skalierungsparameters von 0,126 wird erfolgt eine lineare Interpolation, weshalb ein Reibfaktor von 0,056 verwendet wird. Diese Ergebnisse zeigen, dass der eigenspannungsbezogene Einfluss der Reibungsmodellierung zum Großteil auf das Bauteilinnere begrenzt ist. Lediglich die Verwendung des automatischen Spezifikationsmodus führt zu einer Beeinflussung des berechneten oberflächennahen Eigenspannungszustands.

5.3.3 Validierung

Anhand des Vergleichs numerischer und experimenteller Ergebnisse erfolgt eine Validierung des Umformsimulationsmodells. Zur Bewertung der Abbildungsgenauigkeit werden charakteristische Prozess- und Bauteilgrößen gegenübergestellt.

Kraft-Weg-Verlauf

Der Prozess der Bauteilherstellung ist in die beiden Schritte Umformen und Auswerfen untergliedert. Die notwendigen Prozesskräfte stellen einen gewichtigen Faktor in der Bauteil-, Werkzeug- und Prozessauslegung dar. Die zentralen Messwerte sind die Stempelkraft, welche für die Umformung

des Bauteils notwendig ist, und die Auswerferkraft zum Entfernen des Werkstücks aus dem Werkzeug. Diese experimentell ermittelten und numerisch simulierten Werte dieser beiden Kräfte sind in Bild 32 einander gegenübergestellt.

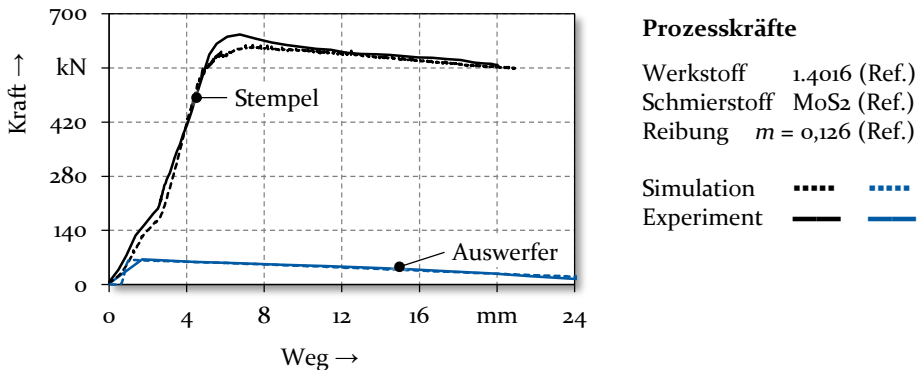


Bild 32: Vergleich von Stempel- und Auswerferkräften in Experiment und Simulation

Die Stempelkräfte weisen in Simulation und Experiment einen sehr ähnlichen Verlauf auf. Die Maximalkraft wird in der Simulation mit 619 kN gegenüber dem Experiment mit 644 kN geringfügig unterschätzt. Beim Kraftanstieg während des Füllens der Schulter und dem Kraftabfall während der Umformung sind die Abweichungen jedoch gering. Die Abnahme der Auswerferkraft mit zunehmendem Weg ist auf den Kontakt zwischen dem nicht umgeformten Schaft und der konisch ausgeführten Matrizenbohrung zurückzuführen. Der Verlauf der Stempelkraft entspricht qualitativ dem aus der Literatur bekannten [33]. Die Unterschiede zur Simulation sind auf den Prozessbeginn beschränkt. Die am Auswerfer gemessene Kraft zeigt in Simulation und Experiment ähnliche Maximalkräfte von 66 kN und 64 kN. Dies zeigt, dass experimentell benötigte Umform- und Prozesskräfte mit der Simulation gut abgebildet werden können.

Geometrie

Die zweidimensionalen Ergebnisse der Umformsimulation werden zum Vergleich mit den Ergebnissen des Realversuchs in eine dreidimensionale Geometrie überführt. Die Geometriebestimmung der physisch hergestellten Bauteile erfolgt mittels des Streifenprojektionsverfahrens mit dem Messsystem GOM Atos. Die Ergebnisse sind in Bild 33 gegenübergestellt.

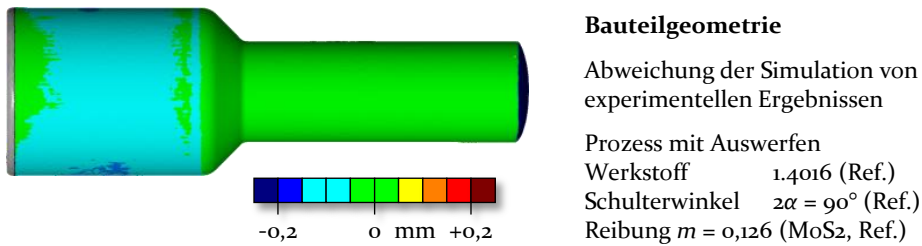


Bild 33: Abweichung der simulierten Bauteilgeometrie von den experimentellen Ergebnissen

Die berechnete Geometrie zeigt eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen. Die Abweichung beträgt im Durchmesser des umgeformten Schafts unter 0,05 mm. Im nicht umgeformten Bereich treten mit bis zu 0,1 mm etwas höhere Abweichungen auf, welche auf die Durchmessertoleranzen des Ausgangsmaterials zurückzuführen sind.

Verfestigungsverteilung

Der umformbedingte Stofffluss führt zu einer definierten Dehnungsverteilung im umgeformten Schaft, die die Eigenspannungsentstehung bestimmt. Eine experimentelle Messung der Dehnungsverteilung ist wie eine fein aufgelöste Messung der lokalen Werkstofffestigkeit nicht möglich. Die Mikrohärtigkeit als Messgröße für den Eindringwiderstand bildet jedoch die durch die Umformung erfahrene Kaltverfestigung ab. In Bild 34 ist die experimentell ermittelte Mikrohärtigkeitsverteilung der simulativ berechneten Verteilung der Streckgrenze gegenübergestellt.

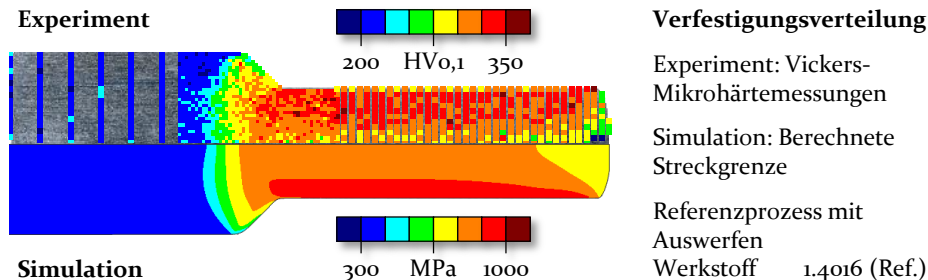


Bild 34: Vergleich der Verfestigungsverteilung im umgeformten Bauteil, Experiment: Mikrohärtemessungen nach Vickers, Simulation: Streckgrenze

Qualitativ liegen in Simulation und Experiment ähnliche Verteilungen vor. Im nicht umgeformten Bereich weisen beide eine homogene Festigkeit auf. Vor dem Schulterbereich tritt eine zunehmende Verfestigung auf, die im Kernbereich eher und im Randbereich später einsetzt. Das Gleiten der Oberflächen im Bereich der Matrizenschulter und das daraus resultierende

Abfallen der Härte zum Randbereich hin wird in der Simulation den experimentellen Ergebnissen entsprechend abgebildet. Entlang des umgeformten Schafts liegen in Axialrichtung homogene Eigenschaften vor, während zum Rand hin eine Zunahme der Verfestigung abgebildet wird. Die in der Bauteilspitze geringere Verfestigung wird in der Simulation wiedergegeben.

Eigenstressungen

Im Fokus dieser Arbeit stehen die im Bauteil verbleibenden Eigenstressungen. Sie werden bei der Bauteilherstellung sowohl während des Umformens als auch während des Auswerfens aus der Matrize erzeugt. In Bild 35 sind die numerisch berechneten Eigenstressungen den experimentell bestimmten gegenübergestellt.

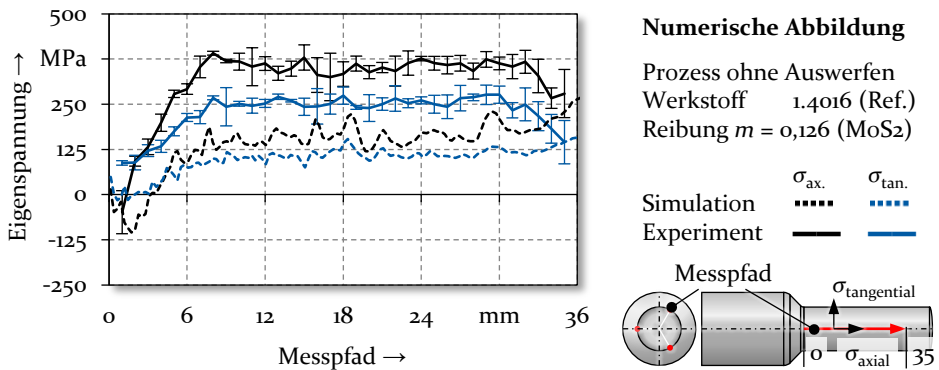


Bild 35: Vergleich von Simulation und Experiment der bei der Umformung ohne Auswerfen entstehenden Bauteileigenstressungen

Übereinstimmend zu den experimentellen Ergebnissen verbleiben in der Simulation nach der Umformung oberflächennahe Zugeigenstressungen, deren Verlauf qualitativ übereinstimmt. Während die Axialspannungen im Experiment auf einem Niveau von 350 MPa liegen, werden in der Simulation Werte um 200 MPa berechnet. In Tangentialrichtung entstehen in der Simulation Zugspannungen um 120 MPa, welche im Experiment um 250 MPa liegen. Während die qualitativen Verhältnisse eine gute Übereinstimmung aufweisen, liegen die berechneten Werte deutlich unter den experimentell identifizierten. Diese Unterschiede werden durch die Simulation des Auswerfens weiter verstärkt, wie in Bild 36 dargestellt.

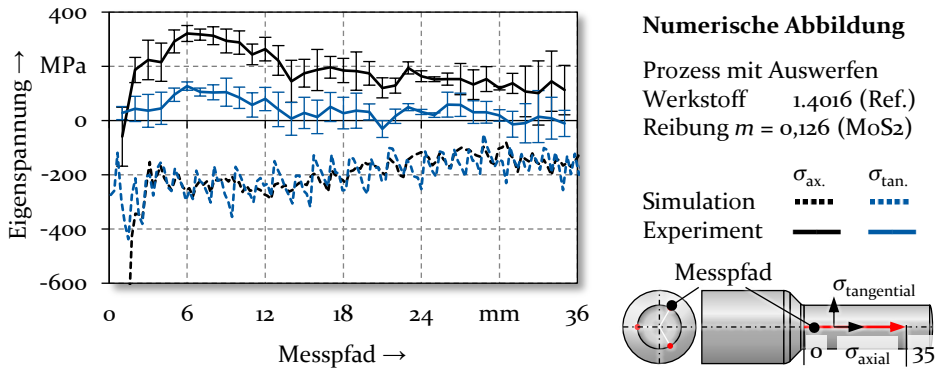


Bild 36: Bauteileigenspannungen in der Oberfläche des umgeformten Schafts nach dem Auswerfen

Im Experiment verringert das Auswerfen die oberflächennahen Eigenspannungen im umgeformten Schaft. In Axial- und Tangentialrichtung tritt dabei eine betragsmäßig ähnliche Reduktion um etwa 200 MPa auf. In der Simulation hingegen werden beide Eigenspannungskomponenten um etwa 300 MPa bis 350 MPa reduziert, so dass nach dem Auswerfen Druckeigenspannungen im umgeformten Schaft berechnet werden. Eine mögliche Ursache für die Abweichungen liegt in der Vergleichbarkeit von Simulation und experimenteller Eigenspannungsbestimmung. Mit der röntgenographischen Spannungsbestimmung wird der Eigenspannungswert als Mittelwert über einen Volumenbereich bestimmt. Im vorliegenden Fall ist dies ein kreisförmiger Bereich mit einem Durchmesser von etwa 0,8 mm und einer maximalen Eindringtiefe von etwa 0,005 mm. In der Simulation erfolgt die Spannungsbestimmung anhand des äußeren Volumenelements. Dies weist mit je 0,125 mm zwar eine geringere Ausprägung in Längsrichtung, aber auch eine größere Tiefe auf. Wie in Abschnitt 5.3.2 gezeigt, führt eine Verringerung der oberflächennahen Netzgröße jedoch zu tendenziell höheren Druckeigenspannungen und daher größeren Abweichungen zwischen Simulation und Experiment.

Fazit

Die Simulation bildet die grundlegenden Vorgänge bei der Umformung hinreichend genau ab. Zur Prozess- und Bauteilauslegung notwendige Ergebnisse wie Kraft-Weg-Verläufe und Bauteilgeometrie werden mit geringen Abweichungen zum Experiment modelliert. Grundlegende Vorgänge der Verfestigung während der Umformung werden nachvollziehbar berechnet und entsprechen den im Experiment auftretenden Verteilungen.

Eigenspannungen in der Bauteiloberfläche werden hingegen in der Simulation unzureichend genau abgebildet. Die hohe Sensitivität der simulierten oberflächennahen Spannungen limitiert die Aussagekraft numerisch ermittelter Eigenspannungszustände. Die fehlende Möglichkeit, Eigenspannungszustände im gesamten Bauteilvolumen mit vertretbarem Aufwand zu charakterisieren, erschwert die Validierung des Modells zusätzlich. Das aufgebaute Umformsimulationsmodell ist daher zur Analyse der Oberflächeneigenspannungen weniger, für die Untersuchung grundlegender werkstofflicher Vorgänge jedoch gut geeignet.

6 Zielgerichtete Eigenspannungseinstellung

Eigenspannungen haben das Potential, die Bauteileigenschaften sowohl positiv als auch negativ zu beeinflussen. Zur Verbesserung des Betriebsverhaltens sind dabei Eigenspannungszustände geeignet, die den im Betrieb wirkenden Lastspannungen entgegenwirken. Um einen definierten Eigenspannungszustand während der Umformung in das Bauteil einzubringen, ist eine Anpassung der zugrundeliegenden Prozesse notwendig. Zentraler Untersuchungsgegenstand in diesem Kapitel sind grundlegende Methoden, welche mit möglichst geringen Prozesseingriffen eine Steuerung der Bauteileigenspannungen erlauben. Die hier verfolgten Ziele sind die Identifikation relevanter Steuer- und Störgrößen zur Eigenspannungseinstellung sowie das Ableiten von Wirkbeziehungen zwischen diesen Größen. Die in diesem Kapitel untersuchten Parameter sind in Bild 37 gezeigt.

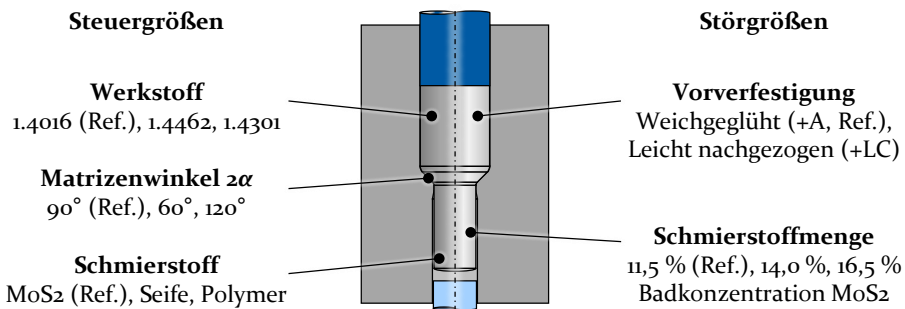


Bild 37: Untersuchte Einflussgrößen zur zielgerichteten Eigenspannungseinstellung

Zunächst sollen Steuergrößen zur gezielten Beeinflussung des bei der Umformung entstehenden Bauteileigenspannungszustands identifiziert werden. Ausgehend vom Referenzprozess werden zunächst grundlegende Wirkmechanismen bei der Anpassung einzelner Prozessparameter charakterisiert. Der Bauteilwerkstoff beeinflusst durch seine Festigkeit und sein Verfestigungsverhalten die Eigenspannungsentstehung während der Umformung und dem Auswerfen. Die Matrizengeometrie legt zusammen mit den tribologischen Bedingungen den Stofffluss fest und dadurch die Verfestigungsverteilung im hergestellten Bauteil. Anhand des Schmierstoffs ist zudem während der Umformung eine Änderung des oberflächennahen Spannungszustands möglich, was eine Beeinflussung der Eigenspannungen nahelegt. Im vorhergehenden Kapitel wurde ein maßgeblicher Einfluss des Auswerfvorgangs zur Eigenspannungsentstehung identifiziert. Weitere Arbeiten bestätigen die Relevanz der

Matrizenrückfederung während des Auswerfens [195]. Zu deren Untersuchung notwendige aktive Armierungssysteme stellen jedoch einen hohen Werkzeugaufwand dar, weshalb die Matrizenrückfederung kein Teil dieser Untersuchungen ist und konstant gehalten wird.

Um ein prozesssicheres Einbringen definierter Eigenspannungszustände zu gewährleisten, sollen zudem die Einflüsse typischer Störgrößen analysiert werden. Eine Änderung der Vorverfestigung kann die Festigkeitsverteilung und dadurch den Eigenspannungszustand beeinflussen. Weiterhin werden Einflüsse der Schmierstoffbeschichtung untersucht.

6.1 Einfluss des Bauteilwerkstoffs

Zur Untersuchung des Werkstoffeinflusses wird der Umformprozess neben dem Referenzwerkstoff 1.4016 mit dem austenitischen Stahl 1.4301 und dem ferritisch-austenitischen Duplex-Stahl 1.4462 durchgeführt. Analog zum Referenzwerkstoff wurden zur Bestimmung der Festigkeit und der Verfestigungseigenschaften Druckversuche nach DIN 50106 durchgeführt. In Bild 38 sind die so bestimmten Druckfließkurven der verwendeten Werkstoffe dargestellt.

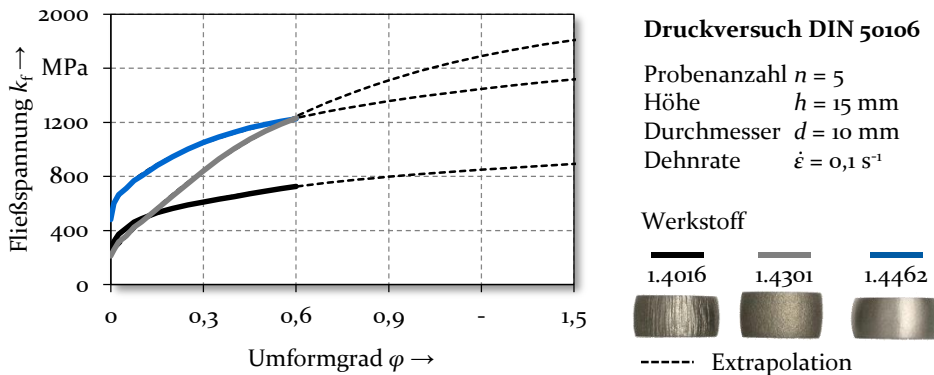


Bild 38: Fließkurven der verwendeten Werkstoffe aus dem Druckstauchversuch nach DIN 50106

Der ferritische Referenzwerkstoff 1.4016 weist mit 263 MPa die geringste Anfangsfließspannung auf. Bei einem Umformgrad von 0,5 beträgt die Fließspannung 691 MPa. Im austenitischen Stahl 1.4301 liegt der Fließbeginn mit 227 MPa auf einem ähnlichen Niveau, bei einem Umformgrad von 0,5 weist er jedoch bereits 1135 MPa Fließspannung auf. Der ferritisch-austenitische Duplex-Stahl 1.4462 beginnt bei einer deutlich höheren Spannung von 489 MPa zu plastifizieren, bei $\phi = 0,5$ liegt die Fließspannung bei

1185 MPa. Die Stähle 1.4016 und 1.4462 zeigen unterschiedliche Festigkeiten, aber ein ähnliches Verfestigungsverhalten. Im rein austenitischen Stahl 1.4301 tritt im Gegensatz dazu eine stärkere Verfestigung auf. Zur quantitativen Beschreibung des Verfestigungsverhalten wurden die experimentell bestimmten Fließkurven mit dem *Hockett-Sherby*-Modell extrapoliert. Die identifizierten Parameter sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Parameter der Hockett-Sherby-Funktion für die verwendeten Werkstoffe

	X6Cr17 1.4016	X2CrNiMoN22-5-3 1.4462	X5CrNi18-10 1.4301
$k_{f,o}$ / MPa	263	489	227
$k_{f,s}$ / MPa	1217	2011	2059
m / -	0,8670	0,8962	1,3394
n / -	0,5276	0,5638	0,9823

Für die Werkstoffe 1.4016 und 1.4462 sind unterschiedliche Anfangs- und Sättigungsfließspannungen zu erkennen. Die Unterschiede der Werkstoffparameter m und n sind gering, weshalb die Kurven eine ähnliche Form auf einem unterschiedlichen Festigkeitsniveau aufweisen. Der austenitische Stahl 1.4301 zeigt hingegen ein anderes Verfestigungsverhalten. Während die Anfangsfließspannung in einem ähnlichen Bereich wie beim ferritischen 1.4016 liegt, ist die Sättigungsfließspannung im Bereich des Duplex-Stahls 1.4462. Dies erklärt auch die stärkere Kaltverfestigung des Werkstoffs, die sich in höheren Werten der Werkstoffparameter m und n widerspiegeln.

Diese Untersuchungen zum Werkstoffverhalten bilden die Grundlage für die Analysen zur werkstoffbedingten Eigenspannungsbeeinflussung. Um die Eigenspannungsanalysen an mehrphasigen Werkstoffen durchführen zu können, ist zunächst eine Methode zur Bestimmung der Makroeigenspannungen notwendig.

6.1.1 Eigenspannungsbestimmung in mehrphasigen Stählen

Die röntgenographische Spannungsanalyse basiert auf charakteristischen Beugungswinkeln von Röntgenstrahlung an den Gitterebenen polykristalliner Werkstoffe. Im kubisch-raumzentrierten Gitter liegen andere Atomabstände vor als im kubisch-flächenzentrierten Kristall, weshalb

Röntgenstrahlung unterschiedlich gebeugt wird. In mehrphasigen Werkstoffen ist die röntgenographische Spannungsbestimmung daher aufgrund der unterschiedlichen Bragg-Winkel lediglich in den einzelnen Phasen möglich. Im verwendeten Duplex-Stahl 1.4462 liegen eine austenitische und eine ferritische Phase zu ungefähr gleichen Teilen vor. Röntgenographische Methoden erlauben die Spannungsbestimmung jedoch nur phasenabhängig. Zur Bestimmung einer Makrospannung aus den phasenspezifischen Mikrospannungen wird von Eigenmann et al. [93] eine Gewichtung nach Phasenanteilen vorgeschlagen.

Dieses Verfahren wird für den verwendeten Duplex-Stahl 1.4462 zunächst validiert. Zunächst erfolgt dazu eine Eigenspannungsbestimmung an einem unbeschichteten und unbelasteten Umformrohling. Anschließend wird der Rohling definiert belastet und die resultierende Gesamtlast, bestehend aus Eigen- und Lastspannungen, röntgenographisch bestimmt. Das Prinzip zur Einbringung einer definierten Vorspannung ist in Bild 39 dargestellt.

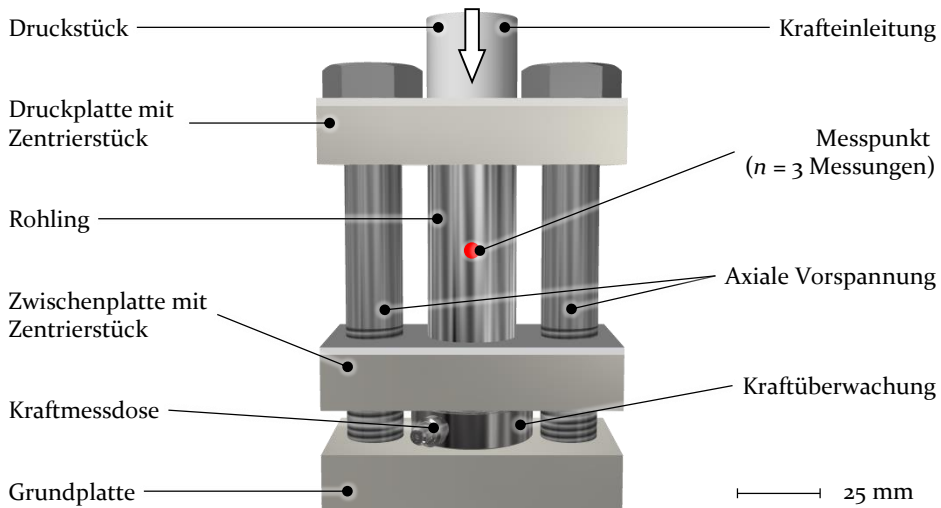


Bild 39: Transportable Vorrichtung zur axialen Vorspannung

Durch eine elektromechanische Prüfmaschine wird über das Druckstück eine definierte axiale Drucklastspannung auf den Prüfkörper aufgebracht, welche im elastischen Bereich liegt. Zur Gewährleistung einer zentrischen Krafteinleitung wird eine Zentrierplatte eingesetzt. Bei Erreichen einer definierten Kraft wird die elastische Rückfederung des Prüfkörpers durch die Verschraubung verhindert. Die axiale Vorspannung wird durch eine Kraftmessdose überwacht. Diese Lastspannung in Höhe von -65 MPa wird

durch die Spannvorrichtung während der anschließenden röntgenographischen Spannungsbestimmung konstant gehalten. Während im unbelasteten Zustand lediglich die Eigenspannungen bestimmt werden, wird im belasteten Zustand die Summe aus Eigen- und Lastspannungen identifiziert. Die Messergebnisse sind in Bild 40 dargestellt.

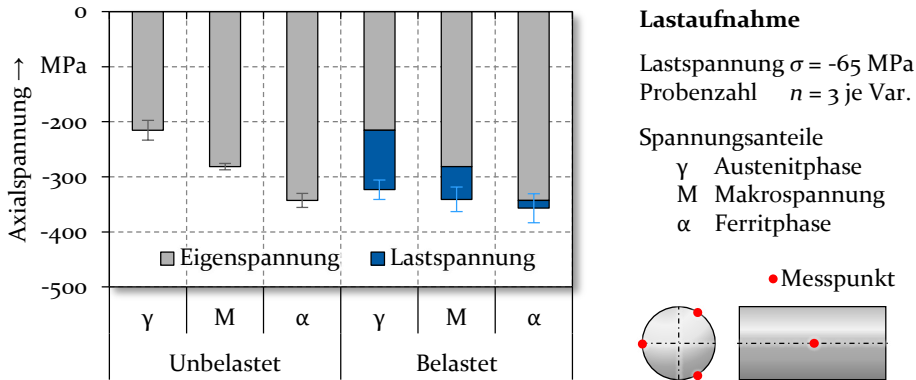


Bild 40: Axiale Oberflächenspannungen im Rohling im unbelasteten und belasteten Zustand

Im unbelasteten Rohling sind in Axialrichtung Druckeigenspannungen mit Mittelwerten von -215 MPa in der Austenit- und -343 MPa in der Ferritphase vorhanden. Mit einem durch Elektronenrückstreubeugung (*Electron Backscatter Diffraction*, EBSD) und durch röntgenographische Phasenanalyse ermittelten Ferritgehalt von 52 % ergibt sich eine mittlere Makroeigenspannung von -281 MPa. Bei Aufbringen einer axialen Last von -65 MPa liegen im Mittel -323 MPa in der Austenit- und -356 MPa in der Ferritphase vor, entsprechend einer Gesamtspannung von -341 MPa. Die Differenz liegt mit 60 MPa im Bereich der aufgebrachten Last. Dies zeigt die grundlegende Anwendbarkeit dieser Methode zur Eigenspannungsbestimmung im zweiphasigen Stahl 1.4462.

6.1.2 Werkstoffabhängige Bauteileigenspannungen

Die Festigkeit und das Verfestigungsverhalten des verwendeten Bauteilwerkstoffs bestimmen die bei der Umformung entstehenden Spannungszustände und somit die nach der Umformung und dem Auswerfen im Bauteil verbleibenden Eigenspannungen. Neben dem ferritischen Referenzwerkstoff 1.4016 werden der austenitische 1.4301 und der ferritisch-austenitische Duplexstahl 1.4462 untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 41 dargestellt.

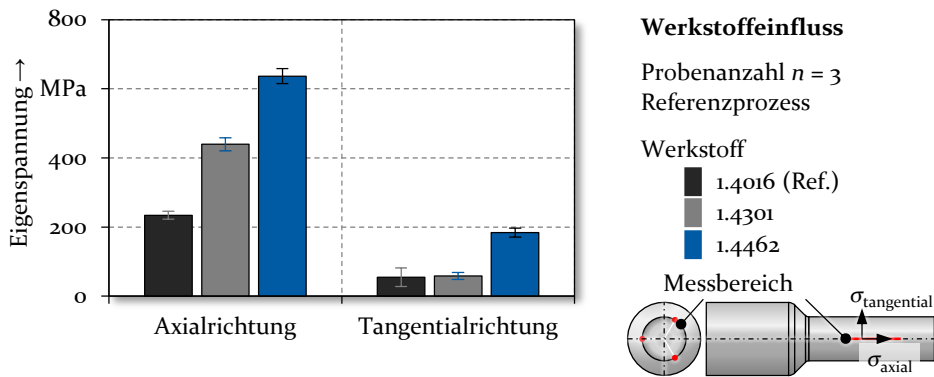


Bild 41: Beeinflussung des Bauteileigenspannungszustands durch den Bauteilwerkstoff

Der ferritische Referenzwerkstoff 1.4016 mit der geringsten Anfangsfließspannung der untersuchten Werkstoffe weist die betragsmäßig geringsten Eigenspannungen im umgeformten Schaft auf. Der austenitische Stahl 1.4301 verfügt über eine ähnliche Anfangsfließspannung wie der ferritische Stahl 1.4016, zeigt aber im Druckversuch eine ausgeprägtere Kaltverfestigung. In den umgeformten Bauteilen sind daher an der Bauteiloberfläche höhere Eigenspannungen vorhanden. Der ferritisch-austenitische Duplexstahl 1.4462 verfügt über die höchste Festigkeit und die höchsten Eigenspannungen.

Diese vorliegenden Oberflächeneigenspannungen sind auf die Werkstofffestigkeit zurückzuführen. Mit höherer Festigkeit sind grundsätzlich höhere Eigenspannungen möglich, da der Fließbeginn aufgrund des vergrößerten elastischen Bereichs später eintritt und so höhere Spannungsbeträge im Werkstoff verbleiben können. Zur Überprüfbarkeit der Eigenspannungsentstehungsmechanismen wird die Verfestigungsverteilung über das Bauteilvolumen untersucht. Dazu wird die Mikrohärteverteilung im Längsschliff der Bauteile bestimmt, welche in Bild 42 dargestellt ist.

Die Mikrohärteverteilungen weisen ein ähnliches Muster für die untersuchten Werkstoffe auf. In der Matrizenschulter ist eine stetige Zunahme der Härte zu erkennen. Im Kontaktbereich zwischen Bauteil und Werkzeug liegt eine geringere Härte vor als unter der Oberfläche. Der umgeformte Schaft weist eine in Axialrichtung homogene Härteverteilung mit geringeren Werten in der Spitze auf. Während das Härtemaximum unter der Oberfläche liegt, sind der Kern und die Oberfläche weniger verfestigt. Im nicht umgeformten Bereich liegt im 1.4016 und im 1.4301 eine homogene

Härteverteilung vor, während im 1.4462 eine geringfügig verfestigte Randschicht gegeben ist, die auf eine unzureichende Wärmebehandlung zurückzuführen ist.

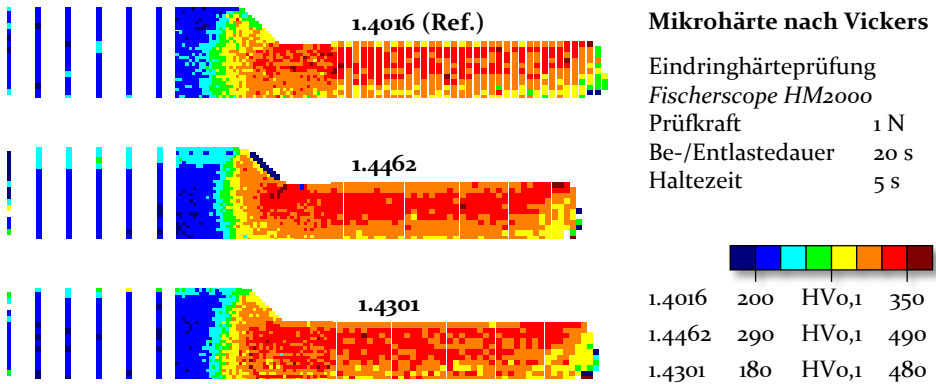


Bild 42: Mikrohärteverteilung in Bauteilen aus verschiedenen Werkstoffen

Während die Härteverteilungen qualitativ übereinstimmen, existieren quantitative Unterschiede zwischen den Werkstoffen. Beim Referenzwerkstoff 1.4016 liegen die Härtewerte in einem Bereich von 150 HV, wobei der Grundwerkstoff eine Härte von etwa 200 HV aufweist. Die Ausgangshärte des Duplexstahls 1.4462 ist aufgrund der höheren Festigkeit um einem Wert von 290 HV. Aus der Umformung resultiert eine Zunahme um bis zu 200 HV. Der austenitische Stahl 1.4301 verfügt mit 180 HV über die niedrigste Grundhärte und mit 300 HV über die höchste Zunahme. Diese Effekte sind auf das in der Fließkurve abgebildete Verfestigungsverhalten zurückzuführen. Die beim Werkstoff 1.4301 vorhandene starke Kaltverfestigung führt bei der Umformung zum Entstehen einer ausgeprägteren Verfestigungsinhomogenität im Vergleich mit den anderen beiden Werkstoffen.

Fazit

Die Werkstoffeigenschaften bestimmen maßgeblich die Eigenspannungsentstehung während der Bauteilherstellung. Bei sonst gleichen Prozessparametern führt eine höhere Werkstofffestigkeit und höhere Verfestigungskennwerte zu höheren Eigenspannungsbeträgen.

6.1.3 Werkstoffbedingte Effekte der Eigenspannungsentstehung

Analog zu den Untersuchungen der Referenzvariante in Abschnitt 5.2.1 wurde die Eigenspannungsentstehung für den Duplexstahl 1.4462 separat für die Umformung und das Auswerfen untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 43 dargestellt [P4].

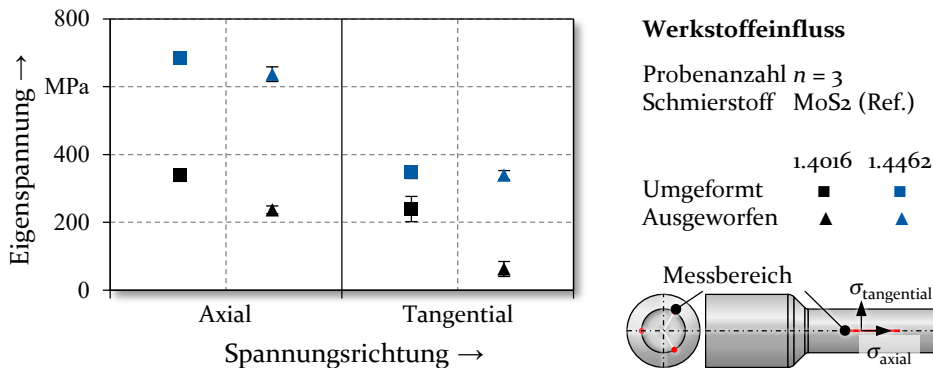


Bild 43: Einfluss des Bauteilwerkstoffs auf die Eigenspannungsentstehung beim Umformen und Auswerfen

Zur Vergleichbarkeit wird dabei der Bereich im umgeformten Schaft herangezogen, in dem ein konstanter Eigenspannungszustand vorliegt. Grundsätzlich ist aufgrund der höheren Werkstofffestigkeit des Duplex-Stahls 1.4462 ein höheres Eigenspannungsniveau zu erkennen. Während beim Referenzwerkstoff 1.4016 durch das Auswerfen eine signifikante Reduktion der Eigenspannungen in axialer und tangentialer Richtung bewirkt wird, zeigen die Bauteile aus 1.4462 ein anderes Verhalten. In Axialrichtung werden die bei der Umformung entstehenden Zugeigenspannungen durch das Auswerfen lediglich geringfügig verringert. In Umfangsrichtung werden die Eigenspannungen um einen Wert reduziert, der im Bereich der Wiederholgenauigkeit und Messunsicherheit liegt. Dies zeigt eine ausgeprägte Werkstoffabhängigkeit der Eigenspannungsentstehung.

Ein Erklärungsansatz für die unterschiedlichen Eigenspannungszustände liegt in der Werkstofffestigkeit und dem Spannungszustand. Während des Auswerfens liegt ein radialer Druckspannungszustand vor, der in axialer Richtung mit Scherspannungen überlagert ist. Beim Referenzwerkstoff wird eine oberflächennahe Werkstoffschicht dabei beim Passieren des Fließbunds plastisch deformiert, wodurch die Eigenspannungen reduziert werden. Aufgrund der höheren Festigkeit des 1.4462 reicht die durch die

elastische Auffederung im Armierungsverbund gespeicherte Energie nicht aus, um oberflächennahe Bereiche während des Auswerfens plastisch zu verformen. Dies führt dazu, dass die Tangentialeigenspannungen keine Änderung erfahren. In Axialrichtung bewirken jedoch die Reibschubspannungen eine geringe Beeinflussung der vorliegenden Zugeigenspannungen.

Fazit

Neben den Bauteileigenschaften und Eigenspannungen beeinflusst die Werkstofffestigkeit die Prozesseigenschaften. Hinsichtlich der Eigenspannungsentstehung treten dabei festigkeitsabhängige Wechselwirkungen auf, die prozessspezifisch zu unterschiedlichen Entstehungsmechanismen führen.

6.2 Stoffflusssteuerung über Matrizengeometrie

Der Stofffluss und die damit einhergehenden Spannungsverhältnisse bei der Umformung beeinflussen maßgeblich die Verfestigungsverteilung im hergestellten Bauteil. Im vorliegenden Prozess ist eine Steuermöglichkeit über den Anstellwinkel der Matrizenschulter gegeben. Im nachfolgenden Abschnitt wird daher untersucht, wie eine Anpassung des Matrizenöffnungswinkels 2α den Prozess und die Eigenspannungsentstehung beeinflusst. Zusätzlich zur Referenzvariante mit $2\alpha = 90^\circ$ werden Matrizen mit 60° und 120° verwendet. Die Matrizenherstellung, insbesondere geometrische Merkmale wie Übergangsradien, Fließbundhöhe, Freischliff, etc. und das Oberflächenfinish bleiben dabei konstant gehalten, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

6.2.1 Resultierende Prozesseigenschaften

Eine Änderung des Schulteröffnungswinkels bewirkt eine Änderung des Stoffflusses entlang der Matrizenschulter, wodurch die Prozesseigenschaften beeinflusst werden. In Bild 44 sind die während der Bauteilherstellung auftretenden Maximalkräfte sowie die Bauteiltemperaturen nach dem Auswerfen dargestellt.

Eine Erhöhung des Matrizenöffnungswinkels führt dabei zu einer Erhöhung der Maximalkraft. Während bei der Referenzvariante mit $2\alpha = 90^\circ$ ein Maximum von 644 kN auftritt, liegen bei $2\alpha = 60^\circ$ mit 614 kN geringfügig niedrigere und bei $2\alpha = 120^\circ$ mit 728 kN höhere Werte vor. Dies wird auf den Werkstofffluss zurückgeführt. Mit zunehmendem Schulterwinkel wird bei gleicher Flächenabnahme die Höhe der Umformzone reduziert.

Dadurch steigt der notwendige - senkrecht zur Stempelrichtung stehende - radiale Anteil des Stoffflusses und somit der Widerstand gegen die Stempelbewegung. Diese erhöhten Schiebungskräfte resultieren in einer erhöhten Maximalkraft. Bei geringen Matrizenöffnungswinkeln ist der radiale Anteil hingegen gering gegenüber dem axialen Anteil, wodurch die Umformung erleichtert wird.

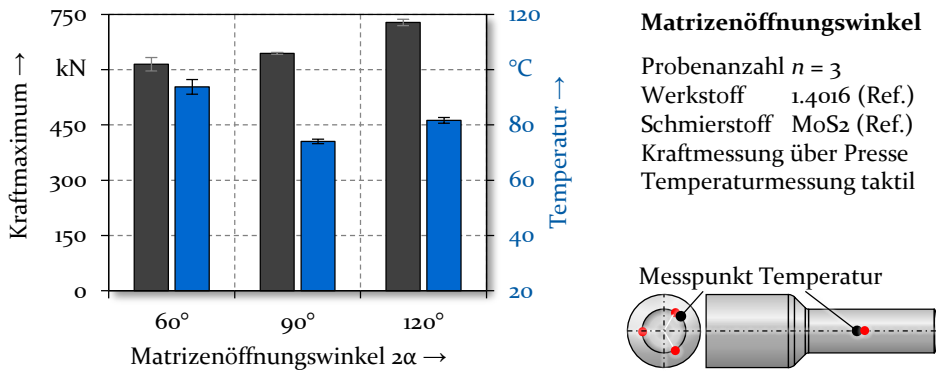


Bild 44: Einfluss des Matrizenöffnungswinkels 2α auf Stempelkraftmaxima und Bauteiltemperaturen

Die nach dem Auswerfen gemessene Bauteiltemperatur ist hingegen mit 74 °C bei $2\alpha = 90^\circ$ minimal und nimmt mit einer Änderung des Matrizenöffnungswinkels zu. Mit 94 °C bei $2\alpha = 60^\circ$ und 82 °C bei $2\alpha = 120^\circ$ treten sowohl bei höherem als auch bei niedrigerem Matrizenöffnungswinkel höhere Temperaturen auf. Der Grund hierfür liegt in den Spannungsverhältnissen während der Umformung. In Bild 46 sind dazu der Kontaktdruck und die Kontur der Kontaktzone bei der Umformung gezeigt.

Mit geringen Schulteröffnungswinkeln liegen geringe Flächenpressungen zwischen Bauteil und Matrize vor. Aufgrund des geringen Winkels ist die Umformzone bei gleicher Flächenabnahme jedoch höher, woraus eine höhere Fläche der konischen Schulter resultiert. Bei hohen Matrizenöffnungswinkeln ist diese Fläche reduziert und die Flächenpressung aufgrund der starken Werkstoffumlenkung erhöht. Wechselwirkungen zwischen der Größe der Kontaktfläche und dem wirkenden Kontaktdruck resultieren in dem in [31] gezeigten Zusammenhang, nach dem die Reibkraft umgekehrt proportional zu $\sin(2\alpha)$ ist und somit ein Minimum bei $2\alpha = 90^\circ$ vorliegt. Da die Temperaturen annähernd proportional zu den berechneten Reibkräften sind, liegt der Schluss nahe, dass die Oberflächenreibung ein maßgeblicher Faktor für die Temperaturentwicklung im Bauteil ist.

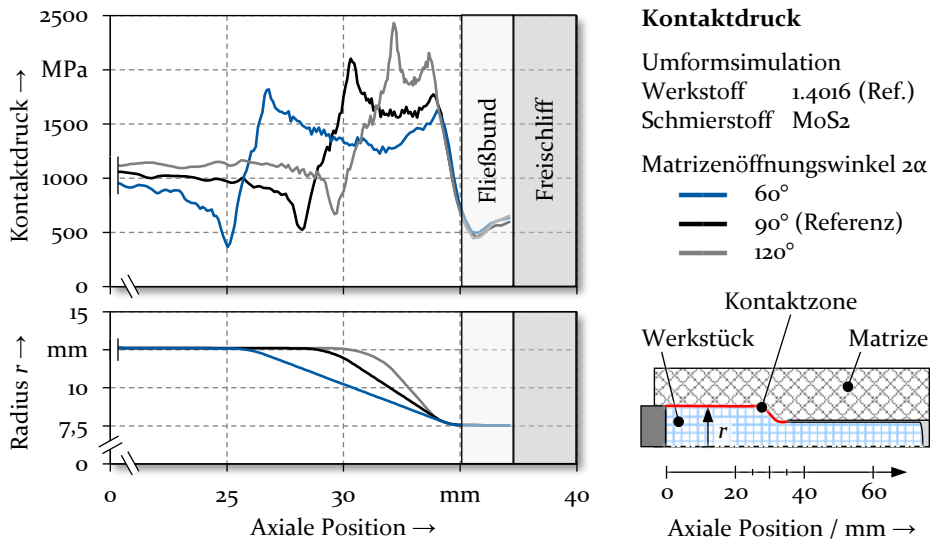
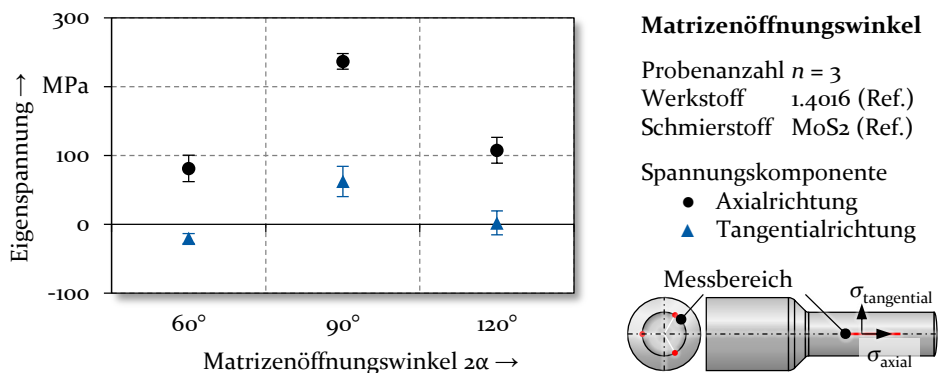


Bild 45: Kontaktstress und Kontur der Kontaktzone im unteren Totpunkt

6.2.2 Stoffflussbedingte Eigenspannungsentstehung

Änderungen des Stoffflusses beeinflussen die Spannungsverteilung während der Umformung im Bauteil. Eine damit einhergehende Beeinflussung der Dehnungsverteilung und -inhomogenität hat daher das Potential, Eigenspannungsänderungen zu bewirken. Der Einfluss des Matrizenöffnungswinkels auf die an der Bauteiloberfläche entstehenden Eigenspannungen sind in Bild 46 dargestellt [P5].


Bild 46: Einfluss des Matrizenöffnungswinkels 2α auf die Bauteileigenspannungen

Sowohl eine Verringerung als auch eine Erhöhung des Schulterwinkels führen gegenüber der Referenzvariante mit $2\alpha = 90^\circ$ zu einer signifikanten Verringerung der oberflächennahen Zugeigenspannungen. Bei einem

Matrizenöffnungswinkel von $2\alpha = 60^\circ$ ist diese Abnahme etwas stärker ausgeprägt als mit $2\alpha = 120^\circ$. Während die Axialeigenspannungen weiterhin im Zugspannungsbereich liegen, liegen in Tangentialrichtung bei $2\alpha = 60^\circ$ geringe Druckeigenspannungen vor, während die Oberfläche mit $2\alpha = 120^\circ$ in Tangentialrichtung spannungsfrei ist.

Ein möglicher Grund für die geringeren Eigenspannungen liegt in den bei der Umformung entstehenden Bauteiltemperaturen. Da die Temperaturdifferenz zwischen den Varianten im Bereich von 20°C jedoch vergleichsweise niedrig und die Aufbringdauer gering ist, ist ein derart ausgeprägter Einfluss unwahrscheinlich. Die Stabilität der Eigenspannungen im vorliegenden Temperaturbereich wird in Abschnitt 7.2 tiefergehend untersucht.

Eine Änderung des Matrizenöffnungswinkels bewirkt eine Änderung des Stoffflusses in der Umformzone und kann so die Dehnungsverteilung im hergestellten Bauteil beeinflussen. Da diese die verbleibenden Eigenspannungen bestimmt [196], ist diese Ursache naheliegend. Zur Bestimmung der Festigkeitsverteilung wurden Mikrohärtemessungen im Längsschliff der Bauteile durchgeführt, deren Ergebnisse in Bild 47 dargestellt sind.

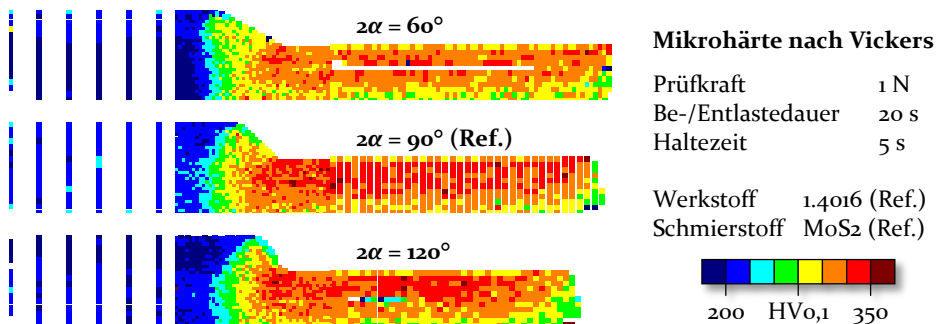


Bild 47: Matrizenöffnungswinkelabhängige Mikrohärteverteilungen in umgeformten Bauteilen

Aus der Mikrohärteverteilung ist ein matrizenöffnungswinkelabhängiges Verfestigungsverhalten erkennbar. Während der Umformbereich bei den verschiedenen Varianten eine ähnliche Länge von etwa 8 mm hat, liegen deutlich unterschiedliche Verteilungen über den Querschnitt vor. In der Referenzvariante mit $2\alpha = 90^\circ$ hat die Einlaufzone eine konvexe Form, bei der der Fließbund den Mittelpunkt bildet. Eine Verringerung des Schulterwinkels auf 60° führt dazu, dass der Werkstoff im Randbereich früher verfestigt als im Kern. Dies spiegelt sich in der leicht trichterförmigen Einlaufzone wider. Eine Erhöhung auf $2\alpha = 120^\circ$ führt hingegen zu einem

späteren Verfestigungsbeginn im randnahen Bereich. Zudem ist im nicht umgeformten Bereich eine geringfügige Erhöhung der Härte feststellbar. Bild 48 zeigt für die verschiedenen Varianten die radiale Härteverteilung in diesem Bereich.

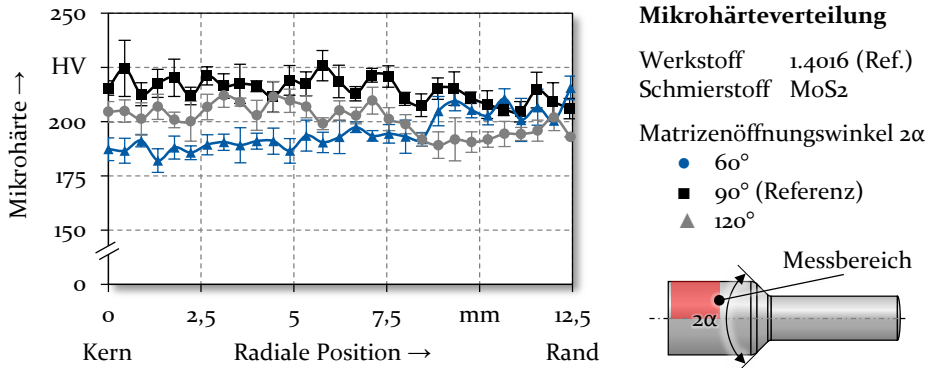


Bild 48: Härteverteilung im nicht umgeformten Bereich

In der Referenzvariante mit $2\alpha = 90^\circ$ liegt eine homogene Härteverteilung über den Querschnitt mit Werten um 215 HV vor. Obwohl dieser Bauteilbereich in der Theorie unverformt bleibt, treten in der Praxis geringfügige plastische Dehnungen auf [191]. Diese sind darauf zurückzuführen, dass der Rohling aufgrund des notwendigen Einlegespiels im oberen Teil der Matrize während der Umformung gestaucht wird. Daraus resultieren gegenüber der Härte des unverfestigten Werkstoffs erhöhte Werte.

Bei der Umformung mit $2\alpha = 60^\circ$ ist die Verfestigung auf eine ca. 4 mm dicke Randschicht begrenzt, in der Härtewerte um 205 HV vorliegen. Im Kernbereich ist mit Werten um 190 HV weiterhin die Härte des unverfestigten Werkstoffs gegeben. Dies ist auf die Fließverhältnisse des Werkstoffs zurückzuführen. Aufgrund des geringen Schulterwinkels ist der Anteil des Stoffflusses in radialer Richtung geringer als der Anteil in axialer Richtung, weshalb bis zur vollständigen Füllung der Schulter ein langer Weg zurückgelegt wird. Dabei eilt der Werkstoff außen vor, wobei der Werkstoff in einem ringförmigen Bereich plastisch deformiert wird.

In der Variante mit $2\alpha = 120^\circ$ ist eine umgekehrte Verteilung zu beobachten. Im Kernbereich ist der Werkstoff auf ein Niveau von etwa 205 HV verfestigt, während der ca. 4 mm dicke Randbereich Werte um 192 HV aufweist. Ursächlich dafür ist der hohe Matrizenöffnungswinkel, der den Werkstofffluss in axialer Richtung behindert. Dieser Widerstand führt dazu, dass Werkstoffbereiche im Bauteilinneren eher fließen als im randnahen Bereich. Dies legen sowohl die Mikrohärteverteilungen in Bild 47 als

auch die Oberflächen der Spitzen der hergestellten Bauteile nahe, die in Bild 49 dargestellt sind.

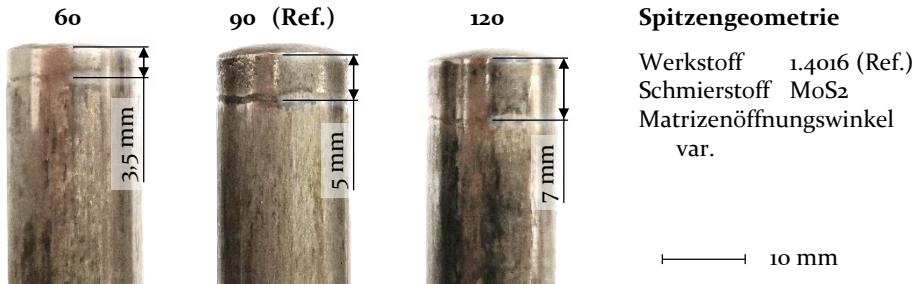


Bild 49: Matrizenwinkelabhängige Oberfläche der Bauteilspitze

An der Oberfläche des gereinigten Bauteils ist die Kante der Stirnfläche des Rohlings zu erkennen. Bei den mit $2\alpha = 90^\circ$ hergestellten Bauteilen der Referenzvariante beträgt der Abstand der Rohlingskante von der Bauteilkante etwa 5 mm. Eine Verringerung des Matrizenöffnungswinkels auf $2\alpha = 60^\circ$ führt zu einer Reduktion auf ca. 3,5 mm, eine Erhöhung auf $2\alpha = 120^\circ$ zu einer Erhöhung auf 7 mm. Dies belegt das Voreilen der kernnahen Werkstoffbereiche bei höheren Matrizenöffnungswinkeln.

Aus den Spannungs- und Dehnungsverhältnissen in der Umformzone resultieren die im fertigen Bauteil verbleibenden Verfestigungsverteilungen und damit die Eigenspannungen. Die Mikrohärteverteilung im umgeformten Schaft ist für die untersuchten Matrizenöffnungswinkel in Bild 50 dargestellt.

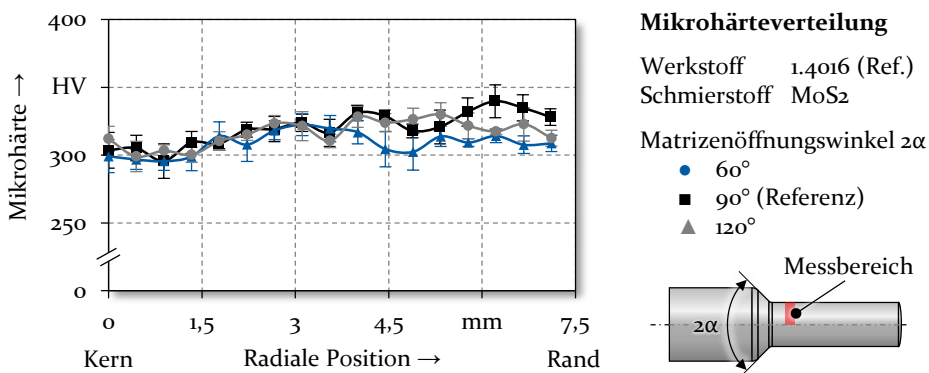


Bild 50: Verfestigungsverteilung im umgeformten Schaft für verschiedene Matrizenöffnungswinkel

Im Kernbereich zeigt sich für sämtliche untersuchten Matrizenöffnungswinkel eine vergleichbare Härteverteilung mit Werten von etwa 300 HV

entlang der Symmetrieachse, die auf ca. 325 HV bei einer radialen Position von 3,5 mm ansteigen. In der Referenzvariante mit $2\alpha = 90^\circ$ ist ein Ansteigen der Härte zum Rand hin zu erkennen, während direkt am Rand ein geringer Härteabfall vorliegt. Das Härtemaximum liegt bei einer radialen Position von 6,2 mm und damit etwa 1,3 mm unter der Oberfläche. Mit Werten zwischen 296 HV und 340 HV liegt die breiteste Härteverteilung im Rahmen der untersuchten Varianten vor. Die Variante mit $2\alpha = 120^\circ$ weist bis zu einem Radius von 4,5 mm eine ähnliche Härteverteilung auf wie die Referenzvariante. Das Härtemaximum liegt bei einem Radius von 5,3 mm jedoch weiter im Bauteilinneren. Zudem ist die Härteverteilung mit Werten zwischen 299 HV und 330 HV weniger breit verteilt. In den mit einem Matrizenöffnungswinkel von $2\alpha = 60^\circ$ hergestellten Bauteilen ist eine vergleichsweise homogene Härteverteilung mit Werten zwischen 296 HV und 322 HV vorhanden. Aufgrund der moderaten Umlenkung ist die Verfestigung ab einer radialen Position von 4 mm geringer als bei den anderen Varianten.

Diese dargestellten makroskopischen Änderungen des Stoffflusses beeinflussen die Verfestigungsverteilung während der Umformung und folglich die Eigenspannungsverteilung in den hergestellten Bauteilen. Zur Einstellung eines definierten Spannungszustands ist eine Anpassung des Matrizenöffnungswinkels ein signifikanter Stellhebel. Weiterhin bieten insbesondere oberflächennahe Eingriffe großes Potential zur Eigenspannungseinstellung.

6.3 Einfluss des verwendeten Schmierstoffs

Bei der Umformung entstehende Bauteileigenspannungen resultieren aus inhomogenen Dehnungszuständen. Eine Änderung des eingesetzten Schmierstoffs beeinflusst die Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug und dadurch oberflächennahe Schubspannungen. Aus diesem Grund erfolgt eine Untersuchung des Einflusses der Schmierstoffe auf die Bauteileigenspannungen. Dazu werden Rohlinge mit zwei weiteren in der Umformtechnik eingesetzten Schmierstoffen umgeformt. Zusätzlich zum MoS₂-basierten Referenzschmierstoff werden ein seifen- und ein polymerbasierter Schmierstoff untersucht [P5].

6.3.1 Charakterisierung der eingesetzten Schmierstoffe

Zur Abschätzung der Umformbarkeit erfolgt zunächst eine Charakterisierung der verwendeten tribologischen Systeme. Dazu wird der in

Abschnitt 4.2 beschriebene DCE-Versuch verwendet. Die numerisch identifizierte Kalibrierkurve, die experimentell bestimmten Napfhöhenverhältnisse und die ermittelten Reibfaktoren sind in Bild 51 dargestellt.

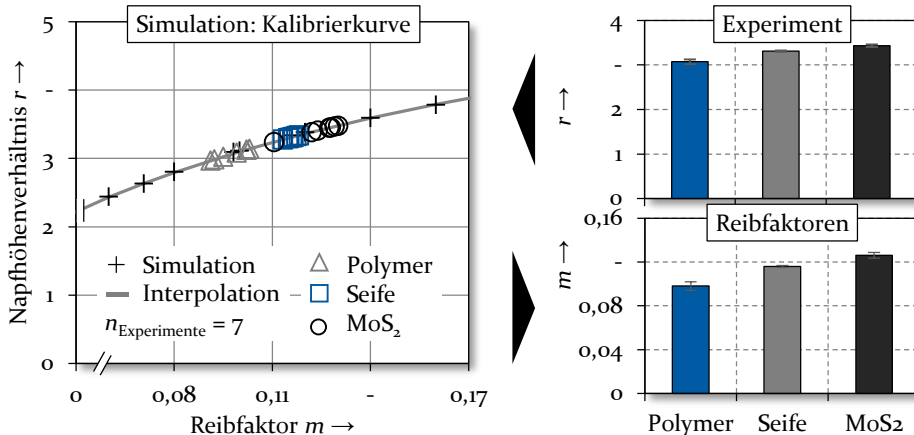


Bild 51: DCE-Versuch: Experimentell ermittelte Napfhöhenverhältnisse, numerisch identifizierte Kalibrierkurve und resultierende Reibfaktoren

Die Verwendung des polymerbasierten Schmierstoffs führt zu dem niedrigsten Napfhöhenverhältnis von $r = 3,071 \pm 0,056$. Seife zeigt einen Wert von $3,311 \pm 0,011$ und MoS₂ einen Wert von $3,433 \pm 0,031$. Mit der numerisch ermittelten Kalibrierkurve entsprechen diese experimentell ermittelten Werte den Reibfaktoren von $0,098 \pm 0,004$ für Polymer, $0,116 \pm 0,001$ für Seife und $0,126 \pm 0,003$ für MoS₂. Diese Unterschiede zwischen den Schmierstoffen stimmen mit Erkenntnissen von Lorenz et al. [43] überein, in denen MoS₂ und Polymer verglichen werden. Während Polymer und Seife bessere Schmiereigenschaften aufweisen, hat MoS₂ Vorteile bei der Trennung von Werkstück- und Werkzeugoberfläche unter hoher tribologischer Belastung, welche beispielsweise bei der Umformung von Stählen mit hoher Festigkeit auftritt [197]. Eine Verringerung der Reibfaktoren bei Verwendung von Phosphat als Schmierstoffträgerschicht auf typischem Kaltschmiedestahl 16MnCr5 wie in [43] legen nahe, dass die Verwendung der zur Umformung von rostfreiem Stahl notwendigen Eisenoxalatschicht zu erhöhter Reibung führt.

6.3.2 Werkstoffabhängige Anwendbarkeit

Für die experimentelle Untersuchung der Anwendbarkeit von Schmierstoffen in der Kaltumformung wurden der Referenzwerkstoff 1.4016 und der Duplexstahl 1.4462 mit drei verschiedenen Beschichtungen in drei Werkzeuggeometrien umgeformt. Die Oberflächen der umgeformten Teile

wurden hinsichtlich der Integrität der Schmierstoffschicht beurteilt. Die Bewertungskriterien und die Ergebnisse sind in Bild 52 dargestellt. Die Varianten mit gestrichelter Füllung wurden aufgrund erfolgloser Vorversuche nicht getestet.

Werkstoff	Schmierstoff	Schulterwinkel 2α			Auswertekriterien	
		60°	90°	120°		
1.4016	MoS ₂	■	■	■	■ Intakte Schmierstoffschicht	
	Polymer	■	■	■	■ Geringfügige Schichtdefekte	
	Seife	■	■	■	■ Beschädigte Schmierstoffschicht	
1.4462	MoS ₂	■	■	■	■ Auswertebereich	
	Polymer	■	▨	▨		
	Seife	▨	■	▨		

Bild 52: Oberflächen der umgeformten Bauteile. Ergebnisse und Bewertungskriterien.

Bei der Verwendung des Referenzwerkstoffs 1.4016 zeigen alle Varianten nach der Umformung und dem Auswerfen eine unversehrte Schmierstoffschicht. Bei der Umformung des Duplexstahls 1.4462 haben lediglich die mit MoS₂ beschichteten und mit Schulteröffnungswinkeln von $2\alpha = 60^\circ$ und 90° eine intakte Oberfläche. Mit Polymerschmierstoff beschichtete Proben, welche mit $2\alpha = 60^\circ$ umgeformt wurden, zeigten nach dem Auswerfen eine schmelzende und verdampfende Schmierstoffschicht und kleinere Kratzer. Um Werkzeugversagen zu vermeiden, wurden Varianten mit höherem Öffnungswinkel des Werkzeugs nicht umgesetzt, da hier höhere tribologische Belastungen zu erwarten sind. Ähnliche Ergebnisse wurden bei der Umformung von Rohlingen erzielt, die mit dem seifenbasierten Schmierstoff beschichtet waren. Bei einem Schulterwinkel von $2\alpha = 120^\circ$ wies das umgeformte Teil mit dem MoS₂-basierten Schmierstoff geringe Kratzer auf, weshalb keine Teile mit Seife und Polymer umgeformt wurden, um ein Versagen der Matrize zu vermeiden. Da Teile mit Polymerschmierstoff bei $2\alpha = 60^\circ$ ebenfalls leichte Kratzer aufwiesen, wurden aufgrund des ähnlichen Verhaltens keine Teile mit Schmierstoff auf Seifenbasis hergestellt.

Dies führt zur Erkenntnis, dass die untersuchten MoS₂-, polymer- und seifenbasierten Schmierstoffe bei der Umformung des ferritischen Edelstahl 1.4016 einsetzbar sind. Für die Umformung des ferritisch-austenitischen Duplexstahls 1.4462 ist aufgrund der hohen tribologischen Last hingegen lediglich MoS₂ mit Schulteröffnungswinkeln von $2\alpha = 60^\circ$ und 90° geeignet [P6].

6.3.3 Beeinflussung der Prozesseigenschaften

Neben der Oberflächenintegrität wirkt sich die Wahl des Schmierstoffs auch auf die Prozesseigenschaften aus. Zur Untersuchung des Einflusses wurden Rohlinge mit MoS₂-, polymer- und seifenbasierten Schmierstoffen beschichtet und mit dem beschriebenen Kaltfließpresswerkzeug umgeformt. Die Auswirkungen auf die Stempelkraftmaxima sind in Bild 53 dargestellt.

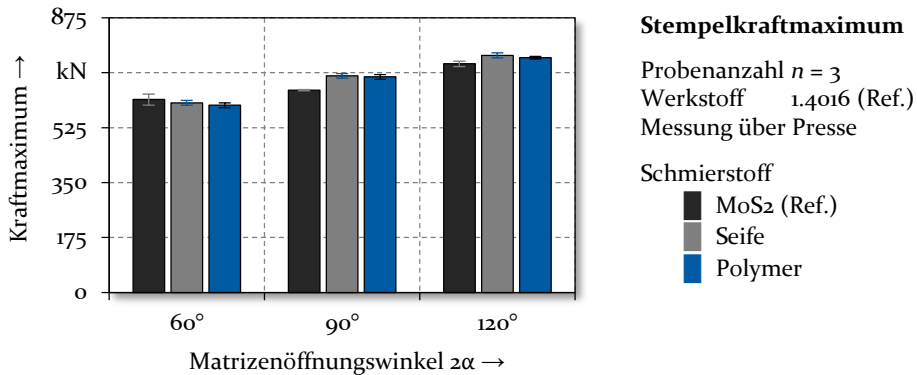


Bild 53: Schmierstoffabhängige Stempelkraftmaxima der hergestellten Bauteile

Ein zunehmender Matrizenöffnungswinkel führt bei allen untersuchten Schmierstoffen zu einem Anstieg der maximalen Stempelkraft. Dies ist auf den Materialfluss zurückzuführen. Eine Vergrößerung des Matrizenwinkels führt zu einer stärkeren Umlenkung des Werkstoffs in der Umformzone und damit zu linear proportional höheren Scherkräften [31]. Mit dem polymer- und seifenbasierten Schmierstoff ist der Anstieg der maximalen Stempelkraft geringfügig höher als mit MoS₂. Dieser Effekt ist dadurch erklärbar, dass Seifen und Polymere im Vergleich zu MoS₂ verbesserte Schmiereigenschaften bei geringen tribologischen Belastungen aufweisen [198]. Nach der Umformung und dem Auswerfen des Bauteils aus dem Werkzeug wurde die Temperatur im umgeformten Schaft gemessen. Die Ergebnisse sind in Bild 54 dargestellt.

Die niedrigsten Bauteiltemperaturen von 57 °C wurden in den mit Seife und mit Polymer mit einem Matrizenöffnungswinkel von $2\alpha = 90^\circ$ umgeformten Proben gemessen. Eine Erhöhung oder Verringerung des Matrizenöffnungswinkels führt zu einer Erhöhung der Bauteiltemperatur. Dies deckt sich mit [31], wonach die Reibkraft umgekehrt proportional zu $\sin(2\alpha)$ ist, was zu einer minimalen Reibkraft bei $2\alpha = 90^\circ$ führt.

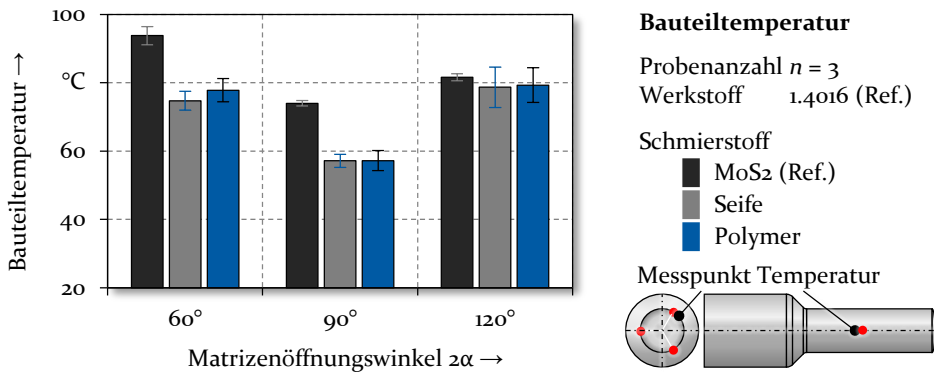


Bild 54: Einfluss von Schmierstoff und Matrizenöffnungswinkel auf die resultierenden Bauteiltemperaturen

Die Temperaturen sind nahezu proportional zu den theoretischen Reibungskräften, was darauf schließen lässt, dass die Bauteiltemperaturen maßgeblich durch die Reibung zwischen Bauteil und Werkzeug beeinflusst werden. Bei der Umformung von 1.4016 mit Matrizenöffnungswinkeln von 60° und 90° führt die Verwendung der polymer- und seifenbasierten Schmierstoffe zu ca. 18 °C niedrigeren Bauteiltemperaturen als bei MoS₂. Dies entspricht auch der Schlussfolgerung über den Einfluss der Reibung auf die Bauteiltemperatur, da Seife und Polymer bei niedrigen Belastungen bessere Schmiereigenschaften aufweisen als MoS₂.

6.3.4 Schmierstoffbedingte Bauteileigenspannungen

Nach der Umformung mit unterschiedlichen Schmierstoffen und Matrizenöffnungswinkeln wurden an den hergestellten Bauteilen die Eigenspannungen bestimmt. Die im umgeformten Schaft entstehenden Eigenspannungen sind in Bild 55 abgebildet.

Die Verwendung von MoS₂ mit einem Reibfaktor von $m = 0,126$ führt zu den höchsten Eigenspannungen, die bei sämtlichen untersuchten Matrizenöffnungswinkeln im Zugspannungsbereich liegen. Eine schrittweise Verringerung der Reibung durch den Einsatz von Seife mit $m = 0,116$ und Polymer mit $m = 0,098$ führt zu einer Reduktion des Eigenspannungswerts, was einer Verschiebung in Richtung Druckspannungen entspricht. Die Verwendung von Polymer mit dem niedrigsten Reibungsfaktor führt zu Druckeigenspannungen für $2\alpha = 60^\circ$, 90° und 120° .

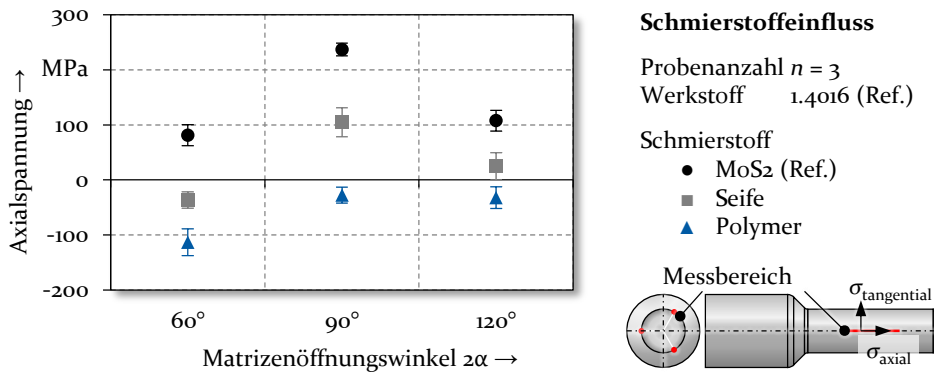


Bild 55: Einfluss des Schmierstoffs auf die Bauteileigenspannungen für verschiedene Matrizenöffnungswinkel

Diese Verringerung der oberflächennahen Spannungen ist durch verbesserte Gleiteigenschaften und damit verringerte Reibschubspannungen erklärbar, die die Inhomogenität der plastischen Verformung in den oberflächennahen Bereichen der Fließpressteile beeinflussen. In der Mikrohärteverteilung der Referenzvariante liegt im Werkstück nahe der Oberfläche eine niedrigere Festigkeit vor als in weiter innenliegenden Bereichen, wie in Abschnitt 5.2 gezeigt. Dies ist auf die Schmierung und die damit einhergehende Möglichkeit zum Abbau der durch den Stempel eingebrachten Energie zurückzuführen. Im Bauteilinneren steht diese Möglichkeit nicht zur Verfügung, weshalb die Energie dort in plastische Deformation umgesetzt wird. Eine Änderung des Schmierstoffs beeinflusst die Gleitbedingungen und den Widerstand gegen Bewegung. Daraus resultiert eine Änderung der Reibschubspannungen und folglich des randnahen Spannungszustands während der Umformung und dem Auswerfen. Dies beeinflusst wiederum die in Bild 56 abgebildete Verfestigungsinhomogenität im Randbereich, wodurch die in der Oberfläche verbleibenden Eigenspannungen geändert werden.

Mit abnehmender Reibung ist nach dem Auswerfen eine Verringerung des oberflächennahen Umformgrads zu erkennen, während tieferliegende Werkstoffbereiche kaum beeinflusst werden. Die Änderungen im unmittelbaren Randbereich sind durch die plastische Deformation der Oberfläche während des Auswerfens aus der Matrize zu erklären. Ein niedrigerer Reibfaktor führt dabei zu einer Abnahme der Verfestigung im Randbereich. Dadurch wird die Verfestigungsinhomogenität erhöht, da sich die Verfestigungswerte in der Randschicht von denen des weiter innenliegenden Maximums unterscheiden. Dies führt zu einer Verschiebung des unter der Oberfläche liegenden Zugeigenspannungsmaximums in

das Werkstoffvolumen hinein, woraus eine Abnahme der Eigenspannungswerte in der Oberfläche resultiert.

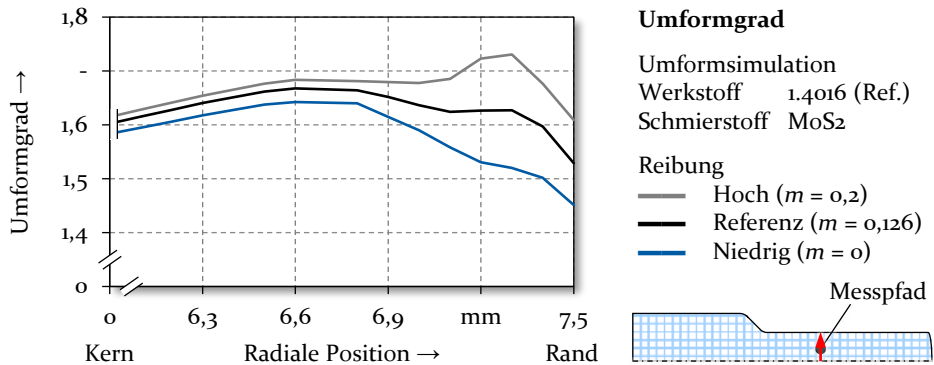


Bild 56: Reibungsabhängige oberflächennahe Umformgradverteilung

Umgekehrt führt eine Erhöhung der Reibung zu einer stärkeren Verfestigung der Oberfläche beim Auswerfen, wodurch die Verfestigungs-inhomogenität im Randbereich reduziert wird, da sich die oberflächennahen Verfestigungswerte denen des innenliegenden Maximums annähern. Daher bewirkt eine Reibungserhöhung eine Verschiebung des Zugeigenspannungsmaximums nach außen und damit höhere Eigenspannungswerte in der Oberfläche.

Da innenliegende Werkstoffbereiche jedoch wenig beeinflusst werden, ergibt sich eine auf die Randschicht beschränkte Beeinflussung der Verfestigung und der Verfestigungs-inhomogenität. Im Bauteilinneren bleibt die Verfestigungsverteilung unverändert, wie in Bild 57 dargestellt.

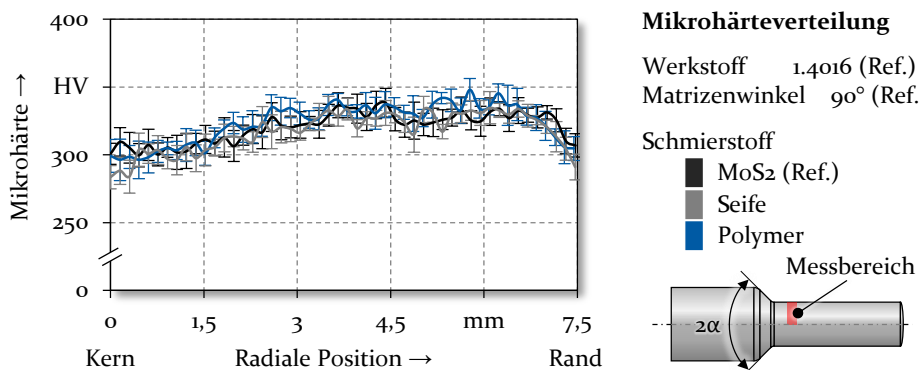


Bild 57: Mikrohärteverteilung im umgeformten Schaft bei Verwendung verschiedener Schmierstoffe

Eine Änderung des Schmierstoffs bewirkt im Bauteilinneren keine ausgeprägte Veränderung der Mikrohärteverteilung. Zum Rand hin ist bei sämtlichen Varianten eine Zunahme der Härte zu erkennen. In einer etwa 1 mm dicken Randschicht liegt jedoch eine Reduktion der Verfestigung aufgrund der beschriebenen Einflüsse der Schmierung vor. Dies deckt sich mit den numerischen Ergebnissen, nach denen der höchste Umformgrad etwa 0,9 mm unter der Oberfläche vorliegt. Über die Verfestigungsverteilung in der Oberfläche kann hingegen experimentell keine Aussage getroffen werden, da bei der Bestimmung der Mikrohärte im Querschliff ein Abstand von der Oberfläche erforderlich ist, der dem zweifachen der Diagonale des Eindrucks entspricht.

Neben der Verringerung der auftretenden Prozesskräfte bietet eine verbesserte Schmierung folglich das Potential, Zugeigenspannungen in der Bauteiloberfläche zu reduzieren. Zur Verbesserung der Bauteileigenschaften ist neben den Methoden zu deren Veränderung auch eine Information über die Verlässlichkeit der Methoden erforderlich.

6.4 Bestimmung der Prozessrobustheit

Um konstante Bauteileigenschaften zu gewährleisten, ist eine Kenntnis des Einflusses typischer Störgrößen auf die Bauteileigenspannungen notwendig. Im industriellen Prozess sind Streuungen insbesondere bei den Eigenschaften des angelieferten Werkstoffs und der Beschichtung der Umformrohlinge möglich. Eine homogene oder inhomogene Verfestigung im Werkstoff hat Potential, die Umformeigenschaften des Rohlings durch lokal unterschiedliche Eigenschaften zu beeinflussen und so die Eigenspannungen zu ändern. Aus diesem Grund wird der Einfluss des Werkstoffzustands auf die Eigenspannungsentstehung analysiert. Durch eine Änderung des Schmierstoffs ist eine gezielte Eigenspannungseinstellung möglich. Daher wird der Einfluss der Schmierstoffauftragsmenge auf die tribologischen Eigenschaften und folglich auf die Bauteileigenspannungen untersucht.

6.4.1 Einfluss einer Vorverfestigung im Ausgangswerkstoff

Die bei der Umformung entstehende Verfestigungsverteilung bestimmt maßgeblich den Eigenspannungszustand des Bauteils. Veränderungen der Vorverfestigung im Rohling, beispielsweise durch die Halbzeugherstellung oder vorhergehende Prozessschritte bedingt, haben daher das Potential, die Eigenspannungsentstehung zu beeinflussen. Um diesen Einfluss zu

identifizieren, wird der Umformprozess mit Rohlingen durchgeführt, deren Oberfläche verfestigt ist – im Gegensatz zum weichgeglühten Werkstoff der Referenzvariante. Dabei wurde Stangenmaterial im leicht nachgezogenen Anlieferungszustand, +LC nach DIN EN 10263-5, verwendet. Beginnend bei den Prozesseigenschaften erfolgt eine Bestimmung des Bauteileigenspannungszustands sowie eine vertiefte Bauteilcharakterisierung [P7].

Während des Fließpressens der Bauteile wurden die für die Umformung und das Auswerfen erforderlichen Prozesskräfte ermittelt. Deren Maxima sind in Bild 58 abgebildet. Zusätzlich sind die Bauteiltemperaturen, gemessen nach dem Auswerfen und Entnehmen aus dem Werkzeug, dargestellt.

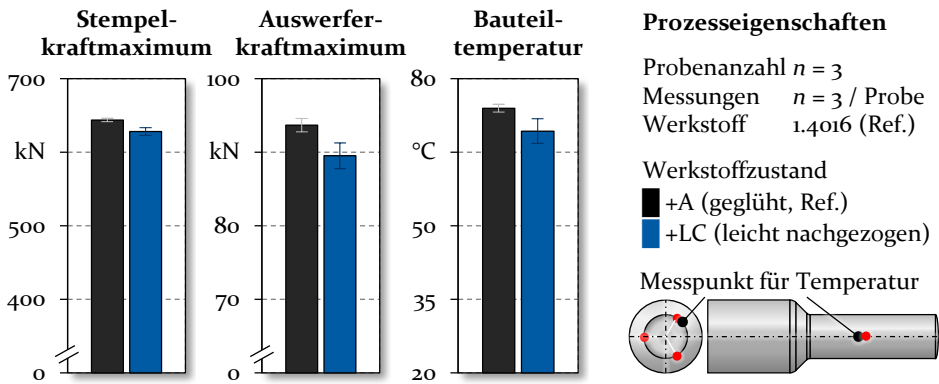


Bild 58: Prozesskräfte und Bauteiltemperaturen beim Einsatz von geblühtem (+A) und leicht nachgezogenem (+LC) Werkstoff

Bei Verwendung von geblühtem Material (+A) ist zur Herstellung der Teile eine Stempelkraft von 644 kN und eine Auswerferkraft von 94 kN erforderlich. Durch die Verformung des Materials und die Reibung zwischen dem Werkstück und der Matrize erwärmt sich das Bauteil auf eine Temperatur von 74 °C. Bei Verwendung von leicht nachgezogenem (+LC) Material werden jedoch etwas geringere Prozesskräfte von 628 kN am Stempel und 90 kN am Auswerfer gemessen. Dies spiegelt sich auch in der Bauteiltemperatur wider, wo lediglich 69 °C erreicht werden. Die Tribologie liefert eine Erklärung für diese Unterschiede. Da das leicht nachgezogene Material eine glattere Oberfläche aufweist als das geblühte, sind hier Einflüsse auf die auftretenden Reibungskräfte möglich, die mit den resultierenden Bauteiltemperaturen zusammenhängen.

Um den Einfluss des Werkstoffzustandes auf die Bauteileigenspannungen zu ermitteln, wurden röntgenografische Eigenspannungsmessungen an der

Oberfläche der hergestellten Bauteile durchgeführt. Da bei der Bauteilherstellung nur etwa 50 % des Rohlingsvolumens verformt werden, wurden die Messungen sowohl im unverformten als auch im umgeformten Bereich der Probekörper durchgeführt. Im unverformten Bereich war bei der Messung aufgrund der kleinen Messpunktgröße eine Oszillation in axialer Richtung notwendig, was zu einem linearen Messbereich führte. Zusätzlich zu den Eigenspannungen wurden die Halbwertsbreiten der Peaks bestimmt, um qualitative Informationen über die Verformungshistorie ableiten zu können. Die Ergebnisse sind in Bild 59 dargestellt.

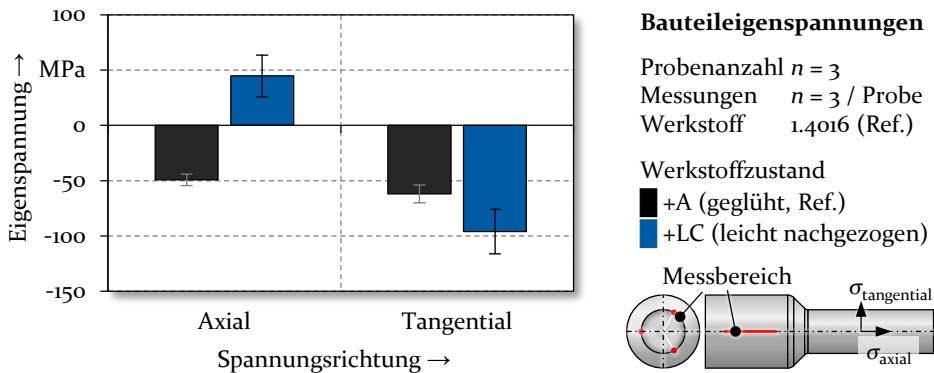


Bild 59: Eigenspannungen im nicht umgeformten Bereich von Bauteilen aus geglühtem (+A) und leicht nachgezogenem (+LC) Werkstoff

Im nicht deformierten Bereich A sind in der Oberfläche des geglühten Materials (+A) Druckeigenspannungen in axialer und in tangentialer Richtung vorhanden. Diese Spannungen resultieren aus der Abkühlung des Materials nach dem Weichglühen, da der Kern nach der Oberfläche abkühlt. Die thermische Schrumpfung führt zu Druckeigenspannungen an der Oberfläche und zu Zugspannungen im Kern [199]. Im leicht nachgezogenen Material (+LC) treten in axialer Richtung geringe Zugeigenspannungen auf, die durch den Kaltziehprozess verursacht werden [200]. In Umfangsrichtung sind die Druckspannungen höher als im geglühten Material. Dieser Eigenspannungszustand ist auf die Oberflächenbelastung beim Kaltziehen zurückzuführen [201]. Die Eigenspannungsverläufe an der Bauteiloberfläche nach der Umformung sind in Bild 60 dargestellt. In beiden Hauptspannungsrichtungen - axial und tangential - sind ähnliche Kurvenverläufe vorhanden. In der Nähe der Schulter treten geringe Eigenspannungen auf, die mit zunehmendem Abstand in ausgeprägte Zugspannungen übergehen.

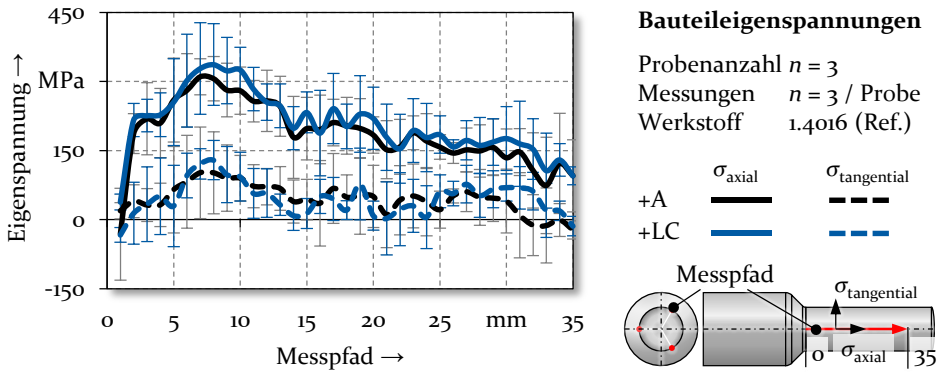


Bild 60: Eigenspannungen von Bauteilen aus geglühtem (+A) und aus leicht nachgezogenem (+LC) Werkstoff

Maximale Eigenspannungen liegen in einem Abstand von 8 mm von der Schulter mit etwa +310 MPa in axialer und etwa +100 MPa in tangentialer Richtung vor. Die Eigenspannungen nehmen in Richtung der Spitze ab. Dieser Spannungszustand kann durch die inhomogene Verformung während des Fließens durch die Umformzone erklärt werden [67] und deckt sich mit Ergebnissen aus der Literatur [202]. Trotz der unterschiedlichen Ausgangsbedingungen sind im umgeformten Zustand keine ausgeprägten Eigenspannungsunterschiede zwischen dem geglühten und dem leicht nachgezogenen Material festzustellen.

Eine Erklärung dafür ist, dass bei der Umformung der Bauteile ein wesentlich höherer Verformungsgrad auftritt als beim Kaltziehen des Materials. Eine Möglichkeit zur Analyse der eingebrachten Verformung bietet die Halbwertsbreite der bei der röntgenografischen Eigenspannungsbestimmung aufgenommenen Peaks als Maß der vorliegenden Versetzungsdichte [203]. In Bild 61 sind die Werte der Halbwertsbreite der Beugungspeaks dargestellt.

Im Ausgangszustand liegen aufgrund der oberflächennahen Verformung im leicht nachgezogenen (+LC) Werkstoff höhere Halbwertsbreiten der Beugungspeaks vor als im weichgeglühten (+A) Material. In den umgeformten Bereichen sind hingegen keine Unterschiede zwischen den Varianten zu erkennen. An der Erhöhung der Halbwertsbreiten im direkten Vergleich der Werte zwischen Ausgangsmaterial und umgeformten Werkstoff ist erkennbar, dass die in der Umformung eingebrachte Verformung deutlich höher ist als die beim Nachziehen.

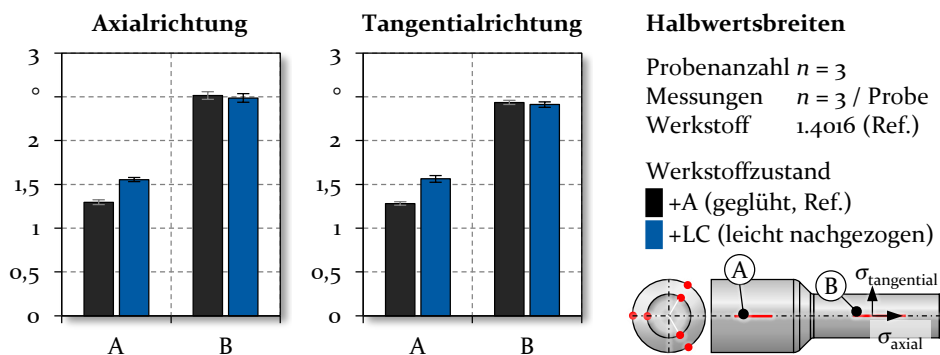


Bild 61: Halbwertsbreiten der Eigenspannungsmessungen in nicht umgeformten (A) und umgeformten (B) Bereichen von Bauteilen aus geglühtem (+A) und aus leicht nachgezogenem (+LC) Werkstoff

Röntgenografische Messungen bilden jedoch aufgrund der begrenzten Eindringtiefe nur den Eigenspannungszustand an der Oberfläche des Bauteils ab. Eine tiefenabhängige Spannungsmessung, bestehend aus abwechselnder röntgenografischer Spannungsbestimmung und einem elektrochemischen Abtragen ist aufgrund der Korrosionsbeständigkeit nur schwer durchführbar. Aus diesem Grund wird die Härte untersucht, um die Bauteileigenschaften im Inneren des Bauteils zu erfassen. Bei diesen Untersuchungen wird der Vergleich zwischen dem Ausgangszustand und den Werkstoffeigenschaften im umgeformten Zustand an einem Längsschnitt durchgeführt. Bild 62 zeigt die Mikrohärteverteilung der gefertigten Bauteile.

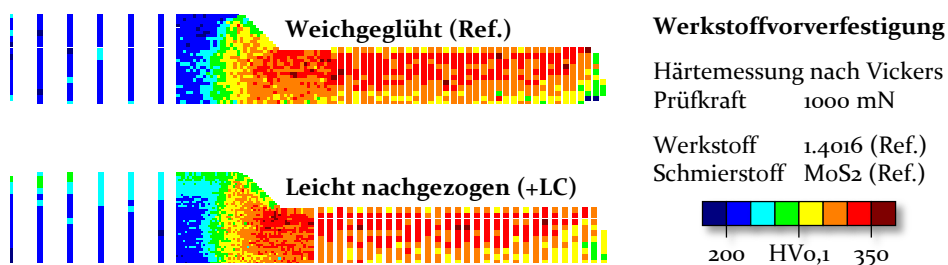


Bild 62: Einfluss einer Vorverfestigung auf die Mikrohärteverteilung im umgeformten Bauteil

Im umgeformten Schaft sind in beiden Varianten ähnliche Festigkeitsverteilungen vorhanden. Das Verfestigungsverhalten in der Umformzone weist keine qualitativen Unterschiede auf. In beiden Ausführungen liegt in der Kontaktzone zwischen Werkstück und Werkzeug eine verringerte Härte vor als im Werkstoffinneren. Zusammen mit den in Bild 61 gezeigten

Halbwertsbreiten erklären diese Härteverteilungen die beschriebene Übereinstimmung der Eigenspannungsverteilungen. Lediglich im nicht umgeformten Bauteilbereich sind Unterschiede zwischen den Varianten erkennbar. Die quantitative Mikrohärteverteilung in diesem Bereich ist in Bild 63 dargestellt.

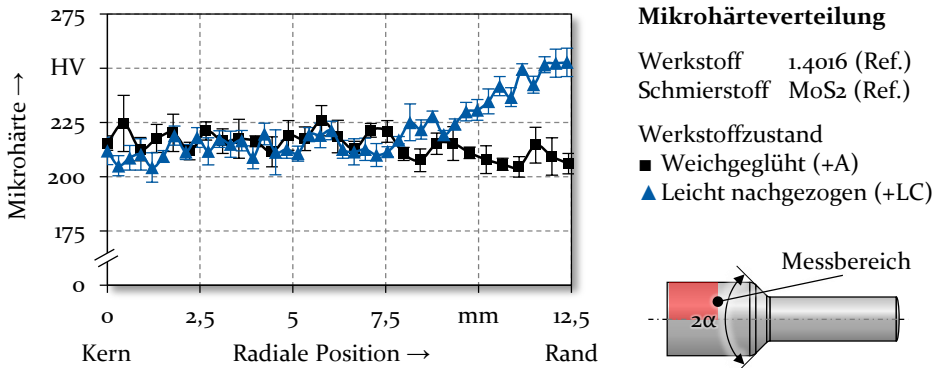


Bild 63: Mikrohärteverteilung im nicht umgeformten Bauteilbereich im vorverfestigten Werkstoff

Der weichgeglühte Werkstoff weist eine homogene Härteverteilung mit Werten zwischen 205 HV und 226 HV auf. Im leicht nachgezogenen (+LC) Material hingegen liegt im Ausgangszustand ein Härtegradient in radialer Richtung vor. Mit Werten von 208 HV bis 224 HV ist die Härte im Kern ähnlich der des geglühten Materials. Der Randbereich ist bis zu einer Tiefe von etwa 3 mm verfestigt und weist eine höhere Härte bis 253 HV auf. Die Standardabweichungen liegen um 9 HV mit Streubreiten von 3 HV bis 15 HV. Diese Zunahme der Härte ist auf die Halbzeugherstellung zurückzuführen. Bei der Herstellung erfolgt nach dem Weichglühen ein Kalibrier-schritt, in dem die Stangen leicht kalt nachgezogen werden. Die geringe Flächenabnahme in diesem Schritt bewirkt mit dem abschließenden Rundschleifen eine Verfestigung im Randbereich. Die Mikrohärte im umgeformten Schaft nach dem Fließpressen des Bauteils ist in Bild 64 gezeigt.

In beiden Varianten liegt im Kern eine Härte um 304 HV vor, die zum Rand hin ansteigt. Die Maxima liegt mit Werten um 340 HV jeweils etwa 1,3 mm unter der Oberfläche, während direkt am Rand eine verringerte Härte vorliegt. Der Wert im äußersten Messpunkt ist in der leicht nachgezogenen Variante mit 312 HV etwas niedriger als in der weichgeglühten Variante mit 328 HV, jedoch liegt der Messpunkt in letzterer weiter vom Rand entfernt.

Die Standardabweichungen liegen um 8 HV mit Streubreiten von 2 HV bis 14 HV.

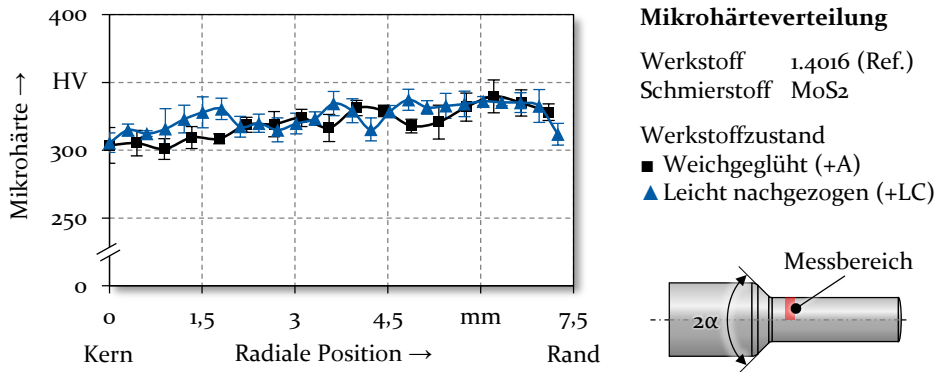


Bild 64: Einfluss der Vorverfestigung auf die Mikrohärteverteilung im umgeformten Schaft

Für beide Werkstoffzustände zeigen sich in den umgeformten Bauteilen grundlegend vergleichbare Mikrohärteverteilungen. Da sich die Mikrohärte trotz der unterschiedlichen Vorverfestigung in der Randschicht nicht signifikant verändert, kann davon ausgegangen werden, dass die geringe Verformung beim Nachziehen des Halbzeugs keinen Einfluss auf das Umformergebnis hat.

6.4.2 Einfluss der Schmierstoffauftragsmenge

In Untersuchungen von Lorenz et al. [204] wurde gezeigt, dass die Schmierstoffauftragsmenge den Reibfaktor im Ringstauchversuch beeinflusst. Da die tribologischen Bedingungen in dieser Arbeit bereits als maßgeblicher Faktor zur Eigenspannungsbeeinflussung identifiziert wurden, wird in diesem Abschnitt der Einfluss von streuenden Reibverhältnissen auf die Bauteileigenspannungen untersucht. Analog zur Referenzvariante werden dazu Rohlinge mit einer Schmierstoffträgerschicht aus Oxalat und einem MoS₂-basierten Schmierstoff beschichtet. Der Einfluss streuender Beschichtungsparameter wird in der praktischen Umsetzung über eine Änderung der Schmierstoffkonzentration im Beschichtungsbad hergestellt. In der Referenzvariante beträgt die Badkonzentration 11,5 %, da dies der häufigste in der Industrie verwendete Wert ist und die unterste sinnvolle Grenze für die Umformaufgabe darstellt. In den angepassten Varianten werden Konzentrationen von 14,0 % und 16,5 % gewählt, da letzteres den höchsten prozesssicher umsetzbaren Wert darstellt. Gleichzeitig mit den Umformrohlingen werden DCE-Proben beschichtet, an denen der

resultierende Reibfaktor bestimmt wird. In Bild 65 ist der Einfluss der Beschichtung auf den im DCE-Versuch ermittelten Reibfaktor dargestellt.

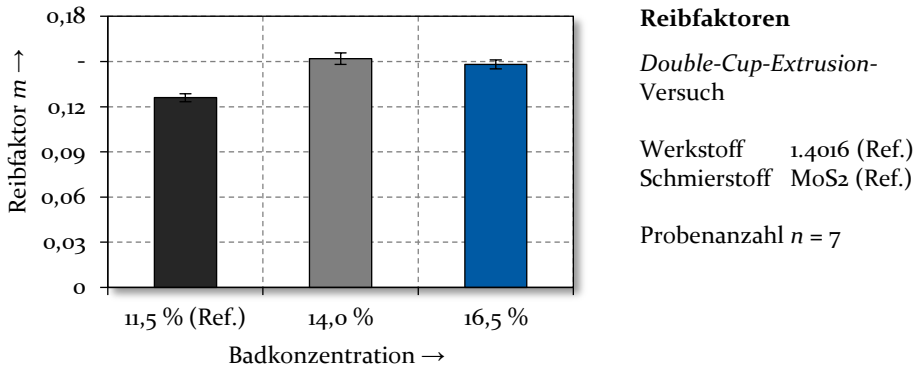


Bild 65: Einfluss der Badkonzentration (MoS₂) bei der Beschichtung auf die Reibfaktoren

Während in der Referenzvariante mit einer Badkonzentration von 11,5 % ein Reibfaktor von $0,126 \pm 0,003$ vorliegt, führt eine Erhöhung der Konzentration zu einer Erhöhung des Reibfaktors. In der mittleren Variante mit 13,5 % beträgt der Reibfaktor $0,152 \pm 0,04$, in der hohen Variante mit 16,5 % $0,148 \pm 0,003$. Für diese Erhöhung existieren verschiedene mögliche Ursachen. Eine Begründung ist zunehmende Reibung mit zunehmender Schichtdicke. Whitehouse et al. [205] haben eine Erhöhung der Reibung mit zunehmender Schichtdicke nachgewiesen. Nach Singer [206] liegt bei einer Schichtdicke im Bereich von $1 \mu\text{m}$ ein Minimum der Reibung vor. Unterhalb dieser Schichtdicke steigt die Reibung aufgrund von Rauheitsspitzen, die den Schmierstoff durchdringen, oberhalb wird sie durch die Umformung der Schicht erhöht. Siu und Li [207] haben gezeigt, dass eine zunehmende Schichtdicke zu abnehmender Reibung führt, aber ab einer Oberflächenrauheit $R_a > 0,2 \mu\text{m}$ kein Einfluss der Schichtdicke vorhanden ist, sondern nur noch die Oberflächenrauheit entscheidend ist.

Eine weitere mögliche Ursache ist eine Alterung des Schmierstoffs. Curry et al. [208] haben gezeigt, dass die Oxidation des MoS₂ durch Umwandlung in MoO₃ zu einer Erhöhung der Reibung führt. Stupp [209] hat zudem gezeigt, dass Alterung die Reibung erhöht und festgestellt, dass in dickeren und gealterten Schichten eher Reibungsanomalien auftreten. Im Gegensatz zu den Proben der angepassten Varianten wurden die Proben der Referenzvariante im vorliegenden Fall wenige Tage nach der Beschichtung geprüft, weshalb eine Alterung des Schmierstoffs nicht ausgeschlossen werden kann.

Zudem ist eine Beeinflussung der Schmiereigenschaften durch Umwelteinflüsse möglich. Curry [210] zeigt, dass Wasser die Scherfestigkeit der MoS₂-Gleitebenen und so die Reibung erhöht. Fusaro [211] hat nachgewiesen, dass die Reibung bei Schmierung mit MoS₂ mit steigender Luftfeuchtigkeit zunimmt, was auf eine erleichterte Oxidation zurückgeführt wurde. Fleischauer [212] hat gezeigt, dass die Reibung zunimmt, wenn MoS₂ in feuchter Atmosphäre gelagert und eingesetzt wird.

Mit den so beschichteten Rohlingen werden Fließpressteile mit der Geometrie der Referenzvariante hergestellt. Die im umgeformten Schaft verbleibenden Eigenspannungen sind in Bild 66 denen der Referenzvariante gegenübergestellt.

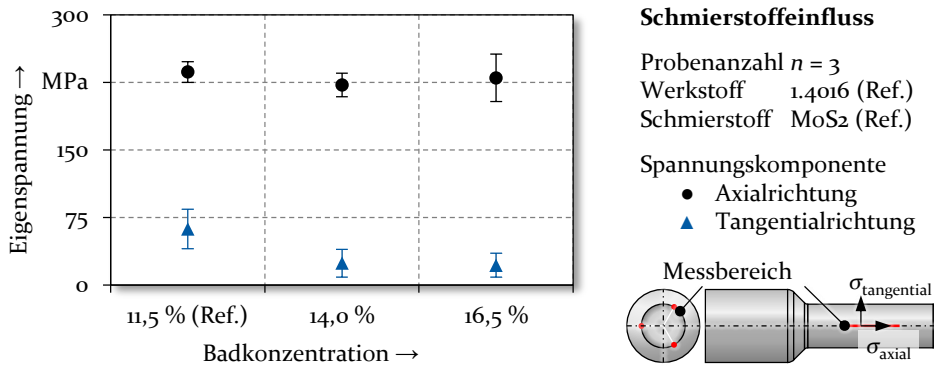


Bild 66: Einfluss der Badkonzentration (MoS₂) bei der Beschichtung auf die bei der Umformung entstehenden Eigenspannungen

Während bei der Referenzvariante Axialspannungen um 237 MPa vorliegen, treten bei höheren Badkonzentrationen und folglich höherer Schmierstoffmenge Eigenspannungen um 223 MPa bei 14 % und 230 MPa bei 16,5 % auf. In Tangentialrichtung liegen statt 62 MPa Zugeigenspannungen um 24 MPa vor. Unter Einbeziehung der Standardabweichungen der Messwerte – welche bei 17 MPa mit Streubreiten von 12 MPa bis 26 MPa liegen – sowie der Messunsicherheit der röntgenographischen Methode sind keine ausgeprägten Unterschiede zur Referenzvariante vorhanden. Einen Erklärungsansatz liefert Spalvins [213], wonach überschüssiger Schmierstoff unter Belastung abbricht, wodurch eine etwa 0,2 μm dicke Schicht verbleibt, die für die Schmierung sorgt. Die Relevanz der Schichtdicke ist somit ab einer bestimmten Grundhöhe gering.

6.5 Abgeleitete Erkenntnisse

Eine gezielte Beeinflussung des Bauteileigenspannungszustands ist durch die Steuergrößen Werkstoff, Matrizengeometrie und Schmierstoff möglich. Bild 67 zeigt die Einflüsse der untersuchten Steuergrößen auf die Eigenspannungsentstehung im untersuchten Fließpressprozess.

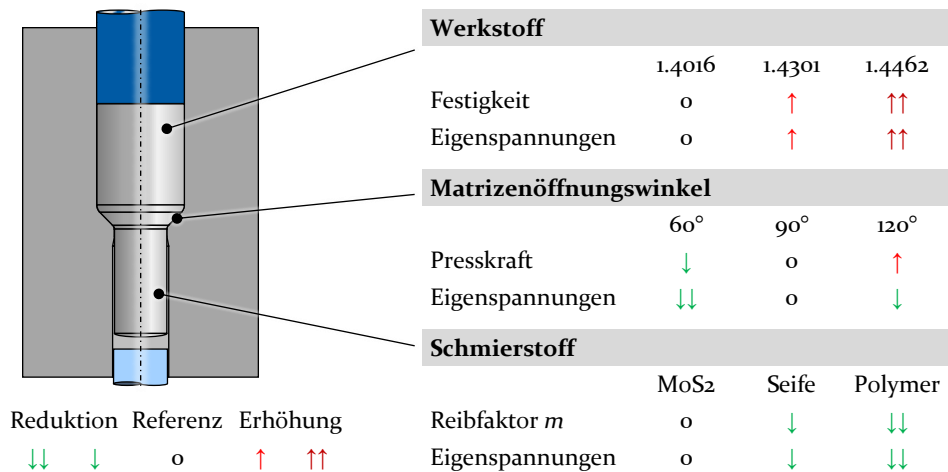


Bild 67: Einfluss von Steuergrößen zur Eigenspannungseinstellung beim Voll-Vorwärts-Fließpressen

Hinsichtlich des verwendeten Werkstoffs ist insbesondere die Festigkeit ausschlaggebend für das bei der Umformung erzielte Eigenspannungsniveau. Eine zunehmende Festigkeit resultiert dabei aufgrund des vergrößerten elastischen Dehnungsbereichs in höheren Eigenspannungsbeträgen. Während bei der Umformung festigkeitsunabhängig ähnliche Entstehungsmechanismen auftreten, können prozessseitige Wechselwirkungen die im Bauteil verbleibenden Eigenspannungsverteilungen beeinflussen. Im vorliegenden Prozess ist der Einfluss des Auswerfens bei Verwendung eines Werkstoffs mit höherer Festigkeit geringer als bei der Herstellung des Referenzbauteils. Dies ist auf die erhöhte Fließgrenze zurückzuführen, die durch das Gleiten des umgeformten Schafts auf dem Fließbund während des Auswerfens nicht erreicht wird. Bei der Bauteil-auslegung sind daher nicht nur die Auswirkungen der Änderung der Werkstofffestigkeit, sondern auch mögliche Wechselwirkungen mit Prozessgrößen zu beachten.

Während der Umformung beeinflusst der Matrizenöffnungswinkel maßgeblich die Eigenspannungsentstehung. Durch die Stoffflusssteuerung ist

eine Veränderung der Verfestigungsverteilung und daher der Eigenspannungsverteilung möglich. Während bei einem Winkel von $2\alpha = 90^\circ$ die höchsten oberflächennahen Zugeigenspannungen erreicht werden, sind diese bei Winkeln von $2\alpha = 60^\circ$ und $2\alpha = 120^\circ$ merklich reduziert. Dieser Mechanismus kann kostengünstig im Rahmen einer eigenspannungs-sensitiven Bauteil- und Prozessauslegung genutzt werden, um den Bauteileigenspannungszustand zu verbessern. Da fließgepresste Bauteile im Allgemeinen in mehreren Umformstufen hergestellt werden, kann die Änderung der Schultergeometrie des Werkstücks mit geringem Aufwand in der nächsten Fertigungsstufe kompensiert werden.

Eine weitere Einstellmöglichkeit ist durch den Schmierstoff gegeben. Eine Reduktion der Reibung zwischen Werkstück und Matrize bewirkt eine Verringerung der Eigenspannungswerte in der Bauteiloberfläche, bis hin zur Verschiebung in den Druckbereich. Der Grund dafür liegt in den während der Umformung vorherrschenden Spannungsverhältnissen, in denen die Reibung insbesondere die oberflächennahen Schubspannungen beeinflusst. Bei der Prozessauslegung ist eine Nutzung des verwendeten Tribosystems ein Stellhebel zur gezielten Eigenspannungseinstellung. Sofern geeignete Schmierstoffe mit geringen Reibfaktoren zur Verfügung stehen, kann deren Einsatz zu einer Verringerung der oberflächennahen Eigenspannungen genutzt werden.

Zwischen den einzelnen Einflussgrößen treten zudem auch Wechselwirkungen auf, die zu einer Überlagerung der Effekte führen. Eine Kombination einzelner Prozessanpassungen kann genutzt werden, um eine größtmögliche Verringerung der Oberflächeneigenspannungen zu erzielen oder Druckeigenspannungen zu erzeugen. Im vorliegenden Prozess werden mit den Parametern der Referenzvariante hohe Zugeigenspannungen in das Bauteil eingebracht. Eine gleichzeitige Anpassung von Matrizenöffnungswinkel und Schmierstoff ermöglicht hingegen die gezielte Einstellung belastungsgünstiger oberflächennaher Druckeigenspannungen.

Hinsichtlich der Eigenspannungsentstehung ist im Referenzprozess eine hohe Robustheit gegeben. Bei der Verwendung von weichgeglühtem Werkstoff werden wiederholbare Eigenspannungszustände erzeugt. Eine geringe oberflächennahe Vorverfestigung – wie sie typischerweise bei der Verwendung von leicht nachgezogenem Rohmaterial auftritt – beeinflusst die Eigenspannungsentstehung nicht. Da die während der Formgebung eingebrachten plastischen Dehnungen höher als die bei der Halbzeugherstellung sind, kann dieser Verfestigungszustand toleriert werden. In der Praxis kann

daher eine geringe Vorverfestigung im Werkstoff als unkritisch hinsichtlich einer Beeinflussung der Eigenspannungen erachtet werden. Dies reduziert die Notwendigkeit von thermischen Behandlungen zwischen den Umformschritten und erhöht so die Prozesseffizienz.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Schmierstoffbeschichtung mit MoS₂ zeigen keinen ausgeprägten Einfluss der Badkonzentration. Bei den Umformversuchen und den dabei entstehenden Bauteileigenspannungen ist eine Robustheit gegenüber der aufgetragenen Schmierstoffmenge zu erkennen. Sofern die Umformung möglich ist und eine Änderung der Schmierstoffmenge keine ausgeprägte Änderung des Reibfaktors bewirkt, ist daher kein eigenspannungsrelevanter Einfluss des Beschichtungs Vorgangs zu erwarten.

Diese Ergebnisse zeigen zum einen, dass die Bauteileigenspannungen grundsätzlich durch die Gestaltung des Fließpressprozesses beeinflusst werden können. Durch verschiedene Prozessanpassungen können definierte Eigenspannungszustände eingestellt werden. Zum anderen ist eine Robustheit des Prozesses gegenüber typischen Variationen der Eingangsgrößen gegeben. Um eine Veränderung der Bauteileigenschaften zu bewirken, ist nicht nur die Ausprägung des Eigenspannungszustands relevant, sondern auch dessen Stabilität während des Bauteileinsatzes.

7 Eigenspannungsstabilität bei typischer Betriebsbelastung

Beim Einsatz eines eigenspannungsbehafteten Bauteils beeinflussen die Eigenspannungen die effektiven Lastspannungen und somit das Ermüdungsverhalten. Günstige Spannungszustände – in den meisten Fällen oberflächennahe Druckeigenspannungen – können den Lastspannungen entgegenwirken und so das Einsatzverhalten verbessern, während ungünstige Verteilungen mit oberflächennahen Zugspannungen die Lebensdauer verringern können. Gleichzeitig wirken aber auch die Betriebsbelastungen auf den Werkstoff und können den Eigenspannungszustand ändern. Beanspruchungsgünstige Eigenspannungszustände können nur positive Auswirkungen haben, solange sie hinreichend stabil sind. Andererseits ist es möglich, ungünstige Eigenspannungszustände zu tolerieren, wenn sie im Betrieb hinreichend schnell abgebaut werden. Zur Abschätzung eigenspannungsbedingter Aus- und Wechselwirkungen sind daher Kenntnisse zur Stabilität unter typischen Betriebsbelastungen notwendig.

Im Bauteileinsatz unterliegen umgeformte Funktionsbauteile mechanischen Belastungen. Die Auslegung basiert dabei oft auf Tragfähigkeitsnachweisen, in denen die Betriebsbeanspruchung der Beanspruchbarkeit des Bauteils gegenübergestellt wird [214]. Im dynamischen Bauteileinsatz wird in der Regel die Langzeitfestigkeit zur Bewertung der Beanspruchbarkeit verwendet [215]. Bei korrekter Dimensionierung bewirkt die mechanische Beanspruchung makroskopisch lediglich elastische Verformungen des Bauteils. Unter zyklischer Belastung kann trotz Beanspruchung im elastischen Bereich aufgrund plastischer Deformationen im Mikrobereich eine Beeinflussung des Eigenspannungszustands auftreten [164]. Weiterhin können die Bauteile im typischen Betrieb thermisch beansprucht werden, wodurch eine Beeinflussung der Eigenspannungen möglich ist [216]. Diese Beanspruchung kann einerseits konstant aufgrund der Einsatzbedingungen vorherrschen. Andererseits können auch kurzzeitig erhöhte Temperaturen auftreten, beispielsweise bei Ausfall von Lagern oder Schmiersystemen.

Vor diesem Hintergrund wird im folgenden Kapitel das Ziel verfolgt, das Eigenspannungsverhalten unter typischen mechanischen und thermischen Betriebsbelastungen zu analysieren, Aus- und Wechselwirkungen zu

erkennen und zugrundeliegende Wirkmechanismen zu identifizieren. Das dabei verfolgte Vorgehen ist in Bild 68 gezeigt.

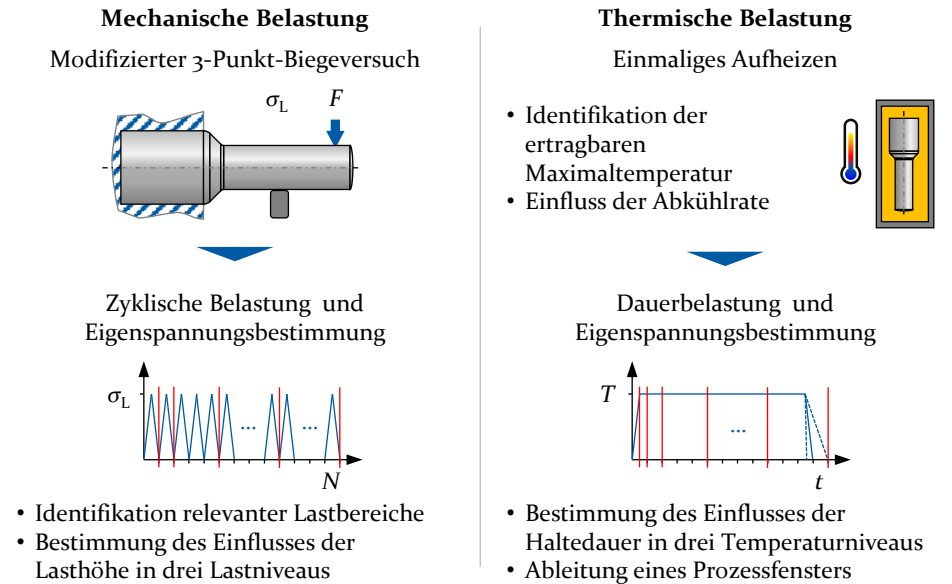


Bild 68: Vorgehen zur Bestimmung der Eigenspannungsstabilität unter typischen Betriebsbelastungen

Dazu werden die fließgepressten Proben einer mechanischen Belastung mit verschiedenen Lastniveaus unterzogen. Als Basis dient dabei ein modifizierter 3-Punkt-Biegeversuch, mit welchem eine schwellende Zugbeanspruchung in der Oberfläche erzeugt wird [P8]. Mit diesem Versuchsaufbau werden zunächst relevante Lastbereiche identifiziert, in denen die Eigenspannungen bei makroskopisch elastischer Beanspruchung beeinflusst werden. Anschließend sollen Auswirkungen und Wechselwirkungen zwischen der Lasthöhe, also der anliegenden Lastspannung, und der Anzahl der aufgetragenen Lastspiele identifiziert und untersucht werden.

Analog dazu erfolgt eine Untersuchung der Auswirkungen thermischer Beanspruchung [P9]. Dabei wird der Einfluss einer einmaligen thermischen Beanspruchung untersucht, wie sie im Bauteileinsatz beispielsweise beim einmaligen Ausfall eines Schmiersystems oder Lagers auftreten kann. Dazu soll ein Zusammenhang zwischen der Bauteiltemperatur und der Eigenspannungsstabilität hergestellt werden. Zur Validierung der Untersuchungsmethodik wird zudem der Einfluss der Abkühlrate untersucht. Weiterhin erfolgt eine Untersuchung der Stabilität unter thermischer

Dauerbelastung. Analog sollen dabei Wechselwirkungen zwischen der anliegenden Temperatur, der Belastungsdauer und dem Bauteileigen-
spannungszustand identifiziert werden.

7.1 Mechanische zyklische Biegebelastung

Zur Ermittlung der Eigenspannungsstabilität werden Bauteile mit Schulteröffnungswinkeln von $2\alpha = 60^\circ$, 90° und 120° verwendet, um den Einfluss der Verfestigungsverteilung mit zu berücksichtigen. Diese Bauteile werden einer zyklischen mechanischen Belastung auf drei Lastniveaus unterzogen, zu deren Festlegung die in Abschnitt 5.1 erfolgte Werkstoffcharakterisierung herangezogen wird. Nach 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 und 200 Belastungszyklen erfolgt eine röntgenografische Eigenspannungsbestimmung im Messpunkt, um so das Verhalten der Eigenspannungen bei fortschreitender Belastung in Abhängigkeit von Lastniveau und Herstellverfahren zu identifizieren.

Die Fließspannung des verwendeten Werkstoffs muss bekannt sein, um die Lastniveaus der mechanischen Belastung festzulegen. Während der Umformung wird der Rohlingsdurchmesser von 25 mm auf 15 mm reduziert, was einem globalen Umformgrad von 1,02 entspricht. Das inhomogene Geschwindigkeitsfeld des Werkstoffs während der Umformung führt jedoch zu einer inhomogenen Umformgradverteilung im Bauteil. In der numerischen Umformsimulation wurde ein Umformgrad von 1,5 an der Bauteiloberfläche festgestellt. Mit der in Abschnitt 5.1 gezeigten Extrapolationsmethode von Voce führt dies zu einer Fließspannung von 757 MPa, während andere Modelle 876 MPa (Hollomon), 892 MPa (Hockett-Sherby) und 950 MPa (Ludwik) vorhersagen.

Basierend auf diesen Daten werden drei Lastniveaus festgelegt. Das untere Lastniveau ist mit 500 MPa im elastischen Bereich für sämtliche Extrapolationsmodelle. Das mittlere Lastniveau liegt mit 700 MPa nahe der geringsten erwarteten Fließspannung. Das obere Lastniveau ist mit 900 MPa nahe dem plastischen Bereich für die höchste erwartete Fließspannung.

7.1.1 Experimentelle Ergebnisse

Bei der Bauteilprüfung auf dem unteren Lastniveau ist die im Bauteil induzierte Lastspannung mit 500 MPa im elastischen Bereich für die gezeigten Materialmodelle. Die Ergebnisse der zyklischen Belastungsversuche sind in Bild 69 dargestellt.

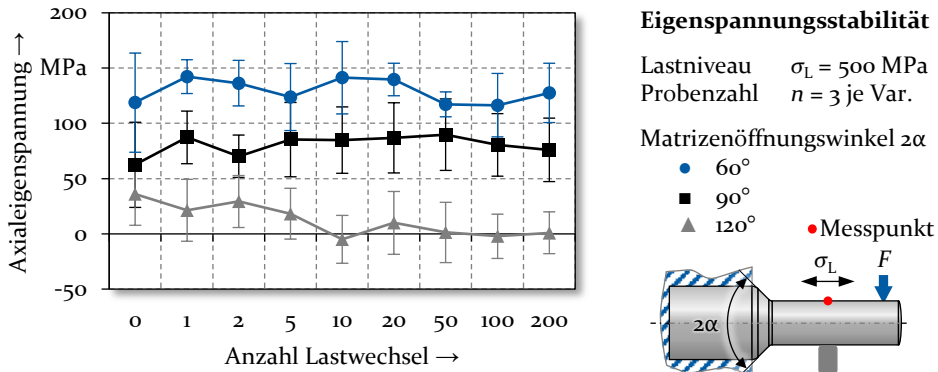


Bild 69: Stabilität der axialen Eigenspannungen bei einer Lastspannung von 500 MPa

In den Bauteilen der Referenzvariante mit einem Schulteröffnungswinkel von $2\alpha = 90^\circ$ liegen nach der Umformung und dem Auswerfen Zugeigenspannungen vor. Mit zunehmender Zyklenzahl bei einer Lastspannung von 500 MPa zeigen sie keine ausgeprägte Veränderung. Obwohl der Mittelwert eine gewisse Schwankung aufweist, liegen unter Berücksichtigung der Messunsicherheit keine signifikanten Abweichungen vor. In den Bauteilen mit $2\alpha = 60^\circ$ liegen geringere Zugeigenspannungen vor, die mit zunehmender Zyklenzahl ebenfalls keine signifikante Änderung aufweisen.

Die Bauteile mit $2\alpha = 120^\circ$ zeigen nach der Umformung die niedrigsten Eigenspannungswerte. Nach zehn Zyklen sind sie zu einem Mittelwert zwischen -5 MPa und 10 MPa reduziert, auf dem sie bis 200 Lastzyklen verbleiben. Ein möglicher Grund hierfür liegt in den besonderen Eigenschaften der Randschicht und des oberflächennahen Werkstoffvolumens. Der vorliegende geringere Umformgrad führt zu einer geringeren Verfestigung. Mit einer Last von 500 MPa tritt plastische Verformung auf und führt so zu einer Verringerung der Zugeigenspannungen. Dies würde nicht nur die Oberfläche betreffen, an der die Spannungen reduziert werden, sondern auch einen oberflächennahen Werkstoffbereich, in welchem eine geringere Kaltverfestigung zu einer verringerten Werkstofffestigkeit und folglich zu einem reduzierten Widerstand gegen Verformung führt. Eine weitere mögliche Begründung liegt in der Schädigung. Die Umformung mit einem Matrizenöffnungswinkel von $2\alpha = 120^\circ$ resultiert in sehr hohen Kontaktdrücken an der Matrizen Schulter. In Verbindung mit der Lastumkehr beim Auswerfen ist das Auftreten von Schädigung in den untersuchten Oberflächenbereichen möglich.

Abhängig vom verwendeten Materialmodell liegt eine Lastspannung von 700 MPa nahe der plastischen Deformation der Proben. Die Ergebnisse der Prüfung mit dieser Lastspannung sind in Bild 70 dargestellt.

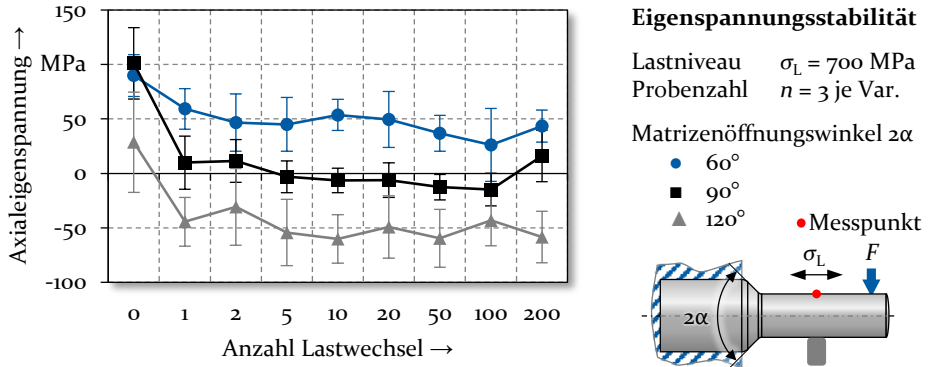


Bild 70: Stabilität der axialen Eigenspannungen bei einer Lastspannung von 700 MPa

Eine Verringerung der Eigenspannungen wird in unterschiedlicher Ausprägung in sämtlichen Proben beobachtet. Die mit $2\alpha = 60^\circ$ umgeformten Bauteile weisen Zugeigenspannungen von 90 MPa auf, welche geringfügig auf ein stabiles Niveau um 50 MPa reduziert werden. In der Referenzvariante mit $2\alpha = 90^\circ$ werden die ausgeprägten Eigenspannungen von 100 MPa nach dem ersten Belastungszyklus eliminiert und verbleiben auf einem Werte von ± 15 MPa, was als spannungsfrei angesehen wird. In den Bauteilen mit einem Schulteröffnungswinkel von $2\alpha = 120^\circ$ liegen nach der Umformung geringe Zugspannungen vor. Nach der ersten Belastung sind Druckeigenspannungen vorhanden, die für den Rest der Testprozedur auf einem konstanten Niveau von -50 MPa verbleiben.

Eine Begründung für das gezeigte Eigenspannungsverhalten ist plastische Verformung der beeinflussten Bereiche. Sie tritt auf, wenn die gesamte Last, bestehend aus Eigen- und Lastspannungen, die Fließgrenze des Werkstoffs erreicht. Sobald dies der Fall ist, wird die Dehnungsverteilung im Bauteil verändert, was nach der elastischen Rückfederung beim Entlasten zu einer veränderten Eigenspannungsverteilung führt. In Bereichen, welche durch Zugspannungen umgeformt wurden, existieren nach dem Entlasten üblicherweise Druckeigenspannungen [217]. Im vorliegenden Fall legt dies nahe, dass in den Bauteilen mit $2\alpha = 60^\circ$ eine höhere Kaltverfestigung vorliegt als in denen mit $2\alpha = 90^\circ$. Trotz eines ähnlichen ursprünglichen Eigenspannungszustands tritt bei Letzteren eine ausgeprägtere Reduktion auf. Eine weitere Erklärung liefert das unter der

Oberfläche liegende Zugspannungsmaximum. Sobald die Gesamtspannung ausreicht, um die Fließspannung zu erreichen, wird der Werkstoff im Ort des Zugspannungsmaximum plastifiziert. Aufgrund der notwendigen Gleichgewichtsbedingung führt dies zu einer Reduktion des Zugspannungsmaximums und nachfolgend einer Umlagerung des Eigenspannungszustands. In diesem Fall wird eine Änderung der Oberflächeneigenspannungen gemessen, welcher jedoch indirekt auf die Last zurückzuführen ist.

In allen Varianten ist hingegen nach einer Änderung im ersten Zyklus ein konstantes Eigenspannungsniveau vorhanden. Dies weist darauf hin, dass die plastische Deformation im ersten Zyklus in den Bauteilen eine stabile Dehnungsverteilung mit einem konstanten Eigenspannungszustand erzeugt.

Eine Last von 900 MPa ist am Anfang des plastischen Bereichs der untersuchten Materialmodelle. Die Ergebnisse der Prüfung mit diesem Lastniveau sind in Bild 71 dargestellt.

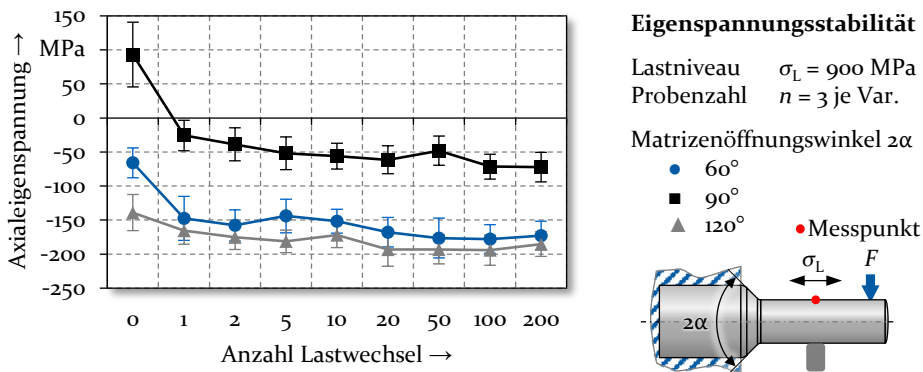


Bild 71: Stabilität der axialen Eigenspannungen bei einer Lastspannung von 900 MPa

In sämtlichen Proben wird während der zyklischen Prüfung eine Abnahme der Eigenspannungen beobachtet. In der Variante mit $2\alpha = 90^\circ$ sind nach der Umformung mit 95 MPa die höchsten Eigenspannungen vorhanden. Nach dem ersten Prüfzyklus werden sie um 120 MPa reduziert, was zu geringen Druckeigenspannungen von -25 MPa führt. Mit zunehmenden Lastzyklen werden sie auf -75 MPa verstärkt. Der Eigenspannungswert in den Proben mit $2\alpha = 60^\circ$ wird im ersten Zyklus von -65 MPa auf -150 MPa reduziert. Nach 200 Zyklen liegen -175 MPa vor. Die Proben mit $2\alpha = 120^\circ$ zeigen eine vergleichsweise geringe Abnahme von -140 MPa auf -190 MPa.

Zwischen einem und 200 Lastzyklen wird für sämtliche Varianten eine kontinuierliche Zunahme von Druckeigenspannungen nachgewiesen mit

Absolutwerten von 25 MPa bis 50 MPa. Die Begründung dafür liegt in der plastischen Deformation der Randschicht, die den höchsten Zuglastspannungen unterliegt. Analog zum Biegebalken werden Druckeigenstressungen erzeugt durch überelastische Zugbeanspruchung und elastische Rückfederung. Der Aufbau der Druckspannungen ist auf eine geringe plastische Verformung bei jedem Belastungszyklus zurückzuführen. Im ersten Lastzyklus sind jedoch ausgeprägte Unterschiede erkennbar. Die höchsten Zugeigenstressungen in den Bauteilen mit $2\alpha = 90^\circ$ erfahren die höchste Abnahme um einen Wert von 120 MPa, während die höchsten Druckeigenstressungen lediglich um 25 MPa verändert werden.

7.1.2 Validierung der Methodik

Um das Vorgehen der Prüfung zu validieren, werden zusätzlich zum axialen Anteil die Tangentialeigenstressungen ausgewertet. Die Ergebnisse sind für sämtliche Lastniveaus in Bild 72 dargestellt.

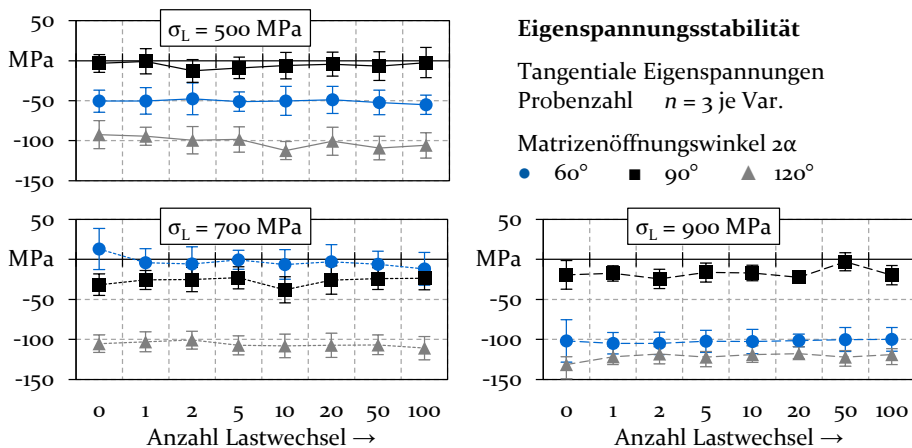


Bild 72: Stabilität der tangentialen Eigenstressungen bei wechselnden Lastspannungen von 500 MPa bis 900 MPa

Bei der mit $2\alpha = 90^\circ$ umgeformten Referenzvariante sind geringe Eigenstressungen zwischen -5 MPa und -35 MPa vorhanden. Diese Unterschiede können auf die Wiederholbarkeit des Prozesses und die allgemeine Messunsicherheit zurückgeführt werden. Für $2\alpha = 60^\circ$ liegen bei den drei Probengruppen unterschiedliche tangentiale Spannungen vor. Dies ist auf die Umformung an der Prozessgrenze zurückzuführen, bei der der geringe Werkzeugöffnungswinkel zu einer großen Umformzone und damit zu hohen Gleitwegen führt. Dadurch können Eigenstressungseinflüsse aus

den Kontaktbedingungen und geringen Unterschieden des tribologischen Systems entstehen. Bei den Varianten mit $2\alpha = 120^\circ$ liegen tangential Spannungen zwischen -95 MPa und -130 MPa vor.

Bei sämtlichen Matrizenöffnungswinkeln und Lastniveaus ist zu erkennen, dass die tangentialen Eigenspannungen während der Prüfzyklen konstant sind und nicht durch die Lastspannung beeinflusst werden. Dies zeigt, dass die aus der Biegebelastung resultierende axiale Lastspannung wie vorgesehen lediglich die axialen Eigenspannungen beeinflusst.

7.2 Thermische Belastung

Neben mechanischen Lasten können auch Temperaturänderungen die Bauteileigenspannungen beeinflussen. In diesem Abschnitt wird das Ziel verfolgt, die thermische Stabilität der umformtechnisch eingebrachten Eigenspannungen zu charakterisieren und ein Prozessfenster zum Bauteileinsatz zu erarbeiten. Weiterhin wird der Eigenspannungsabbau unter thermischer Belastung untersucht, um den Bereich der Eigenspannungsstabilität eingrenzen und die Eigenspannungsreduktion außerhalb dieses Bereichs quantifizieren zu können. Als stabil wird ein Eigenspannungszustand bewertet, wenn die Abweichungen zu vorhergehenden Messwerten innerhalb der Messunsicherheit liegen [218]. Diese beträgt 30 MPa mit dem in dieser Arbeit verwendeten Messaufbau. Als technisch spannungsfrei werden Eigenspannungswerte beurteilt, deren Beträge kleiner als diese Messunsicherheit sind.

Die Untersuchung des thermischen Einflusses ist in drei Aspekte untergliedert. Durch einmaliges Aufheizen bei definierten Temperaturniveaus werden die Einsatzgrenzen ermittelt, bei denen unter einmaliger Belastung Stabilität oder eine nahezu vollständige Relaxation auftritt. Durch intervallweises Halten bei definierten Temperaturniveaus mit zwischen-geschalteten Eigenspannungsmessungen werden Zusammenhänge zwischen der Belastungsdauer, der thermischen Belastung und dem resultierenden Eigenspannungsabbau identifiziert, um so Einsatzbereiche für stabile Eigenspannungen definieren zu können. Der Aspekt der Eigenspannungsbeeinflussung durch die Abkühlung wird zudem untersucht, um versuchsbedingte Einflüsse zu identifizieren.

Für die Versuchsdurchführung wird der Umluft-Kammerofen *Nabertherm N 120/65 HA* mit Luft als Atmosphäre verwendet. Die Proben werden im vorgeheizten Ofen platziert. Zur Überwachung der Bauteiltemperaturen wird eine zusätzliche Probe mit identischer Geometrie verwendet, bei der

ein Thermoelement im Kern angebracht ist, um ein vollständiges Aufheizen der Probe zu gewährleisten.

Das Weichglühen der Umformrohlinge wird um 800 °C durchgeführt [219], weshalb im Rahmen dieser Arbeit der Einfluss niedrigerer Temperaturen untersucht wird. Die in diesem Abschnitt verwendeten Prüftemperaturen liegen unter 550 °C. In diesem Bereich treten bei einmaligem Aufheizen keine Phasenumwandlung ein [220]. Bei Haltedauern über 200 Stunden in Temperaturbereichen über 450 °C ist eine Beeinflussung des ferritischen Werkstoffs durch die 475 °C-Versprödung zu erwarten [221], welche durch die Bildung einer chromreichen α' -Phase aufgrund einer Entmischung des Eisen-Chrom-Mischkristalls charakterisiert ist.

7.2.1 Einfluss der Aufheiztemperatur

Um den Einfluss der Einsatztemperatur auf die oberflächennahen Eigenspannungen zu ermitteln, werden Bauteile auf definierte Temperaturniveaus unterhalb der üblichen Spannungsarmglühtemperatur erwärmt und an ruhender Luft abgekühlt. Als Temperaturen werden 250 °C, 350 °C, 450 °C und 550 °C gewählt. Durch den Verzicht auf eine Haltezeit wird nur der Einfluss der Erwärmung auf eine definierte Temperatur untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 73 dargestellt.

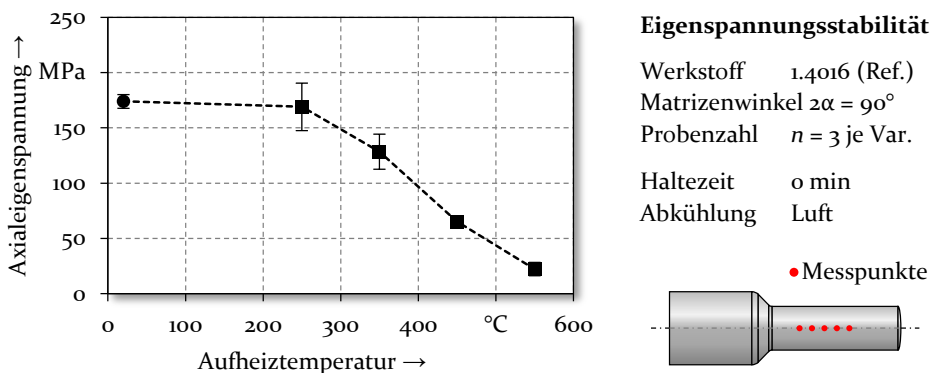


Bild 73: Einfluss des Aufheizens auf die Bauteileigenspannungen

Nach dem Umformen und Auswerfen liegen in den Probekörpern ausgeprägte Zugeigenspannungen von etwa 180 MPa vor. Eine einmalige Erwärmung auf eine Temperatur von 250 °C führt zu keinem signifikanten Abbau. Mit steigender Temperatur ist jedoch eine ausgeprägte Abnahme der Eigenspannungen zu beobachten. Eine Erwärmung auf 350 °C bewirkt einen Rückgang der Eigenspannungen um 39 % auf 130 MPa. Bei einer Temperatur von 550 °C verbleiben 22 MPa im Prüfbereich. Da dieser Wert

innerhalb der Messunsicherheit liegt, wird dieser Eigenspannungszustand als technisch spannungsfrei angesehen.

Dieser Eigenspannungsabbau wird auf eine Verringerung der Materialfestigkeit bei erhöhter Temperatur zurückgeführt, die zu einer Reduzierung der höchsten Eigenspannungen führt. Um dies zu nachzuweisen, wurden Druckversuche bei erhöhter Temperatur mit der servohydraulischen Prüfmaschine *Gleeble 3500* der Firma *Dynamic Systems Inc.* durchgeführt, um die Festigkeit und das Verfestigungsverhalten des verwendeten Werkstoffs zu charakterisieren. In Bild 74 sind die aus den Warmstauchversuchen erarbeiteten Fließkurven von Raumtemperatur bis 400 °C dargestellt.

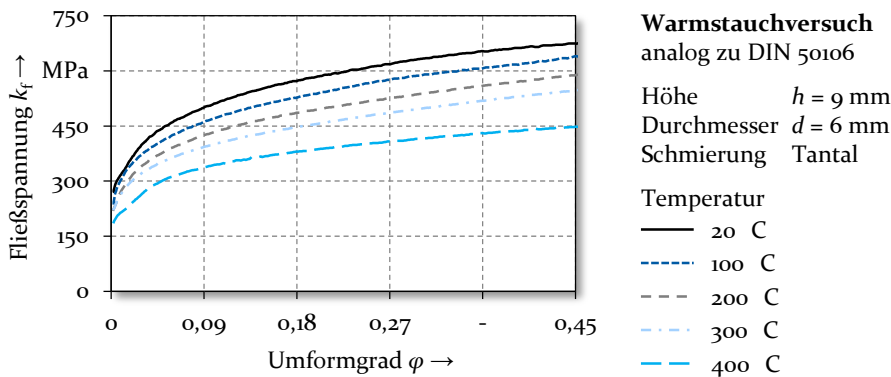


Bild 74: Fließkurven des verwendeten Werkstoffs 1.4016 bei erhöhten Temperaturen

Bei Raumtemperatur weist das Material eine Streckgrenze von 263 MPa auf, die sich bei einem Umformgrad von $\varphi = 0,12$ aufgrund der Kaltverfestigung verdoppelt. Bei einer Erhöhung der Prüftemperatur um 100 °C wird eine mittlere Verringerung der Streckgrenze von 7 % bis 10 % nachgewiesen. In den umgeformten Versuchsteilen sind im Kern hohe Druckeigenspannungen vorhanden, die mit Zugspannungen nahe der Oberfläche im Gleichgewicht stehen [P5]. Eine globale Verringerung der Materialfestigkeit durch thermische Mechanismen führt zu einer Relaxation der höchsten Spannungen durch Plastifizierung. Dieser Mechanismus ist in Bereichen mit hohen Spannungen wie dem Bauteilkern oder dem Zugeigenspannungsmaximum unter der Oberfläche besonders ausgeprägt. Ein zweiter relevanter Mechanismus ist die Auflösung von hohen Versetzungsdichten. Dieser Effekt betrifft vor allem mikroskopische Bereiche wie Korngrenzen. Für Temperaturen von 300 °C bis 550 °C wurde in [222] eine Verringerung der Versetzungsdichten nachgewiesen. Dieser Abbau der makroskopischen und mikroskopischen Eigenspannungsmaxima führt zu

einem reduzierten Gesamteigenspannungsniveau aufgrund des notwendigen Spannungsgleichgewichts im Werkstoff.

7.2.2 Eigenspannungsänderung durch Abkühlung

Neben dem Halten bei erhöhter Einsatztemperatur kann auch durch die Abkühlung eine Beeinflussung des Bauteileigenspannungszustands auftreten. Aus diesem Grund wird untersucht, in welcher Form die Abkühlungsgeschwindigkeit die Eigenspannungen beeinflusst. Dazu werden Proben auf ein Temperaturniveau von 350 °C aufgeheizt, da bei diesem bereits ein Eigenspannungsabbau zu erkennen ist. Anschließend erfolgt eine Abkühlung auf Raumtemperatur mit hoher Abkühlrate in Wasser, mit mittlerer Abkühlrate an ruhender Luft und mit geringer Abkühlrate im geschlossenen und abkühlenden Ofen. Die Ergebnisse sind in Bild 75 dargestellt

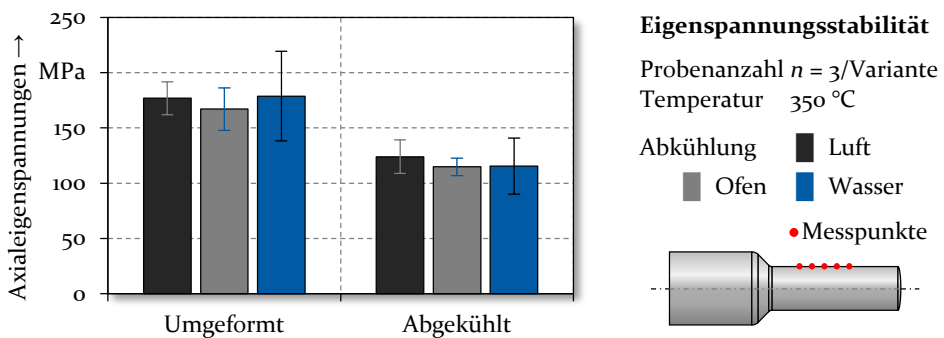


Bild 75: Einfluss der Abkühlung von 350 °C auf Raumtemperatur auf die Bauteileigenspannungen

Im umgeformten Zustand sind in den Proben in Axialrichtung Eigenspannungswerte zwischen 167 MPa und 179 MPa vorhanden. Nach der schnellen Abkühlung in Wasser liegen wie bei der langsamen Abkühlung im Ofen Werte von 115 MPa vor. Bei der Abkühlung an Luft mit mittlerer Abkühlrate verbleiben 124 MPa. Die geringen Abweichungen zwischen den Varianten zeigen, dass die Abkühlung im Rahmen der gegebenen Randbedingungen keinen ausgeprägten Einfluss auf die oberflächennahen Eigenspannungen bewirkt.

Dies ist auf ein homogenes Temperaturfeld bei der Abkühlung zurückzuführen. Bei schneller Abkühlung einzelner Bauteilbereiche mit Wasser ist durch das inhomogene Temperaturfeld zwar eine Beeinflussung der Eigenspannungen zu erwarten [223], durch das vollständige Untertauchen der Probe wird jedoch eine gleichmäßige Wärmeabfuhr gewährleistet. Das aus

der thermischen Ausdehnung resultierende Spannungsfeld ist aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen und der kurzen Wirkdauer wenig ausgeprägt. Während der thermischen Belastung können die Eigenspannungen aufgrund der Reduktion der Fließgrenze relaxieren, bei der Abkühlung werden sie aufgrund des homogenen Temperaturfelds jedoch nicht beeinflusst. In den folgenden Untersuchungen wird daher als Standardvariante die Abkühlung an Luft eingesetzt.

7.2.3 Temperaturabhängiger Einfluss der Haltezeit

Zusätzlich zur Höhe der thermischen Belastung ist deren Aufbringdauer ein zentraler Faktor hinsichtlich der Eigenspannungsstabilität. Aus diesem Grund wird im Folgenden anhand der Referenzvariante der Einfluss von Temperatur und Haltedauer auf die Eigenspannungen ermittelt. Zudem wird der Einfluss der Bauteilgeometrie und der damit verbundenen geänderten Verfestigungsverteilung untersucht.

Temperatureinfluss

Anhand der Referenzvariante erfolgt eine kombinierte Untersuchung der Einflüsse von Temperatur und Haltedauer. Für die thermische Belastung wird der in Abschnitt 7.2.1 identifizierte Bereich von 250 °C bis 550 °C verwendet. Die Ergebnisse sind in Bild 76 dargestellt.

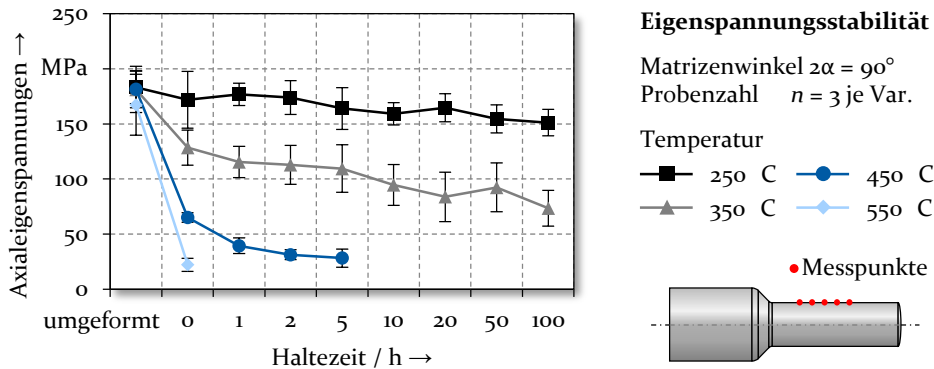


Bild 76: Einfluss der Temperatur und Haltezeit auf die Bauteileigenspannungen

Nach der Umformung liegen die Proben sämtlicher Varianten auf einem vergleichbaren Eigenspannungsniveau von 167 MPa bis 183 MPa. Nach einmaligem Aufheizen liegt bei einem Temperaturniveau von 550 °C eine technisch vollständige Relaxation mit einem Eigenspannungswert von 22 MPa vor. Bei 450 °C tritt beim ersten Aufheizen ein ausgeprägter Eigenspannungsabbau auf 65 MPa auf. Mit zunehmender Haltedauer wird das

Spannungsniveau reduziert. Nach 2 h liegen unter 30 MPa vor, was als technisch spannungsfrei angesehen wird. Bei einer thermischen Belastung von 350 °C tritt beim ersten Aufheizen der höchste Abbau auf einen Wert von 128 MPa auf. Mit zunehmender Haltedauer relaxieren die Eigenspannungen zunehmend. Bei einer Beanspruchungsdauer von 100 h tritt eine Reduktion auf 74 MPa in den Messpunkten auf. Die Belastung bei 250 °C führt zu einem geringfügigen Abbau der Eigenspannungen. Nach 100 h ist eine Abnahme um etwa 30 MPa zu erkennen.

Dieser thermische Abbau der Eigenspannungen ist zum Teil auf die im Abschnitt 7.2.1 gezeigte Reduktion der Festigkeit mit zunehmender Temperatur zurückzuführen. Gleichzeitig werden durch Erholungsvorgänge die im Werkstoff vorhandenen Eigenspannungen verringert. Dies wird durch die in Bild 77 dargestellten Verläufe der Halbwertsbreiten der Beugungspeaks der röntgenographischen Spannungsbestimmung deutlich.

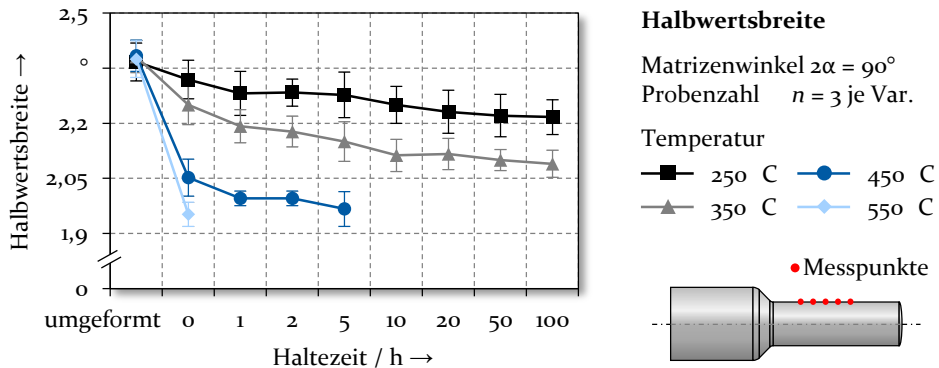


Bild 77: Thermische Beeinflussung der Halbwertsbreite

Da die Verläufe der Halbwertsbreiten in Bild 77 denen der Eigenspannungen in Bild 76 folgen, ist ein kausaler Zusammenhang naheliegend. Nach der Kaltumformung ist im Werkstoff aufgrund der eingebrachten Verformung eine hohe Versetzungsdichte gegeben. Wie in Abschnitt 6.4.1 gezeigt, resultiert dies in einer Erhöhung der Halbwertsbreite der bei der Spannungsbestimmung aufgenommenen Beugungspeaks. Im umgeformten Zustand liegen daher bei sämtlichen Bauteilen die höchsten Halbwertsbreiten vor. Eine Erhöhung der Temperatur des umgeformten Werkstoffs begünstigt Erholungsvorgänge, bei denen durch thermisch aktivierte Vorgänge Versetzungsbewegungen ermöglicht werden [18]. Diese Bewegungen lassen Versetzungen energetisch günstigere Positionen einnehmen, Kristalle verlassen und sich gegenseitig auslöschen, wodurch die Versetzungsdichte abnimmt. Durch die Erholungsvorgänge wird die im

Gitter gespeicherte Energie und damit die Eigenspannungen reduziert [224]. Das Vorliegen von Erholung im Werkstoff wird in Bild 77 durch die Verringerung der Halbwertsbreite mit zunehmender Temperatur und Haltedauer belegt.

Eine mathematische Beschreibung des thermischen Eigenspannungsabbaus ist mittels des Avrami-Ansatzes möglich. Für die vorliegenden Daten wurden mithilfe des Excel-Solvers die notwendigen Parameter mit der Methode der kleinsten Quadrate identifiziert. Die Ergebnisse sind in Bild 78 dargestellt.

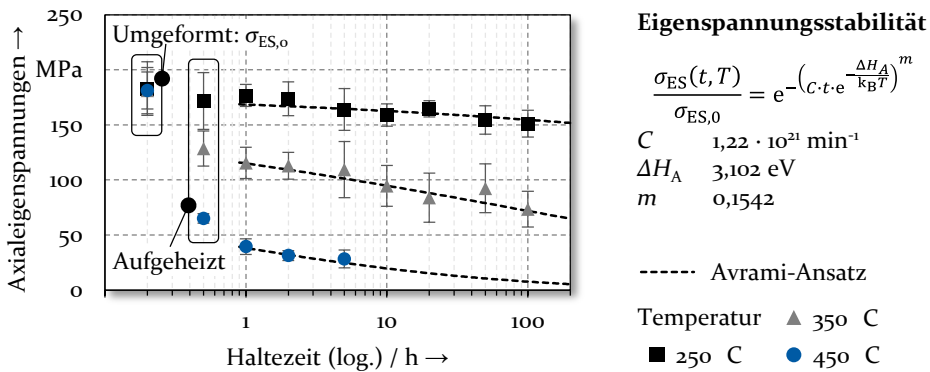


Bild 78: Beschreibung der Eigenspannungsrelaxation mittels eines Avrami-Ansatzes

Für den verwendeten Avrami-Ansatz wurden ein Geschwindigkeitsfaktor von $C = 1,22 \cdot 10^{21} \text{ min}^{-1}$, eine Aktivierungsenthalpie von $\Delta H_A = 3,102 \text{ eV}$ und ein Exponent $m = 0,1542$ identifiziert. Diese Werte liegen in einem ähnlichen Bereich wie von Holzapfel in [169] ermittelt. Die für die verschiedenen Temperaturniveaus abgeleiteten Kurven bilden die experimentell bestimmten Werte gut ab. Um einen technisch spannungsfreien Zustand mit einem Eigenspannungsbetrag von 30 MPa zu erreichen, sind bei einer Temperatur von 350 °C etwa 7500 h notwendig, was 313 Tagen entspricht. Bei einer Temperatur von 250 °C sind $490 \cdot 10^6 \text{ h}$ oder etwa 20 000 Jahre notwendig.

Für die praktische Bewertung der Eigenspannungsstabilität werden entsprechend der allgemeinen Messunsicherheit der röntgenografischen Bestimmungsmethode Änderungen bis 30 MPa toleriert. Auf dieser Basis wurde mit den identifizierten Parametern des Avrami-Ansatzes das in Bild 79 dargestellte Schaubild erarbeitet, das den Zusammenhang zwischen den vor der Belastung vorliegenden Eigenspannungen und der ertragbaren Belastungstemperatur und -dauer zeigt.

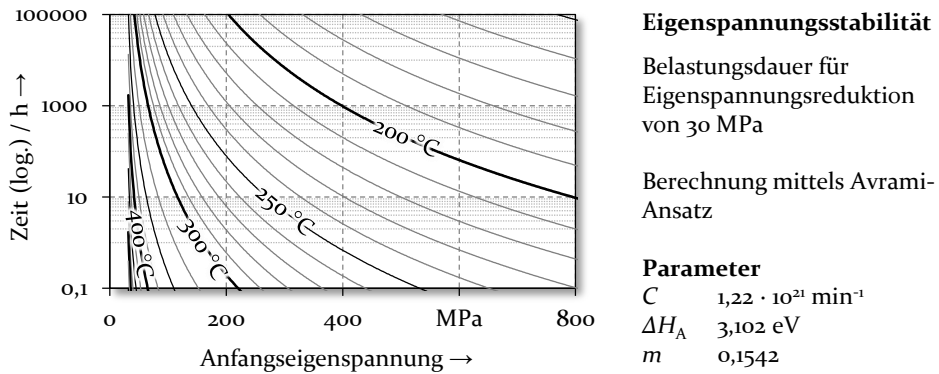


Bild 79: Bestimmung der temperaturabhängigen Belastungsdauer bis eine Reduktion der Eigenspannungen um 30 MPa auftritt

Bei höheren Anfangseigenspannungen sind aufgrund der höheren im Werkstoff gespeicherten Energie geringere Temperaturen zur Reduktion der Eigenspannungen notwendig. Bei geringer ausgeprägten Eigenspannungen ist diese Triebkraft entsprechend reduziert. Die dargestellten Isolinien divergieren bei einem Eigenspannungswert von 30 MPa, da dieser Zustand als eigenspannungsfrei bewertet wird. Bei einem gegebenen Anfangseigenspannungszustand sind mit zunehmender Einsatzdauer geringere Temperaturen zulässig. Bauteile in der Fahrzeugindustrie werden für Lebensdauern von 5 000 bis 30 000 Betriebsstunden ausgelegt. Mit diesen Kriterien liegt die maximale dauerhaft ertragbare Einsatztemperatur mit dem vorliegenden Ansatz zwischen 203 °C für 30 000 h und 216 °C für 5 000 h.

Geometrieinfluss

Neben der Höhe der thermischen Belastung und der Belastungsdauer kann auch der anfängliche Eigenspannungszustand einen Einfluss auf die Stabilität haben. Um verschiedene Kaltverfestigungszustände zu untersuchen, werden Bauteile mit Öffnungswinkeln 2α von 60°, 90° und 120° hergestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Materialumlenkung in der Umformzone der Matrize liegen je nach Öffnungswinkel charakteristische Festigkeits- und Eigenspannungsverteilungen in den umgeformten Bauteilen vor. An der Oberfläche liegen unterschiedliche Eigenspannungen vor, die für die Untersuchung der Stabilität unter dem Einfluss von Temperatur und Zeit genutzt wurden.

Die umgeformten und ausgeworfenen Proben werden aufgrund der praktischen Relevanz bei Temperaturen von 100 °C, 150 °C und 200 °C gegläht.

Nach definierten Zeitintervallen werden die oberflächennahen Eigenspannungen im umgeformten Schaft nach Abkühlung an ruhender Luft gemessen. Für einen Matrizenöffnungswinkel von $2\alpha = 60^\circ$ sind die Ergebnisse in Bild 80 dargestellt.

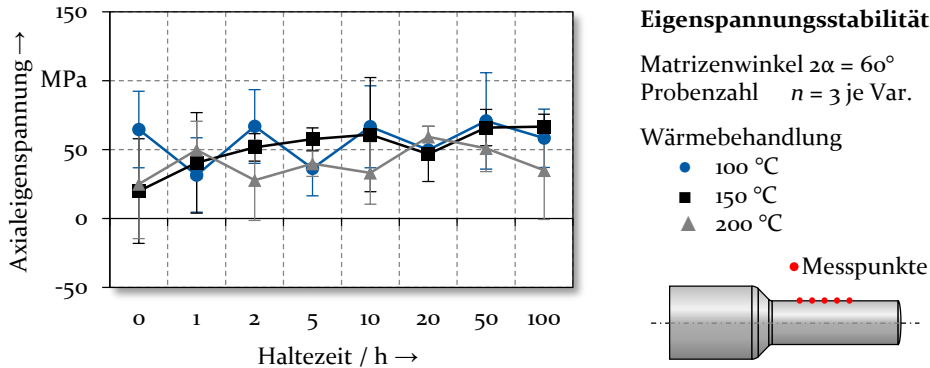


Bild 80: Einfluss der Haltezeit auf die Eigenspannungen bei einem Matrizenöffnungswinkel von $2\alpha = 60^\circ$

Nach der Umformung sind in den hergestellten Bauteilen geringe Zugeigenspannungen von 20 MPa bis 60 MPa vorhanden. Dieser Eigenspannungszustand ist auf die Materialumlenkung während des Fließpressens zurückzuführen. Aufgrund des geringen Öffnungswinkels der Matrize wird das Material sanft umgelenkt, was zu geringen Kaltverfestigungsunterschieden zwischen Kern und Oberfläche und damit zu geringen Eigenspannungen führt. Das Glühen bei Temperaturen von 100 °C bis 200 °C für bis zu 100 h hat keinen signifikanten Einfluss auf die oberflächennahen Eigenspannungen, da diese nicht sehr ausgeprägt sind. Mit zunehmender Haltedauer nimmt jedoch die Streuung der gemessenen Spannungswerte ab. Dies kann darauf hinweisen, dass hohe Mikro-eigenspannungen abgebaut werden, die die Messunsicherheit erhöhen.

Für einen Matrizenöffnungswinkel von $2\alpha = 90^\circ$ liegen höhere Zugeigenspannungen in den Bauteilen vor. In Bild 81 ist ihre Stabilität unter thermischer Belastung dargestellt. In den hergestellten Probekörpern sind ausgeprägte Zugeigenspannungen von 117 MPa bis 173 MPa vorhanden. Trotz der unterschiedlichen anfänglichen Eigenspannungsniveaus wird mit zunehmender Einwirkungszeit bei allen Glühtemperaturen ein ähnliches Verhalten festgestellt. Der erste Glühvorgang mit einer Belastungsdauer von 1 h führt zu einer leichten Abnahme der oberflächennahen Eigenspannungen, gefolgt von einem leichten Anstieg und einer leichten Abnahme ab einer Haltezeit von 5 h.

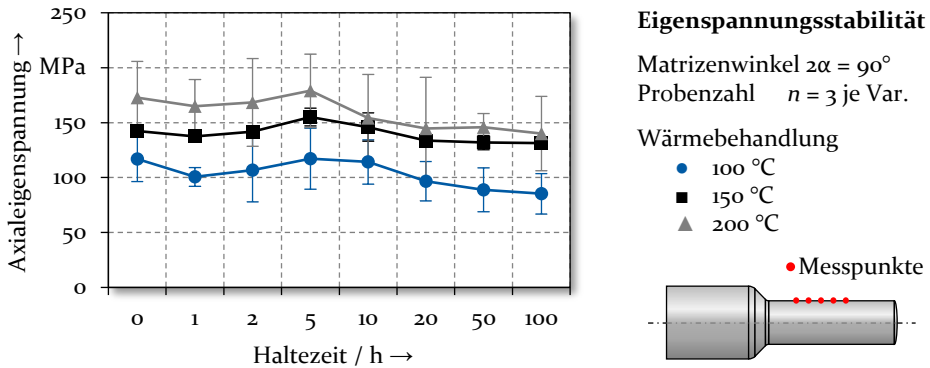


Bild 81: Einfluss der Haltezeit auf die Eigenspannungen bei einem Matrizenöffnungswinkel von $2\alpha = 90^\circ$

Eine Erklärung für dieses Muster ist der Abbau hoher Eigenspannungen in Materialvolumina abseits der Oberfläche. Der anfängliche Rückgang ist möglicherweise auf den Abbau des Druckspannungsmaximums im Kern und eine notwendige Umverteilung des Eigenspannungszustands zurückzuführen. Eine Verringerung des Zugspannungsmaximums unterhalb der Oberfläche mit zunehmender Haltezeit ist der Grund für den vorliegenden Anstieg an der Oberfläche zwischen 1 h und 5 h Haltezeit. Der absolute Einfluss der Wärmebehandlung ist jedoch bei den untersuchten Varianten gering. Bei einer Haltezeit von 50 h werden die Eigenspannungen um 11 MPa bis 28 MPa reduziert, was noch im Bereich der Messunsicherheit liegt.

In den Bauteilen mit $2\alpha = 120^\circ$ liegen in den Oberflächen unterschiedliche Eigenspannungszustände vor. Dies bietet die Möglichkeit, die Eigenspannungsstabilität für unterschiedliche Ausgangszustände zu untersuchen. Die Ergebnisse sind in Bild 82 gezeigt.

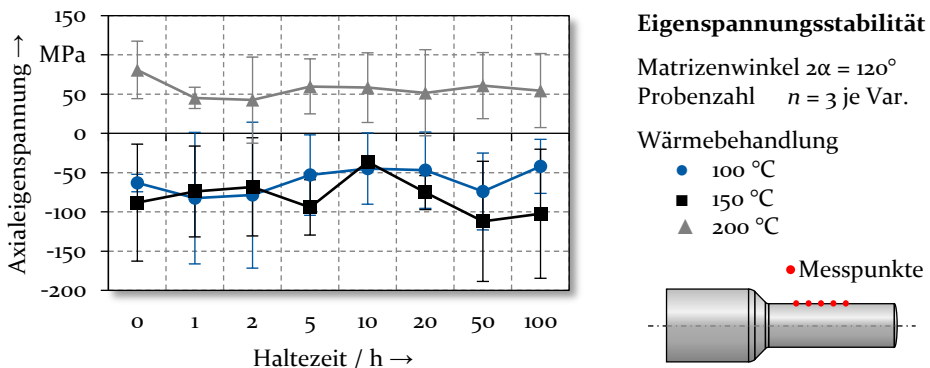


Bild 82: Einfluss der Haltezeit auf die Eigenspannungen bei einem Matrizenöffnungswinkel von $2\alpha = 120^\circ$

Ein möglicher Grund für diese Unterschiede ist die Tribologie. In [P5] wurde gezeigt, dass die Reibung den Oberflächeneigenspannungszustand in vorwärtsfließgepressten Bauteilen beeinflusst. Ein Matrizenöffnungswinkel von $2\alpha = 120^\circ$ führt zu einer starken Umlenkung des Materials in der Umformzone der Matrize, was zu hohen Flächenpressungen an der Matrizenschulter führt. Bei hohen Flächenpressungen beeinflussen Schwankungen in der Schmierstoffauftragsmenge die tribologischen Verhältnisse in der Grenzschicht zwischen Bauteil und Werkzeug, was wiederum die Eigenspannungen beeinflusst. Ein Glühen mit Temperaturen von 100°C bis 200°C und Haltezeiten bis zu 100 h führt nicht zu markanten Veränderungen, da nur geringe Eigenspannungen vorhanden sind. Dies deckt sich mit den Ergebnissen, die für einen Matrizenöffnungswinkel von $2\alpha = 60^\circ$ gezeigt wurden.

7.3 Abgeleitete Erkenntnisse

Neben der Höhe der Eigenspannungen sind bei der Abschätzung der Bauteileinsatzeigenschaften auch Informationen zu deren Stabilität unter typischen Betriebsbelastung notwendig. Relevante Lastfälle sind dabei neben mechanischen insbesondere thermische Belastungen.

Die Eigenspannungen erweisen sich bei einer zyklisch-mechanischen Beanspruchung von 500 MPa als weitgehend stabil. Bei 700 MPa entwickelt sich nach wenigen Belastungszyklen ein neuer stabiler Spannungszustand. Bei 900 MPa werden im ersten Lastwechsel Druckeigenspannungen erzeugt und in den weiteren Lastwechseln verstärkt. Aus den Belastungsexperimenten geht hervor, dass größere Veränderungen vor allem im ersten oder den ersten Belastungszyklen auftreten. Hinsichtlich der Eigenspannungsstabilität werden drei grundlegende Mechanismen identifiziert, die in Bild 83 dargestellt sind.

Für eine geringe Lastspannung sind die analysierten Eigenspannungszustände im untersuchten Bereich stabil. Dies ist der Fall bei einer Belastung von 500 MPa in den mit $2\alpha = 60^\circ$ und 90° umgeformten Teilen. Die Belastung in einem mittleren Lastniveau bewirkt in den ersten Zyklen eine Umlagerung des Eigenspannungszustandes des Bauteils, was zu einem geänderten, aber stabilen Spannungszustand führt. Die Stabilität ist insbesondere auf die bei der plastischen Deformation auftretende Kaltverfestigung zurückzuführen, die die Belastbarkeit in weiteren Zyklen erhöht. Dieses Verhalten wurde für eine Belastung von 500 MPa in der Variante mit $2\alpha = 120^\circ$ und für eine Belastung von 700 MPa nachgewiesen. Eine hohe Zuglastspannung führt zu einer starken Umlagerung der

Bauteilspannungen im ersten Zyklus, gefolgt von einer weiteren geringfügigen Verstärkung, wie es bei einer Belastung mit 900 MPa der Fall ist.

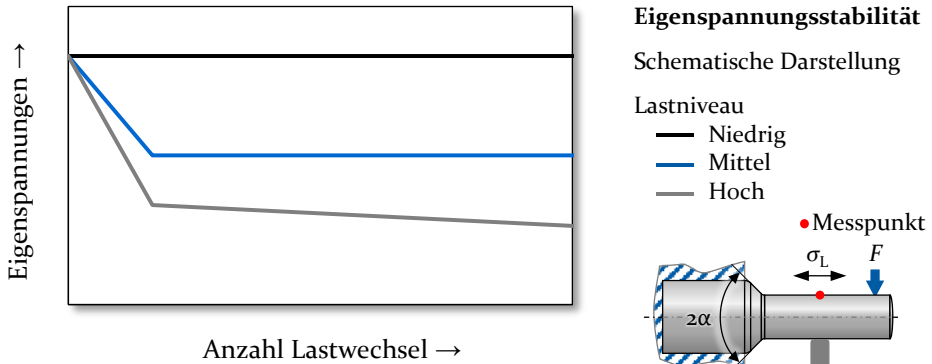


Bild 83: Schematische Darstellung der identifizierten Eigenspannungsrelaxationsmechanismen

Bei mechanischer Belastung eigenspannungsbehafteter Bauteile treten drei verschiedene Verhaltensweisen auf, welche sich mit den in [161] beschriebenen decken. Bei hinreichend niedriger Last werden die Bauteileigenspannungen nicht beeinflusst, wodurch ein stabiler Spannungszustand vorliegt. Mittlere Lasten bewirken einen Abbau von Zugeigenspannungen im ersten Hub oder den ersten Belastungszyklen, wobei sich ein neuer stabiler Eigenspannungszustand einstellt. Hohe Lasten führen sowohl zu einem Abbau von Eigenspannungen in den ersten Hübten als auch zu einem Aufbau von Eigenspannungen mit umgekehrtem Vorzeichen in weiteren Belastungszyklen.

Bei der Produktauslegung sollte daher der Bauteileinsatzbereich spezifiziert werden. Wird ein stabiler Eigenspannungszustand gefordert, sollten Belastungen nahe der Fließgrenze vermieden werden. Eine Überschätzung der Bauteilfestigkeit durch die Verwendung ungeeigneter Materialmodelle kann zu Eigenspannungsabbau im Bauteileinsatz führen. Ebenso ist zu beachten, dass eine einmalig auf das Bauteil aufgebrachte Überlast den Eigenspannungszustand nachhaltig beeinflussen kann. Dies ist im Bauteilbetrieb zu beachten, kann aber auch zur gezielten Einstellung eines erforderlichen Zustands genutzt werden.

Unter thermischer Belastung sind die Höhe der Temperatur und die Aufbringdauer wesentliche Faktoren, die die Eigenspannungen beeinflussen. Aus den experimentellen Ergebnissen der thermischen Belastungsversuche ist das in Bild 84 dargestellte Prozessfenster abgeleitet.

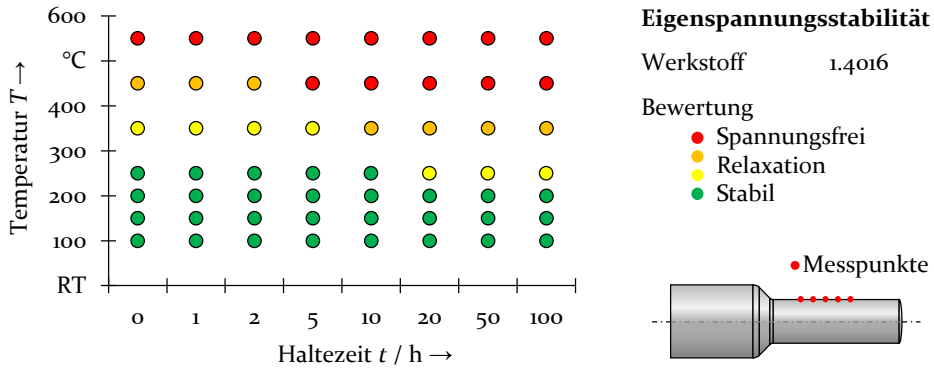


Bild 84: Prozessfenster der thermischen Eigenspannungsstabilität

Bei thermischer Belastung bis 200 °C sind die Eigenspannungen stabil, während oberhalb von 550 °C technisch spannungsfreie Oberflächen vorliegen. Zwischen diesen Temperaturniveaus tritt ein zeit- und temperaturabhängiger Eigenspannungsabbau auf. Während bei Temperaturen von 350 °C und mehr bereits ab dem ersten Aufheizen Eigenspannungen in relevantem Maße abgebaut werden, ist dies bei 250 °C erst nach einer Haltezeit von 20 h der Fall. Bei 450 °C sind nach 5 h technisch spannungsfreie Oberflächen gegeben. Anhand der abgeleiteten Zusammenhänge, die mit dem dargestellten Avrami-Modell beschrieben werden, wird für die Praxis abgeleitet, dass vergleichbare Bauteile einmalige thermische Belastungen von 250 °C nicht überschreiten sollten. Wird diese Temperatur beispielsweise aufgrund von Schadensfällen überschritten werden, ist eine kritische Evaluation des Eigenspannungszustands empfehlenswert. Die maximale Einsatztemperatur sollte im Dauerbetrieb für stabile oberflächennahe Eigenspannungszustände unter 200 °C liegen.

Mit diesen Informationen zu den Einflüssen typischer Betriebsbelastungen auf die Bauteileigenspannungen wird im nächsten Schritt der Einfluss der Eigenspannungen auf das Betriebsverhalten untersucht, um eine Abschätzung der Einflüsse auf die Betriebsfestigkeit zu ermöglichen.

8 Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit

Eigenspannungen wirken sich – neben anderen Faktoren – auf die Betriebsfestigkeit von Bauteilen aus. Durch Überlagerung mit mechanischen Lastspannungen können sie die Gesamtbeanspruchung erhöhen oder verringern und so das Ermüdungsverhalten maßgeblich beeinflussen. Da eine Änderung des Bauteileigenspannungszustands oft aus einer Änderung der Verfestigungsverteilung resultiert oder damit einhergeht, liegt in vielen Fällen eine Überlagerung der beiden Einflüsse vor.

In diesem Kapitel soll der Eigenspannungseinfluss auf die Ermüdungsfestigkeit der fließgepressten Proben identifiziert werden. Dazu werden eigenspannungsbehaftete und eigenspannungsfreie Proben ermüdet, die aufgrund der identischen Herstellung vergleichbare Verfestigungsverteilungen aufweisen. Zudem wird das Ermüdungsverhalten von Bauteilen ermittelt, die gegenüber der Referenzvariante unterschiedliche Eigenspannungs- und Verfestigungsverteilungen aufweisen.

Als Bewertungsgröße dienen Wöhlerkurven, mithilfe derer der Zusammenhang zwischen der aufgetragten Lastamplitude L_a und den ertragbaren Lastspielzahlen N bis zum Ausfall durch Bruch beschrieben wird. Der Zeitfestigkeitsbereich wird dabei durch den in (8) gezeigten Zusammenhang beschrieben.

$$N = C \cdot L_a^{-k} \quad (8)$$

Der Parameter k beschreibt dabei die Neigung der bei logarithmischer Skalierung als Gerade auftretenden Zeitfestigkeitskurve, wobei höhere Werte eine flachere Gerade bedingen. Die Konstante C beschreibt den theoretischen Achsenabschnitt für eine Schwingspielzahl von $N = 1$. Der an die Zeitfestigkeitskurve anschließende Übergang zum Langzeitfestigkeitsbereich, in dem die Wöhlerkurve horizontal verläuft, wird durch die Knickschwingspielzahl N_K und deren Lastamplitude $L_{a,NK}$ beschrieben.

In der experimentellen Umsetzung der Ermüdungsversuche wird eine schwellende Belastung mit einem Spannungsverhältnis von $R = 0$ und einem Amplitudenverhältnis von $A = 1$ aufgebracht, wobei die Spannungsamplitude L_a der Mittellast σ_m entspricht. Dementsprechend ist die maximale Lastspannung $\sigma_{\max}$ das Doppelte der Lastamplitude, die Minimalspannung $\sigma_{\min}$ ist gleich Null. Zur Bestimmung der Wöhlerkurven wird das in DIN 50100 beschriebene Perlenschnurverfahren verwendet. Dabei wird ein Bauteil je Lastniveau und Variante bis zum Ausfall belastet. Für jede Versuchsreihe werden Bauteile in verschiedenen Lastniveaus geprüft,

die sowohl im Zeitfestigkeits- als auch im Langzeitfestigkeitsbereich liegen. Als Versagenskriterium wird der Bruch der Probe definiert. Die Grenzschwingspielzahl, nach der der Versuch ohne Bruch der Probe abgebrochen und als Durchläufer gewertet wird, wird entsprechend DIN 50100 auf einen Wert von 5 000 000 Schwingspielen festgelegt. Die Versuchsdurchführung erfolgt mit dem bereits in Abschnitt 7.1 für die Untersuchung der Eigenspannungsstabilität verwendeten Versuchsaufbau am Resonanzpulsator *Roell Amsler HFP5100*. Typische Verläufe der aufgebrachten Kraft und der resultierenden Prüffrequenz sind in Bild 85 dargestellt.

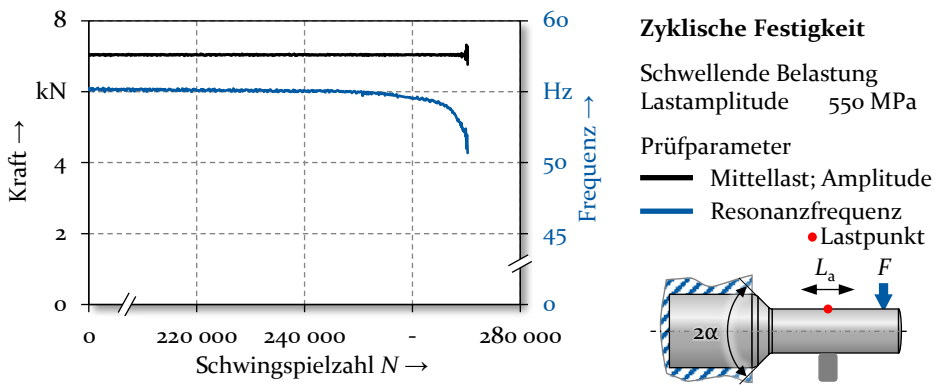


Bild 85: Typische Verläufe der Prüfkraft und der sich einstellenden Prüffrequenz

Die Belastung mit einer definierten Mittellast und einer definierten Spannungsamplitude wird durch das Aufbringen einer statischen und einer dynamischen Kraft umgesetzt. Sie werden durch die Maschinenregelung in einer Einschwingphase aufgebracht und während des Versuchs konstant gehalten. Die Prüffrequenz ist abhängig von der Gesamtsteifigkeit des Versuchsaufbaus und der in der Prüfmaschine eingebauten Erregermasse. Mit den in dieser Arbeit verwendeten Probengeometrien stellt sich eine Resonanzfrequenz von etwa 55 Hz ein, die für die Prüfung verwendet wird. Eine Rissbildung in der Probe verändert die Steifigkeit des Versuchsaufbaus und führt so zu einer Änderung der Eigenfrequenz, welche von Schwingungssensoren aufgezeichnet wird. Als Kriterien für den Versuchsabbruch werden das Erreichen der Grenzschwingspielzahl von 5 000 000 Prüfzyklen oder eine Frequenzänderung von 5 Hz definiert. Letzteres dient der Detektion von Probenbrüchen, um eine Beschädigung des Versuchsaufbaus zu verhindern.

8.1 Einfluss fertigungsbedingter Zugeigenspannungen

Die Bestimmung des Einflusses des bei der Umformung entstehenden Eigenspannungszustands erfolgt an Proben der Referenzvariante, welche mit einem Matrizenöffnungswinkel von $2\alpha = 90^\circ$ und dem MoS₂-basierten Schmierstoff hergestellt wurden. Zur Herstellung einer eigenspannungsfreien Vergleichsvariante werden Bauteile durch einmaliges Aufheizen auf eine Temperatur von 500 °C ohne Haltezeit spannungsarmgeglüht. Wie in Abschnitt 7.2.1 dargestellt, resultiert daraus ein technisch spannungsfreier Zustand mit Eigenspannungsbeträgen unter 30 MPa. Die Ergebnisse der Ermüdungsprüfung der eigenspannungsbehafteten Referenzvariante und der eigenspannungsfreien Vergleichsvariante sind in Bild 86 gezeigt.

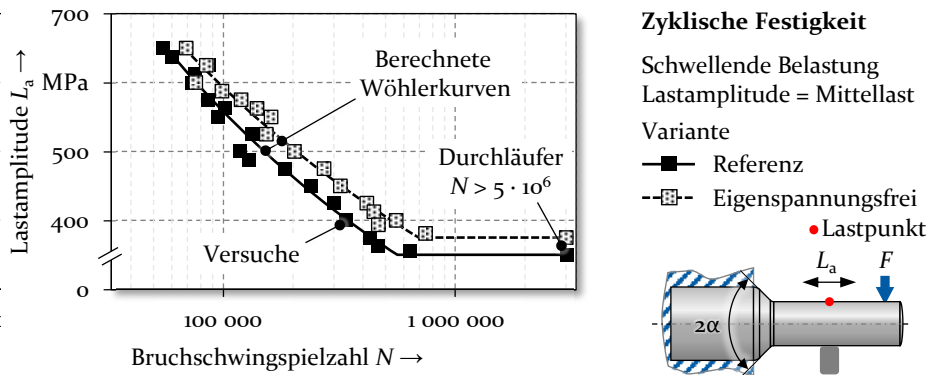


Bild 86: Einfluss des Eigenspannungszustands der Referenzvariante auf die Ermüdungsfestigkeit

Die Bauteile der eigenspannungsfreien Variante weisen eine höhere Ermüdungsfestigkeit auf als die der Referenzvariante. Die erreichten Schwingspielzahlen der eigenspannungsfreien Bauteile liegen im Kurzzeitfestigkeitsbereich 20 % und im Langzeitfestigkeitsbereich 50 % über denen der eigenspannungsbehafteten Proben. Während die berechnete Knickschwingspielzahl in der Referenzvariante bei 563 029 liegt, ist sie im eigenspannungsfreien Zustand mit einem Wert von 697 092 deutlich erhöht. Die ertragbare Lastamplitude im Langzeitfestigkeitsbereich wird durch das Entfernen des Eigenspannungszustands von 350 MPa auf 375 MPa erhöht. Die Neigung k der Zeitfestigkeitsgerade ist bei den geglähten Proben mit einem Wert von 4,24 etwas größer als bei Referenzvariante mit 3,71, woraus eine flachere Ermüdungskurve resultiert.

Die Ursache für die Reduktion der Ermüdungsfestigkeit liegt in der Ausprägung des fertigungsbedingten Eigenspannungszustands mit oberflächennahen Zugspannungen. Diese sind unter der mechanischen

Belastung den angreifenden Zugspannungen überlagert, woraus eine Erhöhung der effektiven Lastspannung resultiert.

8.2 Einfluss der Herstellvariante

In Abschnitt 6.2 wurde gezeigt, dass eine Änderung des Matrizenöffnungswinkels durch eine Beeinflussung des Stoffflusses sowohl die Verfestigungsverteilung als auch die oberflächennahen Eigenspannungen verändert. In Bild 87 ist der Einfluss dieser Herstellvarianten auf die Ermüdungsfestigkeit dargestellt.

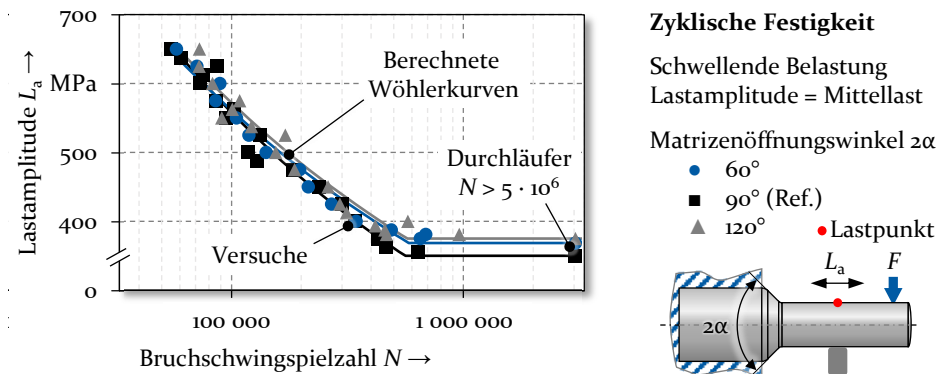


Bild 87: Einfluss der Herstellvariante auf die Ermüdungsfestigkeit

Im Kurzzeitfestigkeitsbereich bei hohen Lastamplituden ist kein ausgeprägter Unterschied zwischen den Varianten hinsichtlich der erreichten Schwingspiele zu erkennen. Hinsichtlich der Langzeitfestigkeit weisen die Bauteile der Referenzvariante mit $2\alpha = 90^\circ$ mit 563 029 Schwingspielen die geringste Knickschwingenzahl der abgeleiteten Wöhlerkurve auf. Die Änderung des Schulteröffnungswinkels führt zu einer Erhöhung auf 573 727 Zyklen bei $2\alpha = 120^\circ$ und 581 867 Zyklen bei $2\alpha = 60^\circ$. Gegenüber der Referenzvariante mit 350 MPa sind im Langzeitfestigkeitsbereich mit 375 MPa bei $2\alpha = 120^\circ$ und 369 MPa bei $2\alpha = 60^\circ$ höhere Lastamplituden erreichbar. Die Neigungen liegen mit Werten von 4,14 ($2\alpha = 120^\circ$) und 4,20 ($2\alpha = 60^\circ$) auf dem Niveau der eigenspannungsfreien Proben.

Gegenüber der Referenzvariante wird somit bei Herstellung mit angepassten Matrizenöffnungswinkeln von $2\alpha = 60^\circ$ und 120° eine Verbesserung der Langzeitfestigkeit erzielt. Eine mögliche Ursache liegt in einer Erhöhung der Bauteilsteifigkeit aufgrund eines herstellungsbedingt veränderten Durchmessers des umgeformten Schafts, da dieser bei der Berechnung des Biege widerstandsmoments in der dritten Potenz eingeht. Da keine

Abweichungen der Abmessungen zwischen den verschiedenen Herstellungsvarianten vorliegen, ist diese Ursache jedoch unwahrscheinlich. Ein Einfluss der Bauteilgeometrie wird ausgeschlossen, da der Versuchsaufbau so gestaltet ist, dass die Prüfbeanspruchung auf den umgeformten Schaft beschränkt ist.

Eine weitere mögliche Ursache ist die Änderung der Verfestigungsverteilung durch die Anpassung des Stoffflusses in der Umformzone. Eine erhöhte Werkstofffestigkeit führt bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen zu einer Erhöhung der Belastbarkeit und damit zu einer Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit. In Bild 50 in Abschnitt 6.2.2 wurde jedoch gezeigt, dass mit der Referenzvariante die höchste Härte in der Randschicht erzielt wurde, während sie mit $2\alpha = 120^\circ$ bis in einer Tiefe von 1,5 mm und mit $2\alpha = 60^\circ$ bis 3,5 mm Tiefe reduziert ist. Mit den angepassten Varianten wird daher trotz einer verringerten Festigkeit eine erhöhte Langzeitfestigkeit erzielt.

Während mit der Referenzvariante mit einem Schulteröffnungswinkel von $2\alpha = 90^\circ$ ausgeprägte Zugeigenspannungen vorliegen, sind diese bei Verwendung von Matrizen mit $2\alpha = 60^\circ$ und $2\alpha = 120^\circ$ reduziert. In der Bauteiloberfläche liegen mit den angepassten Varianten noch immer geringe Zugeigenspannungen vor, die auf einem ähnlichen Niveau sind. Die beobachtete Erhöhung der Langzeitfestigkeit der Bauteile durch Anpassung der Matrizengeometrie ist daher auf reduzierte oberflächennahe Zugeigenspannungen zurückzuführen. Da sowohl in der Bauteiloberfläche als auch in oberflächennahen Bereichen Zugeigenspannungen vorliegen, ist die Ermüdungsfestigkeit gegenüber der eigenspannungsfreien Variante jedoch reduziert.

8.3 Erkenntnisse

In den Ermüdungsversuchen erfolgte eine Identifikation des Fertigungseinflusses auf die Einseitzigenschaften der hergestellten Probengeometrie. Basierend auf den Ergebnissen wurden die nachfolgenden Erkenntnisse abgeleitet.

Der bei der Bauteilherstellung entstehende Eigenspannungszustand beeinflusst die Ermüdungsfestigkeit maßgeblich. Während in Axialrichtung im Kern Druckeigenspannungen vorliegen, sind an der Bauteiloberfläche Zugeigenspannungen vorhanden, deren Maximum unter der Oberfläche liegt. Das Aufbringen einer Biegebelastung resultiert in oberflächennahen Zugspannungen, die sich mit den Eigenspannungen überlagern und so die

Gesamtbeanspruchung erhöhen. Der in der Referenzvariante erzeugte Eigenspannungszustand verringert die im Langzeitfestigkeitsbereich ertragbare Spannungsamplitude, wie in Bild 88 dargestellt.

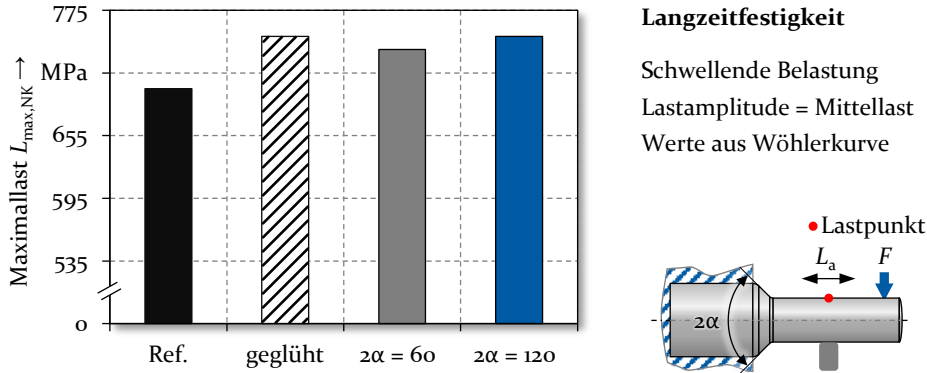


Bild 88: Mit den unterschiedlichen Herstellvarianten erzielbare Langzeitfestigkeit

In der eigenspannungsbehafteten Referenzvariante mit einem Schulteröffnungswinkel von $2\alpha = 90^\circ$ liegt der Langzeitfestigkeitsbereich bei einer schwelenden Maximalbeanspruchung von 700 MPa. Das thermische Entfernen des gesamten Eigenspannungszustands führt zu einer Erhöhung der Langzeitfestigkeit auf 750 MPa. Dies entspricht einer Erhöhung der Beanspruchbarkeit von 50 MPa oder 7 %.

Eine mit einer Änderung der Herstellvariante einhergehende Änderung der Bauteileigenspannungen beeinflusst ebenfalls die Ermüdungsfestigkeit. Im Vergleich mit der Referenzvariante sind die oberflächennahen Zugeigenspannungen bei einer Änderung des Matrizenöffnungswinkels reduziert. Diese oberflächennahe Eigenspannungsreduktion bewirkt eine Erhöhung der Belastbarkeit im Langzeitfestigkeitsbereich. Dieser Einfluss ist so ausgeprägt, dass trotz verringerter Kaltverfestigung eine verbesserte Ermüdungsfestigkeit erreicht wurde. Eine Anpassung des Matrizenöffnungswinkels auf $2\alpha = 60^\circ$ erhöht die ertragbare Langzeitfestigkeit von 700 MPa in der Referenzvariante auf 738 MPa, was einer Erhöhung um 5 % entspricht. Eine Änderung auf $2\alpha = 120^\circ$ führt wie das Spannungsarmglühen zu einer Verbesserung um 50 MPa oder 7 %.

Die mit einer Änderung der Herstellvariante einhergehende Änderung der oberflächennahen Bauteileigenspannungen ist insbesondere im Langzeitfestigkeitsbereich wirksam. Im Kurzzeitfestigkeitsbereich mit hohen Lastamplituden und im Zeitfestigkeitsbereich werden jedoch unterschiedliche Effekte erzielt, wie in Bild 89 am Beispiel der Knickschwingspielzahl

dargestellt, die den Übergang vom Zeitfestigkeits- in den Langzeitfestigkeitsbereich markiert.

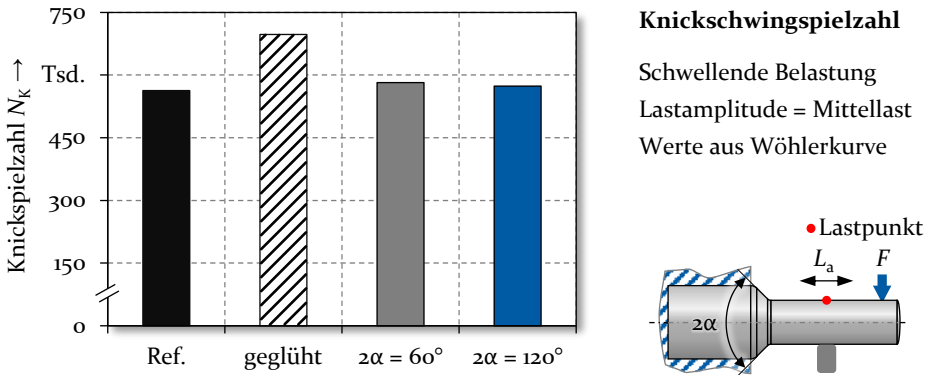


Bild 89: Eigenspannungs- und variantenabhängig erreichbare Knickschwingspielzahl

Der durch die Umformung eingebrachte Eigenspannungszustand reduziert die im Zeitfestigkeitsbereich erreichbare Schwingspielzahl. Während die Knickschwingspielzahl bei den eigenspannungsbehafteten Varianten um 570 000 liegt, ist sie bei der eigenspannungsfreien Ausführung auf 697 000 erhöht, was einer Zunahme von 22 % entspricht. Diese eigenspannungsbedingte Beeinflussung der Ermüdungslebensdauer ist auf die Überlagerung mit den Lastspannungen zurückzuführen. Die dadurch erhöhte effektive Lastspannung führt zu einem früheren Versagen aufgrund der erhöhten Werkstoffschädigung.

Zwischen den eigenspannungsbehafteten Proben sind keine ausgeprägten Unterschiede hinsichtlich der erreichbaren Knickschwingspielzahl zu erkennen. Dies ist durch die Eigenspannungsverteilungen im Bauteilinneren begründet. Druckeigenspannungen im Kern liegen mit Zugeigenspannungen an und unter der Oberfläche im Gleichgewicht. Bei hohen Lasten – wie sie im Zeitfestigkeitsbereich auftreten – ist der Einfluss des Spannungsmaximums unter der Oberfläche besonders ausgeprägt. Da die eigenspannungsbehafteten Varianten eine ähnliche Eigenspannungsverteilung im Werkstoffinneren aufweisen, zeigen sie ein ähnliches Ermüdungsverhalten im Zeitfestigkeitsbereich. Eine Verbesserung der Zeitfestigkeit ist durch ein vollständiges Entfernen des gesamten Eigenspannungszustands möglich. Im Langzeitfestigkeitsbereich überwiegt hingegen der Einfluss der Oberfläche, weshalb eine Einstellung der Eigenspannungen ein großes Potential bietet. Eine Verringerung der oberflächennahen Eigenspannungen führt zu einer Erhöhung der im Langzeitfestigkeitsbereich ertragbaren Beanspruchung. Durch Anpassung des

Umformprozesses kann eine Verbesserung der Langzeitfestigkeit erreicht werden, die geeignet ist, anderweitig notwendige Spannungsarmglüh-schritte zu ersetzen.

9 Eigenspannungssensitive Prozess- und Bauteilauslegung

In den vorhergehenden Kapiteln wurde gezeigt, dass durch die Eigenspannungssteuerung bei der Umformung eine kostengünstige Verbesserung der Bauteileigenschaften erreicht werden kann. Zur Nutzung der erarbeiteten Forschungsergebnisse in der Prozessplanung werden in diesem Kapitel die wichtigsten Erkenntnisse zusammengeführt und daraus Anwendungshinweise abgeleitet. Neben Methoden zur eigenspannungs-sensitiven Prozess- und Bauteilauslegung sollen eigenspannungsbedingte Betriebsgrenzen der hergestellten Bauteile dargestellt werden.

9.1 Definierte Eigenspannungseinstellung bei der Bauteilherstellung

Bei der Herstellung kaltfließgepresster Bauteile führen inhomogene Dehnungsverteilungen zum Verbleiben von Eigenspannungen im Werkstoff. Diese können sowohl in nachgeschalteten Bearbeitungsschritten als auch im Einsatz die Bauteileigenschaften verändern. Die Beeinflussung der im Bauteil verbleibenden Dehnungsverteilung stellt das zentrale Werkzeug zur Steuerung des Eigenspannungszustands dar.

Steuergrößen zur Eigenspannungseinstellung

Zur gezielten Einstellung des Bauteileigenspannungszustands im untersuchten Voll-Vorwärts-Fließpressprozess existieren verschiedene Stellgrößen. Haupteinflussfaktor ist der Bauteilwerkstoff. Eine Erhöhung der Werkstofffestigkeit erlaubt höhere Eigenspannungsbeträge im Bauteil. Solange grundlegende Werkstoffeigenschaften wie das Auftreten von Duktilität und Kaltverfestigung gegeben sind, treten prinzipiell vergleichbare Eigenspannungsentstehungsmechanismen bei der Umformung auf. Eine Änderung des Werkstoffs führt unter diesen Voraussetzungen zu einer Änderung der Eigenspannungsbeträge, nicht jedoch der grundlegenden Eigenspannungsverteilung. Bei der Auslegung des Umformprozesses sind jedoch Nebeneffekte zu beachten, die die Eigenspannungsentstehung beeinflussen können. Dazu zählt insbesondere die erhöhte elastische Matrizenaufweitung bei der Umformung von Werkstoffen mit erhöhter Festigkeit, welche beim Auswerfen zu einer Beeinflussung der oberflächen-nahen Eigenspannungen führen kann.

Der Matrizenöffnungswinkel bestimmt maßgeblich den Werkstofffluss während der Umformung. Eingriffe in diesen Parameter beeinflussen zum einen die Verhältnisse von axialem zu radialem Anteil des Werkstoffflusses. Zum anderen werden die oberflächennahen Spannungsverhältnisse durch die Beeinflussung der Dehnungsverteilung maßgeblich verändert. Höhere Schulteröffnungswinkel führen zu einem erhöhten Kontaktdruck in der Matrizen Schulter; geringere Öffnungswinkel vergrößern hingegen die Mantelfläche der Matrizen Schulter und damit die Gleitfläche. Die höchsten oberflächennahen Zugeigenspannungen treten bei einem Schulteröffnungswinkel von $2\alpha = 90^\circ$ auf. Sowohl eine Erhöhung auf 120° als auch eine Verringerung auf 60° führen aufgrund des veränderten Stoffflusses zu einer Reduktion dieser Oberflächeneigenspannungen. In der Praxis ist daher die Verwendung von Umformmatrizen mit Schulteröffnungswinkeln von 60° oder 120° zu empfehlen, wenn eine Verringerung der oberflächennahen Zugeigenspannungen angestrebt wird. Nachgeschaltete Prozessschritte, in denen der beim Fließpressen nicht beeinflusste Bereich umgeformt wird, sind entsprechend anzupassen.

Eine Verringerung der Reibung reduziert die oberflächennahen Eigenspannungswerte. In Kombination mit weiteren Maßnahmen, wie der Änderung des Matrizenöffnungswinkels, ist im untersuchten Prozess auch das Einbringen von Druckeigenspannungen in der Oberfläche möglich. Dieser Effekt beruht auf einer Reduktion von Schubspannungen und Verfestigung in oberflächennahen Bereichen, was zu einer Verschiebung der Zugeigenspannungen in Richtung des Druckbereichs führt. Für die Praxis ist daher die Verwendung von Schmierstoffen zu empfehlen, mit denen eine möglichst geringe Reibung erzielt wird. Prozessabhängig ist dabei jedoch die Eignung des jeweiligen Schmierstoffs in Kombination mit Bauteilwerkstoff und Matrizendesign zu beachten.

Störgrößen

Neben der Einstellung eines definierten Eigenspannungszustands ist die Robustheit des Umformprozesses ein gewichtiger Faktor. Eine geringe Vorverfestigung im Werkstoff – wie sie typischerweise beim leichten Nachziehen auftritt – kann im untersuchten Versuchsaufbau toleriert werden. Da die bei der Herstellung des Rohmaterials eingebrachte Verfestigung gering gegenüber der bei der Bauteilherstellung ist, treten keine ausgeprägten Einflüsse auf die Eigenspannungsentstehung auf. Bei der Herstellung von Kaltfließpressteilen mit geringer Flächenabnahme oder der Weiterverarbeitung von ausgeprägt inhomogen verfestigtem Werkstoff

ist daher eine vertiefte Untersuchung des Einflusses auf die Eigenspannungsentstehung notwendig.

9.2 Wechselwirkungen im Bauteileinsatz

Bei der Verwendung der hergestellten Bauteile sind die Eigenspannungen und die anliegenden Betriebsbelastungen überlagert. Dabei beeinflussen sie sich wechselseitig, wodurch sowohl die effektiven Lastspannungen als auch die im Bauteil vorhandenen Eigenspannungen verändert werden können. Zur Vorhersage dieser Wechselwirkungen sind Kenntnisse über die wechselseitige Beeinflussung von Eigenspannungen und Betriebslasten notwendig.

Mechanische Belastung

Wirken Last- und Eigenspannungen in dieselbe Richtung, tritt eine Erhöhung der effektiven Lastspannung auf. Umgekehrt kann die effektive Belastung bei umgekehrten Vorzeichen verringert werden. Gleichzeitig kann auch eine Beeinflussung des Bauteileigenspannungszustands eintreten. Dazu wurden drei grundsätzliche Mechanismen identifiziert. Ist die Summe aus Last- und Eigenspannungen im gesamten Bauteil geringer als die Fließgrenze des Werkstoffs, so liegen bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen stabile Eigenspannungen vor. Erreicht die Summe aus Last- und Eigenspannungen lokal die Fließgrenze des Werkstoffs, wird der Eigenspannungszustand verändert. Zuglastspannungen führen dabei zu einer Reduktion des Eigenspannungswertes, was einer Verschiebung in Richtung des Druckbereichs entspricht. Zudem wird der Werkstoff lokal kaltverfestigt, wodurch sich seine Beanspruchbarkeit in weiteren Zyklen erhöht. Dies führt zu einem Eigenspannungszustand, der im ersten Zyklus oder den ersten Zyklen verändert wird und anschließend stabil bleibt. Überschreitet die Summe aus Last- und Eigenspannungen die Fließgrenze in allen Zyklen aufgrund von Schädigung oder nicht ausreichender Verfestigung, sind die Bauteileigenspannungen während der gesamten Ermüdungslebensdauer instabil.

Welche dieser drei Mechanismen im Bauteileinsatz auftritt, ist im allgemeingültigen Fall unter Anderem abhängig von der anliegenden Belastung, dem verwendeten Bauteilwerkstoff, der bei der Herstellung eingebrachten Kaltverfestigung und der Ausprägung des Eigenspannungszustands. Im vorliegenden Demonstratorbauteil liegen bei Belastung unterhalb der Langzeitfestigkeit konstante Eigenspannungen vor. Bei Belastung im Bereich der Langzeitfestigkeit wird der Eigenspannungszustand im ersten

Hub beeinflusst und verbleibt anschließend stabil auf einem neuen Niveau. Im Zeitfestigkeitsbereich werden die Bauteileigenspannungen anfangs ausgeprägt und in weiteren Hüben geringfügig verändert, was auf das Einbringen von Schädigung und daraus folgende Ermüdung hindeutet.

Der für den Voll-Vorwärts-Fließpressprozess typische Eigenspannungszustand mit Druckeigenspannungen im Kern und Zugspannungen nahe der Oberfläche hat im Allgemeinen negative Auswirkungen auf die Ermüdungsfestigkeit. Eine Verringerung der oberflächennahen Eigenspannungen durch die Veränderung des Matrizenöffnungswinkels bewirkt in dem in dieser Arbeit untersuchten Prozess trotz reduzierter Kaltverfestigung eine Erhöhung der Langzeitfestigkeit. Ein vollständiges Entfernen der Bauteileigenspannungen erhöht sowohl die Langzeitfestigkeit als auch die erreichbare Schwingspielzahl im Zeitfestigkeitsbereich, da Zugeigenspannungen sowohl in als auch unter der Oberfläche entfernt werden.

Die Verringerung oberflächennaher Eigenspannungen durch umformtechnische Methoden kann folglich für Bauteile empfohlen werden, die am unteren Ende der Zeitfestigkeitskurve im Grenzbereich zur Langzeitfestigkeit eingesetzt werden. Hier kann die Erhöhung der Belastbarkeit ausreichen, um die Bauteileigenschaften vom Zeit- in den Langzeitfestigkeitsbereich zu verschieben.

Einfluss durch Einsatztemperatur

Eigenspannungen in Bauteilen wirken sich dann günstig aus, wenn sie im Betrieb den anliegenden Belastungen entgegenwirken. Abhängig vom Beanspruchungskollektiv können sich daher verschiedene Eigenspannungszustände günstig auf die Ermüdungseigenschaften auswirken. Unter Wechselbelastung oder bei Beanspruchung mit Mittellasten im Zugbereich wirken sich oberflächennahe Zugeigenspannungen in der Regel nachteilig aus, während Druckeigenspannungen Rissinitiierung und -wachstum hemmen. Vor diesem Hintergrund sind bei der Bewertung der Eigenspannungsstabilität unter thermischer Belastung zwei Fälle zu berücksichtigen.

Sind nach der Umformung ungünstige Eigenspannungszustände – also solche, die die effektive Beanspruchung erhöhen – vorhanden, ist ein Eigenspannungsabbau im Einsatz des thermisch belasteten Bauteils vorteilhaft. Ein gezieltes thermisches Entfernen des im Bauteil vorhandenen Eigenspannungszustands ist durch das Spannungsarmglühen oberhalb der halben absoluten Schmelztemperatur möglich. Unterhalb dieser Temperatur ist jedoch aufgrund thermisch aktivierter Vorgänge auf

Werkstoffebene ebenfalls eine Beeinflussung des Eigenspannungszustands möglich. Im vorliegenden Prozess mit kaltfließgepressten Bauteilen aus dem ferritischen Stahl 1.4016 führt ein einmaliges Aufheizen auf 550 °C zu technisch spannungsfreien Bauteilen. Sind spannungsfreie Bauteile gefordert, ist demnach ein einmaliges Aufheizen der Bauteile auf 550 °C empfehlenswert. Höhere Haltezeiten sollten wegen der bei chromhaltigen ferritischen Stählen auftretenden 475-°C-Versprödung vermieden werden [225].

Existiert im umgeformten Bauteil hingegen ein günstiger Eigenspannungszustand, welcher der Beanspruchung entgegenwirkt, sollte dessen Stabilität im Bauteileinsatz gewährleistet sein. Dazu sollte eine kritische Bewertung der Einsatztemperaturen erfolgen, um die positiven Auswirkungen des belastungsgünstigen Eigenspannungszustands nutzen zu können. Im *paint-bake*-relevanten Bereich bis 200 °C liegen größtenteils stabile Eigenspannungen vor. Zwischen 200 °C und 550 °C liegt ein zeit- und temperaturabhängiger Abbau vor, der mit den gezeigten Modellen beschrieben wird. Besteht die Anforderung eines stabilen Eigenspannungszustands, sollten daher diese Grenzen gewahrt werden. Werden diese Temperaturgrenzen im Betrieb überschritten, sollte eine kritische Neubewertung basierend auf der erfahrenen thermischen Belastung und der Dauer der Belastung erfolgen.

9.3 Einfluss auf Ermüdungseigenschaften

In der Referenzvariante liegt umformbedingt ein ausgeprägter Eigenspannungszustand mit hohen oberflächennahen Zugeigenspannungen vor. Diese oberflächennahen Zugeigenspannungen reduzieren die im Langzeitfestigkeitsbereich ertragbare Beanspruchung. Im Zeitfestigkeitsbereich ist zudem eine Relevanz des Eigenspannungszustands im Bauteilinneren gegeben. Gegenüber eigenspannungsfreien Bauteilen sind die Langzeitfestigkeit und die ertragbare Schwingspielzahl im Zeitfestigkeitsbereich reduziert.

Die Eigenspannungsstabilität unter mechanischer Belastung stellt einen Indikator für Ermüdung dar. Eine Beanspruchung, bei der eine zyklusabhängige Eigenspannungsbeeinflussung auftritt, liegt im Zeitfestigkeitsbereich. Das Vorliegen eines stabilen Eigenspannungszustands lässt darauf schließen, dass die Beanspruchung im Langzeitfestigkeitsbereich liegt. Eine Belastung, bei welcher ein anfangs relaxierender und anschließend stabiler Eigenspannungszustand auftritt, liegt im Übergangsbereich.

Bei Vorliegen günstiger Eigenspannungszustände – beispielsweise oberflächennaher Druckeigenspannungen – sollten die Einsatztemperaturen unter 200 °C gehalten werden, um eine hinreichende Eigenspannungsstabilität zu gewährleisten. Sind oberflächennahe Zugeigenspannungen vorhanden, ist ein Abbau im Betrieb vorteilhaft, da dadurch die Ermüdungseigenschaften insbesondere im Zeitfestigkeitsbereich positiv beeinflusst werden. Ungünstige Eigenspannungszustände nach der Umformung können toleriert werden, wenn sie im Bauteileinsatz thermisch bedingt zeitnah abgebaut werden. Da mit einer thermischen Überbelastung jedoch ein Risiko für Entfestigung einhergeht, ist es empfehlenswert, die thermische Belastung zu begrenzen.

Der bei der Umformung entstehende Eigenspannungszustand beeinflusst somit die Ermüdungseigenschaften des Bauteils maßgeblich. Um die im Zeitfestigkeitsbereich ertragbaren Schwingspiele zu erhöhen, ist eine Evaluation des gesamten Bauteileigenspannungszustands notwendig. Zugeigenspannungen im Bauteilinneren können – unabhängig von den Oberflächeneigenspannungen – das Ermüdungsverhalten beeinflussen. Eine Anpassung des Matrizenöffnungswinkels bewirkt eine Reduktion der oberflächennahen Zugeigenspannungen, welche die Langzeitfestigkeit der hergestellten Bauteile erhöht. Durch eine kostengünstige Anpassung der Werkzeuggeometrie können so die Bauteileigenschaften verbessert werden. Dieser Einfluss entspricht dem des Spannungsarmglühens, jedoch ohne zusätzlichen Prozessschritt und ohne latent vorhandenes Risiko des Entfestigens bei einer Wärmebehandlung. Eine eigenspannungssensitive Auslegung des Umformprozesses bietet daher das Potential, mit kostengünstigen Anpassungen Verbesserungen der Bauteileigenschaften zu erzielen, ohne die Prozesskette zu verlängern.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Kaltmassivumformverfahren wie das Voll-Vorwärts-Fließpressen werden als ressourcen- und energieeffiziente Fertigungsmethode für metallische Bauteile eingesetzt. Die Kaltverfestigung, also die Zunahme der Versetzungsdichte in Kombination mit fehlender Möglichkeit zur Rekristallisation, bewirkt eine für den Bauteileinsatz günstige Zunahme der Festigkeit. Inhomogene plastische Dehnungsverteilungen, die dabei typischerweise auftreten, führen jedoch zum Verbleiben von Eigenspannungen im Werkstoff. Eingriffe in das Eigenspannungsgleichgewicht, beispielsweise durch nachgeschaltete Prozessschritte, können zu unerwünschten Effekten wie Geometrieänderungen führen. Zudem sind Eigenspannungen im Bauteileinsatz den Lastspannungen überlagert. Dadurch haben sie das Potential, die effektiv anliegende Last sowohl zu reduzieren als auch zu erhöhen und daher das Ermüdungsverhalten maßgeblich zu beeinflussen. Zur Beeinflussung der Bauteileigenspannung durch Einstellung der Eigenspannungen beim Voll-Vorwärts-Fließpressen von rostfreiem Stahl und anderen metallischen Werkstoffen liegen jedoch teils widersprüchliche Erkenntnisse vor.

Das in dieser Arbeit übergeordnet verfolgte Ziel ist die Erarbeitung einer Methode zur eigenspannungssensitiven Prozessauslegung. Neben der Entstehung der Bauteileigenspannungen wurden Methoden zu deren gezielten Einstellung untersucht. Zusammen mit der Bestimmung der Eigenspannungsstabilität unter typischen Betriebsbedingungen wurden die Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit erforscht.

Anhand eines Referenzprozesses wurde die Eigenspannungsentstehung beim Voll-Vorwärts-Fließpressen des rostfreien Stahls X6Cr17 (Werkstoffnummer 1.4016, AISI 430) numerisch und experimentell charakterisiert. Das Voreilen des Werkstoffs in der Bauteilmitte führte zu einem charakteristischen Spannungszustand mit Druckeigenspannungen im Kern, die mit oberflächennahen Zugeigenspannungen im Gleichgewicht sind. An der Bauteiloberfläche liegen ausgeprägte Zugeigenspannungen vor, deren Maximum jedoch unter der Oberfläche liegt.

Darauf aufbauend wurden Steuer- und Störgrößen zur gezielten Eigenspannungseinstellung und deren Auswirkungen untersucht. Dabei wurden insbesondere der verwendete Schmierstoff und der Schulteröffnungswinkel des Umformwerkzeugs als relevante Steuergrößen identifiziert. Durch eine Verringerung der Reibung und die Verwendung hoher und

niedriger Matrizenöffnungswinkel konnte eine Reduktion der oberflächennahen Zugeigenspannungen bis hin zur Verschiebung in den Druckbereich erreicht werden. Bei hinreichender Trennung der Oberflächen zeigte sich der Prozess robust gegenüber Schwankungen der aufgetragenen Schmierstoffmenge. Eine geringe Vorverfestigung der Oberfläche beeinflusst die Eigenspannungsentstehung nicht signifikant.

Unter zyklisch-mechanischer Bauteilbelastung wurden drei verschiedene Relaxationsmuster identifiziert. Stabile Bauteileigenspannungen liegen bei niedrigen Lasten vor. Mittlere Lasten führen aufgrund lokaler plastischer Deformation zu einer Änderung in den ersten Zyklen, wodurch ein neuer, stabiler Eigenspannungszustand gebildet wird. Unter hohen Lasten werden die Eigenspannungswerte aufgrund von plastischer Deformation in jedem Lastzyklus beeinflusst. Hinsichtlich des Einflusses thermischer Belastung wurde ein Prozessfenster erarbeitet, innerhalb dessen ein stabiler Eigenspannungszustand vorliegt. Dabei wurde eine Maximaltemperatur identifiziert, unter welcher bei einmaliger Belastung ein vollständiger Eigenspannungsabbau resultiert. Ebenso wurden thermische Grenzen hinsichtlich stabiler Eigenspannungen bei Langzeitbelastung ermittelt. Davon ausgehend wurde ein auf dem Avrami-Modell basierender Zusammenhang zwischen der thermischen Last, der Belastungsdauer und der Eigenspannungsstabilität erforscht.

Der umformbedingte Eigenspannungszustand führte zu einer Reduktion der Betriebsfestigkeit. Durch einen Vergleich mit spannungsfreien Proben konnten Zugeigenspannungen in und nahe der Oberfläche als ursächlich für eine Verringerung der Zeit- und Langzeitfestigkeit identifiziert werden. Eine Verringerung oberflächennaher Zugeigenspannungen durch Änderung des Matrizenöffnungswinkels führte trotz verringerter oberflächennaher Kaltverfestigung zu einer Erhöhung der Langzeitfestigkeit, die den Auswirkungen des Spannungsarmglühens entspricht.

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass eine Beeinflussung der Betriebsfestigkeit fließgepresster Bauteile durch die Eigenspannungssteuerung bei der Umformung möglich ist. Durch eine Anpassung des Matrizen Designs konnten kostengünstig oberflächennahe Zugeigenspannungen reduziert und so die Langzeitfestigkeit erhöht werden. In weiterführenden Forschungsarbeiten sind Methoden zur Eigenspannungseinstellung im Bauteilinneren zu untersuchen, um die Ermüdungseigenschaften und die Wirtschaftlichkeit weiter zu verbessern.

11 Summary and future work

Cold bulk forming processes such as forward rod extrusion are used as a resource- and energy-efficient manufacturing method for metallic components. Work hardening, which is the increase in dislocation density combined with the lack of possibility for recrystallization, causes an increase in strength, which is beneficial for component use. However, inhomogeneous plastic strain distributions, which typically occur in this process, lead to residual stresses remaining in the workpiece. Interference with the residual stress equilibrium, for example through subsequent process steps, can lead to undesirable effects such as changes in geometry. In addition, residual stresses in the component are superimposed to the load stresses. As a result, they have the potential to both reduce and increase the effective applied load and therefore significantly influence fatigue behavior. However, there are partly contradictory findings on the influence of the residual stress on the component by adjusting the residual stresses during full forward extrusion of stainless steel and other metallic materials.

The overall objective of this thesis is the establishment of a method for residual stress-sensitive process design. In addition to the generation of component residual stresses, methods for their targeted adjustment were investigated. In combination with the determination of residual stress stability under typical operating conditions, the effects on fatigue strength were investigated.

Using a reference process, the development of residual stresses during forward rod extrusion of the stainless steel X6Cr17 (1.4016, AISI 430) was characterized numerically and experimentally. The material's forward movement in the center of the component led to a characteristic stress state with compressive residual stresses in the core that are in equilibrium with tensile residual stresses near the surface. Distinct tensile residual stresses are present at the component surface, although their maximum lies below the surface.

Based on this, control and disturbance variables for targeted residual stress adjustment and their effects were investigated. In particular, the lubricant used and the shoulder opening angle of the forming die were identified as relevant control variables. By reducing the friction and using high and low die opening angles, it was possible to achieve a reduction in the tensile residual stresses close to the surface and even a shift into the compressive

range. With sufficient separation of the surfaces, the process proved robust to variations in the amount of lubricant applied. A slight pre-hardening of the surface does not significantly influence the development of residual stresses.

Three different relaxation schemes were identified under cyclic mechanical loading. Stable residual stresses are present at low loads. Medium loads lead to a change in the first cycles due to local plastic deformation, forming a new, stable residual stress state. Under high loads, residual stress values are influenced in each load cycle due to plastic deformation. Regarding the influence of thermal loading, a process window was developed, within which a stable residual stress state exists. A maximum temperature was identified below which complete residual stress relaxation occurs during one-time loading. Thermal limits were also determined with regard to stable residual stresses under long-term loading. Based on this, a relationship between thermal load, load duration and residual stress stability based on the Avrami model was developed.

The forming-related residual stress state led to a reduction of the fatigue strength. By comparison with stress-free specimens, tensile residual stresses in and near the surface could be identified as being responsible for a reduction in the fatigue strength and high-cycle fatigue strength. A reduction of tensile near-surface residual stresses by changing the die opening angle led to an increase in high-cycle fatigue strength despite reduced strain hardening near the surface.

In the present work, it was shown that it is possible to influence the fatigue strength of extruded components through residual stress control during forming. By adapting the die design, it was possible to reduce tensile residual stresses near the surface and thus increase the long-term strength at low cost. In further research work, methods for residual stress adjustment inside the component are to be investigated in order to further improve the fatigue properties and the economic efficiency.

Literaturverzeichnis

- [1] Heyn, E.: Über Eigenspannungen in Metallen, ihre Ursachen und Folgen. *Naturwissenschaften* 9(1921)18, S. 321–325
- [2] Kobayashi, H.; Onoue, H.: Brittle Fracture of Liberty Ships. *Failure Knowledge Base*, (1943)100
- [3] Langhorst, M.: Beherrschung von Schweißverzug und Schweiß Eigenspannungen - Dissertation, 2015
- [4] Withers, P. J.; Turski, M.; Edwards, L.; Bouchard, P. J.; Buttle, D. J.: Recent advances in residual stress measurement. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 85(2008)3, S. 118–127
- [5] Ilg, U.; König, G.; Erve, M.: Das Werkstoffkonzept in deutschen Leichtwasserreaktoren - Beitrag zur Anlagensicherheit, Wirtschaftlichkeit und Schadensvorsorge: 34. MPA-Seminar "Werkstoff- und Bauteilverhalten in der Energie- und Anlagentechnik", 9. und 10. Oktober 2008, Stuttgart.
- [6] de Mol, Bas A. J. M.; Overkamp, P. J.; van Gaalen, G. L.; Becker, A. E.: Non-destructive assessment of 62 Dutch Björk-Shiley convexo-concave heart valves. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery* 11(1997)4, S. 703–709
- [7] Macherauch, E.; Kloos, K.-H.: Bewertung von Eigenspannungen bei quasistatischer und schwingender Werkstoffbeanspruchung. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 20(1989)1, S. 1–13
- [8] Macherauch, E.; Kloos, K.-H.: Bewertung von Eigenspannungen bei quasistatischer und schwingender Werkstoffbeanspruchung - Teil III. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 20(1989)3, S. 82–91
- [9] Betzold, J.; Pucelik, J.; Eisenberg, S.: Eigenspannungen als Messgröße zur Qualitätssicherung. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 38(2007)4, S. 263–273
- [10] Bhupatiraju, M.; Greczanik, R.: Cold Extrusion. In: Semiatin, S. L. (Hrsg.): *ASM Handbook 14A: Bulk Forming*. ASM International, 2005, S. 405–418
- [11] Löhne, D.; Lang, K.-H.; Vöhringer, O.: Residual Stresses and Fatigue Behavior. In: Totten, G. E.; Howes, M. A. H.; Inoue, T. (Hrsg.): *Handbook of residual stress and deformation of steel*. ASM International, 2002, S. 27–53

- [12] Massivumformung in Deutschland - Eine energieintensive energieeffiziente Branche. Infostelle Industrieverband Massivumformung, 2017, 1. Auflage
- [13] Fritz, A. H.; Schmütz, J. (Hrsg.): Fertigungstechnik. Springer Vieweg, 2022, 13. Auflage
- [14] Herbertz, R.; Licht, W.; Fuss, F.: Materialeffizienz in der Massivumformung. Schmiede-Journal, (2011)September, S. 20–25
- [15] Schuler GmbH (Hrsg.): Handbuch der Umformtechnik. Springer Berlin Heidelberg, 1996
- [16] Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik - Band 3: Blechbearbeitung. Springer, 1990, 2., völlig Neubearb. und erw. Aufl.
- [17] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 4 - Umformen. Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [18] Gottstein, G.: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik - Physikalische Grundlagen (Hrsg.): Springer-Lehrbuch. Springer Vieweg, 2014, 4., neu bearb. Aufl. 2014
- [19] Liewald, M.; Kannewurf, M.: Kaltmassivumformung: Präzision in Serie, 2012, Überarb. Ausg
- [20] Raedt, J. W.: Grundlagen für das schmiermittelreduzierte Tribosystem bei der Kaltumformung des Einsatzstahles 16MnCr5 - Dissertation, 2002
- [21] Nee, A. Y. C. (Hrsg.): Handbook of manufacturing engineering and technology. Springer Reference, 2015
- [22] Rollett, A. D.; Kocks, U. F.: A Review of the Stages of Work Hardening. Solid State Phenomena 35-36(1993), S. 1–18
- [23] Koehler, J. S.: The Nature of Work-Hardening. Physical Review 86(1952)1, S. 52–59
- [24] Gerin, B.; Pessard, E.; Morel, F.; Verdu, C.; Mary, A.: Beneficial effect of prestrain due to cold extrusion on the multiaxial fatigue strength of a 27MnCr5 steel. International Journal of Fatigue 92(2016)4, S. 345–359
- [25] Schuster, A.: Charakterisierung des Faserverlaufs in umgeformten Stählen und dessen Auswirkung auf mechanische Eigenschaften - Zugl.: Dortmund, Techn. Univ., Diss., 2012 (Hrsg.): Dortmunder Umformtechnik. Shaker, 2013
- [26] Herbertz, R.; Hermanns, H.; Labs, R. (Hrsg.): Massivumformung kurz und bündig. Industrieverband Massivumformung, 2013

- [27] Koether, R.; Sauer, A.: Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure - Mit 406 Bildern und 41 Tabellen sowie 30 Übungsaufgaben und 53 Kontrollfragen. Carl Hanser Verlag, 2017, 5., überarbeitete und erweiterte Auflage unter Mitarbeit von Dirk Odening
- [28] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik - Grundlagen, Technologien, Maschinen (Hrsg.): VDI-Buch. Springer Vieweg, 2018, 3., überarbeitete Auflage
- [29] Herlan, T.: Optimaler Energieeinsatz bei der Fertigung durch Massivumformung (Hrsg.): Berichte aus dem Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart. Bd. 99. Springer, 1989
- [30] Breuer, D.: Bestimmung des Formänderungsvermögens bei der Kaltmassivumformung - Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2007 (Hrsg.): Berichte aus der Produktionstechnik. Bd. 2007,19. Shaker, 2007
- [31] Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik - Band 2: Massivumformung. Springer, 1988, 2., völlig Neubearb. Aufl.
- [32] Hirschvogel, M.; Dommelen, H.: Some applications of cold and warm forging. Journal of Materials Processing Technology 35(1992)3-4, S. 343-356
- [33] Lange, K.; Kammerer, M.; Pöhlandt, K.; Schöck, J.: Fließpressen - Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke (Hrsg.): VDI-Buch. Springer, 2008
- [34] Bay, N.: The state of the art in cold forging lubrication. Journal of Materials Processing Technology 46(1994)1-2, S. 19-40
- [35] Groche, P.; Müller, C.; Stahlmann, J.; Zang, S.: Mechanical conditions in bulk metal forming tribometers—Part one. Tribology International 62(2013)2270, S. 223-231
- [36] Groche, P.; Müller, C.; Jahn, A.: Effects of the Tool Lubrication in Cold Forging. Tribology Letters 53(2014)3, S. 599-605
- [37] Gariety, M.; Ngaile, G.; Altan, T.: Evaluation of new cold forging lubricants without zinc phosphate precoat. International Journal of Machine Tools and Manufacture 47(2007)3-4, S. 673-681
- [38] Bay, N.; Eriksen, M.; Tan, X.; Wibom, O.: A friction model for cold forging of aluminum, steel and stainless steel provided with conversion coating and solid film lubricant. CIRP Annals 60(2011)1, S. 303-306
- [39] Hoffmann, H.: Handbuch Umformen. Hanser Verlag, 2012

- [40] Bay, N.; Azushima, A.; Groche, P.; Ishibashi, I.; Merklein, M.; Morishita, M.; Nakamura, T.; Schmid, S.; Yoshida, M.: Environmentally benign tribo-systems for metal forming. CIRP Annals 59(2010)2, S. 760–780
- [41] Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015
- [42] Günes, S.; Tanrikulu, B.; Özugurlu, D. C.; Kilicaslan, C.; Ince, U.: A Comparative Study: Zinc Phosphate-Soap Coating Versus Polymer Based Coating in Cold Forward Extrusion.
- [43] Lorenz, R.; Hagenah, H.; Merklein, M.: Experimental Evaluation of Cold Forging Lubricants Using Double-Cup-Extrusion-Tests. Materials Science Forum 918(2018), S. 65–70
- [44] Gao, C.; Bredell, L.; Kuhlmann-Wilsdorf, D.; Makel, D. D.: Micromechanics of MoS₂ lubrication. Wear 162-164(1993)2, S. 480–491
- [45] Macherauch, E.; Wohlfahrt, H.; Wolfstieg, U.: Zur zweckmäßigen Definition von Eigenspannungen. HTM Journal of Heat Treatment and Materials 28(1973)3, S. 201–211
- [46] Wolfstieg, U.; Macherauch, E.: Ursachen und Bewertung von Eigenspannungen. Chemie Ingenieur Technik - CIT 45(1973)11, S. 760–770
- [47] Meyer, L. W.; Lippmann, S.; Weise, A.; Kunz, F.; Thieme, U.; Ansorge, H.: Entstehung von Eigenspannungen bei der thermomechanischen Behandlung des Stahls 42 CrMo 4 - Experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen. In: Aurich, D.; Kloos, K.-H.; Lange, G.; Macherauch, E. (Hrsg.): Eigenspannungen und Verzug durch Wärmeeinwirkung. Wiley, 2006, S. 37–58
- [48] Hoffmann, B.; Vöhringer, O.: Mikro- und Makroeigenspannungen von Stählen nach Härten und Anlassen. In: Aurich, D.; Kloos, K.-H.; Lange, G.; Macherauch, E. (Hrsg.): Eigenspannungen und Verzug durch Wärmeeinwirkung. Wiley, 2006, S. 160–174
- [49] Dahl, W.; Dilthey, U.; Weirich, P.; Payrebrune, J. de: Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen dicker Bleche. In: Aurich, D.; Kloos, K.-H.; Lange, G.; Macherauch, E. (Hrsg.): Eigenspannungen und Verzug durch Wärmeeinwirkung. Wiley, 2006, S. 175–201

- [50] Johnson, E. M.; Watkins, T. R.; Schmidlin, J. E.; Dutler, S. A.: A Benchmark Study on Casting Residual Stress. *Metallurgical and Materials Transactions A* 43(2012)5, S. 1487–1496
- [51] Ekmekci, B.: Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM). *Applied Surface Science* 253(2007)23, S. 9234–9240
- [52] Eslami-Chalandar, H.; Kaßner, M.; Nitschke-Pagel, T.; Wohlfahrt, H.: Eigenspannungsentstehung in flammrichttypischen Wärmefeldern. In: Aurich, D.; Kloos, K.-H.; Lange, G.; Macherauch, E. (Hrsg.): *Eigenspannungen und Verzug durch Wärmeeinwirkung*. Wiley, 2006, S. 270–290
- [53] Schneider, J.; Wörner, J.-D.; Schneider, F.; Schula, S.; Kuntsche, J.: Vorspannen von Glas. In: Schneider, J.; Kuntsche, J.; Schula, S.; Schneider, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): *Glasbau*. Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 139–171
- [54] Robinson, J. S.; Truman, C. E.; O'Donovan, A.; Rebelo Kornmeier, J.: Uphill quenching to reduce residual stress in a heat treatable aluminium alloy. *Materials Science and Technology* 35(2019)15, S. 1864–1871
- [55] Genzel, C.; Reimers, W.; Schwarz, O.; Grosch, J.: Restaustenit- und Eigenspannungsverteilung in tiefgeköhlten, einsatzgehärteten Gefügen. In: Aurich, D.; Kloos, K.-H.; Lange, G.; Macherauch, E. (Hrsg.): *Eigenspannungen und Verzug durch Wärmeeinwirkung*. Wiley, 2006, S. 114–125
- [56] Pohl, M.; Bracke, A.: Thermisch induzierte Veränderungen der Mikrostruktur ferritisch-austenitischer Duplex-Stähle und deren Einfluß auf den Eigenspannungszustand. In: Aurich, D.; Kloos, K.-H.; Lange, G.; Macherauch, E. (Hrsg.): *Eigenspannungen und Verzug durch Wärmeeinwirkung*. Wiley, 2006, S. 442–456
- [57] Denis, S.; Simon, A.; Beck, G.: Berücksichtigung des Werkstoffverhaltens eines Stahles mit Martensitumwandlung bei der Berechnung von Eigenspannungen während des Abschreckvorganges. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 37(1982)1, S. 18–28
- [58] Günther, D.; Kreft, U.; Hirsch, T.; Hoffmann, F.; Mayr, P.: Entstehung und Ursachen von Eigenspannungen beim Gasnitrieren. In: Aurich, D.; Kloos, K.-H.; Lange, G.; Macherauch, E. (Hrsg.): *Eigenspannungen und Verzug durch Wärmeeinwirkung*. Wiley, 2006, S. 98–113

- [59] Patschger, M.: Prozessentwicklung zum chemischen Vorspannen dünner Gläser - Dissertation, 2015
- [60] Tekkaya, A. E.: Ermittlung von Eigenspannungen in der Kaltmassivumformung. Bd. 83. Springer Berlin Heidelberg, 1986
- [61] Dorfschmidt, E.: Eigenspannungsuntersuchungen beim Voll-Vorwärts-Kaltfließpressen von Stahl - Dissertation, 1982
- [62] Franceschi, A.; Jaeger, F.; Hoche, H.; Oechsner, M.; Groche, P.: Calibration of the residual stresses with an active die during the ejection phase of cold extrusion. *International Journal of Material Forming* 14(2021)2, S. 223–233
- [63] Midha, P. S.; Modlen, G. F.: Residual stresses in cold-extruded rods. *Metals Technology* 3(1976)1, S. 202–207
- [64] Tekkaya, A. E.; Gerhardt, J.; Burgdorf, M.: Residual Stresses in Cold-Formed Workpieces. *CIRP Annals* 34(1985)1, S. 225–230
- [65] Genzel, C.; Reimers, W.; Malek, R.; Pöhlandt, K.: Neutron and X-ray residual stress analysis of steel parts produced by cold forward extrusion and tube drawing. *Materials Science and Engineering: A* 205(1996)1-2, S. 79–90
- [66] Zucko, M.; Pöhlandt, K.; Pyzalla, A.; Reimers, W.; Kockelmann, H.: Berechnung der Umformeigenspannungen beim Fließpressen und Vergleich mit experimentellen Ergebnissen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 28(1997)9, S. 417–423
- [67] Pyzalla, A.; Reimers, W.: Residual Stress and Texture Due to Cold and Hot Extrusion Processes. *Textures and Microstructures* 33(1999)1-4, S. 291–301
- [68] Backofen, W. A.: Deformation processing. *Metallurgical Transactions* 4(1973)12, S. 2679–2699
- [69] Wang, Z.; Gong, B.: Residual Stress in the Forming of Materials. In: Totten, G. E.; Howes, M. A. H.; Inoue, T. (Hrsg.): *Handbook of residual stress and deformation of steel*. ASM International, 2002, S. 141–149
- [70] Hosford, W. F.; Caddell, R. M.: *Metal forming - Mechanics and metallurgy*. Cambridge University Press, 2011, 4. ed.
- [71] Zdunek, J.; Maj, P.; Kulczyk, M.; Mizera, J.: Texture, residual stresses and mechanical properties analysis in the commercial 1.4462 duplex stainless steel subjected to hydrostatic extrusion. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 19(2019)2, S. 525–534

- [72] Merklein, M.; Ndzomssi, F.; Engel, U.: Investigation of the Influence of Tool Geometry on Effective Strain Distribution in Full Forward Extrusion. In: Menary, Gary (Hrsg.) The 14th International ESAFORM Conference on Material Forming. AIP Publishing, 2011, S. 419–424
- [73] Hoche, H.; Balser, A.; Oechsner, M.; Franceschi, A.; Groche, P.: Verbesserung des Eigenspannungszustands beim Kaltfließpressen durch den aktiven Einsatz eines gesteuerten Gegenstempels. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 50(2019)6, S. 669–681
- [74] Schajer, G. S. (Hrsg.): Practical residual stress measurement methods. Wiley, 2013
- [75] Rossini, N. S.; Dassisti, M.; Benyounis, K. Y.; Olabi, A. G.: Methods of measuring residual stresses in components. *Materials & Design* 35(2012)1, S. 572–588
- [76] Fathallah, R.; Cao, W.; Castex, L.; Webster, P. S.; Ezeilo, A.; Webster, G. A.; Webster, P. J.: Comparison of Residual Stresses Determined by X-ray Diffraction, Neutron Diffraction and the Hole Drilling Method in Aerospace Shot peened Materials. In: James, M. R. (Hrsg.): Proceedings of the Fourth International Conference on Residual Stresses - June 8 - 10, 1994, Stouffer Harborplace Hotel, Baltimore, Maryland. Society for Experimental Mechanics Inc, 1994, S. 834–843
- [77] Süptitz, R.; Günther, A.: Verfahren zur tiefenaufgelösten Bestimmung der mechanischen Spannungszustände von metallischen Werkstücken mittels modifizierter Bohrlochmethode. DE102020003231A1, 02.12.2021
- [78] Flaman, M. T.; Herring, J. A.: Comparison of Four Hole-Producing Techniques for the Center-Hole Residual-Stress Measurement Method. *Experimental Techniques* 9(1985)8, S. 30–32
- [79] Schajer, G. S.: Advances in Hole-Drilling Residual Stress Measurements. *Experimental Mechanics* 50(2010)2, S. 159–168
- [80] Schimmöller, H.: Analytische Behandlung von Eigenspannungszuständen auf der Grundlage der Elastizitätstheorie (Hrsg.): Schriftenreihe Schiffbau. Bd. 524. Technische Universität Hamburg-Harburg, 1992
- [81] ASTM E837-99: Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM International,
- [82] Hossain, S.; Zheng, G.; Truman, C. E.; Smith, D. J.: Application of multiple analysis methods in optimising complex residual stress characterisation. *Experimental Techniques* 41(2017)5, S. 483–503

- [83] Schajer, G. S.: Relaxation Methods for Measuring Residual Stresses: Techniques and Opportunities. *Experimental Mechanics* 50(2010)8, S. 1117–1127
- [84] Leggatt, R. H.; Smith, D. J.; Smith, S. D.; Faure, F.: Development and experimental validation of the deep hole method for residual stress measurement. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 31(1996)3, S. 177–186
- [85] Smith, D. J.: Deep Hole Drilling. In: Schajer, G. S. (Hrsg.): *Practical residual stress measurement methods*. Wiley, 2013, S. 65–88
- [86] Cheng, W.; Finnie, I.: *Residual Stress Measurement and the Slitting Method*. Springer US, 2007
- [87] Prime, M. B.; DeWald, A. T.: The Contour Method. In: Schajer, G. S. (Hrsg.): *Practical residual stress measurement methods*. Wiley, 2013, S. 109–138
- [88] Prime, M. B.: Cross-Sectional Mapping of Residual Stresses by Measuring the Surface Contour After a Cut. *Journal of Engineering Materials and Technology* 123(2001)2, S. 162–168
- [89] Murray, C. E.; Noyan, I. C.: Applied and Residual stress Determination Using X-ray Diffraction. In: Schajer, G. S. (Hrsg.): *Practical residual stress measurement methods*. Wiley, 2013, S. 139–162
- [90] Friedrich, W.; Knipping, P.; Laue, M.: Interferenzerscheinungen bei Röntgenstrahlen. *Annalen der Physik* 346(1913)10, S. 971–988
- [91] Bragg, W. H.; Bragg, W. L.: The reflection of X-rays by crystals. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* 88(1913)605, S. 428–438
- [92] Macherauch, E.; Müller, P.: Das $\sin^2\psi$ -Verfahren der röntgenografischen Spannungsmessung. *Zeitschrift für angewandte Physik* 13(1961), S. 305–312
- [93] Eigenmann, B.; Macherauch, E.: Röntgenographische Untersuchung von Spannungszuständen in Werkstoffen, Teil I. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 26(1995)3, S. 148–160
- [94] Krieger, H.: *Strahlungsquellen für Technik und Medizin*. Springer Berlin Heidelberg, 2017, 3. Aufl. 2018
- [95] Hauk, V.; Macherauch, E.: A Useful Guide for X-Ray Stress Evaluation (XSE). *Advances in X-ray Analysis* 27(1983), S. 81–99

- [96] Eigenmann, B.; Macherauch, E.: Röntgenographische Untersuchung von Spannungszuständen in Werkstoffen, Teil III. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 27(1996)9, S. 426–437
- [97] David, W. I. F.: Powder diffraction peak shapes. Parameterization of the pseudo-Voigt as a Voigt function. *Journal of Applied Crystallography* 19(1986)1, S. 63–64
- [98] Brown, A.; Linde, S.: Powder Diffraction Profiles and the Pearson VII Distribution. *Advances in X-ray Analysis* 30(1986), S. 343–350
- [99] Sedighi, M.; Nazemnezhad, R.: Effect of Peak Positioning Method on Accuracy of X-Ray Diffraction Residual Stress Measurement. *Experimental Techniques* 40(2016)1, S. 295–302
- [100] Hüsecken, A.: Untersuchung der Auswirkung von sehr hohen Lastspielzahlen auf einen austenitisch-ferritischen Duplexstahl mittels in-situ Röntgendiffraktion an der Strahllinie BL10 an der Synchrotronstrahlungsquelle DELTA - Dissertation, 2017
- [101] Spieß, L.; Teichert, G.; Schwarzer, R.; Behnken, H.; Genzel, C.: *Moderne Röntgenbeugung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019
- [102] Fitzpatrick, M. E.; Fry, A. T.; Holdway, P.; Kandil, F. A.; Shackleton, J.; Suominen, L.: Determination of residual stresses by X-ray diffraction. NPL report DEPC Measurement note, (2005)52
- [103] Prevéy, P. S.: Problems with non-destructive surface X-ray diffraction residual stress measurement. In: Ruud, C. (Hrsg.): *Practical applications of residual stress technology - Proceedings of the Third International Conference, 15 - 17 May 1991, Indianapolis, Indiana, USA*. ASM International, 1991
- [104] Krawitz, A. D.; Brune, J. E.; Schmank, M. J.: Measurements of Stress in the Interior of Solids with Neutrons. In: Kula, E.; Weiss, V. (Hrsg.): *Residual Stress and Stress Relaxation*. Springer US, 1982, S. 139–156
- [105] Behnken, H.: Strain-Function Method for the Direct Evaluation of Intergranular Strains and Stresses. *Physica status solidi A Applied research* 177(2000)2, S. 401–418
- [106] Pencea, I.; Tiriba, G.: Multiconvolutional Approach for Uncertainty Estimation of the Residual Stress Measured by XRD $\sin^2\psi$ Method. *Scientific Bulletin - "Politehnica" University of Bucharest. Series A, Applied mathematics and physics* 75(2013)4
- [107] Mueller, E.: How Precise can be the Residual Stress Determined by X-Ray Diffraction? A summary of the Possibilities and Limits. In: Holden, T. M.; Edwards, L.; Muransky, O. (Hrsg.): *Residual stresses*

- 2016, ICRS-10 - 10th International Conference on Residual Stresses (ICRS10), Sydney, Australia, 3-7 July, 2016. Materials Research Forum LLC, 2017, S. 295-298
- [108] François, M.; Dionnet, B.; Sprauel, J. M.; Nardou, F.: The Influence of Cylindrical Geometry on X-ray Stress Tensor Analysis. I. General Formulation. *Journal of Applied Crystallography* 28(1995)6, S. 761-767
- [109] Dionnet, B.; François, M.; Sprauel, J. M.; Nardou, F.: The influence of cylindrical geometry on X-ray stress tensor analysis. II. Applications. *Journal of Applied Crystallography* 32(1999)5, S. 883-891
- [110] Müller, E.: Messung von Lastspannungen bei verschiedenen Oberflächenrauheiten mit Hilfe eines Röntgendiffraktometers. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 48(1993)1, S. 50-52
- [111] Smit, T. C.; Reid, R. G.: A Method to Combine Residual Stress Measurements from XRD and IHD using Series Expansion. *Experimental Mechanics* 61(2021)6, S. 1029-1043
- [112] Simpson, C. A.; Knowles, D. M.; Mostafavi, M.: Influence of Microstructure on Synchrotron X-ray Diffraction Lattice Strain Measurement Uncertainty. *Metals* 11(2021)5, S. 774
- [113] Ma, C.-H.; Huang, J.-H.; Chen, H.: Residual stress measurement in textured thin film by grazing-incidence X-ray diffraction. *Thin Solid Films* 418(2002)2, S. 73-78
- [114] Fu, X.; Niu, Z.; Deng, Y.; Zhang, J.; Liu, C.; Chen, G.; Li, Z.; Zhou, W.: Accuracy of X-ray diffraction measurement of residual stresses in shot peened titanium alloy samples. *Nondestructive Testing and Evaluation* 34(2019)2, S. 164-177
- [115] Bauch, J.; Rosenkranz, R.: *Physikalische Werkstoffdiagnostik - Ein Kompendium wichtiger Analytikmethoden für Ingenieure und Physiker*. Springer Vieweg, 2017
- [116] Sanchez-Bajo, F.; Cumbreira, F. L.: The Use of the Pseudo-Voigt Function in the Variance Method of X-ray Line-Broadening Analysis. *Journal of Applied Crystallography* 30(1997)4, S. 427-430
- [117] Takebayashi, S.; Kunieda, T.; Yoshinaga, N.; Ushioda, K.; Ogata, S.: Comparison of the Dislocation Density in Martensitic Steels Evaluated by Some X-ray Diffraction Methods. *ISIJ International* 50(2010)6, S. 875-882

- [118] Hammond, C.: The basics of crystallography and diffraction (Hrsg.): International Union of Crystallography texts on crystallography. Bd. 21. Oxford University Press, 2015, 4. edition
- [119] Tanaka, K.: The $\cos\alpha$ method for X-ray residual stress measurement using two-dimensional detector. Mechanical Engineering Reviews 6(2019)1, 18-00378-18-00378
- [120] Sasaki, T.: New Generation X-Ray Stress Measurement Using Debye Ring Image Data by Two-Dimensional Detection. Materials Science Forum 783-786(2014), S. 2103-2108
- [121] Hutchings, M. T.; Withers, P. J.; Holden, T. M.; Lorentzen, T.: Introduction to the characterization of residual stress by neutron diffraction. CRC Press Taylor & Francis Group, 2005, 1. ed.
- [122] Allen, A. J.; Hutchings, M. T.; Windsor, C. G.; Andreani, C.: Neutron diffraction methods for the study of residual stress fields. Advances in Physics 34(1985)4, S. 445-473
- [123] Kleinstück, K.; Tobisch, J.; Betzl, M.; Mücklich, A.; Schläfer, D.; Schläfer, U.: Texturuntersuchungen von Metallen mittels Neutronenbeugung. Kristall und Technik 11(1976)4, S. 409-429
- [124] Will, G.: Kristallstrukturanalyse und Neutronenbeugung I. Angewandte Chemie 81(1969)9, S. 307-320
- [125] Reimers, W.; Broda, M.; Brusch, G.; Dantz, D.; Liss, K.-D.; Pyzalla, A.; Schmackers, T.; Tschentscher, T.: Evaluation of residual stresses in the bulk of materials by high energy synchrotron diffraction. Journal of Nondestructive Evaluation 17(1998)3, S. 129-140
- [126] Bittel, H.: Zur Statistik der ferromagnetischen Elementarvorgänge und ihren Einfluß auf das Barkhausenrauschen. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1956
- [127] Vogt, S.; Greß, T.; Neumayer, F. F.; Schwarzer, N.; Harris, A.; Volk, W.: Method for highly spatially resolved determination of residual stress by using nanoindentation. Production Engineering 13(2019)2, S. 133-138
- [128] Noyan, I. C.; Cohen, J. B.: Residual Stress - Measurement by Diffraction and Interpretation. Springer New York, 1987
- [129] Lüthi, T.: Beitrag zur Ermittlung von Eigenspannungen mit Ultraschall: Anwendung auf Schweissnähte, 1990
- [130] Peiter, A.: Spannungsmeßpraxis - Experimentelle Ermittlung Mechanischer Spannungen. Vieweg+Teubner Verlag, 1992

- [131] Bray, D. E.: Ultrasonics. In: Schajer, G. S. (Hrsg.): Practical residual stress measurement methods. Wiley, 2013, S. 259–278
- [132] Kudryavtsev, Y. F.: Residual Stress. In: Sharpe, W. N. (Hrsg.): Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics. Springer US, 2008, S. 371–387
- [133] Tsui, T. Y.; Oliver, W. C.; Pharr, G. M.: Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: Part I. Experimental studies in an aluminum alloy. Journal of Materials Research 11(1996)3, S. 752–759
- [134] Zhu, L.-N.; Xu, B.-S.; Wang, H.-D.; Wang, C.-B.: Measurement of Residual Stresses Using Nanoindentation Method. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences 40(2015)2, S. 77–89
- [135] Gibmeier, J.: Zum Einfluss von Last- und Eigenspannungen auf die Ergebnisse instrumentierter Eindringhärteprüfungen - Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2004 (Hrsg.): Forschungsberichte aus dem Institut für Werkstofftechnik. Bd. 6, 2005
- [136] Dean, J.; Aldrich-Smith, G.; Clyne, T. W.: Use of nanoindentation to measure residual stresses in surface layers. Acta Materialia 59(2011)7, S. 2749–2761
- [137] Huang, X.; Liu, Z.; Xie, H.: Recent progress in residual stress measurement techniques. Acta Mechanica Solida Sinica 26(2013)6, S. 570–583
- [138] Guo, J.; Fu, H.; Pan, B.; Kang, R.: Recent progress of residual stress measurement methods: A review. Chinese Journal of Aeronautics 34(2021)2, S. 54–78
- [139] Kornmeier, M.; Scholtes, B.: Analyse von Abschreck- und Verformungseigenspannungen mittels Bohrloch- und Röntgenverfahren. In: Aurich, D.; Kloos, K.-H.; Lange, G.; Macherauch, E. (Hrsg.): Eigenspannungen und Verzug durch Wärmeeinwirkung. Wiley, 2006, S. 457–474
- [140] Schimmöller, H.: Entstehung und Bestimmung von Schweißeigenspannungen (Hrsg.): Schriftenreihe Schiffbau. Bd. 523. Technische Universität Hamburg-Harburg, 1992
- [141] Fontanari, V.; Frendo, F.; Bortolamedi, T.; Scardi, P.: Comparison of the hole-drilling and X-ray diffraction methods for measuring the residual stresses in shot-peened aluminium alloys. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design 40(2005)2, S. 199–209

- [142] Sim, W. M.: Challenges of residual stress and part distortion in the civil airframe industry. *International Journal of Microstructure and Materials Properties* 5(2010)4/5, S. 446
- [143] Lachmann, C.; Nitschke-Pagel, T.; Wohlfahrt, H.: Zum Einfluß von Eigenspannungen und Mikrostruktur auf die Kaltrißneigung hochfester Stähle. In: Aurich, D.; Kloos, K.-H.; Lange, G.; Macherauch, E. (Hrsg.): *Eigenspannungen und Verzug durch Wärmeeinwirkung*. Wiley, 2006, S. 252–269
- [144] Kovalev, A. I.; Wainstein D L; Mishina V P; Zabilsky, V. V.: Effect of Residual Stress on Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking. In: Totten, G. E.; Howes, M. A. H.; Inoue, T. (Hrsg.): *Handbook of residual stress and deformation of steel*. ASM International, 2002, S. 70–86
- [145] da Silva Peltz, J.; Beltrami, L. V. R.; Kunst, S. R.; Brandolt, C.; Malfatti, C. d. F.: Effect of the Shot Peening Process on the Corrosion and Oxidation Resistance of AISI430 Stainless Steel. *Materials Research* 18(2015)3, S. 538–545
- [146] Litteken, C. S.; Strohsand, S.; Dauskardt, R. H.: Residual stress effects on plastic deformation and interfacial fracture in thin-film structures. *Acta Materialia* 53(2005)7, S. 1955–1961
- [147] Lidbury, D.: The significance of residual stresses in relation to the integrity of LWR pressure vessels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 17(1984)4, S. 197–328
- [148] Bürgel, R.: *Festigkeitslehre und Werkstoffmechanik*. Vieweg+Teubner Verlag, 2005
- [149] Radaj, D.; Vormwald, M.: *Ermüdungsfestigkeit - Grundlagen für Ingenieure*. Springer Berlin Heidelberg, 2007, 3., neubearb. u. erw. Aufl. 2007
- [150] McClung, R. C.: A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 30(2007)3, S. 173–205
- [151] Wycisk, E.: *Ermüdungseigenschaften der laseradditiv gefertigten Titanlegierung TiAl6V4*. Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [152] Coules, H. E.; Horne, G.; Abburi Venkata, K.; Pirling, T.: The effects of residual stress on elastic-plastic fracture propagation and stability. *Materials & Design* 143(2018)12, S. 131–140
- [153] Rörup, J.: Einfluss von Druckmittelspannungen auf die Betriebsfestigkeit von geschweißten Schiffskonstruktionen -

- Dissertation (Hrsg.): Schriftenreihe Schiffbau. Bd. 619. Technische Universität Hamburg-Harburg; Inst. für Schiffbau, 2002
- [154] Nitschke-Pagel, T.; Wohlfahrt, H.: Einfluß von Eigenspannungen auf die Schwingfestigkeit geschweißter Feinkornbaustähle. In: Aurich, D.; Kloos, K.-H.; Lange, G.; Macherauch, E. (Hrsg.): Eigenspannungen und Verzug durch Wärmeeinwirkung. Wiley, 2006, S. 291–308
- [155] Withers, P. J.: Residual Stress and its Role in Failure. Reports on Progress in Physics 70(2007)12, S. 2211–2264
- [156] Lachmann, C.; Nitschke-Pagel, T.; Wohlfahrt, H.: Bedeutung von Eigenspannungsabbau und mikrostrukturellen Veränderungen für die Lebensdauervorhersage schwingbeanspruchter Schweißverbindungen. International Journal of Materials Research 94(2003)6, S. 640–648
- [157] Manjoine, M.: Stress Relaxation Characteristics and Data Utilization. In: Kula, E.; Weiss, V. (Hrsg.): Residual Stress and Stress Relaxation. Springer US, 1982, S. 519–530
- [158] Nitschke-Pagel, T.; Wohlfahrt, H.: Eigenspannungsabbau in zügig und zyklisch beanspruchten Schweißverbindungen. International Journal of Materials Research 92(2001)8, S. 860–866
- [159] James, M. R.: The Relaxation of Residual Stresses During Fatigue. In: Kula, E.; Weiss, V. (Hrsg.): Residual Stress and Stress Relaxation. Springer US, 1982, S. 297–314
- [160] Toribio, J.: Residual Stress Effects in Stress-Corrosion Cracking. Journal of Materials Engineering and Performance 7(1998)2, S. 173–182
- [161] Vöhringer, O.: Relaxation of Residual Stresses by Annealing or Mechanical Treatment. In: Niku-Lari, A. (Hrsg.): Advances in surface treatments - Technology-applications-effects : proceedings of the AST World Conference Advances in Surface Treatments and Surface Finishing, Paris, 3-4 December 1986. Pergamon Press, 1987, S. 367–396
- [162] Dalaei, K.; Karlsson, B.; Svensson, L.-E.: Stability of shot peening induced residual stresses and their influence on fatigue lifetime. Materials Science and Engineering: A 528(2011)3, S. 1008–1015
- [163] Schulze, V.; Vöhringer, O.; Macherauch, E.: Modellierung der einachsigen Zug- und Druckverformung kugelgestrahlter Zylinderproben aus vergütetem 42CrMo4 und der dabei auftretenden

- Makroelastizitätsänderungen. *International Journal of Materials Research* 89(1998)10, S. 719–728
- [164] Kohlenbecker, M.: Untersuchung der Eigenspannungsstabilität von autofrettierten Aluminiumbauteilen unter zyklischer Beanspruchung und erhöhter Temperatur - Dissertation. Universität Stuttgart, 2014
- [165] Maier, H. J.; Niendorf, T.; Bürgel, R.: *Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019
- [166] Löhe, D.; Vöhringer, O.: Stability of Residual Stress. In: Totten, G. E.; Howes, M. A. H.; Inoue, T. (Hrsg.): *Handbook of residual stress and deformation of steel*. ASM International, 2002, S. 54–69
- [167] Schmitt-Thomas, K. G.: *Metallkunde für das Maschinenwesen*. Springer Berlin Heidelberg, 1990
- [168] Macherauch, E.; Kloos, K.-H.: Bewertung von Eigenspannungen bei quasistatischer und schwingender Werkstoffbeanspruchung - Teil II. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 20(1989)2, S. 53–60
- [169] Holzapfel, H.; Schulze, V.; Vöhringer, O.; Macherauch, E.: Residual stress relaxation in an AISI 4140 steel due to quasistatic and cyclic loading at higher temperatures. *Materials Science and Engineering: A* 248(1998)1-2, S. 9–18
- [170] Bai, Q.; Feng, H.; Si, L.-K.; Pan, R.; Wang, Y.-Q.: A Novel Stress Relaxation Modeling for Predicting the Change of Residual Stress During Annealing Heat Treatment. *Metallurgical and Materials Transactions A* 50(2019)12, S. 5750–5759
- [171] Epp, J.; Surm, H.; Hirsch, T.; Hoffmann, F.: Residual stress relaxation during heating of bearing rings produced in two different manufacturing chains. *Journal of Materials Processing Technology* 211(2011)4, S. 637–643
- [172] Nikitin, I.; Besel, M.: Residual stress relaxation of deep-rolled austenitic steel. *Scripta Materialia* 58(2008)3, S. 239–242
- [173] Nikitin, I.; Scholtes, B.; Maier, H. J.; Altenberger, I.: High temperature fatigue behavior and residual stress stability of laser-shock peened and deep rolled austenitic steel AISI 304. *Scripta Materialia* 50(2004)10, S. 1345–1350
- [174] Prevéy, P. S.; Hombach, D.; Mason, P.: Thermal residual stress relaxation and distortion in surface enhanced gas turbine engine components, 1998

- [175] Daichendt, S.: Relaxation strahlbedingter Eigenspannungen unter kombiniert thermisch-mechanischer Beanspruchung in Laserstrahl-Schweißverbindungen einer AlSiMgCu-Knetlegierung - Dissertation, 2011
- [176] ICFG Dokument. 5/82: Calculation methods for cold forging tools.,
- [177] Buschhausen, A.; Weinmann, K.; Lee, J. Y.; Altan, T.: Evaluation of lubrication and friction in cold forging using a double backward-extrusion process. *Journal of Materials Processing Technology* 33(1992)1-2, S. 95-108
- [178] Kiener, C.; Neher, R.; Merklein, M.: Influence of tribological conditions on cold forging of gears. *Production Engineering* 12(2018)3-4, S. 367-375
- [179] Steinke, P.: *Finite-Elemente-Methode*. Springer Berlin Heidelberg, 2015
- [180] Ludwik, P.: *Elemente der Technologischen Mechanik*. Springer Berlin Heidelberg, 1909
- [181] Hollomon, J. H.: Tensile deformation. *Trans. AIME*, (1945)162, S. 268-290
- [182] Voce, E.: The Relationship between Stress and Strain for Homogeneous Deformation. *Journal of the Institute of Metals* 74(1948), S. 537-562
- [183] Hockett, J. E.; Sherby, O. D.: Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 23(1975)2, S. 87-98
- [184] Milutinovic, M.; Lendjel, R.; Balos, S.; Zlatanovic, D. L.; Sevsek, L.; Pepelnjak, T.: Characterisation of geometrical and physical properties of a stainless steel denture framework manufactured by single-point incremental forming. *Journal of Materials Research and Technology* 10(2021), S. 605-623
- [185] Cotton, D.; Maillard, A.; Kaufmann, J.: Improved coining force calculations through incorporation of key process parameters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 967(2020)1, S. 12003
- [186] Tikhovskiy, I.; Raabe, D.; Roters, F.: Simulation of the deformation texture of a 17%Cr ferritic stainless steel using the texture component crystal plasticity finite element method considering texture gradients. *Scripta Materialia* 54(2006)8, S. 1537-1542

- [187] Portier, L.; Calloch, S.; Marquis, D.; Geyer, P.: Ratchetting under tension-torsion loadings: experiments and modelling. *International Journal of Plasticity* 16(2000)3-4, S. 303-335
- [188] Chaboche, J. L.: Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International Journal of Plasticity* 5(1989)3, S. 247-302
- [189] Walzer, S.; Liewald, M.; Simon, N.; Gibmeier, J.; Erdle, H.; Böhlke, T.: Improvement of Sheet Metal Properties by Inducing Residual Stresses into Sheet Metal Components by Embossing and Reforming. *Applied Science and Engineering Progress*, (2021)
- [190] Borchers, H.; Fricke, H.: Die Entwicklung der Textur von aluminiumberuhigtem kohlenstoffarmem unlegiertem Stahl für Kaltumformung im Zugversuch bei nahezu regelloser Ausgangsorientierung. *Archiv für das Eisenhüttenwesen* 40(1969)1, S. 81-86
- [191] Tekkaya, A. E.: Improved relationship between Vickers hardness and yield stress for cold formed materials. *Steel Research* 72(2001)8, S. 304-310
- [192] Werkstoffdatenblatt 1.3397 / HS 2-2-2 / ASP2012.
URL: https://www.zapp.com/fileadmin/_documents/Datenblaetter/Werkstoffe/Werkzeugstahl/Deutsch/ASP/ASP_2012_DE.pdf;
[06.04.2023]
- [193] Werkstoffdatenblatt 1.2343 / X37CrMoV5-1. URL: https://www.hsm-stahl.de/fileadmin/user_upload/datenblatt/HSM_Datenblatt_1.2343.pdf;
[06.04.2023]
- [194] Moraes Costa, A. L. de; Da Silva, U. S.; Valberg, H. S.: On the Friction Conditions in FEM Simulations of Cold Extrusion. *Procedia Manufacturing* 47(2020), S. 231-236
- [195] Franceschi, A.: Anforderungsspezifische Einstellung des Eigenspannungszustands in der Kaltmassivumformung - Dissertation, 2023
- [196] Noyan, I. C.; Cohen, J. B.: The Nature of Residual Stress and Its Measurement. In: Kula, E.; Weiss, V. (Hrsg.): *Residual Stress and Stress Relaxation*. Springer US, 1982, S. 1-18
- [197] Vazirisereshk, M. R.; Martini, A.; Strubbe, D. A.; Baykara, M. Z.: Solid Lubrication with MoS₂: A Review. *Lubricants* 7(2019)7, S. 57
- [198] Groche, P.; Zang, S.; Kramer, P.; Müller, C.; Rezanov, V.: Influence of a heat treatment prior to cold forging operations on the performance of lubricants. *Tribology International* 92(2015)2, S. 67-71

- [199] Sen, S.; Aksakal, B.; Ozel, A.: Transient and residual thermal stresses in quenched cylindrical bodies. *International Journal of Mechanical Sciences* 42(2000)10, S. 2013–2029
- [200] Kuboki, T.; Kawakami, I.; Neishi, Y.; Kuroda, K.; Akiyama, M.: A Study on the Influence of Mechanical Properties on the Distribution of Axial Residual Stress after Cold Drawing of Metallic Bars. *Journal of the Society of Materials Science, Japan* 50(2001)3Appendix, S. 41–46
- [201] Ruiz-Hervias, J.; Luzin, V.; Prask, H.; Gnaeupel-Herold, T.; Elices, M.: Effect of thermo-mechanical treatments on residual stresses measured by neutron diffraction in cold-drawn steel rods. *Materials Science and Engineering: A* 435-436(2006), S. 725–735
- [202] Atienza, J.; Martinez-Perez, M. L.; Ruiz-Hervias, J.; Mompean, F.; Garcia-Hernandez, M.; Elices, M.: Residual stresses in cold drawn ferritic rods. *Scripta Materialia* 52(2005)4, S. 305–309
- [203] Shintani, T.; Murata, Y.: Evaluation of the dislocation density and dislocation character in cold rolled Type 304 steel determined by profile analysis of X-ray diffraction. *Acta Materialia* 59(2011)11, S. 4314–4322
- [204] Lorenz, R.; Hagenah, H.; Merklein, M.: Influence of the coating process on the tribological conditions during cold forging with a MoS₂ based lubricant. In: Fratini, L.; Di Lorenzo, R.; Buffa, G.; Ingarao, G. (Hrsg.): *Proceedings of the 21st International ESAFORM Conference on Material Forming - ESAFORM 2018 : Palermo, Italy, 23-25 April 2018*. AIP Publishing, 2018, S. 40013
- [205] Whitehouse, G. D.; Nandan, D.; Whitehurst, C. A.: The Effect of Film Thickness on Friction Coefficients for Solid Lubricants; CaF₂, MoS₂ and Graphite. *Tribology Transactions* 13(1970)3, S. 159–168
- [206] Singer, I. L.: Solid Lubrication Processes. In: Singer, I. L.; Pollock, H. M. (Hrsg.): *Fundamentals of Friction: Macroscopic and Microscopic Processes*. Springer Netherlands, 1992, S. 237–261
- [207] Siu, J. H.; Li, L. K.: An investigation of the effect of surface roughness and coating thickness on the friction and wear behaviour of a commercial MoS₂-metal coating on AISI 400C steel. *Wear* 237(2000)2, S. 283–287
- [208] Curry, J. F.; Wilson, M. A.; Luftman, H. S.; Strandwitz, N. C.; Argibay, N.; Chandross, M.; Sidebottom, M. A.; Krick, B. A.: Impact of Microstructure on MoS₂ Oxidation and Friction. *ACS applied materials & interfaces* 9(2017)33, S. 28019–28026

- [209] Stupp, B. C.: Synergistic effects of metals co-sputtered with MoS₂. Thin Solid Films 84(1981)3, S. 257–266
- [210] Curry, J. F.: Friction and Environmental Sensitivity of Molybdenum Disulfide: Effects of Microstructure - Dissertation, 2017
- [211] Fusaro, R. L.: Lubrication and Failure Mechanisms of Molybdenum Disulfide Films - I - Effect of Atmosphere, 1978
- [212] Fleischauer, P. D.: Effects of Crystallite Orientation on Environmental Stability and Lubrication Properties of Sputtered MoS₂ Thin Films. ASLE Transactions 27(1984)1, S. 82–88
- [213] Spalvins, T.: Morphological and frictional behavior of sputtered MoS₂ films. Thin Solid Films 96(1982)1, S. 17–24
- [214] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung (Hrsg.): VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, 2006, 3., korrigierte und ergänzte Auflage
- [215] Spura, C.; Fleischer, B.; Wittel, H.; Jannasch, D.: Roloff/Matek Maschinenelemente. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023
- [216] Roth, M.: Die thermische Stabilität von Eigenspannungen in kugelgestrahlten Oberflächen. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 18(1987)7, S. 225–228
- [217] Weng, C. C.; White, R. N.: Residual Stresses in Cold-Bent Thick Steel Plates. Journal of Structural Engineering 116(1990)1, S. 24–39
- [218] Mueller, E.: The long-term stability of residual stresses in steel. SN Applied Sciences 3(2021)12
- [219] Werkstoffdatenblatt 1.4016 / X6Cr17. URL: https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publicationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4016_de.pdf; [05.10.2023]
- [220] Santos, Y.; Farias, C.; Sobral, M. D.; Araujo Oliveira, M.; Araujo, M.: Spectral Analysis of Ultrasonic Lamb waves applied to the study of the Intermetallic phase presence on plates of AISI 430 Ferritic Stainless Steel submitted to Isothermal Treatments (Hrsg.): 18th World Conference on Nondestructive Testing, 2012
- [221] Grobner, P. J.: The 885 °F (475 °C) embrittlement of ferritic stainless steels. Metall Trans 4(1973)1, S. 251–260
- [222] Wang, X.; Zhang, W.; Liu, Z.; Li, H.; Wang, G.: Improvement on room-temperature ductility of 6.5 wt.% Si steel by stress-relief annealing treatments after warm rolling. Materials Characterization 122(2016)12, S. 206–214

- [223] Behrens, B.-A.; Schröder, J.; Brands, D.; Brunotte, K.; Wester, H.; Scheunemann, L.; Uebing, S.; Kock, C.: Numerische Prozessauslegung zur gezielten Eigenspannungseinstellung in warmmassivumgeformten Bauteilen unter Berücksichtigung von Makro- und Mikroskala. *Forschung im Ingenieurwesen* 85(2021)3, S. 757–771
- [224] Weißbach, W.; Dahms, M.; Jaroschek, C.: *Werkstoffkunde*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015
- [225] Wackermann, K.: Einfluss einer zyklischen Belastung auf die Versprödungskinetik von Legierungen am Beispiel der 475 °C-Versprödung von Duplexstahl und der dynamischen Versprödung einer Nickelbasislegierung - Dissertation, 2014

Verzeichnis promotionsbezogener eigener Publikationen

- [P1] Franceschi, A.; Stahl, J.; Kock, C.; Selbmann, R.; Ortmann-Ishkina, S.; Jobst, A.; Merklein, M.; Kuhfuß, B.; Bergmann, M.; Behrens, B.-A.; Volk, W.; Groche, P.: Strategies for residual stress adjustment in bulk metal forming. *Archive of Applied Mechanics* 91(2021)8, S. 3557–3577
- [P2] Floros, D.; Jobst, A.; Kergaßner, A.; Merklein, M.; Steinmann, P.: Towards an holistic account on residual stresses in full-forward extruded rods. *Archive of Applied Mechanics* 91(2021)8, S. 3649–3664
- [P3] Landkammer, P.; Jobst, A.; Kiener, C.; Steinmann, P.; Merklein, M.: Investigations on residual stress generation in full-forward-extrusion. *Production Engineering* 28(2019)1, S. 201–212
- [P4] Jobst, A.; Kiener, C.; Merklein, M.: Investigations on Residual Stress Generation in Extruded Steel Components. In: Wulfsberg, J. P.; Hintze, W.; Behrens, B.-A. (Hrsg.): *Production at the leading edge of technology*. Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 83–92
- [P5] Jobst, A.; Floros, D.; Steinmann, P.; Merklein, M.: Component residual stress control in forward rod extrusion by material flow and tribology - experiments and modeling. *Forschung im Ingenieurwesen* 85(2021)3, S. 733–744
- [P6] Jobst, A.; Merklein, M.: Applicability of Solid Lubricant Coatings in Cold Rod Extrusion of Stainless Steels. *Defect and Diffusion Forum* 404(2020), S. 95–100
- [P7] Jobst, A.; Merklein, M.: Influence of Material Delivery Condition on Residual Stresses and Part Properties During Forward Rod Extrusion. In: Daehn, G.; Cao, J.; Kinsey, B.; Tekkaya, A. E.; Vivek, A.; Yoshida, Y. (Hrsg.): *Forming the Future*. Springer International Publishing, 2021, S. 2277–2288
- [P8] Jobst, A.; Merklein, M.: Stability of forming induced residual stresses in stainless steel components under mechanical load. *Manufacturing Letters* 35(2023), S. 49–54
- [P9] Jobst, A.; Merklein, M.: Stability of forming induced residual stresses in stainless steel parts at elevated temperature: ICRS 11 - The 11th International Conference of Residual Stresses, 2022

Verzeichnis promotionsbezogener studentischer Arbeiten

- [S1] Keller, Johannes: Konstruktion eines Prüfstands zur schwingenden Belastung fließgepresster Bauteile. Bachelorarbeit (2018), Erlangen
- [S2] Schäfer, Hanna: Halbzeugcharakterisierung in der Kaltmassivumformung. Bachelorarbeit (2018), Erlangen
- [S3] Zimmer, Benedikt: Simulative Untersuchung eigenspannungsrelevanter Einflussgrößen beim Fließpressen. Bachelorarbeit (2018), Erlangen
- [S4] Arslantürk, Ömer: Untersuchungen zur Stabilität umformtechnisch eingebrachter Eigenspannungen bei thermischer Belastung. Bachelorarbeit (2019), Erlangen
- [S5] Nguyen, Thuy Thanh: Ermittlung des Einflusses von Eigenspannungen auf die Schwingfestigkeit fließgepresster Bauteile unter schwellender Biegebelastung. Projektarbeit (2020), Erlangen
- [S6] Laux, Philipp: Bestimmung des Einflusses tribologischer und prozesseitiger Größen auf den Eigenspannungszustand fließgepresster Bauteile. Bachelorarbeit (2020), Erlangen
- [S7] Li, Zhuoyuan: Untersuchung der Abbildungsgenauigkeit numerischer Eigenspannungsberechnungen beim Voll-Vorwärts-Fließpressen. Masterarbeit (2020), Erlangen
- [S8] Keller, Johannes: Untersuchungen zur Stabilität umformtechnisch eingebrachter Eigenspannungen unter zyklischer Biegebelastung. Masterarbeit (2020), Erlangen
- [S9] Binner, Miriam: Untersuchung des Einflusses von Werkstoffvorverfestigung auf die Bauteileigenschaften beim Voll-Vorwärts-Fließpressen. Projektarbeit (2021), Erlangen
- [S10] Zierke, Florian: Untersuchung der Eigenspannungsstabilität in fließgepressten Stahlbauteilen unter thermischer Belastung. Bachelorarbeit (2022), Erlangen

Reihenübersicht

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

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmflk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

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 CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumformung mit elastischer Matrizierung
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-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 CO₂-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 Ehmman

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-Heibel

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 Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn

Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen

LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.

1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth

Laserstrahlhartlöten mit 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 Fokusparsparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage

LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.

1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser

Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung

FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.

ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl

Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion

FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab.

1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto

Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen

LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.

1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl

Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung

FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.

ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf

Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenvickeln

FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.

ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes

Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung

LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab.

1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus

Laserstrahlumformen von Profilen

LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.

1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer

Adaptive Strahlführungen für CO₂-Lasieranlagen

LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.

1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber

Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage

FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.

1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik

LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.

1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke

Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung

LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller

Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen

FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17

Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner

Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung

LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.

1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen

LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.

1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind

Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren

LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab.

1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard

Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen

FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab.

1998. ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh

Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe

FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab.

1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

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

Band 81: Stefan Schuberth

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.
1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab.
1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab.
1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab.
1999. ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.
1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P.

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

Band 94: Hans-Martin Biehler

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

Band 95: Wolfgang Becker

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

Band 96: Philipp Hein

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

Band 97: Gunter Beitinger

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

Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe 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 Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder, 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige

Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder, 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel

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 Negendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - 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 trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Triologie, 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 Prechtl
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.
2006. ISBN 3-87525-238-1.

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

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

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

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für 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 Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schalungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 135 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplattinen
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahl-schweißen 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 wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur 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 verstärkter Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von makromechatronischen 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 Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

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

Band 198: Stephan Roth

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

Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahl-tiefschweißen
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 Dörfel

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innenhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahl-sintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

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

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

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

Band 226: Peter Sebastian Feuer
Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung 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 Laserstrahl-löten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

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

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim 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 Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

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

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

Band 264: Matthias Domke

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

Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärteprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

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

Band 272: Michael Wieland

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

Band 273: René Schramm

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

Band 274: Michael Lechner

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

Band 275: Kolja Andreas

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

Band 276: Marcus Baum

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

Band 277: Thomas Schneider

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

Band 278: Jochen Merhof

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

Band 279: Fabian Zöller

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

Band 280: Christian Hezler

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

Band 281: Jochen Bönig

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

Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer 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 Karosserie-
bau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unterneh-
menscontrollings um die Dimen-
sion Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen
zur Herstellung zyklisch-symmet-
rischer Bauteile mit Nebenform-
elementen durch Blechmassivum-
formung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

**Band 288: Hans Ulrich Vierzig-
mann**
Beitrag zur Untersuchung der tri-
bologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereit-
stellung von tribologischen Mod-
ellversuchen 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 Absiche-
rung der formgebenden Operation
des Nasspressprozesses von Ge-
lege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische
Mindestenergiebedarf als Refe-
renzwert zur Bewertung der Ener-
gieeffizienz in der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen ver-
zinkter Stahlbleche in Kehlnahtge-
ometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

**Band 292: Alexander Kahrma-
nidis**
Thermisch unterstützte Umfor-
mung 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 Sys-
teme zur Montage von Permanent-
magneten und zur Messung mag-
netischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensver-
halten hochfester Leichtbauwerk-
stoffe 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 Hert-
weck**
Zeitliche Pulsformung in der La-
sermikromaterialbearbeitung -
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 En-
ergy-Efficient Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

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

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstel-
lung montageführender Werkerin-
formationssysteme 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 si-
multanem, intensitätsselektivem
Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch un-
terstützten Fertigungskette zur
Herstellung umgeformter Bauteile
aus der härtesten Aluminiumle-
gierung 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, Mode-
ling, Simulation and Optimization
of Molded Interconnect Devices
(MID) Based on Laser Direct
Structuring (LDS) / Experimentelle
Untersuchung, Modellierung, Si-
mulation und Optimierung von
Molded Interconnect Devices
(MID) basierend auf Laser Direkt-
strukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26
Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsver-
fahren für flachleiterbasierte Pkw-
Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vivapc
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 Spinnenbeinprinzip

LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp

Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung

LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz

Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten

FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner

Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung

FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger

Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion

KTMfK, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn

Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)

FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019.

ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann

Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme

FAPS, ix 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 Schwingenschlölgl

Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten

LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti

Evaluation of failure behaviour of sheet metals

LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner

Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess

LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner

Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen

FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter

Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente

FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser

Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation

FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend

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

Band 348: Matthias Ehlert

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

Band 349: Thomas Sander

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

Band 350: Florian Pilz

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

Band 351: Sebastian Josef Katona

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-Modelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der 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 Formspulenwicklungen für automobilen Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

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

Band 356: Hannah Riedle

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

Band 357: Maximilian Landgraf

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

Band 358: Alireza Esfandiyari

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

Band 359: Christian Sand

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

Band 360: Ralf Merk

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 Schäfer

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 fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen

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

Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß

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

Band 374: Martin Hohmann

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

Band 375: Timo Kordaß

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

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

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

Band 378: Michael Schneider

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

Band 379: Tobias Sprügel

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

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

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

Band 383: Mario Meinhardt

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

Band 384: Felix Bauer

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

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

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

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

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

ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

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

ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

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

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

ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

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

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

ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

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

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

ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer

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

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

ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

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

ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

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

ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

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

ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

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

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

ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

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

ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

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

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

ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

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

ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

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

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

ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf
Modellierung und Vorhersage
menschlichen Interaktionsverhal-
tens 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 Kohlen-
stoffschichten 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 konstruktionsbeglei-
tendes Toleranzmanagement
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder,
13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-593-3.

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

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

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

Band 413: Frank Bodendorf
Machine Learning im Cost Engi-
neering 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 Nutzerstigma-
tisierung durch Förderung einer
gleichermaßen gebrauchstaugli-
chen 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 Manu-
facturing Applying Blockchain and
Graphs
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder,
10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-615-2.

**Band 417: Benjamin Lengen-
felder**
Remote photoacoustic sensing us-
ing 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 zwi-
schen dem tribochemischen Auf-
bau 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 Be-
schleunigung von Qualifizierungs-
untersuchungen 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 Kup-
fer auf Aluminiumoxid-Keramik
FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bil-
der, 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 Spec-
troscopy (LIBS) as a diagnostics
tool for biological tissue analysis.
LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12
Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-641-1.

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

Band 424: Thomas Braun
Potenzialanalyse der plasmabasier-
ten, strukturierten Metallisierung
thermoaktiver Oberflächen im in-
dustriellen 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 Werkstoffcha-
rakterisierung für die numerische
Auslegung von Blechumformpro-
zessen
LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13
Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-663-3.

Band 427: Matthias Graser
Analyse lokaler Kurzzeitwärmebe-
handlungsmethoden zur Verbesse-
rung des Umformverhaltens und
der Bauteileigenschaften von Alu-
miniumstrangpresshohlprofilen
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 dünnscher 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 Wiesemayer

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 Rohrmoser

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. 130 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.

Abstract

Cold forging processes such as forward rod extrusion are used as a resource- and energy-efficient manufacturing method for metal components. Inhomogeneous plastic strain distributions, which typically occur during this process, lead to residual stresses remaining in the workpiece, which can cause unfavorable effects and significantly influence the fatigue behavior.

The objective pursued in this thesis is the development of a method for residual stress-sensitive process design. Using a reference process, the generation of residual stresses during forward rod extrusion of the stainless steel X6Cr17 was investigated numerically and experimentally. Based on this, control and disturbance variables for residual stress adjustment were qualified and their effects were quantified. Different relaxation patterns were identified under cyclic mechanical component loading. With regard to thermal loading, a process window was determined within which stable residual stresses are present. Based on this, a model-based relationship between temperature, load duration and residual stress stability was derived.

It was demonstrated that the fatigue strength of extruded components can be influenced by residual stress control during forming. By adapting the die design, it was possible to reduce near-surface tensile residual stresses at low cost and increase the long-term strength.

Kaltmassivumformverfahren wie das Voll-Vorwärts-Fließpressen werden als ressourcen- und energieeffiziente Fertigungsmethode für metallische Bauteile eingesetzt. Inhomogene plastische Dehnungsverteilungen, die dabei typischerweise auftreten, führen jedoch zum Verbleiben von Eigenspannungen im Werkstoff, welche zu unerwünschten Effekten führen und das Ermüdungsverhalten maßgeblich beeinflussen können.

Das in dieser Arbeit verfolgte Ziel ist die Erarbeitung einer Methode zur eigenspannungssensitiven Prozessauslegung. Anhand eines Referenzprozesses wurde die Eigenspannungsentstehung beim Voll-Vorwärts-Fließpressen des rostfreien Stahls X6Cr17 numerisch und experimentell untersucht. Darauf aufbauend wurden Steuer- und Störgrößen zur Eigenspannungseinstellung qualifiziert und deren Auswirkungen quantifiziert. Unter zyklisch-mechanischer Bauteilbelastung wurden verschiedene Relaxationsmuster identifiziert. Hinsichtlich der thermischen Belastung wurde ein Prozessfenster erarbeitet, innerhalb dessen stabile Eigenspannungen vorliegen. Darauf aufbauend wurde ein modellbasierter Zusammenhang zwischen der Temperatur, der Belastungsdauer und der Eigenspannungsstabilität abgeleitet.

Es konnte gezeigt werden, dass eine Beeinflussung der Betriebsfestigkeit fließgepresster Bauteile durch die Eigenspannungssteuerung bei der Umformung möglich ist. Durch eine Anpassung des Matrizendesigns konnten kostengünstig oberflächennahe Zugeigenspannungen reduziert und die Langzeitfestigkeit erhöht werden.

