



FAU Studien aus dem Maschinenbau 442

Martin Killmann

Vorspannung und Ermüdung von
Kaltmassivumformwerkzeugen für
unrunde Bauteilgeometrien

Martin Killmann

Vorspannung und Ermüdung von Kaltmassivumformwerkzeugen für
unrunde Bauteilgeometrien

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 442

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

Martin Killmann

Vorspannung und Ermüdung von Kaltmassivumformwerkzeugen für unrunde Bauteilgeometrien

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: Martin Killmann, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, ([ror https://ror.org/oof7hpc57](https://ror.org/oof7hpc57)), <https://orcid.org/0000-0001-5596-0525>

Bitte zitieren als

Killmann, Martin. 2024. *Vorspannung und Ermüdung von Kaltmassivumformwerkzeugen für unrunde Bauteilgeometrien*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 442. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-742-5

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

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über 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: 978-3-96147-741-8 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-742-5 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-742-5

**Vorspannung und Ermüdung von
Kaltmassivumformwerkzeugen für unrunde
Bauteilgeometrien**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Martin Killmann, M.Sc.

aus Erlangen

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

Tag der mündlichen
Prüfung: 17.01.2024

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Prof. Dr.-Ing. Sebastian Härtel, BTU Cottbus

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein, Ordinaria des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie, für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit, das entgegengebrachte Vertrauen und die zahlreichen gebotenen Entwicklungsmöglichkeiten.

Darüber hinaus möchte ich Prof. Dr.-Ing. Sebastian Härtel für die Übernahme des Fachgutachtens danken. Prof. Dr. habil. Dirk Schubert und Prof. Dr.-Ing. habil. Hinnerk Hagenah danke ich für die Übernahme des fachfremden Gutachtens und des Prüfungsvorsitzes.

Großer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie für die angenehme und produktive Zusammenarbeit. Insbesondere möchte ich mich bei Alina Biallas, Christoph Kiener, David Römisch, Dimitrios Lampropoulos, Florian Pilz, Franz He, Manfred Vogel, Manuel Reck, Nikolaos Rigas und Simon Wituschek bedanken. Hervorheben möchte ich zudem Dr.-Ing. Johannes Henneberg für die zahlreichen technischen Diskussionen und die enorm wertvolle Unterstützung sowie Andreas Rohrmoser für die vertrauensvolle Zusammenarbeit besonders in der Endphase unserer Dissertationen.

Ebenso möchte ich allen Mitarbeitenden aus dem Sekretariat, der Buchhaltung, der Systemadministration und dem technischen Bereich danken. Zudem bedanke ich mich bei allen Studierenden und wissenschaftlichen Hilfskräften, mit denen ich im Rahmen meiner Tätigkeit zusammenarbeiten durfte. Hervorzuheben sind dabei Alexander Kanygin, Marion Vogel und Thomas Dengel.

Weiterhin gilt mein Dank meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, meiner Schwester und meiner Patentante, meinen Freunden und meiner Partnerin für die große Unterstützung auf meinem bisherigen Lebensweg. Zuletzt möchte ich mich bei meinen Großvätern bedanken, die mir stets als Vorbilder sowohl in der Wissenschaft als auch dem Ingenieurwesen gedient haben.

Sonderburg, im April 2024

Martin Killmann

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik und Forschung	3
2.1 Kaltmassivumformung unrunder Bauteilgeometrien	3
2.1.1 Bauteile und Verfahren	3
2.1.2 Werkzeugbeanspruchung	7
2.2 Lebensdauer von Kaltmassivumformwerkzeugen	8
2.2.1 Versagensursachen	8
2.2.2 Werkzeugauslegung	9
2.3 Maßnahmen zur Erweiterung der Lebensdauer	10
2.3.1 Beeinflussung der Beanspruchbarkeit	11
2.3.2 Beeinflussung der Beanspruchungen	14
2.4 Zusammenfassende Bewertung	20
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	25
4 Angewendete Werkstoffe, Anlagen, Messmethoden und Software	27
4.1 Werkstoffe	27
4.1.1 Werkstoffe für Umformversuche	27
4.1.2 Werkstoffe für Ermüdungsversuche	29
4.2 Schmierstoffsystem	33
4.3 Anlagen	34
4.4 Verfahren zur Analyse der Bauteil- und Werkzeugeigenschaften	35
4.5 Simulationssoftware Simufact.Forming	36
5 Analyse der Werkzeugbelastung bei der Umformung nicht-rotationssymmetrischer Bauteilgeometrien	39
5.1 Prozesskonzept	39
5.2 Aufbau und Validierung des Simulationsmodells	41
5.3 Analyse des Beanspruchungszustands der Matrize	47
5.4 Analyse der Armierungswirkung	52
5.5 Ableiten von werkzeugtechnischen Herausforderungen bei der Umformung unrunder Bauteilgeometrien	57

6	Aufbau eines Modellversuchs zur experimentellen Erforschung des Ermüdungsverhaltens von Kaltmassivumformwerkzeugen	61
6.1	Versuchsprinzip	62
6.2	Numerische Abbildung	63
6.3	Einfluss von Elastomerverschleiß	65
6.4	Ermüdungsverhalten im Modellversuch	69
6.5	Bewertung der Eignung des Modellversuchs zur Analyse des Ermüdungsverhaltens von Kaltmassivumformwerkzeugen	72
7	Untersuchung lokaler Vorspannungen durch Aussparungen im Armierungsverbund	75
7.1	Durchgängige Aussparung	75
7.1.1	Wirkungsweise	75
7.1.2	Numerische Parameteranalyse	81
7.1.3	Analyse des Ermüdungsverhaltens	89
7.2	Abgesetzte Aussparung	91
7.2.1	Wirkungsweise	91
7.2.2	Numerische Parameteranalyse	94
7.2.3	Analyse des Ermüdungsverhaltens	97
7.3	Bewertung der Eignung von Aussparungen zur lokalen Vorspannung und Erhöhung der Werkzeuglebensdauer	99
8	Untersuchung lokaler Vorspannungen durch das Einpressen von Spannstiften	105
8.1	Spannstifte mit Armierung	105
8.1.1	Wirkungsweise	106
8.1.2	Numerische Parameteranalyse	113
8.1.3	Analyse des Ermüdungsverhaltens	119
8.2	Spannstifte ohne Armierung	121
8.2.1	Wirkungsweise	121
8.2.2	Numerische Parameteranalyse	124
8.2.3	Analyse des Ermüdungsverhaltens	129
8.3	Bewertung der Eignung von Spannstiften zur lokalen Vorspannung und Erhöhung der Werkzeuglebensdauer	130
9	Zusammenfassung und Ausblick	135
10	Summary and outlook	139
	Literaturverzeichnis	143

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
a	mm	Maximaler Aussparungsabstand
a _o	mm	Ausgangsstempelposition
a _v	mm	Stempelposition mit Elastomerverschleiß
a _z	mm	Horizontaler Abstand vom Beginn der Aussparung zum Zugspannungsbereich
b	mm	Aussparungsabstand am Beginn des Übergangs
c _s	mm	Spannstiftabstand zum Ort der maximalen Zugbeanspruchung
d _s	mm	Spannstiftdurchmesser
f	Hz	Frequenz
h _o	mm	Ausgangshöhe
h _a	mm	Absatzhöhe in abgesetzten Aussparungen
h _o	mm	Höhe des oberen Napfes im DCE-Test
h _u	mm	Höhe des unteren Napfes im DCE-Test
m	-	Reibfaktor
n	-	Anzahl Wiederholversuche
n _A	-	Anzahl der Aussparungen
n _f	-	Anzahl der Funktionselemente
n _{Funktionselemente,Außen}	μm	Punktabstand bei Härtemessung an den Funktionselementen
n _{Funktionselemente,Mitte}	μm	Punktabstand bei Härtemessung in der Mitte der Geometrie mit Funktionselementen
n _{Oval}	μm	Punktabstand bei Härtemessung der ovalen Geometrie
p	MPa	Druck
p _I	MPa	Innendruck
q	-	Napfhöhenverhältnis
r _B	mm	Radius der Matrizenbohrung
A	mm ²	Fläche

A_p	mm^2	Fläche, auf die der Armierungsdruck wirkt
E	MPa	Elastizitätsmodul
F	kN	Kraft
F_o	kN	Ausgangskraft
F_V	kN	Kraft mit Elastomerverschleiß
K	MPa	Kompressionsmodul
V_o	mm^3	Ausgangsvolumen
V_V	mm^3	Volumen mit Elastomerverschleiß
α	$^\circ$	Aussparungswinkel
α_{ges}	$^\circ$	Gesamtwinkel aller Aussparungen in einer Matrize
β	$^\circ$	Winkel vom Aussparungsübergang zum Beginn des Armierungskontakts
γ	$^\circ$	Winkel vom Beginn des Armierungskontakts zum vollen Haftmaß
Δh	mm	Höhenänderung
ΔV	mm^3	Volumenänderung
ε	-	Dehnung
ν	-	Poissonzahl
ξ	$\%$	Relatives Matrizenhaftmaß
ξ_S	$\%$	Relatives Spannstifthaftmaß
σ	MPa	Spannung
$\sigma_{H, \text{max}}$	MPa	Maximale Hauptspannung
σ_r	MPa	Radialspannung
σ_t	MPa	Tangentialspannung
$\sigma_{t,B}$	MPa	Tangentialspannung an der Spannstiftbohrung
$\sigma_{t,Z}$	MPa	Tangentialspannung im Zugspannungsbereich
τ_{max}	MPa	Maximale Schubspannung
Φ	-	Umformgrad
A/S	-	Aktieselskab, Dänisch für Aktiengesellschaft

AG	-	Aktiengesellschaft
AISI	-	American Iron and Steel Institute
C	-	Kohlenstoff
CO ₂	-	Kohlenstoffdioxid
Cr	-	Chrom
Cu	-	Kupfer
D	-	Druckspannungsbereich
DCE	-	Double Cup Extrusion
DIN	-	Deutsches Institut für Normung
EN	-	Europäische Norm
FE	-	Funktionselemente
FEM	-	Finite Elemente Methode
GmbH	-	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
ICFG	-	International Cold Forging Group
IPCC	-	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	-	Internationale Organisation für Normung
IT	-	ISO-Toleranz
JIS	-	Japan Industrial Standard
Mn	-	Mangan
Mo	-	Molybdän
MoS ₂	-	Molybdändisulfid
P	-	Phosphor
PID	-	Proportional, Integral, Differential
PM	-	Pulvermetallurgisch
S	-	Schwefel
Si	-	Silizium
UT	-	Unterer Totpunkt
V	-	Vanadium
W	-	Wolfram
Z	-	Zugspannungsbereich

1 Einleitung

Laut dem Bericht des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) beträgt die globale Erwärmung 2023 im Vergleich zum vorindustriellen Zustand $1,1\text{ °C}$ [1]. Zur Bekämpfung des menschengemachten Klimawandels strebt die Europäische Union daher bis 2050 Netto-Treibhausgasemissionen von Null an [2]. Die hierfür notwendige Elektrifizierung bedingt Prognosen zufolge einen deutlich höheren Strombedarf [3]. Um diesen durch erneuerbare Energien zu decken, ist die Einsparung von Energie entscheidend [4]. Im Jahr 2021 entstand etwa ein Viertel des Energieverbrauchs der Industrie aus der Metallerzeugung und -bearbeitung [5]. Eine energieeinsparende und ressourcenschonende Produktion metallischer Bauteile ist damit entscheidend für den Wandel zu einer klimaneutralen Gesellschaft.

Hierfür bietet die Fertigungstechnologie der Massivumformung hohes Potential. Bei dieser werden Bauteile durch plastische Deformation hergestellt, wodurch eine sehr gute Materialausnutzung erreicht wird [6]. Dies ist zum Beispiel daran ersichtlich, dass bei der Fertigung eines Magnetventilankers durch Umformung 46 % weniger Rohmaterial im Vergleich zur zerspanenden Herstellung benötigt wird [7]. Da die Herstellung der Rohmaterialien sehr energieintensiv ist, ist der Energieverbrauch pro Tonne produzierter Bauteile in der Massivumformung mit 3400 kWh bis 7000 kWh [8] im Vergleich zur spanenden Fertigung mit 8400 kWh bis 11400 kWh [9] deutlich geringer. Weiterhin führt die umformende Fertigung durch einen ungebrochenen Faserverlauf zu guten mechanischen Eigenschaften, weshalb diese Produktionsklasse das beste Verhältnis aus Belastbarkeit und Energieeinsatz bietet [8].

In der Warmmassivumformung wird circa ein Drittel des Energieeinsatzes für die Erwärmung der Rohlinge vor der Umformung verwendet [8]. Sofern diese Erwärmung im Ofen erfolgt, entstehen hierdurch direkte CO_2 Emissionen. Eine Umformung von Werkstoffen bei Raumtemperatur hat damit hohes Potential zu einer weiteren Reduktion des Energieverbrauchs und der Emissionen. Weiterhin ist im Vergleich zur Warmumformung weniger Nachbearbeitung der Bauteile notwendig, da ohne Verzunderung und Wärmeverzug bessere Oberflächen und maßhaltigere Geometrien erzeugt werden [6]. Anhand der Herstellung einer Rotorwelle wurde gezeigt, dass die CO_2 Emissionen pro Bauteil bei Einsatz der Kaltmassivumformung mit 0,62 kg deutlich niedriger sind als bei Warmumformung mit 2,58 kg oder Zerspanung mit 2,61 kg [10]. Allerdings betragen die Werkzeugkosten für

die Kaltumformung etwa 30000€ [10]. Dies zeigt sowohl das Potential der Kaltmassivumformung als ressourcenschonendes Fertigungsverfahren, als auch die Bedeutung der Werkzeuge für dessen wirtschaftlichen Einsatz.

Kaltmassivumformwerkzeuge sind durch die zur Umformung bei Raumtemperatur notwendigen hohen Kräfte stark belastet. Daher wird das Produktionsverfahren konventionell für einfache, rotationssymmetrische Bauteile wie Bolzen [11] oder Achsen [12] eingesetzt. Aktuell besteht jedoch eine Nachfrage nach anspruchsvolleren Produktgeometrien, da zur Erschließung von Leichtbaupotentialen häufig mehrere Funktionen von demselben Bauteil erfüllt werden müssen [13]. Aus diesem Grund gibt es vermehrt Untersuchungen zum Einsatz der Kaltmassivumformung für komplizierte Geometrien wie zum Beispiel außenverzahnte Bauteile mit gleichzeitig unrunder Innenkontur [14]. Eine wesentliche Herausforderung hierbei sind hohe lokal konzentrierte Werkzeugbelastungen, die Werkzeugausfall durch Ermüdung verursachen [13]. Dies führt nicht nur zu erhöhten Werkzeugkosten, sondern auch zu ungeplanten Anlagenstillständen, welche die Effizienz der Prozesse beeinträchtigen [15]. Die Werkzeuglebensdauer ist daher entscheidend für die Etablierung von ressourcenschonenden Kaltumformprozessen für zunehmend anspruchsvollere Bauteilgeometrien. Eine weit verbreitete Maßnahme zur Verlängerung der Werkzeuglebensdauer ist eine Vorspannung durch Armierungen. Diese werden von außen auf die formgebenden Matrizen aufgeschumpft [16]. Bestehendes Wissen und Auslegungsrichtlinien zu Armierungen basiert allerdings auf konventionellen, rotationssymmetrischen Geometrien [16].

In der vorliegenden Arbeit werden der Beanspruchungszustand sowie die Lebensdauer von Umformwerkzeugen für unrunde Geometrien in Abhängigkeit der Vorspannung untersucht. Zuerst wird ein grundlegendes Verständnis zur Beanspruchung der Werkzeuge bei der Umformung nicht-rotationssymmetrischer Bauteile erarbeitet. Hierfür werden Werkzeugbelastungssimulationen anhand von zwei Bauteilgeometrien durchgeführt. Um den Einfluss der Spannungen auf das Ermüdungsversagen zu analysieren, wird ein Modellversuch ausgelegt, mit dem im Labormaßstab Untersuchungen zur Ermüdung bei Einsatz unterschiedlicher Werkzeugkonzepte möglich sind. Die numerischen Modelle und der Ermüdungsversuch werden anschließend genutzt, um speziell angepasste Vorspannungssysteme für unrunde Geometrien zu erforschen. Hierdurch werden neue Möglichkeiten für die beanspruchungsgerechte Werkzeugauslegung bei der Umformung unrunder Bauteilgeometrien geschaffen und ein Beitrag zur Erweiterung des Bauteilspektrums der Kaltmassivumformung geleistet.

2 Stand der Technik und Forschung

Die Kaltmassivumformung ermöglicht die wirtschaftliche Massenfertigung von Near-Net-Shape Bauteilen, die durch Kaltverfestigung und einen vorteilhaften Faserverlauf gute mechanische Eigenschaften aufweisen [17]. Um der Forderung nach einer Produktion von Bauteilen in Leichtbauweise zu begegnen, ist eine Erweiterung auf neue, anspruchsvollere Bauteilgeometrien notwendig. Daher wird im Stand der Technik und Forschung auf die Kaltumformung nicht-rotationssymmetrischer Bauteilgeometrien eingegangen. Eine wesentliche Herausforderung ist hierbei die Werkzeuglebensdauer, welche entscheidend für den wirtschaftlichen Einsatz der Prozesse ist. Neben Grundlagen zur Lebensdauer und Versagensmechanismen sowie Methoden zur Werkzeugauslegung werden demnach Möglichkeiten zur Erweiterung der Lebensdauer aufgezeigt. Abschließend wird der aktuelle Stand der Forschung bewertet und neuer Forschungsbedarf abgeleitet.

2.1 Kaltmassivumformung unrunder Bauteilgeometrien

Die Kaltmassivumformung wird konventionell für die Fertigung rotations-symmetrischer Bauteile [18] wie Bolzen [11] oder Achsen [12] eingesetzt. Durch Fortschritte in den Bereichen Materialien, Beschichtungen und Prozessführung ist heutzutage auch die Herstellung unrunder Bauteilgeometrien mit Verfahren der Kaltmassivumformung möglich [19]. Durch den Trend zu erhöhter Funktionsintegration im Sinne des Leichtbaus [13] besteht hoher Bedarf an nicht-rotationssymmetrischen, geometrisch komplizierten Bauteilgeometrien [20]. Der folgende Abschnitt gibt daher einen Überblick über aktuelle Forschungsschwerpunkte im Bereich der Kaltmassivumformung unrunder Bauteile sowie der dabei entstehenden Werkzeugbeanspruchungen.

2.1.1 Bauteile und Verfahren

Die Umformung unrunder Bauteilgeometrien umfasst die Herstellung komplexer Leichtbauteile mit minimalem Eigengewicht [21] wie zum Beispiel nicht kreisförmige Geometrien mit Funktionselementen [22]. Diese sind häufig zyklisch symmetrisch ausgeführt und beinhalten insbesondere

Verzahnungen [23], Verbindungselemente [24], Gelenke [25] sowie Bauteile der Blechmassivumformung [26]. Im Folgenden werden Forschungen zur Kaltumformung dieser Bauteilgruppen dargelegt.

Verzahnungen

Ein aktuell untersuchtes Verfahren zur Herstellung von Zahnrädern ist das „Samanta“-Verfahren, in dem Zahnräder durch Vollvorwärtsfließpressen ohne den Einsatz eines Auswerfers umgeformt werden [27]. Hierbei stehen angepasste Werkzeugkonzepte zur Verbesserung der Bauteilumformung und Verringerung der Werkzeugbeanspruchungen im Fokus [28]. Neben angepassten Einlaufradien [28] wird ein Werkzeugkonzept mit einem Hinterschnitt zur Minimierung des Kontakts zwischen Werkstück und Werkzeug untersucht [27]. Dies ermöglicht einen längeren Stempelweg bei gleichbleibenden Reibflächen. Zudem nehmen die Stempelkraft sowie die erzeugten Kontakt- und Zugspannungen um etwa ein Drittel ab.

Auch die Umformung von Kegelrädern ist Gegenstand aktueller Forschungen. Zum Beispiel werden Taumelprozesse zur Verringerung der benötigten Kräfte in Bezug auf die Vorform [29] und die prozessbedingten Unterschiede zum Warm Schmieden [30] untersucht. Auch für die Produktion von Kegelrädern mit Kreuz-Innenkontur werden Taumelverfahren mit dem Fokus auf Prozessführung sowie geometrischer Genauigkeit erforscht [31]. In einer Untersuchung von JIN ET AL. zum Vollvorwärtsfließpressen von Kegelrädern wird das Bruchversagen der verwendeten Werkzeuge analysiert [32]. Hierfür werden die Werkzeugbelastungen simulativ ermittelt und durch Anpassungen der Werkzeuggeometrie verringert.

Neben klassischen gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern sowie Kegelrädern werden auch anspruchsvollere Bauteile mit Verzahnungen durch Kaltmassivumformung hergestellt. Zum Beispiel untersuchten KANG ET AL. die Herstellung eines Hülsenockens [33], was einem verzahnten Bauteil mit unrunder Innengeometrie entspricht. Hierbei wird insbesondere die elastische Auffederung der Matrize und deren Auswirkung auf die Bauteilgeometrie analysiert. Durch die Berücksichtigung der Werkzeugdeformation konnte die Verzahnung mit einer Toleranzklasse von JIS 6 hergestellt werden. KU ET AL. untersuchten die Herstellung einer verzahnten Antriebswelle mit hexagonaler Innenkontur mit Hinblick auf die numerische Abbildung der erforderlichen Kräfte [14]. Anhand der Simulationen wurde ein Werkzeug- und Pressenkonzept ausgewählt und Bauteile erfolgreich hergestellt. Die Herstellung einer weiteren Antriebswelle mit nicht-kreisförmigen Profil durch einen sechsstufigen Kaltumformprozess wurde

von JO ET AL. untersucht [7]. Hauptbestandteil der Untersuchung ist der Vergleich der mechanischen Eigenschaften mit konventionell spanend hergestellten Wellen. Hierbei wurde mit einer um 50 % höheren Zugfestigkeit sowie einem um 100 Nm höheren Drehmoment eine deutliche Verbesserung durch die Umformung festgestellt. Weiterhin wurde von JAFARZADEH ET AL. die Herstellung eines zahnradähnlichen Bauteils, einer Nabe mit zwei Zähnen, untersucht [23]. Es wurde identifiziert, dass die benötigte Umformkraft mit dem Halbzeugdiameter sowie der Halbzeughöhe und dem Reibfaktor steigt. Dies ist unter anderem auf eine bessere Füllung der Kavitäten für die Verzahnungen zurückzuführen, welche eine höhere benötigte Kraft und höhere Werkzeugbeanspruchungen verursacht. Bei der Umformung einer Verzahnung für eine Welle-Nabe-Verbindung wurde die Integration mehrerer Umformstufen in einer Matrize analysiert [34]. Durch eine Anpassung der Matrizegeometrie im oberen Bereich wurde ein verbesserter Stofffluss und eine verringerte Umformkraft erreicht.

Verbindungselemente

Ein wesentliches Einsatzfeld der Kaltmassivumformung ist die Herstellung von Verbindungselementen [35]. Zum Beispiel wird die mehrstufige Umformung von Schweißflanscmuttern untersucht [36]. Hierbei wurden durch numerische Untersuchungen kritische Werkzeugbereiche identifiziert und durch Anpassung einer Vorstufe die Umformkraft um 30 % reduziert. Dies führte zu einer Standmengensteigerung der Werkzeuge von über 200 %. Weiterhin untersuchten HSIA ET AL. einen sechsstufigen Umformprozess zur Herstellung hohler Sechskantschrauben [24]. In diesem Prozess führen Spannungskonzentrationen am Stempel zu erhöhtem Verschleiß. Durch eine Änderung der Stempelgeometrie in der dritten Stufe wurde die Umformkraft um 20 % gesenkt. Die Herstellung eines asymmetrischen Verbindungselements ist durch sogenanntes „Split-Forging“ möglich [37]. Ein Stempel dringt in die Werkstückoberfläche ein und teilt das Material dort in zwei Bereiche auf. Im Prozess wird eine Reduktion der Umformkraft zur Verbesserung der Bauteilgenauigkeit und der Erhöhung der Werkzeuglebensdauer gefordert [37]. Hierfür wurden verschiedene Stempelgeometrien untersucht, wobei sich flache Stempel wegen verbesserter tribologischer Bedingungen als vorteilhaft herausstellten. Weiterhin führten zugeschnittene Vorformen zu einer reduzierten Umformkraft.

Gelenke

Neben Verzahnungen und Verbindungselementen wird die Herstellung von Gelenken durch Kaltmassivumformung erforscht. Zum Beispiel wurde zur Umformung der Innenlaufbahn eines Gleichlaufgelenks ein Werkzeugkonzept mit längsgeteilter Matrize untersucht [25]. Trotz der Segmentierung der Werkzeuge trat bereits nach 15 produzierten Bauteilen Bruchversagen an der Matrize auf. Durch Erhöhen eines Radius und Einbringen einer Fase wurden die Beanspruchungen verringert und das Bruchversagen im Rahmen der Untersuchungen verhindert. Neben der Innenbahn wird auch die umformtechnische Herstellung der Außenbahn von Gleichlaufgelenken erforscht [38]. Der Fokus liegt zunächst auf der Umsetzbarkeit des Prozesses als Kaltumformung im Vergleich zur konventionellen Warmumformung. Die Werkzeugauslegung erfolgt mithilfe der Analyse der Vergleichsspannung an lokalen Werkzeugelementen. Da die Belastungen die statische Festigkeit nicht überschreiten, wurden erfolgreich Bauteile hergestellt. Eine Aussage über die Dauerfestigkeit der Werkzeuge ist aus den Untersuchungen nicht möglich. Ein weiteres durch Kaltmassivumformung hergestelltes Gelenk ist das Kreuzgelenk. In der Untersuchung eines Gesenkschmiedeprozesses wurde numerisch der Einfluss der Bauteilorientierung sowie von Winkelradien auf die Werkzeugbelastung analysiert [39]. Eine Erhöhung der Radien bis zu einem gewissen Punkt sowie eine vorteilhafte Bauteilorientierung wirken sich positiv auf die Beanspruchungen und die Werkzeuglebensdauer aus.

Blechmassivumformung

Anspruchsvolle Bauteilgeometrien mit Nebenformelementen werden auch in der neuartigen Prozessklasse der Blechmassivumformung hergestellt. Diese ist als die Anwendung von Massivumformoperationen auf Blechhalbzeuge definiert [26]. Hierbei werden Nebenformelemente an Blechgeometrien erzeugt [40], welche von der Rotationssymmetrie abweichen. Die hergestellten Bauteile werden häufig im Antriebsstrang eingesetzt und umfassen zum Beispiel Synchronringe [41] oder Duplexzahnräder [42]. Herausforderungen in der Prozessklasse liegen in einer unzureichenden Formfüllung sowie in hohen lokalen [43] und asymmetrischen [44] Werkzeugbeanspruchungen. Aktuelle Forschungen konzentrieren sich daher auf eine Erweiterung der Formgebungsgrenzen, zum Beispiel durch den Einsatz von maßgeschneiderten Oberflächen [45], sowie deren Auswirkung auf die Werkzeugbeanspruchung [46].

2.1.2 Werkzeugbeanspruchung

Wie im vorherigen Abschnitt dargelegt wurde, konzentriert sich die Forschung im Bereich der Kaltmassivumformung unrunder Bauteilgeometrien auf die Bauteilgenauigkeit, den Kraftbedarf sowie die Werkzeugbeanspruchungen. Letzteren kommt eine hohe Bedeutung zu, da bei Werkzeugausfall hohe Kosten nicht nur durch die Herstellung neuer Werkzeuge, sondern auch als sekundäre Kosten durch Maschinenstillstände entstehen [15]. Daher wird im Folgenden auf Grundlagen der Werkzeugbeanspruchung in der Kaltmassivumformung eingegangen und Herausforderungen durch unrunder Bauteilgeometrien aufgezeigt.

Werkzeuge der Massivumformung gehören zu den höchstbelasteten technischen Bauteilen [47]. Die Last ist nach ENGEL in äußere und innere Beanspruchungen zu unterteilen [48]. Die äußere Beanspruchung wird dabei durch die im Umformprozess auftretende mechanische und thermische Belastung sowie die Reibung bestimmt. Mechanische Beanspruchungen mit hohen Kontaktdrücken von bis zu über 3000 MPa sind charakteristisch [48]. Die thermische Belastung ist bei der Kaltumformung mit einer Werkzeuggrundtemperatur von etwa 80-120°C [6] dagegen vergleichsweise gering. Einflussgrößen auf den Stofffluss und damit die äußeren Belastungen sind Geometrie und Materialien der Werkzeuge und Werkstücke sowie die Eigenschaften der Wirkfuge, welche die Reibung bestimmen. Die innere Beanspruchung ergibt sich als Reaktion des Werkzeugs auf die äußere Beanspruchung [48]. Sie äußert sich als elastische Deformation der Werkzeuge mit einer inhomogenen Spannungsverteilung in Abhängigkeit der Werkzeuggeometrie. Meist tritt durch die elastische Aufweitung eine Kombination aus radialen Druck- und tangentialen Zugspannungen auf [49]. Bei Querschnittsübergängen liegen zudem axiale Spannungskomponenten vor [49]. Werkzeuge der Kaltmassivumformung sind damit durch einen anspruchsvollen, mehrachsigen und zyklisch auftretenden Spannungszustand gekennzeichnet.

Die ohnehin hohen Werkzeugbelastungen sind für unrunder Bauteilgeometrien meist noch kritischer und stellen daher eine Herausforderung für die maßhaltige und wirtschaftliche Fertigung dar [13]. Dies liegt daran, dass die Umformung von Bauteilen mit Funktions- und Nebenformelementen mit einem komplexen Materialfluss einhergeht [20]. Kleine Übergangsradien sowie niedrige und schmale Kavitäten behindern den Stofffluss und bedingen eine erhöhte Umformkraft [23], da die Stoffflussrichtung lokal stark umgelenkt wird [24]. Aus den erhöhten Kräften entstehen große Kontaktspannungen mit Auswirkungen auf die Werkzeuglebensdauer [50] und

Bauteilgenauigkeit [51]. Weiterhin begünstigen die nicht-kreissymmetrischen Querschnitte eine inhomogene Spannungsverteilung [52]. Im Vergleich zu rotationssymmetrischen Werkzeugen, welche einen gleichmäßigen Spannungszustand am Querschnitt gekennzeichnet sind, entstehen versagenskritische lokale Spannungsspitzen.

2.2 Lebensdauer von Kaltmassivumformwerkzeugen

Die Werkzeuglebensdauer spielt in der Kaltmassivumformung eine große Rolle bei der Senkung der Produktionskosten [53]. Werkzeugkosten machen in der Herstellung zwischen 5 % und 15 % der Gesamtkosten aus [18]. Werden geometrisch anspruchsvolle Werkzeuge zur Net-Shape-Fertigung genutzt, erhöht sich dieser Anteil auf bis zu 30 % [15]. Die Tendenz dieses Kostenanteils ist steigend, da immer höhere Anforderungen an Werkzeuge und Produkte gestellt werden [48]. Durch den Rohstoff- und Energieaufwand bei der Fertigung neuer Werkzeuge tritt bei Werkzeugausfall auch eine erhöhte ökologische Belastung auf. Weiterhin entstehen bei Wiederaufnahme der Produktion nach Anlagenstillständen instationäre Bedingungen hinsichtlich Temperatur und Reibung [54]. Dies führt zu einer Produktion von Ausschuss in der Anlaufphase, was sowohl aus ökologischen als auch ökonomischen Gesichtspunkten nachteilig ist.

Nach ENGEL kann die Werkzeuglebensdauer auf verschiedene Arten definiert werden [48]. Sie ist eine stochastische Größe, welche durch Verschleiß, Bruch/Ermüdung und plastische Verformung bestimmt wird [48]. Weiterhin beschreibt die Werkzeuglebensdauer denjenigen Zeitraum, in dem die Beanspruchbarkeit des Werkzeugs größer ist als seine Beanspruchung [48]. Sie ist zudem definiert als diejenige Stückzahl, die unter Gewährleistung der geforderten Produktqualität mit einem Werkzeug erreicht wird [48]. Im Folgenden werden die lebensdauerbegrenzenden Versagensursachen dargelegt sowie bestehende Strategien zur beanspruchungsgerechten Werkzeugauslegung erläutert.

2.2.1 Versagensursachen

Gängige Versagensursachen in der Kaltmassivumformung sind Verschleiß, Gewalt- oder Ermüdungsbruch und plastische Verformung [48]. Verschleiß ist definiert als fortschreitender Materialverlust aus der Oberfläche eines Körpers durch tribologische Beanspruchungen [55]. Er entsteht in Bereichen hoher Kontaktdrücke und Gleitgeschwindigkeiten [56] und bestimmt die Lebensdauer, wenn infolge einer Geometrieänderung durch

Verschleiß die Toleranzen der zu fertigenden Bauteile nicht mehr eingehalten werden [48]. Gewaltbruch tritt bereits nach wenigen Zyklen durch eine Überbeanspruchung auf und kann bei korrekter Werkzeugauslegung vermieden werden [48]. Ermüdungsbruch entsteht hingegen durch Rissbildung nach hohen zyklischen Belastungen [57]. Bei einfachen Werkzeuggeometrien ist die häufigste Versagensursache Verschleiß [6]. Bei geometrisch komplizierten Werkzeugen nimmt er hingegen eine untergeordnete Rolle gegenüber der Ermüdung ein [49]. Bei derartigen Geometrien fallen nahezu sämtliche Fließpresswerkzeuge durch Ermüdung aus [58]. Daher steht diese Versagensform im Fokus der vorliegenden Arbeit.

Ermüdung entsteht bei hoher zyklischer Belastung und einem Anriss des Werkzeugs [57]. Es ist ein Schädigungsprozess, der sich in jedem Zyklus fortsetzt und zu irreversiblen Materialveränderungen führt [48]. Entscheidend für das Ermüdungsverhalten sind Amplitude und Mittelspannung der Lastzyklen [59]. Nach JAECKELS ist die Ermüdung in fünf Phasen unterteilt: Zyklische Verfestigung und Entfestigung, Bildung von Mikrorissen, Entstehung von Makrorissen, Wachstum von Makrorissen und Versagen durch instabile Rissausbreitung und Restbruch [60]. Ausgangspunkt der Ermüdungsrisse ist bei Umformwerkzeugen meist die Werkzeugoberfläche, da hier die größten mechanischen Wechselbeanspruchungen wirken [48] und oftmals bereits Defekte durch die Herstellung vorhanden sind [61]. Die Makrorisse breiten sich senkrecht zur größten Zugspannung und damit in der Regel senkrecht zur Bauteiloberfläche aus [62], bis es zum Restbruch kommt.

2.2.2 Werkzeugauslegung

Die Werkzeuglebensdauer wird über empirische, deterministische, stochastische und wissensbasierte Ansätze vorhergesagt [48]. Nach dem empirischen Ansatz wird die Auslegung auf Basis des Erfahrungswissens des Konstrukteurs durchgeführt [48]. Dieser Ansatz ist in der Praxis weit verbreitet, jedoch immer nur innerhalb einzelner Unternehmen verfügbar und damit nicht universell anwendbar. Der deterministische Ansatz basiert auf der Annahme, dass Ermüdungsversagen eine Folge von Prozessparametern wie den auftretenden Lasten und der Werkzeuggeometrie ist und anhand analytischer Verfahren berechenbar ist [48]. Hierbei kommt der numerischen Auslegung mit der Finiten Elemente Methode (FEM) eine hohe Bedeutung zu [63]. Die Berechnungskonzepte werden anhand von spannungs-, dehnungs- und energiebasierten Schädigungsmodellen angewen-

det [49]. Spannungs- und dehnungsbasierte Modelle sind für eine einachsige Belastung ausgelegt und damit für Kaltmassivumformwerkzeuge nur bedingt anwendbar [49]. Im von HÄNSEL [61] entwickelten energiebasierten Schädigungsmodell gibt es Entwicklungen in Form der Berücksichtigung eines Mittelspannungskorrekturfaktors [49] sowie des Werkzeugvolumens [64]. Im Rahmen des stochastischen Auslegungsansatzes werden die deterministischen Modelle zudem um den Einfluss von Parameterschwankungen in den Eingangsgrößen erweitert [65]. Die wissenschaftliche Lebensdauervorhersage hat das Ziel, Daten aus deterministischen Modellen unabhängig vom konkreten Prozess zur Verfügung zu stellen und eine übertragbare Wissensbasis zu schaffen [49].

Eine Herausforderung bei der Umsetzung des deterministischen und stochastischen Ansatzes ist, dass hierfür materialspezifische Parameter benötigt werden, welche häufig nicht bekannt sind [66]. Es ist daher von hoher Bedeutung, Werkstoffe von Kaltmassivumformwerkzeugen in Bezug auf Ermüdungsversagen zu charakterisieren. Herausfordernd ist dabei, dass Ermüdungsversagen vom mehrachsigen Beanspruchungszustand abhängt und kein reiner Materialkennwert ist [67]. Aktuell wird der mehrachsige Spannungszustand meist zu einem unter einachsiger Beanspruchung ermittelten Vergleichswert vereinfacht [68]. Im Rahmen der Umformtechnik häufig eingesetzte Modellversuche beinhalten den einachsigen Zug-/Druck-Versuch [69], den Vierpunkt-Biegeversuch [70] sowie den Umlaufbiegeversuch [71]. Um den mehrachsigen Beanspruchungszustand der Kaltmassivumformung zu berücksichtigen, entwickelte MEIDERT einen Ermüdungsversuch, in dem eine hohle Probe unter konstantem Innendruck mit einer axial wechselnden Kraft beansprucht wird [49]. Der maximal erreichbare Innendruck ist in diesen Untersuchungen durch das Dichtungssystem auf 300 MPa begrenzt. Im Gegensatz dazu liegen in der Umformtechnik zyklisch auftretende Innendrucke im Bereich mehrerer 1000 MPa vor [48]. Weitere mehrachsige Versuche zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens, welche außerhalb der Umformtechnik eingesetzt werden, basieren auf einer Überlagerung von Torsions- und Axialbelastung [72] oder Torsions- und Biegebelastung [73]. Sie bilden damit ebenso nicht die zyklisch aufgetragenen hohen Innendrucke der Kaltmassivumformung ab.

2.3 Maßnahmen zur Erweiterung der Lebensdauer

Die Werkzeuglebensdauer beschreibt denjenigen Zeitraum, in dem die Beanspruchbarkeit des Werkzeugs größer ist als seine Beanspruchung [48].

Um sie zu verlängern, muss dementsprechend entweder die Beanspruchbarkeit erhöht oder die Beanspruchung verringert werden. Bestehende Ansätze zur Erweiterung der Lebensdauer werden im Folgenden vorgestellt.

2.3.1 Beeinflussung der Beanspruchbarkeit

Die Beanspruchbarkeit beschreibt die Fähigkeit eines Werkzeugs, den vorherrschenden Beanspruchungen zu widerstehen [48]. Ansätze zur Vergrößerung der Beanspruchbarkeit beinhalten die Wahl geeigneter Werkstoffe und Beschichtungen, die Herstellungsverfahren der Werkzeuge sowie Wärmebehandlungen. Grundlegend sind die Maßnahmen in global am gesamten Werkzeug wirkende und lokal an Orten kritischer Belastung wirkende Maßnahmen zu unterteilen.

Werkstoffe und Beschichtungen

Die Anforderungen an Werkzeugwerkstoffe hängen in der Massivumformung vom Versagensmechanismus ab. Ist Verschleiß maßgeblich, wird eine hohe Härte der Materialien gefordert [74]. Zur Vermeidung von Ermüdungsversagen sind zähe Werkstoffe vorteilhaft, da diese die versagenskritischen Zugspannungen besser ertragen [75]. Die konventionell verwendeten Werkstoffe reichen von Kaltarbeitsstählen über Schnellarbeits- und hochlegierte Werkzeugstähle bis zu Hartmetallen [74], wobei in der genannten Reihenfolge die Härte zu- und die Zähigkeit abnimmt [48]. Zur Erzielung eines hohen Verschleißwiderstands bei gleichzeitig hoher Ermüdungsfestigkeit werden pulvermetallurgische (PM) Stähle eingesetzt [6]. Diese haben im Vergleich zu geschmolzenen Stählen weniger Einschlüsse sowie homogen verteilte, feine und globulare Karbide. Zum Beispiel wurde mit dem PM-Stahl Böhler K390 bei einem Prägestempel die achtfache Standzeit im Vergleich zum konventionellen Stahl 1.2379 erreicht [75]. Neben PM-Stählen finden vermehrt Hartmetalle Anwendung für Massivumformwerkzeuge [76]. Die eingesetzten Hartmetalle werden durch pulvermetallurgisches Sintern hergestellt und bestehen aus Wolfram-Karbiden in einer Bindephase aus Kobalt [6]. Wegen ihres hohen E-Moduls werden sie dort verwendet, wo eine hohe Druckfestigkeit und eine geringe Werkzeugauffederung benötigt wird [6]. Ein Einsatzgebiet ist zum Beispiel die Umformung von druckaufgestickten Stählen, die unter sehr hohen Kräften stattfindet [77]. Für maximale Werkzeughärten wurde die Verwendung von Keramiken untersucht [78]. Diese sind jedoch sehr zugspannungsempfindlich und daher stark rissgefährdet. Weiterhin werden Faserverbund-

werkstoffe als Werkzeugmaterialien erforscht [79]. Der Einsatz eines kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffs führte im Vergleich zu konventionellen Stahllarmierungen zu einer um 18 % erhöhten Vorspannung und bis zu 25 % höherer Werkzeuglebensdauer. Herausforderungen beim Einsatz dieses Werkstoffs liegen in der geometrischen Genauigkeit [79]. Die Verwendung hochfester Materialien stellt eine globale Maßnahme zur Verbesserung der Beanspruchbarkeit dar. Daneben gibt es Ansätze zum Einsatz lokal unterschiedlicher Werkstoffe durch Verfahren der additiven Fertigung [80]. Hierdurch können potenziell ermüdungskritische Bereiche einen zähen Werkstoff erhalten, während verschleißkritische Stellen aus Materialien hoher Härte ausgeführt würden.

Zur gezielten Einstellung von Eigenschaften und der Verbesserung der Verschleißbeständigkeit werden Beschichtungen eingesetzt [55]. Diese können lokal oder global angewendet werden und werden grundlegend in Reaktions- und Auflageschichten eingeteilt [81]. In der Kaltmassivumformung kommen hauptsächlich Auflageschichten, insbesondere keramische Hartstoffschichten, zum Einsatz [82]. Entwicklungen für hohe Beanspruchungen beinhalten Mehrlageschichten wie Titancarbonnitrid (TiCN), welche für hohe Kontaktspannungen und Gleitwege geeignet sind [20]. Zudem werden nanostrukturierte Beschichtungen wie $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{AlTiN}$ für komplexe Geometrien mit hohen Spannungsspitzen untersucht [20].

Werkzeugherstellung

In Massivumformwerkzeugen tritt Rissversagen vorwiegend ausgehend von Oberflächendefekten an der Werkzeugoberfläche auf [61]. Aus diesem Grund kommen der Oberflächenbeschaffenheit sowie Topographie eine hohe Bedeutung zu [83]. Die konventionelle Fertigungskette für Massivumformwerkzeuge besteht aus der Erzeugung der Makrogeometrie durch Zerspanen oder Erodieren. Anschließend erfolgt eine Feinbearbeitung durch Läppen oder Polieren [18], bei der die Werkzeugoberfläche maßgeblich beeinflusst wird [84]. Durch die Entfernung von Oberflächendefekten werden Risskeime aus der Makrobearbeitung entfernt und die Ermüdungsfestigkeit verbessert. Zum Beispiel entsteht beim Erodierprozess eine thermisch beeinflusste Randzone mit Zugeigenspannungen, welche sich negativ auf die Werkzeuglebensdauer auswirkt [84]. Daher muss diese sogenannte „weiße Schicht“ im Feinbearbeitungsprozess möglichst vollständig abgetragen werden. Eine vorteilhafte Werkzeugherstellung ist als globale Maßnahme mit Auswirkung auf das gesamte Werkzeug zu sehen.

Da Ermüdungsversagen durch zyklisch auftretende Zugspannungen verursacht wird [59], ist die Einbringung von Druckeigenstressungen bereits in der Werkzeugherstellung wünschenswert. Hierzu werden Verfahren wie Verfestigungs- oder Kugelstrahlen [82] sowie Glatt- oder Festwalzen [85] eingesetzt. Beide Verfahren können lokal oder global angewendet werden. Das Kugelstrahlen wird in der Kaltmassivumformung zum Beispiel zur Vorbereitung für eine Hartstoffbeschichtung verwendet. Neben der Reinigung der Oberfläche sowie der positiven Beeinflussung der Eigenstressung werden scharfe Kanten und Rauheitsspitzen abgetragen, was zu einer verringerten Kerbwirkung führt [82]. Mit dem Verfahren werden daher um den Faktor 1,1 bis 2,0 erhöhte Dauerfestigkeiten im Vergleich zu nicht gestrahlten Oberflächen erreicht [86]. Beim Festwalzen wird eine Keramik-Kugel unter hohem Druck über die Werkzeugoberfläche geführt [85]. Dieses Verfahren ist bei Werkstoffen bis 60 HRC für eine Verbesserung der Eigenstressungen, Rauheit, Härte und Verfestigung einsetzbar [87]. Nach ANDREAS [84] ist eine Prozesskette aus Erodieren, Abrasivstrahlen, Polieren und Verfestigungsstrahlen vorteilhaft für das Ermüdungsverhalten von Werkzeugen. Durch Abrasivstrahlen wird die aus dem Erodierprozess entstandene Oberflächenschicht mit Zugeigenstressungen entfernt. Das Polieren vermindert Rauheitsspitzen, welche als Risskeime wirken können, und das Verfestigungsstrahlen bringt Druckeigenstressungen ein.

Wärmebehandlung

Die Wärmebehandlung von Werkzeugwerkstoffen ist ein Haupteinflussfaktor auf deren Härte und Zähigkeit [88]. Während die Bearbeitung der Werkzeuge im weichgeglühten Zustand erfolgt, ist für den Einsatz eine hohe Härte zum Widerstand gegen Verschleiß notwendig [89]. Um dies zu erreichen, wird das Werkzeug nach der Erzeugung der Geometrie auf die entsprechende Härtetemperatur des Werkstoffs erwärmt und anschließend abgeschreckt [89]. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Zähigkeit wird mindestens zweimaliges Anlassen der Werkzeuge nach dem Härten empfohlen [89]. Neben einer Erwärmung der Werkzeuge besteht auch Potential zur Erhöhung der Beanspruchbarkeit durch eine kryogene Behandlung [90]. Hierfür werden die Werkzeuge nach einer Standard-Wärmebehandlung für 16 Stunden auf -185°C gekühlt. Dies führt zu einer stärkeren Martensithärtung und einer feineren Verteilung der Karbide, was wiederum eine höhere Härte und geringere Oberflächenrauheit erzeugt. Im Umlaufbiegeversuch an Proben aus AISI H13 wurde mit dieser Behandlung ein verbessertes Ermüdungsverhalten nachgewiesen [90].

Zur lokalen Verbesserung der Verschleiß- oder Ermüdungsfestigkeit wurde eine Wärmebehandlung über Laserstrahlhärten und -anlassen untersucht [91]. Die Verfahren sind flexibel und lokal einsetzbar, da sich der Laserstrahl über beliebig komplexe Konturen führen lässt [92]. Das Laserstrahlhärten wird durch ein Erhitzen der Randschicht auf Temperaturen knapp unterhalb der Schmelztemperatur und anschließend rasches Abkühlen an Luft erreicht [59]. Hierdurch wird das Werkstoffgefüge in Martensit umgewandelt [92]. Das Härten induziert zudem Druckeigenspannungen an der Oberflächenschicht [59]. Durch die genannten Effekte kann die Dauerfestigkeit mehr als verdoppelt werden [59]. Mit dem Laserstrahlanlassen werden duktile Bereiche erzeugt [87]. Bereits eine Härtereduktion zwischen 12 % und 16 % hat einen positiven Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit [87]. Im Einsatz an Industriewerkzeugen wurden um 22 % höhere Standmengen durch Laserstrahlhärten und um 89 % höhere Standmengen durch Laserstrahlanlassen erreicht [87].

2.3.2 Beeinflussung der Beanspruchungen

Massivumformwerkzeuge sind durch mechanische, tribologische und thermische Beanspruchungen gekennzeichnet. Im Bereich der Kaltumformung sind insbesondere die tribologischen und mechanischen Lasten kritisch. Daher wird im Folgenden auf Möglichkeiten zur Verringerung dieser Beanspruchungen eingegangen. Die mechanischen Lasten sind sowohl durch eine Anpassung der äußeren Beanspruchungen mithilfe einer geeigneten Prozessführung und Werkzeuggestaltung, als auch durch eine Verringerung der inneren Beanspruchung durch eine Vorspannung der Werkzeuge mit Armierungssystemen beeinflussbar. Auf letzteres wird ein besonderes Augenmerk gelegt, da der Einsatz von Armierungen weit verbreitet und ohne wesentliche Änderung der Prozessparameter einsetzbar ist. Wie bei der Beanspruchbarkeit ist ein Einfluss auf die Beanspruchungen lokal oder global möglich.

Verbessern der tribologischen Bedingungen

Das tribologische System wird in der Umformtechnik im Wesentlichen durch die Oberflächen der Kontaktpartner Werkstück und Werkzeug sowie das verwendete Schmiersystem beeinflusst [93]. Da in der Kaltmassivumformung mit sehr hohen Kontaktdrücken und Oberflächenvergrößerungen anspruchsvolle tribologische Bedingungen vorliegen, sind Flüssigschmierstoffe meist nicht in der Lage, eine ausreichende Trennung der

Oberflächen zu gewährleisten [93]. Zur Erzielung eines günstigen Schmier-systems wird daher üblicherweise eine Schmierstoffträgerschicht in Form von Zinkphosphaten oder Eisenoxalaten auf das Werkstück aufgetragen [94]. Durch physikalische oder chemische Reaktion der Trägerschicht mit einem Schmiermittel wird eine erhöhte Schmierstoffaufnahme auf der Werkstückoberfläche erreicht [95]. Die beschichteten Bauteile werden anschließend in eine alkalische Seife getaucht. Durch eine chemische Reaktion wird ein 3-lagiger Schmierfilm mit einer geringen Scherfestigkeit gebildet [95]. Für sehr hohe Flächenpressungen und Umformgrade, welche häufig bei komplexen Bauteilgeometrien auftreten, wird als Schmierstoff MoS₂ verwendet, da es im Vergleich zu Seifen unempfindlicher gegenüber Oberflächenvergrößerungen ist [17]. Bei der Aufbringung der Zinkphosphatschicht entstehen chemische Nebenprodukte wie Schwermetalle, weswegen das Verfahren als nicht umweltfreundlich gilt [96]. Daher werden aktuell Alternativen zur Phosphatierung wie MEC Homat, Daido AquaLub oder MCI Z-Coat [96] sowie der Einsatz von gestrahlten Oberflächen [97] untersucht. Zudem bestehen Ansätze zur Verbesserung des Trennverhaltens von Flüssigschmierstoffen durch eine Kraftaufbringung mit niederfrequenter Oszillation [98].

Neben der globalen Beeinflussung des tribologischen Systems durch Schmierstoffe ist auch ein lokaler Einfluss durch die Anpassung der Werkzeugoberfläche möglich. Hierbei werden Beschichtungen [99] oder Strukturierungen [100] eingesetzt. Die bessere Schmierwirkung durch strukturierte Werkzeugoberflächen basiert auf der Kontrolle des Reibungs- und Verschleißverhaltens durch Schmiertaschen [101]. Diese fungieren als Speicher für den Schmierstoff, welcher bei zunehmendem Kontaktdruck durch hydrodynamische und hydrostatische Effekte aus den Taschen gedrängt wird und damit eine verbesserte Schmierwirkung erreicht [102]. Mit dem Einsatz von Schmiertaschen ist eine Erhöhung der Werkzeuglebensdauer um mehr als 300 % möglich [103].

Prozessführung und Werkzeuggestaltung

Der Stofffluss hat in der Umformtechnik entscheidenden Einfluss auf die Werkzeugbeanspruchungen [104]. Daher hat eine geeignete Prozess- und Werkzeuggestaltung Potential, Belastungen sowohl lokal als auch global zu reduzieren. Ein Beispiel für eine beanspruchungsgerechte Prozessführung ist die sogenannte Divided-Flow Method [105]. In dieser wird der Materialfluss so aufgeteilt, dass neben der Füllung anspruchsvoller Bereiche gleichzeitig ein weiterer Stofffluss entweder radial nach innen (relief hole) oder

axial innerhalb einer zentralen Bohrung (relief axis) besteht. Dies verringert Reibung, Kräfte und Werkzeugbelastungen. Die Bereiche des kompensierenden Materialflusses haben jedoch meist keine definierte Geometrie und müssen daher nachbearbeitet werden [106]. Nach einem ähnlichen Prinzip werden Überläufe eingesetzt, um die Kraft bei der Füllung von Ecken und Kanten abzumindern. Dies führte bei der Herstellung von Zahnradern zu einer verringerten Werkzeugbelastung [107]. Ein weiteres Beispiel für eine aus Werkzeugsicht günstige Prozessführung ist der Guided Material Flow Samantha Prozess [27]. In diesem wird durch einen weniger abrupten Verformungsverlauf der Zahnkopf vor dem Zahnfuß ausgeformt und damit eine volle Füllung garantiert. Zur Reduktion von Kraft und Werkzeugbelastung ist ein Hinterschnitt in der Matrize integriert. Mit diesem Verfahren wurde eine um ein Drittel verringerte Werkzeugbelastung erreicht [27]. Neben der Matrize wirkt sich nach SWEENEY auch eine Anpassung der Stempelgeometrie auf den Stofffluss und damit die Werkzeugbeanspruchungen aus [108]. Eine stark an den Stofffluss angepasste Werkzeuginnengeometrie führt jedoch häufig zu erhöhter spanender Nacharbeit [39]. Dies verringert die Near-Net-Shape Eigenschaft, welche ein wichtiger Vorteil der Kaltmassivumformung ist [17].

Um dies zu vermeiden, sind Anpassungen an der Werkzeugaußenkontur oder –kinematik anwendbar. Zum Beispiel können in vertikaler Richtung bewegliche Matrizen zur Reduktion von Lasten und Spannungen eingesetzt werden [109]. Weiterhin werden Matrizen häufig mit einer Quer- oder Längsteilung ausgeführt [6]. Durch das Teilen an Stellen mit hohen Spannungskonzentrationen wird die Rissbildung infolge der Überlagerung von Zug-, Druck- und Biegespannungen an kritischen Übergängen, Radien und Kanten vermieden [6]. Bei Matrizonteilungen ist jedoch zu beachten, dass kein Werkstoff in die Trennfuge eindringt. Dies wird häufig durch eine Vorspannung erreicht, welche bei Querteilung in axialer Richtung und bei Längsteilung in radialer Richtung ausgeführt ist.

Armierungssysteme

In einem typischen Fließpressprozess liegen am Matrizeninnenrand zu Prozessende radiale Druck- und tangential Zugspannungen vor [6]. Armierungen werden eingesetzt, um den tangentialen Zugspannungen durch eine globale Vorspannung entgegenzuwirken. Bei Einsatz einer Armierung liegt zu Prozessbeginn bereits eine Druckspannung in radialer und tangentialer Richtung vor. Durch die Überlagerung mit den Prozessspannungen entsteht am Prozessende ein unkritischerer Spannungszustand, bei dem

idealerweise noch eine Restdruckspannung in tangentialer Richtung vorherrscht [6]. Da in der Realität meist trotz der Vorspannung zu Prozessende noch eine gewisse Zugspannung vorliegt, wechselt der Beanspruchungszyklus von einem mehrachsigen Druck- zu einem mehrachsigen Zug-Druckspannungszustand.

Die Druckvorspannung wird erreicht, indem die Matrize mit Übermaß in einen oder mehrere Armierungsringe eingepresst oder eingeschrumpft wird [6]. Die Art des Fügens hängt dabei von der Trennfuge zwischen Matrize und Armierung ab. Bei einer zylindrischen Trennfuge wird die Armierung auf etwa 400°C erhitzt und anschließend die Matrize eingelegt [6]. Durch die mit der Abkühlung einhergehende Schrumpfung der Armierung wird die Vorspannung aufgebracht. Die erreichbare Vorspannung ist dabei durch die Wärmeausdehnung und die Anlasstemperatur des Armierungswerkstoffes begrenzt [6]. Zudem können beim Ein- und Ausbau Aufschweißungen entstehen, die eine Wiederverwendung der Armierungen nur bei aufwändiger Nacharbeit möglich machen [110]. Im Gegensatz dazu ist bei der Verwendung von teureren, kegeligen Trennfugen ein einfacherer Ein- und Ausbau gewährleistet [110]. Durch das Vorsehen von Kegelverhältnissen im Bereich 1/100 oder 1/50 sind zudem ein Einpressen ohne Erwärmung und höhere Haftmaße möglich [6].

Das Haftmaß gibt dabei den Maßunterschied zwischen dem Innendurchmesser der Armierung und dem Außendurchmesser der Matrize an [110]. Üblicherweise wird es als relatives Haftmaß in Bezug auf den Radius der Trennfuge verwendet. Je größer das Haftmaß gewählt wird, desto höher ist die Vorspannung der Matrize [111]. Neben der Fügbarkeit ist das Haftmaß begrenzt durch die Zugfestigkeit des Armierungsringes und die Druckfestigkeit der Matrize [6]. Bei zylindrischem Fügen sind Haftmaße bis zu 5 ‰ erreichbar [110]. Für höhere Haftmaße wird kegeliges Fügen eingesetzt, wobei eine Überarmierung durch Überschreiten der Festigkeiten der Fügepartner verhindert werden muss. In der Praxis werden mit kegeligen Trennfugen Haftmaße bis zu 7 ‰ erreicht. Um hohe Haftmaße zu ermöglichen, müssen Matrizen eine ausreichende Druckfestigkeit und Armierungen eine entsprechende Zugfestigkeit besitzen. Daher werden für Matrizen häufig pulvermetallurgische Stähle oder Hartmetalle verwendet [74]. Für Armierungen sind dagegen Warmarbeitsstähle mit höherer Zähigkeit üblich [74].

Für die Auslegung von Armierungssystemen gibt es Vorgaben der International Cold Forging Group (ICFG) [16], welche auf rotationssymmetrischen

Vollvorwärtsfließpresswerkzeugen basieren. Demnach sollte das Verhältnis zwischen Innen- und Außendurchmesser des Armierungsverbands zwischen vier und sechs liegen. Ein höherer Außendurchmesser erzeugt eine größere Vorspannung der Matrize. Ab einem Durchmesser Verhältnis von etwa 4 ist die Erhöhung jedoch nur noch gering, da die größte Belastung am Innendurchmesser auftritt [110]. Ab Innendrücken von 1000 MPa sollte ein Armierungsring und ab 1600 MPa zwei Armierungsringe verwendet werden. Bei Stahlmatrizen liegen die Grenzwerte doppelt armerter Werkzeugsysteme bei Innendrücken von 2160 MPa, bei Hartmetallmatrizen bei 2000 MPa [16].

Für besonders hohe Belastungen werden Bandarmierungen eingesetzt. Bei Bandarmierungen wird ein Blechband aus Federstahl unter Vorspannung auf die Matrize oder einen zusätzlichen Kern gewickelt [112]. Die ertragbaren Innendrucke steigen hierdurch im Vergleich zu konventionellen Pressverbänden mit Armierungsringen um 50-70 % [112]. Durch die Verwendung eines Hartmetallzwischenrings zwischen Matrize und Bandarmierung wird zudem die Matrizenauflagerung reduziert und ein einfacher Ein- und Ausbau des Matrizenkerns gewährleistet [6]. Die verbesserten mechanischen Eigenschaften und höheren Fertigungsgenauigkeiten bewirken eine Erhöhung der Standzeiten anspruchsvoller Werkzeuge um durchschnittlich 50 % [112]. Gleichzeitig wird die Streuung der Standzeiten um 50 % verringert [112]. Für extreme Beanspruchungen gibt es Sondersysteme in Form von Bandarmierungen mit erhöhter Steifigkeit sowie mit kombinierter axialer und radialer Vorspannung [113].

Um die Beanspruchungen und die Bauteilgenauigkeit während des Prozesses einstellen zu können, werden sogenannte Aktivarmierungen erforscht. Bei diesen ist die Armierungswirkung über den Prozess variabel [114]. Zur Realisierung einer Aktivarmierung bestehen verschiedene Ansätze. Mit einem hydraulischen System wird die Armierungswirkung über die radiale Verschiebung eines Verstärkungselements auf der Matrize reguliert [115]. Hierfür ist ein hoher Bau- und Druckraum notwendig. Weiterhin ist der Einsatz eines Keilsystems mit konischem Trägerrohr und konischer Innenfläche des Innenrings möglich [116]. Hierbei tritt jedoch Verschleiß am Keilsystem auf. Neben einer externen Verschiebung des Keils wurde eine verschiebbare Matrize mit keilförmiger Außenfläche vorgeschlagen [117]. Durch die bei Verschiebung erhöhte Keilwirkung vergrößert sich während der Belastung der Armierungsdruck. Nach Wegfall der Prozesslast ist durch die Rückfederung der Matrize ein nahezu kraftfreies Auswerfen möglich [117]. Die Belastungen können weiterhin über die thermische Ausdehnung der Armierung mittels der Erwärmung durch eine Induktionsschleife

eingestellt werden [118]. Dieses System ist für die meisten Anwendungen in der Kaltmassivumformung jedoch zu träge. Weiterhin wurde die Einstellung des Matrizeninnendurchmessers über einen umlaufenden Elastomerring untersucht [119]. Hierfür ist ein komplizierter Werkzeugaufbau und hohe Umformkräfte notwendig, da die Kraft zur Belastung des Elastomerrings ebenfalls von der Presse aufgebracht wird [119]. Zuletzt wurde der Einsatz von Piezoaktoren als Aktivarmierungselement untersucht [120]. Hierdurch werden lokale Kräfte aufgebracht, was den Einsatz vieler Aktoren notwendig macht.

Die beschriebenen Armierungssysteme inklusive ihrer Sonderformen sind für eine globale Erhöhung der Vorspannung ausgelegt. Bei lokalen Spannungsspitzen ist hingegen eine lokale Armierungswirkung wünschenswert. Zur Einstellung einer lokalen Armierungswirkung in axialer Richtung entwickelte GROENBAEK ein Konzept mit profilierter Matrize für ein lokal angepasstes Haftmaß [121]. Durch das Vorsehen einer Aussparung auf Höhe eines Querschnittsübergangs wird in diesem Bereich lokal der Kontakt zwischen Matrize und Armierung unterbrochen. Hierdurch entsteht eine Biegewirkung, durch die die Matrizeninnenwand in axialer Richtung stärker vorgespannt wird. Neben einer diskreten Aussparung ist auch eine Anpassung des Armierungsdrucks über Schrägen mit unterschiedlichen Winkeln an der Matrizenaußenseite möglich [122]. Vorteilhafte Ausführungen der Matrizenaußengeometrie wurden mit Verfahren der Optimierung berechnet [123]. Im Einsatz erzielten profilierte Matrizen eine Standmengensteigerung von 50.000 auf 460.000 bei einer Kuppmatrize [124], von 17.500 auf 71.000 in einer Matrize für einen Rückwärtsfließpressprozess [125] sowie um mindestens das Dreifache bei einer vereinfachten Gelenkmatrize [126]. Auch in Bandarmierungen ist eine Profilierung zur Erzeugung einer lokalen Vorspannung von Querschnittsübergängen möglich. Unter Einsatz der Opti-Fit Bandarmierung der Firma Strecon A/S wurde eine Erhöhung der Lebensdauer von 30.000 auf 200.000 erreicht [127]. Profilierte Matrizen wurden bisher nur für eine lokale Vorspannung in axialer Richtung eingesetzt. Für asymmetrische Bauteilgeometrien mit lokalen tangentialen Spannungsspitzen ist der Einsatz von Spannstiften möglich [128]. Diese werden mit Übermaß in dafür vorgesehene Bohrungen der Matrize zur Erzeugung einer lokalen Vorspannung von innen eingesetzt. In einem Innenhochdruckumformwerkzeug wurde die Reduktion lokaler Beanspruchungen durch den Einsatz von Spannstiften numerisch nachgewiesen [128]. Beim Einsatz in einer Matrize für ein Pleuel nahmen die Spannungen dagegen zu [128]. Weitere Untersuchungen, zum Beispiel in Bezug auf die richtige Positionierung und vorteilhafte Maße der Spannstifte, sind für den

zielführenden Einsatz notwendig [129], wurden aber bisher nicht durchgeführt. Weiterhin wurden unrunde Armierungsgeometrien zur Reduktion lokal starker Auffederungen sowie über den Durchmesser lokal eingestellte Haftmaße zur Kompensation lokaler Spannungen vorgeschlagen [128], jedoch nicht umfassend untersucht.

2.4 Zusammenfassende Bewertung

Zur Begegnung ökonomischer und ökologischer Anforderungen wird in der Fertigungstechnik eine Near-Net-Shape Produktion in Leichtbauweise angestrebt. Die Fertigungsklasse der Kaltmassivumformung bietet das Potential, diesen Anforderungen gerecht zu werden. Daher wird aktuell die Umformung unrunder Bauteilgeometrien wie Zahnrädern, Verbindungselementen, Gelenken sowie Bauteilen der Blechmassivumformung erforscht. Die Zielgrößen der Untersuchungen lassen sich in die Kategorien Bauteilumformung, Kraftbedarf und Werkzeugbeanspruchung einteilen. Hierbei wird häufig die Umsetzbarkeit der Verfahren im Vergleich zur konventionellen Herstellung zum Beispiel durch Warmumformung oder Spanen untersucht. Zur Reduktion der benötigten Kräfte und Werkzeugbelastungen werden zudem inkrementelle Verfahren wie das Taumeln für anspruchsvolle Werkzeuggeometrien erforscht.

Die lokale Werkzeugbelastung ist eine wesentliche Herausforderung bei der Umformung anspruchsvoller Bauteilgeometrien. Gleichzeitig ist sie von hoher ökonomischer und ökologischer Bedeutung, da bei Werkzeugausfall durch Maschinenstillstände und Neufertigung erhebliche Mehrkosten sowie ein erhöhter Material- und Energiebedarf entstehen. Bereits konventionelle rotationssymmetrische Kaltmassivumformwerkzeuge sind durch hohe Innendrucke stark belastet. Werden unrunde Bauteile in Net-Shape Fertigung ausgeformt, enthalten die Werkzeuge die Kontur der anspruchsvollen Bauteilgeometrien. Damit erhöhen sich die Werkzeugbeanspruchungen einerseits durch einen komplizierteren Werkstofffluss und andererseits durch geometrische Unstetigkeiten. Diese verändern den Beanspruchungszustand von gleichmäßig verteilten Belastungen zu lokalen Spannungsspitzen. Die Werkzeugbelastung beeinflusst die Werkzeuglebensdauer, welche üblicherweise durch Verschleiß und Ermüdungsversagen begrenzt ist. Wegen der lokalen Spannungsspitzen ist bei unrunder Bauteilgeometrien Ermüdung der maßgebliche Versagensmechanismus. Untersuchungen zur Werkzeugbeanspruchung wurden meist anhand der Vergleichsspannung nach von Mises durchgeführt, welche keine Aussagen

über die Ausprägung der Spannungen hinsichtlich Zug- oder Druckbelastung sowie ihrer Richtung zulässt. Eine genaue und systematische Analyse der Richtung und Entstehungsmechanismen von Werkzeugbeanspruchungen bei unrunder Geometrien ist nicht bekannt und daher in der vorliegenden Arbeit durchzuführen.

Eine Erhöhung der Werkzeuglebensdauer ist entscheidend für den wirtschaftlichen Einsatz von Kaltmassivumformverfahren. Grundsätzlich ist dies über eine Erhöhung der Beanspruchbarkeit oder eine Senkung der Beanspruchungen der Werkzeuge erreichbar. Beide Ansätze sind sowohl global auf das gesamte Werkzeug als auch lokal auf kritische Stellen anwendbar. Eine Vergrößerung der Beanspruchbarkeit wird dadurch erschwert, dass Umformwerkzeuge sowohl einen hohen Widerstand gegen Verschleiß als auch gegen Ermüdung aufweisen müssen. In der Werkstoffauswahl ist somit eine hohe Härte und eine hohe Zähigkeit gefordert, was zumeist gegensätzliche Eigenschaften sind. So reagieren Hartmetalle, welche ein sehr gutes Verschleißverhalten aufweisen, sehr empfindlich auf Zugspannungen und sind insbesondere bei anspruchsvollen Geometrien mit Spannungsspitzen stark ermüdungsgefährdet. Bei unrunder Werkzeuggeometrien bietet die lokale Einstellung der Werkstoffeigenschaften Potential durch die Ausführung ermüdungskritischer Bereiche mit zähen Materialien und verschleißkritischer Stellen mit hochharten Werkstoffen. Ansätze zur Werkzeugherstellung durch additive Fertigung mit lokal unterschiedlichen Materialien sowie das Konzept einer lokalen Wärmebehandlung zeigen das Potential von Werkzeugen mit lokal unterschiedlicher Beanspruchbarkeit. Ermüdungsversagen wird durch hohe Spannungsamplituden sowie hohe Mittelspannungen begünstigt. Daher wirkt sich in der Werkzeugherstellung das Einbringen von Druckeigenstressungen positiv im Hinblick auf die Werkzeuglebensdauer aus. Dies ist durch Verfahren wie Kugelstrahlen oder Festwalzen erreichbar. Die eingebrachten Eigenstressungen sind jedoch begrenzt, so dass bei sehr hohen Belastungen und zugempfindlichen Materialien weiterhin ein hohes Ermüdungsrisiko besteht.

Da die Beanspruchbarkeit der Werkzeuge nicht unbegrenzt erhöhbar ist und die Maßnahmen im Spannungsfeld zwischen hoher Härte für Verschleißwiderstand und hoher Zähigkeit gegen Ermüdungsversagen stehen, bietet eine Senkung der Beanspruchungen hohes Potential in Bezug auf die Werkzeuglebensdauer. Zur Verbesserung des Verschleißverhaltens ist zum Beispiel eine Verringerung der tribologischen Beanspruchungen durch geeignete Schmiersysteme oder Werkzeugoberflächen möglich. Da bei anspruchsvollen Bauteil- und Werkzeuggeometrien Ermüdungsversagen

maßgeblich ist, ist außerdem eine Reduktion der äußeren und inneren mechanischen Beanspruchungen notwendig. Die äußere Beanspruchung beinhaltet die Kontaktdrücke zwischen Werkstück und Werkzeug. Diese können durch eine geeignete Prozessführung und Werkzeuggestaltung, zum Beispiel mit ausreichend großen Übergangsradien, reduziert werden. Eine Änderung der Prozessführung wird bei bestehenden Prozessen wegen des hohen Aufwands jedoch nur selten durchgeführt. Zudem bedingt eine Anpassung der Werkzeuginnengeometrie eine veränderte Bauteilgeometrie. Dies führt zur Notwendigkeit von spanender Nachbearbeitung und steht im Gegensatz zur Forderung nach Near-Net-Shape Fertigung. Änderungen in der Werkzeuggeometrie mit Einfluss auf die Beanspruchungen sollten demnach vorzugsweise in der Werkzeugaußenkontur stattfinden. Hier bietet der Einsatz von Armierungssystemen zur Beeinflussung der inneren Beanspruchungen hohes Potential. Da Ermüdungsversagen bei zyklischer Belastung neben der Spannungsamplitude durch Zugspannungen begünstigt wird, ist eine Verschiebung des Beanspruchungszustands in den Druckbereich über eine Vorspannung zielführend.

Armierungssysteme sind grundlegend für rotationssymmetrische Bauteilgeometrien ausgelegt. Entwicklungen in diesem Bereich zielen hauptsächlich auf eine Erhöhung der globalen Armierungswirkung oder eine über den Umformprozess zeitlich einstellbare Wirkung der Armierung. Da bei unrunder Bauteilgeometrien lokale Spannungsspitzen entstehen, wäre zur Reduktion dieser Spannungen eine lokale Armierungswirkung geeignet. Eine gezielte Einstellung der Vorspannungswirkung wurde in der Praxis bisher nur für eine lokale axiale Vorspannung über profilierte Matrizen genutzt. Zur lokalen Vorspannung kritischer Querschnittsbereiche besteht ein theoretischer Ansatz in Form des Einsatzes von Spannstiften. Zudem wurde der Einsatz von unrunder Armierungsgeometrien sowie über den Querschnitt lokal eingestellten Übermaßen vorgeschlagen. Diese Maßnahmen wurden bisher nicht umfassend erforscht, bieten jedoch das Potential, lokalen Spannungsspitzen entgegenzuwirken und die Werkzeuglebensdauer zu erhöhen. Hieraus leitet sich der Forschungsbedarf ab, Vorspannungssysteme zur lokalen Beeinflussung des Spannungszustands in Kaltmassivumformwerkzeugen zu untersuchen.

Um die Wirksamkeit von spannungssenkenden Maßnahmen auf die Werkzeuglebensdauer zu beurteilen, ist Wissen über die Werkzeugauslegung notwendig. Diese erfolgt aktuell meist erfahrungsbasiert, da das nötige Wissen sowie die Materialparameter für analytische Modelle nur bedingt zur Verfügung stehen. Zudem erfolgt die Charakterisierung des Ermü-

dungsverhaltens unter stark vereinfachten einachsigen Spannungszuständen. Hieraus folgt, dass aktuell keine Modellversuche zur realitätsnahen Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit verschiedener Werkzeugsysteme bestehen. Ein solcher Versuch müsste zur Berücksichtigung der Mehrachsigkeit und Armierungswirkung zyklisch auftretende Innendrucke in realen Matrizengeometrien abbilden. Für eine Bewertung des Einflusses verschiedener Vorspannkonzepte auf die Werkzeuglebensdauer ist damit die Auslegung eines neuen Ermüdungsversuchs notwendig.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Kaltmassivumformwerkzeuge sind hohen zyklischen Beanspruchungen ausgesetzt. Diese verursachen häufig frühzeitiges Werkzeugversagen durch Ermüdung, was wirtschaftliche und ökologische Nachteile für die Prozessklasse darstellt. Insbesondere bei der Umformung unrunder Bauteile sind die Werkzeugbelastungen kritisch. Gleichzeitig besteht für derartige Geometrien ein mangelndes Verständnis bezüglich der Entstehung der ermüdungsverursachenden Beanspruchungen und deren Beeinflussung durch Armierungen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die grundlagenwissenschaftliche Analyse der Werkzeugbeanspruchung und des Ermüdungsversagens von Matrizen mit nicht-rotationssymmetrischer Innenkontur in Abhängigkeit des Vorspannsystems. Bild 1 zeigt die hierzu verwendete Vorgehensweise.

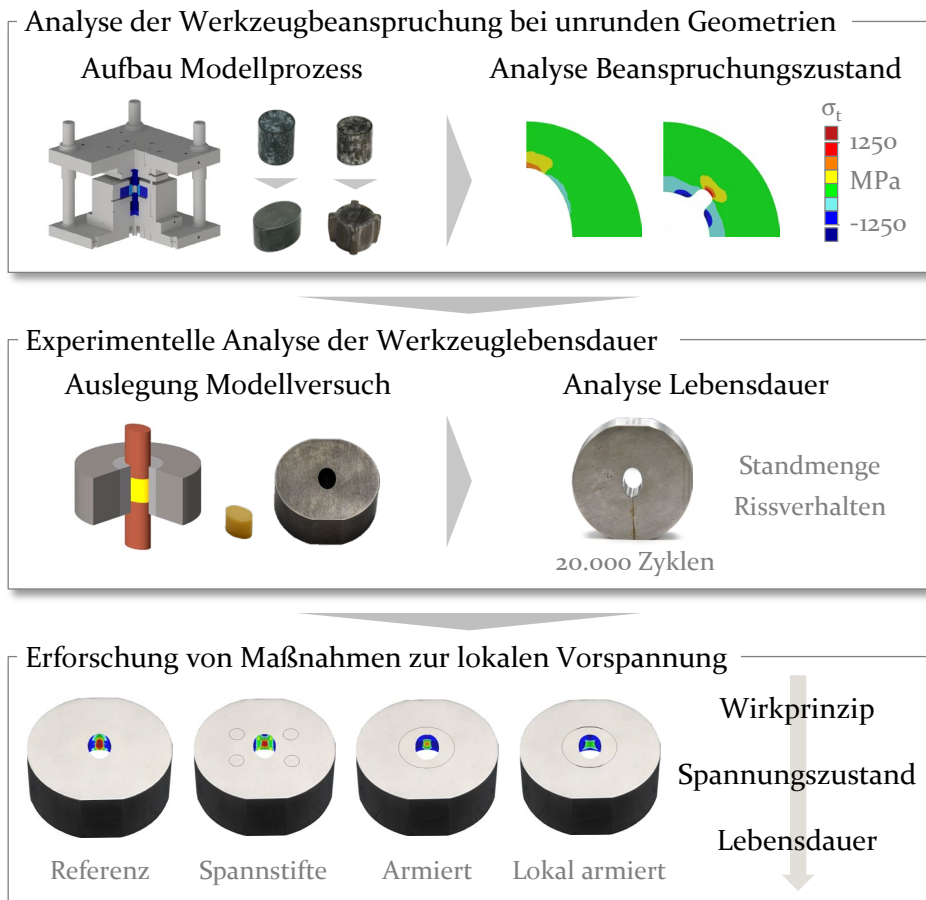


Bild 1: Methodische Vorgehensweise

Das erste Teilziel ist die Generierung von grundlegendem Verständnis zur Entstehung der Werkzeugbeanspruchungen bei nicht-kreissymmetrischen Innengeometrien. Um dies zu erreichen, sind numerische Untersuchungen anhand eines Modellprozesses zur Kaltmassivumformung unrunder Bauteile durchzuführen. Zur Sicherstellung der Übertragbarkeit der Erkenntnisse sind zwei verschiedene Werkzeuggeometrien zu untersuchen, wobei eine elliptische und eine mit Funktionselementen versehene Geometrie zum Einsatz kommen sollen. Um die Aussagekraft der numerischen Ergebnisse zu gewährleisten, ist eine Validierung anhand von Realversuchen durchzuführen. Hierdurch wird das Modell dazu qualifiziert, die Mechanismen zur Entstehung kritischer Spannungen sowie die Wirkungsweise konventioneller Armierungssysteme auf diese zu untersuchen.

Die Beanspruchungen bei der Herstellung unrunder Bauteile führen zu einer durch Ermüdungsversagen begrenzten Werkzeugstandmenge. Aktuell bestehende Modellversuche bieten keine Möglichkeit zur Untersuchung der Ermüdung in Abhängigkeit des Werkzeugkonzepts. Vor diesem Hintergrund ist das zweite Teilziel die Bereitstellung einer Methode zur Analyse der Auswirkung der Werkzeugbeanspruchung auf die Ermüdungsrissbildung und Werkzeuglebensdauer. Um die Belastung durch hohe Innendrucke in der Kaltmassivumformung abzubilden, soll hierzu die Kompression von Elastomeren eingesetzt werden. Die Vergleichbarkeit der entstehenden Belastungen zu realen Kaltumformprozessen ist anhand von Simulationen des Beanspruchungszustands, Analysen der erreichten Lebensdauer sowie des auftretenden Rissbilds für armierte und nicht armierte Werkzeuge zu untersuchen.

Auf Basis der Grundlagenuntersuchungen sowie des Modellversuchs sind als drittes Teilziel Maßnahmen zur lokalen Vorspannung kritischer Bereiche in unrunden Geometrien zu erforschen. Mögliche Ansätze hierzu sind eine lokale Anpassung des Armierungsdrucks mithilfe von Aussparungen sowie eine innere Vorspannung durch in die Matrice gepresste Spannstifte. Für die grundlegende Untersuchung der beiden Maßnahmen sollen diese numerisch hinsichtlich ihrer Wirkmechanismen sowie des Einflusses geometrischer Parameter auf den Spannungszustand analysiert werden. Die Auswirkung auf das Ermüdungsverhalten ist anschließend im zuvor ausgelegten Modellversuch anhand der Werkzeuglebensdauer und Rissbildung zu untersuchen.

Bei Erreichung der Teilziele wird Verständnis zur Wirkung von Armierungssystemen auf die Werkzeugbelastung und das Ermüdungsversagen bei unrunden Matrizeninnenkonturen generiert. Dies ermöglicht den Einsatz neuer beanspruchungsgerechter Vorspannkonzepete für eine erhöhte Werkzeuglebensdauer und einen effizienteren Einsatz von Kaltmassivumformprozessen.

4 Angewendete Werkstoffe, Anlagen, Messmethoden und Software

Zur Untersuchung der Werkzeugbelastung und Ermüdung werden Umformversuche, Simulationen und Ermüdungsversuche durchgeführt. Die Prozesse werden hierbei maßgeblich durch die eingesetzten Werkstoffe für Bauteile und Werkzeuge sowie das Schmiersystem beeinflusst. Daher werden diese im Folgenden beschrieben. Weiterhin werden die zur Durchführung der Untersuchungen genutzten Anlagen erläutert. Zur Prozessbewertung werden verschiedene Bauteil- und Werkzeugeigenschaften gemessen. Daher wird auf die Verfahren zur Bestimmung der hergestellten Bauteilgeometrien, der Bauteilhärte sowie der Werkzeugdehnung eingegangen. Zuletzt wird die für die numerischen Untersuchungen verwendete Software beschrieben.

4.1 Werkstoffe

4.1.1 Werkstoffe für Umformversuche

Im Umformprozess stehen Werkstück und Werkzeug miteinander in Kontakt. Die Materialien beider Körper beeinflussen unter anderem über ihre Festigkeit und Oberflächen die entstehenden Beanspruchungen. Um relevante Erkenntnisse zu generieren, werden in den Untersuchungen etablierte Werkstoffe der Kaltmassivumformung eingesetzt.

Werkstückwerkstoff

Das Material des Werkstücks beeinflusst sowohl das Reibverhalten als auch den Umformprozess und die daraus entstehenden Beanspruchungen [48]. Die Fließkurve beschreibt die notwendige Spannung zur plastischen Verformung, welche als Kontaktdruck an die Werkzeuge weitergegeben wird und zur mechanischen Werkzeugbelastung führt. Es wird der Werkstoff 16MnCrS5 (1.7139) verwendet. Dieser ist ein typischer Kaltumformstahl, welcher zum Beispiel häufig für Zahnräder [130] oder Tassenstößel [131] eingesetzt wird. Die chemische Zusammensetzung dieses Materials ist in Tabelle 1 zu finden.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung 16MnCrS5 (1.7139) [132]

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Cu (%)
0,14 - 0,19	0,15 - 0,40	1,00 - 1,30	0,025	0,020 - 0,035	0,80 - 1,10	0,40

Die Fließkurve des Werkstoffs ist für das Verhalten im Umformprozess entscheidend. Daher wird diese im Stauchversuch nach DIN 50106 ermittelt [133]. Es werden Proben mit Durchmesser 20 mm und Höhe 30 mm mit einer Maximalkraft von 412 kN gestaucht. Diese Kraft ist durch die eingesetzte Presse SchenckTrebel RM400 bedingt. Zur Minimierung von Reibeffekten wird jeweils eine Teflonfolie zwischen die Stauchbahnen und die Werkstückoberfläche eingelegt. Die ermittelte Fließkurve ist in Bild 2 dargestellt.

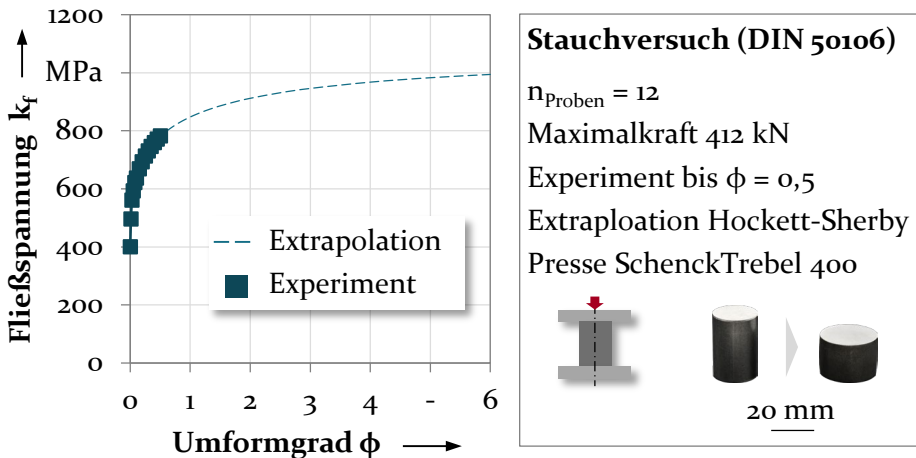


Bild 2: Fließkurve 16MnCrS5

Der Fließbeginn des Werkstoffs liegt bei etwa 400 MPa. Die Fließkurve konnte mit der verfügbaren Kraft bis zu einem Umformgrad von 0,5 experimentell ermittelt werden. Zu diesem Zeitpunkt tritt eine Kaltverfestigung auf circa 800 MPa ein. Da in Massivumformprozessen üblicherweise höhere Umformgrade auftreten, wird eine Extrapolation nach Hockett-Sherby [134] durchgeführt. Nach den Ergebnissen liegt bei einem Umformgrad von 6,0 eine Fließspannung von etwa 1000 MPa vor.

Werkstoffe des Armierungsverbands

Der Armierungsverband besteht aus Matrize und Armierungsring. Die Matrize ist in direktem Kontakt zum Werkstück, was höchste Anforderungen hinsichtlich Druckfestigkeit, Härte, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit

bedingt [6]. Daher werden für diesen Anwendungsfall häufig Schnellarbeitsstähle verwendet. Diese besitzen als hochlegierte Kaltarbeitsstähle eine hohe Verschleißbeständigkeit, Druckfestigkeit und Zähigkeit [6]. Schnellarbeitsstähle werden schmelz- oder pulvermetallurgisch hergestellt. Pulvermetallurgische Stähle haben durch die Minimierung von Defekten, welche als Risskeime wirken, vorteilhafte mechanische Eigenschaften [135]. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit der pulvermetallurgisch hergestellte Schnellarbeitsstahl ASP2023 als Matrizenwerkstoff verwendet. Neben den beschriebenen Eigenschaften von pulvermetallurgischen Stählen hat dieser im Vergleich zu konventionellem Stahl einen größeren E-Modul von 230.000 MPa [136]. Die statische Druckfestigkeit von ASP2023 beträgt je nach Härte zwischen 1800 MPa und 3800 MPa [136]. Für die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Einsatzhärte von 62 + 2 HRC besteht eine statische Festigkeit von 2750 MPa bis 3050 MPa.

Armierungen haben im Gegensatz zu Matrizen keinen Kontakt zum Werkstück und sind daher weniger verschleißkritisch. Aufgrund der Vorspannung, welche sie auf die Matrizen aufbringen, ist jedoch eine höhere Zugfestigkeit notwendig. Daher werden als Materialien häufig Warmarbeitsstähle verwendet [74]. Im Rahmen der Arbeit wird 1.2344 als ein typischer Vertreter für Armierungen eingesetzt. Der Werkstoff hat gemäß der Datenbank des verwendeten Simulationsprogramms Simufact.Forming einen E-Modul von 210.000 MPa. Die chemische Zusammensetzung der Werkzeugwerkstoffe ist in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung für 1.3344 (ASP2023) und 1.2344 [137]

	C (%)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)	V (%)	W (%)	Mn (%)
ASP2023	1,15 –	≤0,45	3,8 –	4,7 –	2,70 –	5,9 –	-
1.3344	1,25		4,5	5,2	3,20	6,7	
X40CrMoV5-1	0,35 –	0,80 –	4,8 –	1,20 –	0,85 –	-	0,25 –
1.2344	0,42	1,20	5,5	1,50	1,15		0,50

4.1.2 Werkstoffe für Ermüdungsversuche

Zusätzlich zu den in den Umformversuchen eingesetzten Werkzeugen wird im Ermüdungsversuch ein Festkörper-Druckmedium für die Übertragung der Innendrucke benötigt. Das Anforderungsprofil an das Druckmedium umfasst ein elastisches und inkompressibles Verhalten. Dies wird von Polyurethan Elastomeren erfüllt, welche im Bereich der Umformtechnik bereits Anwendung bei Blech- [138] und Massivumformwerkzeugen [139]

finden. Hochfeste Polyurethane sind in der Lage, hohen hydrostatischen Drücken bis mindestens 1200 MPa zu widerstehen [140]. Zu den stärksten Materialien dieser Art gehört der Werkstoff Vulkollan® der Firma Covestro AG, welcher eine hohe Verschleißbeständigkeit aufweist [141] und im Rahmen dieser Arbeit mit einer Härte von 92 Shore A verwendet wird.

Zur genaueren Bestimmung der Eigenschaften des Vulkollans ist eine Materialcharakterisierung notwendig. Die relevanten Materialparameter sind der Kompressionsmodul K , welcher den Widerstand gegen Kompression beschreibt, sowie der Elastizitätsmodul E . Nach aktuellem Stand gibt es keine Norm zur Charakterisierung des Kompressionsmoduls von Elastomeren. Ein entsprechender Versuch, bei dem ein Elastomer in einer Form mit bis zu 750 MPa Spannung belastet wird, wurde von BAUMGARTEN durchgeführt [119]. Um höhere Drücke ohne Überlastung der umliegenden Form zu erreichen, wird sein Konzept wie in Bild 3 gezeigt angepasst.

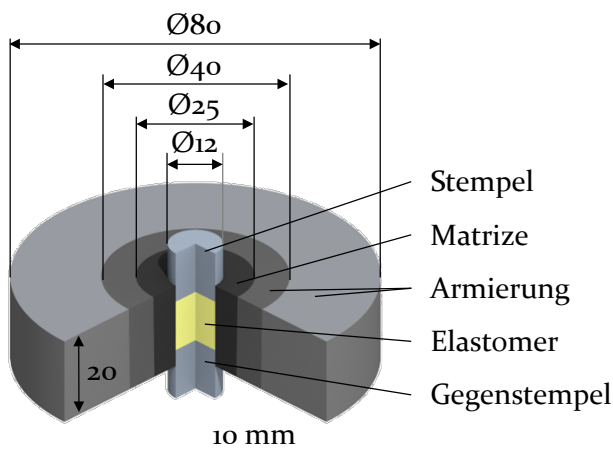


Bild 3: Versuchsaufbau zur Charakterisierung von Vulkollan®

Die Form wird in eine Matrize und einen Gegenstempel aufgeteilt, um ihre Belastung zu reduzieren. Weiterhin wird die Matrize aus dem Hartmetall G20 gefertigt, um eine elastische Deformation, welche die Ergebnisse beeinflussen würde, zu minimieren. Zur Vermeidung von Zugspannungen im Hartmetall wird die Matrize doppelt mit den Haftmaßen 5 % und 6 % armiert. Im Versuchsablauf bringt der Stempel eine Kraft von 226 kN auf, was bei einem Probendurchmesser von 12 mm einem Druck von 2000 MPa entspricht. Vor dem ausgewerteten Versuch werden jeweils vier Zyklen mit Belastung und Entlastung gefahren. Dies liegt daran, dass in den ersten Lastzyklen bei Elastomeren ein Druckverformungsrest auftritt, in dem die Ausgangsgeometrie nicht vollständig erreicht wird [142]. Ab dem fünften

Zyklus liegen konstante Versuchsbedingungen vor. Die ermittelte Kraft-Weg-Kurve ist in Bild 4 dargestellt.

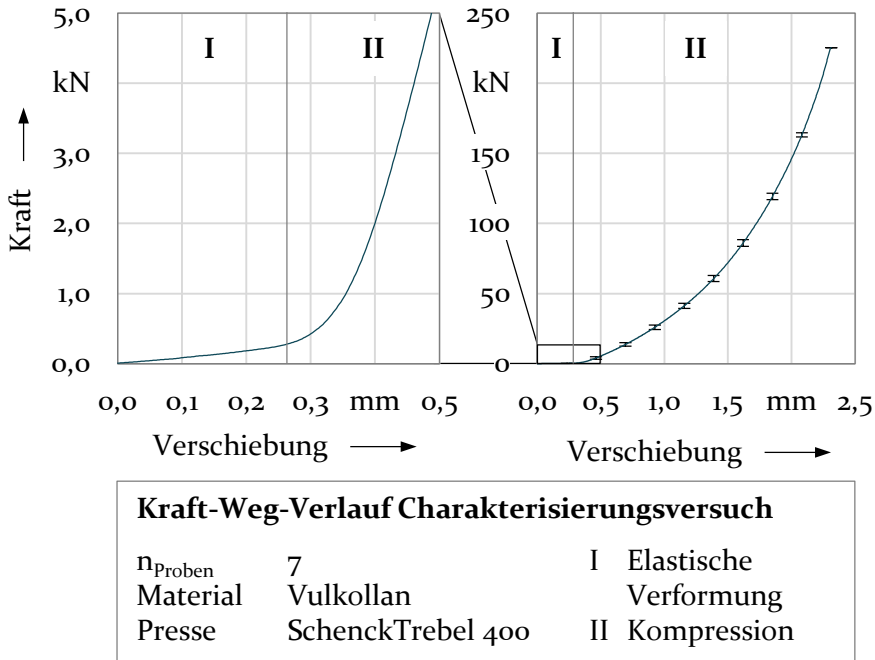


Bild 4: Kraft-Wegverlauf des Charakterisierungsversuchs

Da das Elastomer zum Einlegen in die Matrize einen geringfügig kleineren Durchmesser hat, ist während der ersten knapp 0,3 mm des Stempelwegs eine elastische Verformung mit konstantem Anstieg der Kraft zu beobachten. Aus diesem Bereich wird der E-Modul mit Formel (1) bestimmt [143].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta h}{h_0}} = \frac{\frac{F}{r_B^2 \pi}}{\frac{\Delta h}{h_0}} \quad (1)$$

Die Ausgangshöhe h_0 wurde für sieben Proben nach den ersten vier Lastzyklen zu $11,85 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ gemessen. Es tritt der beschriebene Druckverformungsrest auf, da die Proben vor dem ersten Lastzyklus eine Höhe von $12,09 \pm 0,02 \text{ mm}$ aufwiesen. Der Radius der Matrizenbohrung r_B beträgt $6,02 \text{ mm}$. Die Änderung der Höhe Δh sowie die dazu benötigte Kraft F werden direkt aus dem Kraft-Weg-Verlauf bei der Belastung bestimmt. Somit beträgt der errechnete E-Modul $E = 111 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$. Dies befindet sich

innerhalb von Literaturwerten, welche den E-Modul für Vulkollan© zwischen 10^1 und 10^3 angeben [144].

Zur Ermittlung des Kompressionsmoduls wird Bereich II, in dem die Kompression stattfindet, herangezogen. Die Steigung der Kurve wird mit zunehmender Kraft größer. Dies stimmt mit Ergebnissen von ADAMS und GIBSON überein, nach denen der Widerstand gegen Kompression bei Elastomeren mit zunehmendem Druck ansteigt [140]. Bei einer Last von 2000 MPa (226 kN) beträgt die Höhenänderung 2 mm. Der Kompressionsmodul wird mit Formel (2) anhand von aus der Bestimmung des E-Moduls bekannten Größen berechnet [145].

$$K = \frac{p}{\frac{\Delta V}{V_0}} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta h}{h_0}} \quad (2)$$

Da der Kompressionsmodul nicht konstant, sondern abhängig vom vorliegenden Druck ist, wird der Kompressionsmodul über dem Druck in Bild 5 dargestellt. Weiterhin wird zur Integration in numerische Modelle die Poissonzahl ν bestimmt, welche nach Formel (3) von Elastizitäts- und Kompressionsmodul abhängt.

$$\nu = \frac{3 \cdot K - E}{6 \cdot K} \quad (3)$$

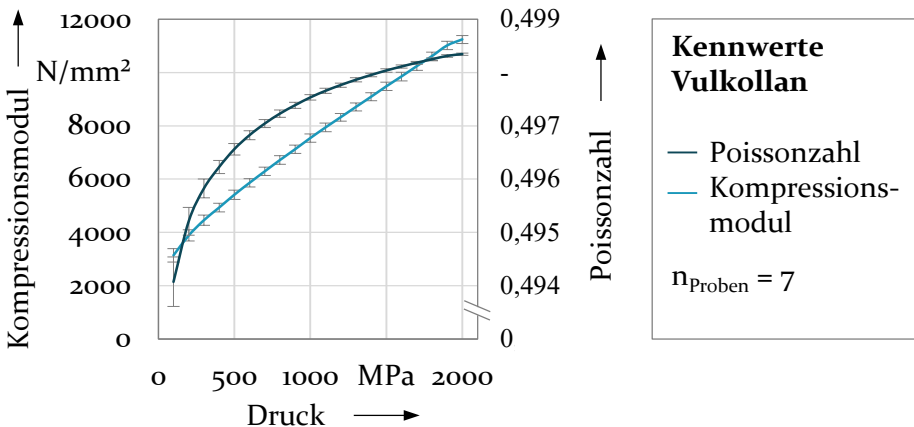


Bild 5: Poissonzahl und Kompressionsmodul von Vulkollan© in Abhängigkeit des hydrostatischen Drucks

Der Kompressionsmodul steigt linear mit dem hydrostatischen Druck an. Beim höchsten Druck von 2000 MPa liegt er bei 11240 MPa \pm 153 MPa. Die

Poissonzahl an diesem Punkt beträgt $0,498344 \pm 0,000023$. Dies ist in Übereinstimmung mit Literaturwerten, da die Poissonzahl von Elastomeren üblicherweise nahe 0,5 liegt [146].

4.2 Schmierstoffsystem

Wie im Stand der Technik beschrieben, wird zur Verringerung der tribologischen Beanspruchungen in der Kaltmassivumformung üblicherweise eine Zinkphosphatbeschichtung eingesetzt, da die auftretenden Kontaktdrücke zu hoch für Flüssigschmierstoffe sind [93]. Im Rahmen der Untersuchungen dieser Arbeit wird daher eine Zinkphosphatschicht in Kombination mit dem Schmiermittel Seife verwendet. Dieses Schmierstoffsystem wird häufig für Prozesse mit einer großen Oberflächenvergrößerung eingesetzt [94].

Zur numerischen Abbildung der Reibung werden Reibmodelle verwendet. Für die in der Massivumformung typischen hohen Kontaktdrücke ist das Reibfaktormodell geeignet, in welchem die Reibung über die Schubfließgrenze bestimmt wird [147]. Ein bewährter Laborversuch zur Bestimmung des Reibfaktors ist der Double-Cup-Extrusion (DCE) Test. Dieser Versuchsaufbau bildet die Kontaktbedingungen der Kaltmassivumformung insbesondere hinsichtlich der Kontaktnormalspannungen und Oberflächenvergrößerungen gut ab [148]. Das Versuchskonzept basiert auf einem kombinierten Napf-Vorwärts- und Napf-Rückwärtsfließpressen. In Abhängigkeit der Reibung resultieren auf der Ober- und Unterseite unterschiedliche Napfhöhen. Dieses Konzept ist in Bild 6 dargestellt. Der Reibfaktor wird über eine numerische Identifikation bestimmt. Es wird ein Simulationsmodell des DCE Tests erstellt und der Reibfaktor verwendet, bei dem das Napfhöhenverhältnis in Simulation und Experiment übereinstimmen.

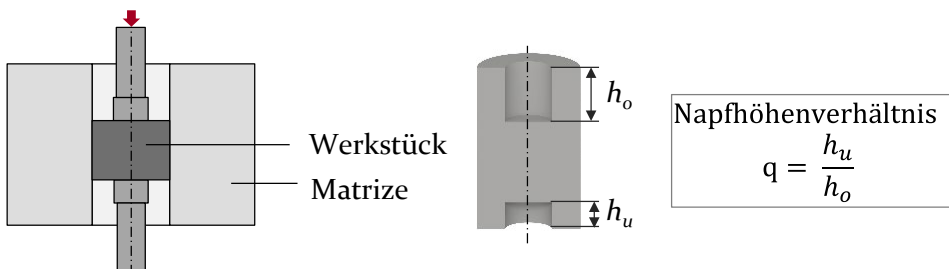


Bild 6: Versuchskonzept des DCE Tests

Für den Modellversuch werden die gleichen Matrizen- und Werkstückwerkstoffe sowie Schmiermittel wie in den Umformprozessen verwendet. Dies gewährleistet die Übertragbarkeit der tribologischen Bedingungen.

Der DCE-Test wird auf der Universalprüfmaschine Schenck Trebel RM400 durchgeführt. Bei Prüfung von sechs Proben tritt ein Napfhöhenverhältnis von $q = 0,380 \pm 0,004$ auf. Zur Identifikation des Reibfaktors wird ein numerisches Modell des Versuchs in Simufact.Forming aufgebaut und mit Reibfaktoren zwischen 0,01 und 0,08 simuliert. Wie in Bild 7 zu sehen ist, ist die beste Übereinstimmung mit einem Reibfaktor von 0,04 gegeben. Dieser wird daher für die numerischen Modelle dieser Arbeit verwendet.

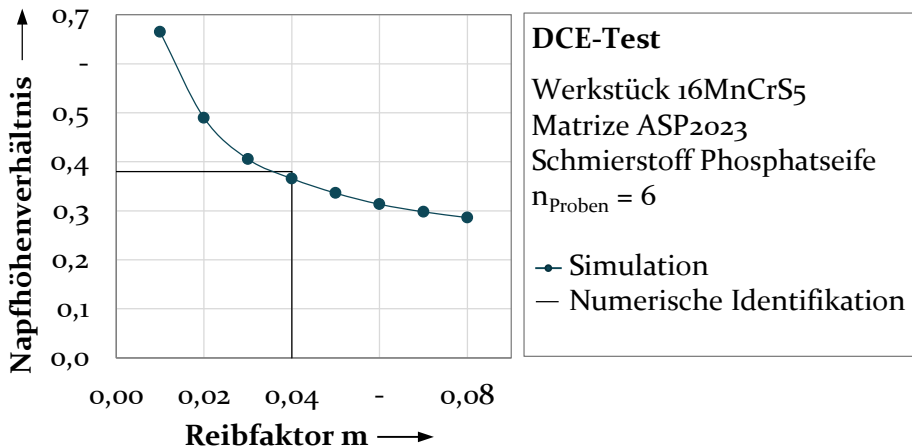


Bild 7: Ergebnisse der numerischen Identifikation des Reibfaktors

4.3 Anlagen

Zur Umformung und Werkstoffprüfung kommen eine Umformpresse der Firma Lasco sowie ein Hydropulser der Firma Zwick/Roell zum Einsatz. Die hydraulische Tiefziehpressen Lasco TSP 100 So besitzt eine Nennkraft von 1000 kN. Da es sich um eine zweifach wirkende Presse handelt, kann ein Auswerfvorgang in den Prozess integriert werden. Die Anlage zeichnet sich weiterhin durch eine große Steifigkeit der Gestelle sowie hohe Umformgeschwindigkeiten aus.

Für die dynamische Prüfung im Rahmen der Ermüdungsversuche wird der Hydropulser HA250 eingesetzt. Hierbei handelt es sich um eine servohydraulische Prüfmaschine, welche sich zur Werkstoffprüfung unter schwellender oder wechselnder Belastung eignet. Die Anlage bringt Kräfte bis zu 250 kN bei einem Maximalhub von 150 mm und einer maximalen Prüffrequenz von 180 Hz auf. Die Ermüdungsproben werden mit einem Keil-Probenhalter in Spannbacken geklemmt. Alternativ ist es möglich, ein Werkzeugsystem an den Spannbacken zu montieren. Die Einstellung des

Programmablaufs sowie Auswertung der Ergebnisse erfolgen in der an einem externen Rechner verfügbaren Software testXpert III von Zwick/Roell.

4.4 Verfahren zur Analyse der Bauteil- und Werkzeugeigenschaften

Zur Validierung des numerischen Modells ist ein Vergleich aus Messgrößen und numerisch ermittelten Werten notwendig. Hierzu wird bauteilseitig die Geometrie vermessen sowie die mechanischen Eigenschaften über eine Härteprüfung bestimmt. Um auch die Werkzeugbelastung messtechnisch zu erfassen, werden die auftretenden Dehnungen über Dehnungsmessstreifen ermittelt. Die eingesetzten Verfahren werden im Folgenden genauer beschrieben.

Vermessung der Bauteilgeometrie

Zur Bestimmung der Geometrie der Bauteile kommt das optische Messsystem ATOS der Firma GOM GmbH zum Einsatz. Dieses ist in der Lage, durch Streifenlichtprojektion ein dreidimensionales digitales Abbild eines Bauteils zu erstellen. Das zu vermessende Werkstück wird dabei mit einer Lackschicht versehen, um Fehlstellen in der Messung durch Spiegelung an der metallischen Oberfläche zu vermeiden. Die Dicke der Lackschicht wird durch einen geometrischen Offset aus dem Messergebnis herausgerechnet. Um die richtige Orientierung von Ober- und Unterseite des Bauteils zueinander zu gewährleisten, werden Referenzpunkte genutzt und deren Position zueinander bestimmt. Die Auswertung der Messung erfolgt in der Software GOM Inspect 2018. Es ist ein direkter Vergleich von dreidimensionalen Modellen aus der Vermessung und einer Simulation möglich. Zudem kann die Bauteilgeometrie in Schnittebenen verglichen oder als Koordinaten ausgegeben und extern verarbeitet werden.

Härtemessung

Die Härte eines umgeformten Bauteils stellt aufgrund der auftretenden Kaltverfestigung ein Maß für den vorliegenden Umformgrad dar. Zum Vergleich der numerisch ermittelten Umformgradverteilung mit der vorliegenden Bauteilhärte wird diese durch eine instrumentierte Eindringprüfung nach DIN EN ISO 14577-1 bestimmt [149]. Es wird mit dem Härtemessgerät Fischerscope HM2000 eine Diamantpyramide in die Bauteiloberfläche eingedrückt und die Eindringhärte über das Messen der Eindringtiefe bestimmt. Diese wird anschließend nach dem in der Norm [149] beschriebenen Vorgehen in die gebräuchlichere Vickershärte umgerechnet. Für das Messverfahren ist eine glatte Bauteiloberfläche notwendig, weshalb die

Bauteile zuvor in der relevanten Schnittebene getrennt, in Epoxidharz eingebettet, geschliffen und poliert werden. Die Position der Messpunkte wird an einem externen Messrechner mithilfe eines programmierbaren Messstisches definiert. Der Abstand der Punkte zueinander sollte für Stahlwerkstoffe zur Vermeidung einer gegenseitigen Beeinflussung der Eindrücke mindestens das Fünffache der Diagonale des Abdrucks betragen. Im verwendeten Versuchsaufbau mit einer Prüfkraft von 500 mN beträgt der minimale Punktabstand damit 0,1 mm. Der tatsächliche Punktabstand wird als Kompromiss zwischen Auflösung der Ergebnisse und Messdauer gewählt und liegt zwischen 170 µm und 450 µm. Als Ergebnis liegt für jeden Messpunkt ein Härtewert vor. Zur Visualisierung werden diese mit einer Farbskala versehen und als Härteplot dargestellt.

Bestimmung der Werkzeugdehnung

Die elastische Deformation der Werkzeuge während der Umformung wird über Dehnungsmessstreifen ermittelt. Diese werden auf eine Werkzeugoberfläche geklebt, welche keinen Kontakt mit dem Werkstück hat, aber dennoch eine Dehnung erfährt. Der Vergleich der Beanspruchung ist damit nicht im höchstbelasteten Bereich möglich, jedoch an einem Vergleichspunkt zum Beispiel auf der Unterseite der Matrize. Dehnungsmessstreifen ermitteln die Dehnung über die Widerstandsänderung eines Messgitters bei Verformung [150]. Im Versuchsaufbau wird in einer sogenannten Viertelbrücke einer der vier Widerstände einer Wheatstoneschen Brückenschaltung durch den Dehnungsmessstreifen ersetzt. Bei Änderung des Widerstands am Dehnungsmessstreifen wird eine Brückenverstimmung, also ein Unterschied in der Eingangs- und Ausgangsspannung der Messbrücke, erzeugt. Diese wird über einen Verstärker als elektrische Spannung ausgegeben und anschließend in die Dehnung umgerechnet. Im Rahmen der Arbeit kommen Messstreifen vom Typ HBM 1-XY91-3/350 sowie HBM 1-XY11-3/350 zum Einsatz. Erstere haben ein Messfeld von 3 mm x 1,5 mm, letztere von 3 mm x 3,2 mm. Sie werden in Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Platzes auf die zu messenden Werkzeuge aufgeklebt. Um die Ergebnisse mit numerischen Daten zu vergleichen, wird nach dem Befestigen der Messstreifen deren exakte Position mithilfe des Mikroskops Leitz PMM 654 ermittelt.

4.5 Simulationsoftware Simufact.Forming

Da eine direkte Messung der Werkzeugbelastung in Umformprozessen nur an der Matrizenoberfläche außerhalb der Umformzone möglich ist, sind numerische Verfahren zur Bewertung der Werkzeugbelastung notwendig.

Hierfür wird die Software Simufact.Forming 15.0 eingesetzt, welche auf die Berechnung von Massivumformprozessen spezialisiert ist. Es lassen sich sowohl zwei- als auch dreidimensionale Modelle simulieren, wobei eine effiziente Berechnung auch bei Letzteren durch das Ausnutzen von zyklischen Symmetrien möglich ist. Die volumetrische Vernetzung erfolgt in Abhängigkeit der Verformung und geometrischen Kompliziertheit mit Tetraeder- oder Hexaederelementen, deren Größe über Verfeinerungsboxen lokal eingestellt werden kann. Weiterhin wird bei zu großer Dehnung eine Neuvernetzung zur Entzerrung der Elemente durchgeführt. Die Berechnung der Werkzeugbelastung ist sowohl gekoppelt, also gleichzeitig mit der Stoffflusssimulation, als auch entkoppelt in einer externen Simulation möglich. Die Materialdaten werden entweder aus der integrierten Datenbank entnommen oder mit manuellem Input erstellt. Hierbei besteht die Option, E-Modul und Querdehnzahl für Werkzeugwerkstoffe sowie temperatur- und dehnratenabhängige Fließkurven für Werkstückmaterialien zu hinterlegen. Im Postprocessing bietet Simufact.Forming eine Darstellung der Ergebnisse bereits während der Berechnung. Eine detaillierte Analyse von Ergebnisgrößen an definierten Positionen ist über den Einsatz von Partikeln, welche vor der Simulation an den relevanten Stellen eingefügt werden, möglich.

5 Analyse der Werkzeugbelastung bei der Umformung nicht-rotationssymmetrischer Bauteilgeometrien

Hohe Werkzeugbelastungen und daraus folgender Ermüdungsbruch sind wesentliche Hemmschwellen für die Etablierung von Kaltmassivumformprozessen für anspruchsvolle, unrunde Bauteilgeometrien. Daher ist das Ziel dieses Kapitels der Aufbau eines Verständnisses hinsichtlich der Werkzeugbeanspruchung in Matrizen mit nicht-rotationssymmetrischer Innenkontur. Zur numerischen Untersuchung dieser Beanspruchung wird ein Modellprozess genutzt. Es werden Anforderungen an den Prozess aufgestellt und je zwei Bauteil- sowie Werkzeuggeometrien abgeleitet. Anschließend wird ein numerisches Modell aufgebaut und anhand von Realversuchen validiert. Das validierte Modell wird genutzt, um den Spannungszustand zu analysieren. Neben Art und Richtung der vorliegenden Belastungen in Abhängigkeit der Geometrie ist insbesondere die Wirkungsweise der Vorspannung durch Armierungen von Interesse. Diese wird für verschiedene Armierungsaußengeometrien untersucht, um eine beanspruchungsgerechte Vorspannung von Matrizen mit nicht-rotationssymmetrischer Innenkontur zu ermöglichen. Abschließend werden auf Basis der durchgeführten Untersuchungen werkzeugseitige Herausforderungen bei der Umformung unrunder Bauteilgeometrien abgeleitet.

5.1 Prozesskonzept

Die Grundlage zur Untersuchung lokaler Werkzeugbelastungen infolge unrunder Geometrien bildet ein Modellprozess mit nicht-rotationssymmetrischem Bauteil- und Werkzeugquerschnitt. Die Bauteile sollen in einem einstufigen Kaltmassivumformprozess hergestellt werden. Zur Untersuchung der Vorspannungswirkung ist im zugehörigen Werkzeug eine Armierung vorzusehen. In der Kaltmassivumformung treten hohe Werkzeugbeanspruchungen von mehreren Tausend Megapascal auf. Um Belastungen in dieser Größenordnung zu erreichen, wird als Prozesskonzept Gesenkschmieden ohne Grat gewählt. Durch das Pressen von Material in eine geschlossene Form entstehen bei dieser Prozessklasse hohe Kontaktdrücke und Werkzeugbelastungen [151]. Es sollen sowohl unrunde Geometrien mit fließendem Übergang, als auch scharfe Übergänge zu lokalen Elementen untersucht werden. Daher werden ein ovales Bauteil und ein Bauteil mit

vier gleichmäßig angeordneten Funktionselementen hergestellt. Die Werkzeuge haben einen konstanten Querschnitt, um den Effekt der nicht-rotationssymmetrischen Geometrie losgelöst von axialen Belastungen an Querschnittsübergängen zu analysieren. Das Prozesskonzept und die hergestellten Bauteile sind in Bild 8 dargestellt.

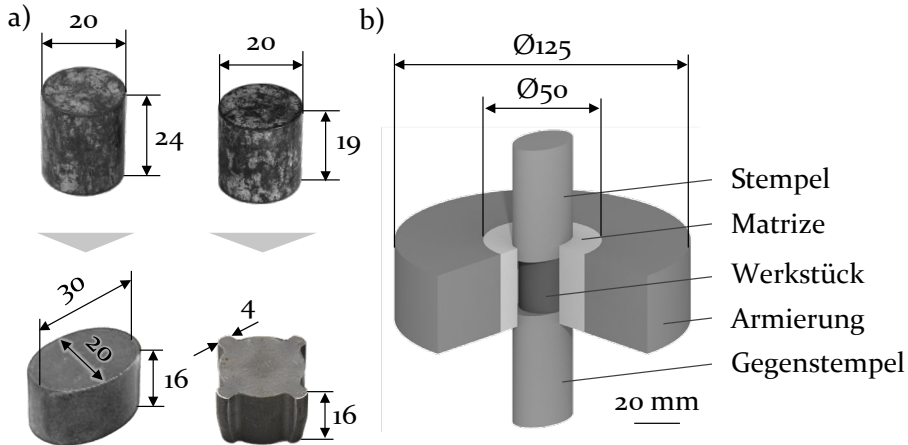


Bild 8: Modelprozess: a) hergestellte Bauteilgeometrien und b) Werkzeugaufbau am Beispiel der elliptischen Geometrie

Stempel, Gegenstempel und Matrizeninnenkontur besitzen jeweils den selben Querschnitt wie das umgeformte Bauteil. Die Bauteilabmessungen werden so gewählt, dass sie in einem ähnlichen Größenbereich zu industriell hergestellten Kaltumformteilen liegen und mit der Maximalkraft der verwendeten Presse Lasco TSP 100 So von 1000 kN herstellbar sind. Die elliptische Geometrie hat daher eine kurze Halbachse von 10 mm und eine lange Halbachse von 15 mm. Die zweite Geometrie hat einen Grunddurchmesser von 20 mm mit Funktionselementen mit einer Breite von 4 mm und einem Außendurchmesser von 28 mm. Zur Vergleichbarkeit der Geometrien haben beide dieselbe Höhe von 16 mm. Als Werkstückwerkstoff wird der in Kapitel 4 beschriebene Stahl 16MnCrS5 mit einer Zinkphosphatschicht und dem Schmiermittel Seife verwendet. Im Prozess wird der Rohling in die Matrize eingelegt und über den Gegenstempel axial positioniert. Durch Aufbringen einer Kraft über den Stempel wird das Bauteil in die formgebende Matrize gepresst. Diese ist aus dem pulvermetallurgischen Stahl ASP2023 hergestellt. Stempel und Gegenstempel sind aus ASP2030. Zur Vermeidung von Überlastbrüchen sowie der Analyse der Vorspannungswirkung wird die Matrize mit einem Übermaß von 3 % in einen Armierungsring aus 1.2344 eingeschrumpft. Die Außenabmaße von Matrize und Armierung werden anhand von ICFG-Richtlinien gewählt [16]. Die

Trennfuge zwischen Matrize und Armierung ist zylindrisch ausgeführt, um Änderungen am Armierungskonzept fertigungstechnisch leicht umsetzen zu können.

5.2 Aufbau und Validierung des Simulationsmodells

Die höchstbelasteten Bereiche im Werkzeuginneren sind nicht für Messungen mit Dehnungsmessstreifen zugänglich. Weiterhin sind die herrschenden Drücke zu groß, um sie mit Druckmessfolien ermitteln zu können. Demnach ist zur umfassenden Analyse der Werkzeugbelastung der Einsatz eines numerischen Modells notwendig. Dieses wird im Folgenden beschrieben und anhand von Realversuchen validiert.

Die Simulation wird in der Software Simufact.Forming 15.0 aufgebaut. Um eine hohe Anzahl verschiedener Werkzeugvarianten untersuchen zu können, wird ein entkoppeltes Modell mit separater Berechnung von Stofffluss und Werkzeugbelastung verwendet. Bei Änderungen an der Werkzeugaußenkontur, welche sich nicht auf das Bauteil auswirken, ist demnach nur eine neue Simulation der Werkzeugbelastung notwendig. Durch den entkoppelten Ansatz werden Rückwirkungen zwischen Werkzeugauffederung und Stofffluss nicht berücksichtigt. Diese haben jedoch einen geringen Einfluss auf die Werkzeugbelastung [40]. Die Werkzeuggeometrien nach Bild 8 werden demnach als starre Körper in der Stoffflusssimulation verwendet. Die plastische Verformung des Werkstücks wird anhand der in Kapitel 4 gezeigten Fließkurve modelliert. Das Werkstück wird dabei wie in Bild 9 a) gezeigt mit Hexaedern bei einer Kantenlänge von 0,6 mm sowie einer Verfeinerung der Außenkontur auf 0,3 mm ab einem Radius von 9 mm vernetzt. Dies ermöglicht eine genauere Abbildung der Funktionselemente und Außenkontur der Ellipse. Die Vernetzung mit Hexaedern ist für Werkstücke in der Umformtechnik etabliert, um robuste Modelle bei geringer Rechendauer zu gewährleisten [152]. Als Reibfaktor wird gemäß den Ergebnissen aus Kapitel 4 ein Wert von $m = 0,04$ angesetzt. Die Werkzeug-, Werkstück- und Umgebungstemperatur liegt bei 20°C. Die Umformung wird durch Verfahren des Stempels bis zu einem Abstand von 16 mm zum Gegenstempel definiert. Hierdurch entsteht eine Kraft des Stempels auf das Werkstück, welches sich plastisch verformt und den Kontaktdruck an die umliegenden Werkzeuge weitergibt. Dieser Kontaktdruck wird im nächsten Schritt in die Werkzeugbelastung überführt und der Einfluss auf die Werkzeuge berechnet.

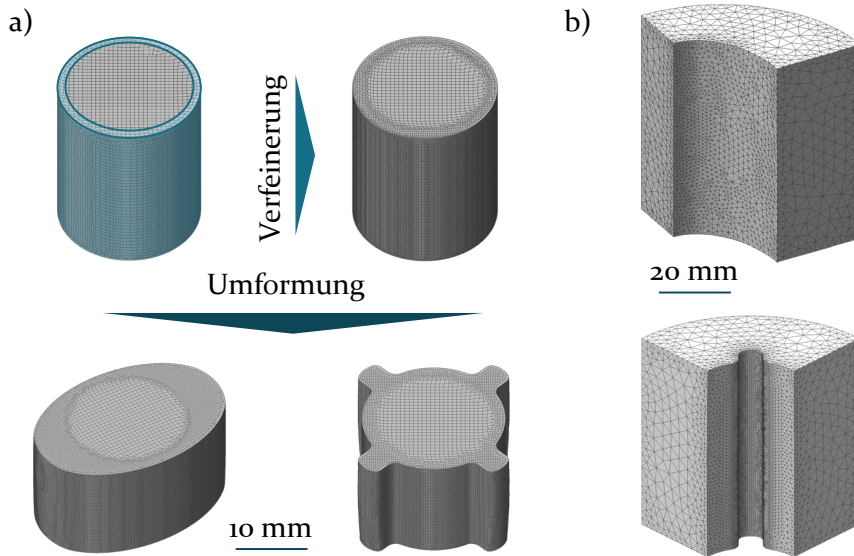


Bild 9: Vernetzung der a) Werkstücke und b) Werkzeuge in der Simulation

Wegen der zyklischen Symmetrie der Werkzeuge ist die Simulation eines 90° Segments ausreichend. Es werden Matrize und Armierung simuliert, da die Matrize das ermüdungskritische Element im Prozess darstellt und der Armierungsring durch eine Vorspannung die vorliegenden Beanspruchungen beeinflusst. Die Vorspannung wird durch eine physikalische Überlappung von $0,075$ mm eingestellt, welche einem relativen Haftmaß von 3% entspricht. Zur Vermeidung einer axialen Verschiebung des Werkzeugsystems werden Halteebenen auf der Ober- und Unterseite eingesetzt. Die Werkzeuggeometrien werden wie in Bild 9 b) gezeigt mit einer maximalen geometrischen Abweichung von $0,01$ mm mit Tetraederelementen diskretisiert. Dieser Elementtyp ist geeignet für die Vernetzung anspruchsvoller Geometrien und wird daher häufig für Werkzeuge eingesetzt [152].

Um realitätsnahe Ergebnisse der numerischen Modelle zu gewährleisten, wird eine Validierung durchgeführt. Hierzu werden bauteil- und prozessseitige Zielgrößen zwischen Experiment und Simulation verglichen [153]. Als Ergebnisse der Stoffflusssimulation werden Kraft-Weg-Verläufe, Bauteilgeometrien sowie Umformgrad- und Härteverteilungen untersucht. Zur Validierung der Werkzeugbelastungssimulation werden Dehnungen im Prozess an der während der Umformung zugänglichen Matrizenunterseite mithilfe von Dehnungsmessstreifen ermittelt und den numerischen Ergebnissen gegenübergestellt. Bild 10 zeigt den Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe. Bei $n = 4$ Wiederholversuchen liegen im Experiment geringe mittlere

Standardabweichungen von 4,7 kN für die ovale Geometrie und 2,5 kN für die elliptische Geometrie vor.

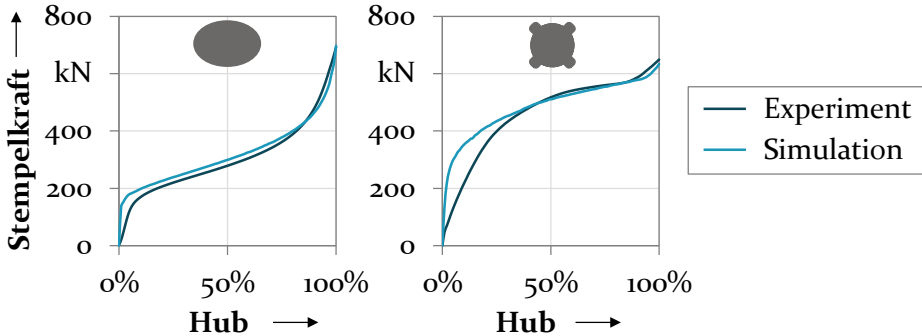


Bild 10: Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe aus Simulation und Experiment

Für beide Geometrien ist sowohl in Simulation als auch Experiment zunächst ein steiler Anstieg des Kraft-Weg-Verlaufs im Bereich der elastischen Verformung zu sehen. Dieser ist in der Simulation etwas stärker ausgeprägt, da experimentell auch im numerischen Modell nicht berücksichtigte Komponenten wie Werkzeugplatten und das Maschinengestell belastet sind. Anschließend steigt der Kraft-Weg-Verlauf flacher im Bereich der plastischen Umformung. Bei der Geometrie mit Funktionselementen wird im Vergleich zur Ellipse bereits bei geringerer Verformung eine höhere Kraft aufgebracht. Während bei der elliptischen Geometrie zunächst nur Kontakt zur Matrizenwand an der kurzen Ellipsenachse vorliegt, ist der Materialfluss in allen Bereichen zwischen den Funktionselementen von Beginn an gehemmt. Hierdurch besteht ein höherer Widerstand gegen die Umformung, welcher den früheren Kraftanstieg erklärt. Am Ende der Prozesse nimmt die Kraft wegen größerer Verfestigung und Reibung aufgrund einer höheren Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück erneut stärker zu. Die Verläufe der Kraftkurven sind in guter Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation. Die Maximalkraft, welche die höchsten Werkzeugbelastungen erzeugt, beträgt für die Ellipse experimentell 691 kN und simulativ 697 kN. Bei der Geometrie mit Funktionselementen liegt der Kraftbedarf im Versuch bei 649 kN und in der Simulation bei 634 kN. Dies entspricht relativen Abweichungen von 0,9 % und 2,3 %. Das numerische Modell bildet den Kraftbedarf zur Umformung sehr gut ab.

Zur experimentellen Bestimmung der Bauteilgeometrie wurden die hergestellten Werkstücke mit einem topometrischen 3D-Sensor der Firma ATOS vermessen. Die Geometrien werden anhand eines Querschnittes in der

Bauteilmitte in Bild 11 verglichen. Diese Schnittposition wird gewählt, da die Werkzeugbelastung auf der mittleren Bauteilhöhe am größten ist. Wegen der Symmetrie wird zur besseren Sichtbarkeit nur ein Viertel des jeweiligen Querschnitts gezeigt.

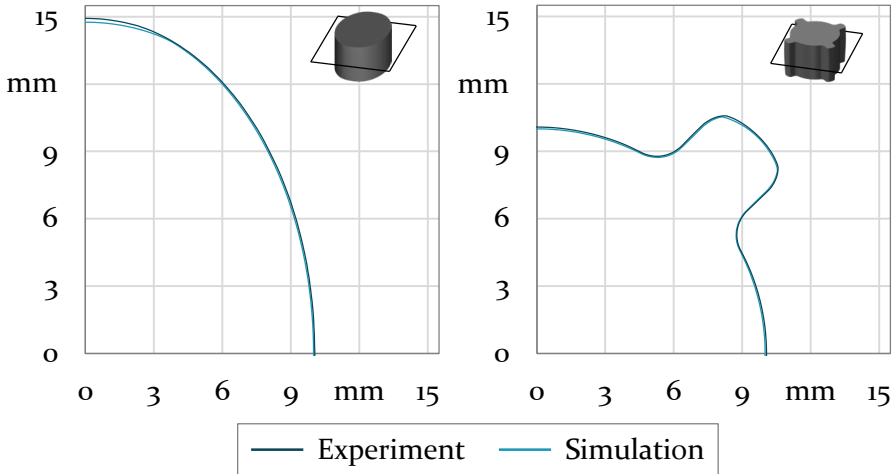
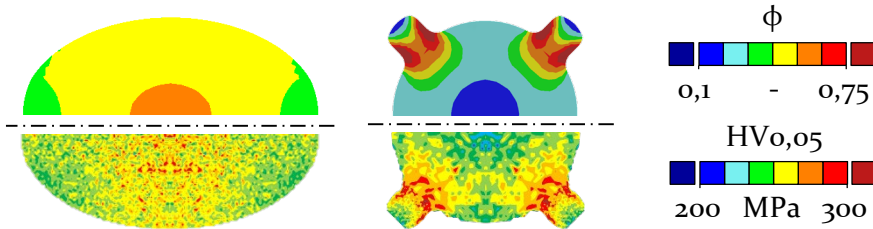


Bild 11: Vergleich der Bauteilgeometrien aus Simulation und Experiment

Die gemessene elliptische Geometrie weicht an der Nebenachse um 0,07 mm vom numerischen Wert von 10 mm ab. An der Hauptachse ist experimentell ein um 0,12 mm größerer Radius vorhanden. Die relativen Abweichungen betragen 0,7 % und 0,8 %. Bei der zweiten Geometrie liegt im Bereich zwischen den Funktionselementen experimentell ein um 1,1 % oder 0,06 mm größerer Radius vor. Bei der Füllung des Funktionselements beträgt die maximale Abweichung im horizontalen Schnitt 0,05 mm. Die Geometrien sind in sehr guter Übereinstimmung, wobei minimale Unterschiede durch die in der Simulation nicht berücksichtigte Werkzeugauffederung zu erklären sind. Zusätzlich zu den Schnittgeometrien wurde die Höhe der Bauteile vermessen. Diese beträgt in der Simulation den Nennwert von 16 mm und stimmt experimentell mit 15,94 mm (Oval) und 16,07 mm (Funktionselemente) sehr gut überein.

Neben der Geometrie ist die Verfestigung der Bauteile für die an das Werkzeug weitergegebene Belastung entscheidend. Da mit einer Kaltverfestigung bei der Umformung sowohl die Bauteilhärte als auch der Umformgrad zunimmt, können diese Größen qualitativ miteinander verglichen werden [152]. Hierfür wird ein Querschliff in der Bauteilmittte erstellt und die Härteverteilung über eine instrumentalisierte Eindringprüfung bestimmt. Der Vergleich der so ermittelten Härte mit der numerischen Umformgradverteilung ist in Bild 12 dargestellt.



Härtemessung

- Fischerscope HM2000
- Prüfkraft 500 mN
- Haltedauer 10 s
- Schnitt in Bauteilmitte

Punktabstand

- n_{Oval} 200 μm
- $n_{\text{Funktionselemente,Mitte}}$ 450 μm
- $n_{\text{Funktionselemente,Au\ss en}}$ 170 μm

Bild 12: Vergleich der experimentell ermittelten Härteverteilung mit der numerisch ermittelten Umformgradverteilung

Der Bereich größter Verfestigung der Ellipse befindet sich im Zentrum des ovalen Bauteils. Während das Material im äußeren Bereich unter geringer plastischer Verformung nach außen verschoben wird, erfährt die Bauteilmitte eine höhere plastische Dehnung, da Material von dort verdrängt und zur Seite umgelenkt wird. Bei der zweiten Bauteilgeometrie liegen lokal höhere Umformgrade am Einlauf zu den Funktionselementen vor. Hier wird das Material stark umgelenkt, um die Formfüllung zu gewährleisten. Im Bauteilinneren liegt dagegen ein geringer Umformgrad vor, da die Materialbereitstellung stärker von den direkt an die Funktionselemente angrenzenden Gebieten kommt. Die beschriebenen Verläufe sind sowohl in der Härte- als auch Umformgradverteilung zu sehen. Es ist demnach eine gute Übereinstimmung der Kaltverfestigung zwischen Simulation und Experiment gegeben.

Zum Vergleich werkzeugseitiger Ergebnisgrößen werden in Bild 13 die Ergebnisse einer Dehnungsmessung der Werkzeugbelastungssimulation gegenübergestellt. Es werden Dehnungsmessstreifen an der Matrizenunterseite in den am weitesten von der rotationssymmetrischen Geometrie abweichenden Bereichen aufgebracht. An diesen Positionen der Ellipsenhauptachse und der Rückwand der Funktionselemente werden die höchsten messbaren Zugspannungen in tangentialer Richtung erwartet. Die durch die Armierung aufgebrachte Vorspannung wird dabei nicht berücksichtigt, da die Dehnungsmessstreifen erst nach dem Armierungsvorgang aufgebracht werden können. Die Standardabweichung der Messungen ist mit 25 $\mu\text{m}/\text{m}$ für die ovale Geometrie und 58 $\mu\text{m}/\text{m}$ für die Geometrie mit

Funktionselementen bei $n = 4$ Wiederholversuchen gering und wird daher nicht in den Graphen angezeigt.

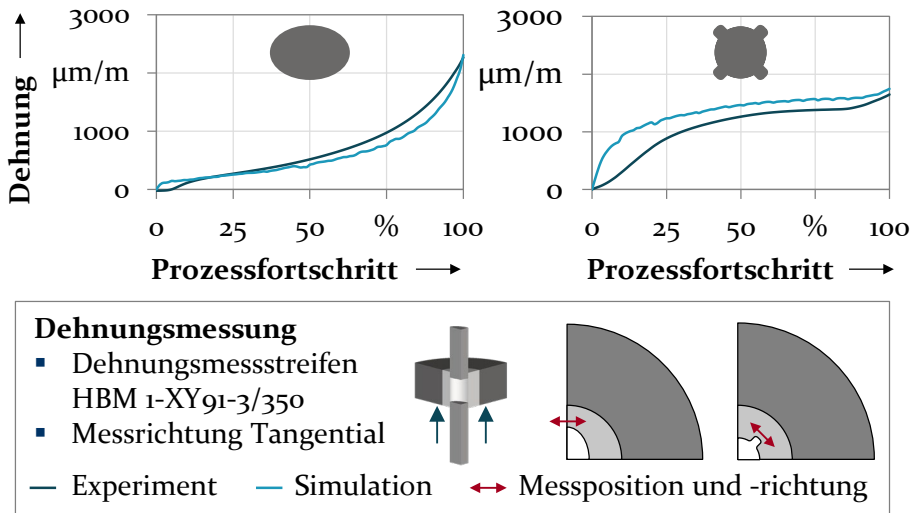


Bild 13: Vergleich der Werkzeugdehnungen zwischen Simulation und Experiment

In beiden Dehnungsmessungen liegen über den Prozess ansteigende Verläufe vor. Die positiven Dehnungen zeigen, dass in den von der rotations-symmetrischen Geometrie abgesetzten Bereichen Zugspannungen entstehen. Während die Dehnungsverläufe bei der elliptischen Geometrie sehr nah beieinanderliegen, ist für die Geometrie mit Funktionselementen zu Prozessbeginn ein stärkerer Anstieg der numerischen Dehnungen im Vergleich zum Experiment zu sehen. Diese Abweichung ist vergleichbar zu dem bei den Kraft-Weg-Verläufen aufgetretenen Verhalten. Für die Werkzeugbelastung sind insbesondere die höchsten Dehnungen zu Prozessende relevant, da diese in Kombination mit der Vorspannung entscheidend für die Werkzeugermüdung sind. In der ovalen Geometrie liegen die höchsten Dehnungen experimentell bei $2267 \mu\text{m/m}$ und numerisch bei $2314 \mu\text{m/m}$. In der Geometrie mit Funktionselementen sind die maximalen Werte gemessen $1646 \mu\text{m/m}$ und simuliert $1749 \mu\text{m/m}$. Die relativen Abweichungen betragen $2,1 \%$ und $6,3 \%$. Insbesondere die Werkzeugdehnung zu Prozessende zeigt eine gute Übereinstimmung. Das numerische Modell ist damit zur Analyse der kritischen Werkzeugbeanspruchungen qualifiziert.

5.3 Analyse des Beanspruchungszustands der Matrize

In diesem Abschnitt wird die Werkzeugbelastung der ermüdungskritischen Matrizen mithilfe der validierten Simulation analysiert. Die Beanspruchung entsteht durch den Kontaktdruck in der Wirkfuge zwischen Werkstück und Werkzeug. Dieser führt zu Verschiebungen und folglich mechanischen Spannungen in den Werkzeugen. Dem entgegen wirkt die Vorspannung aus der Armierung. Dieser Sachverhalt wird in Bild 14 anhand des höchstbelasteten Querschnitts in der Mitte der Umformzone veranschaulicht. Zur Verdeutlichung der auftretenden Effekte wird die Matrizen- deformation um einen Faktor 50 skaliert.

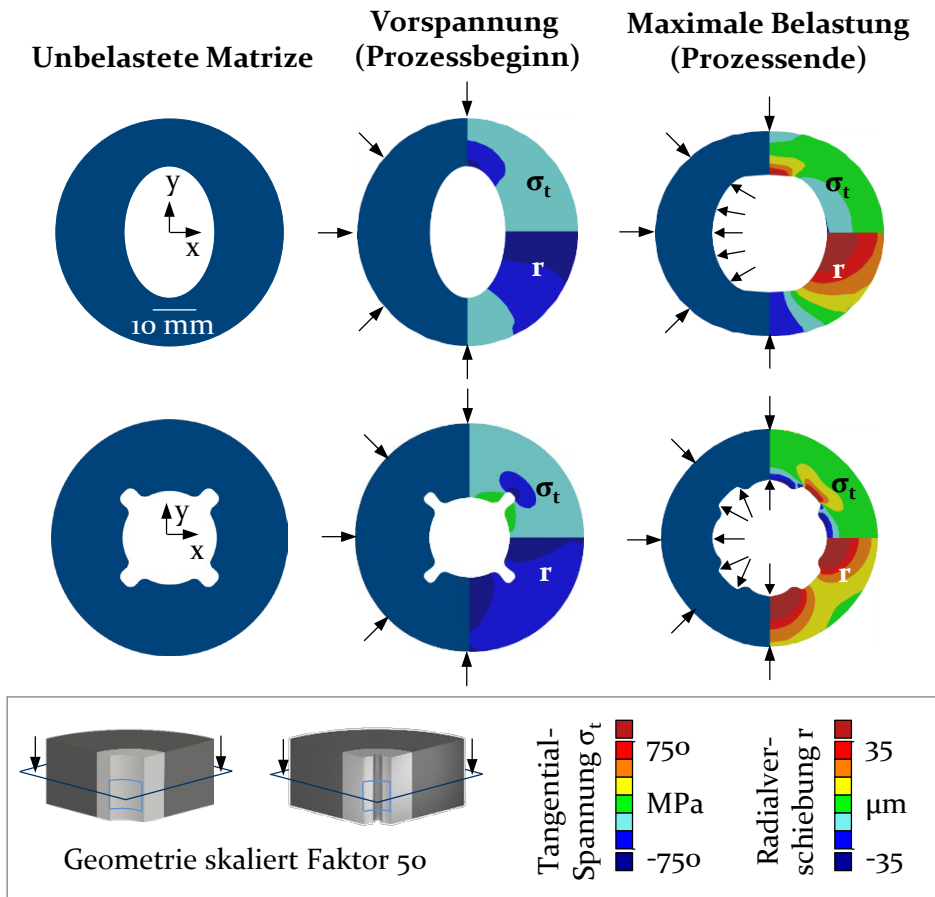


Bild 14: Entstehung der Werkzeugbelastung

Bereits in der Vorspannung führt die unrunde Matrizeninnengeometrie zu ungleichmäßigen Verschiebungen und Spannungen. In der elliptischen Geometrie wird der Bereich an der Nebenachse deutlich stärker nach Innen

verschoben als an der Hauptachse. Dies führt zu tangentialen Druckspannungen an der Innenwand des weniger deformierten Bereichs. Der gleiche Effekt tritt in der Geometrie mit Funktionselementen auf. Die innenliegenden Bereiche zwischen den Funktionselementen werden stärker radial verschoben, sodass am Funktionselement eine tangentielle Druckspannung entsteht. Bei der maximalen Werkzeugbelastung am Prozessende kehrt sich der Spannungszustand um. Durch den Innendruck auf die Matrize wird diese nach außen verschoben, wobei die Radialverschiebung an der kurzen Ellipsenachse und zwischen den Funktionselementen maximal ist. Die Bereiche an der Ellipsenhauptachse und der Rückwand der Funktionselemente werden hierdurch auseinandergezogen, was zu einer tangentialen Zugspannung führt. Bei jeder Umformung wird demnach die elliptische Innengeometrie von einer schmäleren zu einer breiteren Ellipse gedehnt und analog die Kavitäten für Funktionselemente in tangentialer Richtung zusammen und auseinander gedrückt. Dies führt zu einer wechselnden Zug-Druck-Belastung mit hoher Amplitude und Zugspannungsanteil, welcher bei Kaltumformwerkzeugen mit hochfesten Materialien besonders kritisch für Ermüdungsversagen ist [74]. In der elliptischen Geometrie betrifft dies durch die zyklische Symmetrie zwei stark belastete Bereiche am jeweiligen Ende der Ellipsenhauptachse. In der zweiten Geometrie liegen vier kritische Bereiche an den jeweiligen Funktionselementen vor.

Eine Analyse der richtungsabhängigen Spannungskomponenten ist in Bild 15 dargestellt. Die beschriebenen tangentialen Spannungen stellen die einzigen Zugspannungen im Prozess dar. In radialer Richtung liegen Druckspannungen in den Bereichen der kurzen Ellipsenachse und zwischen den Funktionselementen vor. Diese Belastungen sind eine Folge des Kontaktdrucks des Werkstücks, welcher nach außen auf die Werkzeuginnenwand wirkt. Zug- und Druckbeanspruchungen treten in voneinander getrennten Bereichen auf. Diese werden im Folgenden als Zugspannungs- und Druckspannungsbereiche bezeichnet. Druckbelastungen liegen dort vor, wo die Matrizeninnenkontur der rotationssymmetrischen Form des Bauteilrohrlings am nächsten liegt. Zwischen den Funktionselementen und an der kurzen Ellipsenachse sind demnach Druckspannungsbereiche angeordnet. An diesen Stellen liegen auch in tangentialer Richtung keine Zugbelastungen vor. Diese sind an den von der Kreisform abweichenden Bereichen an der Ellipsenhauptachse und der Rückwand der Funktionselemente konzentriert. In diesen Zugspannungsbereichen ist der Belastungszustand durch tangentialen Zug gekennzeichnet, wobei keine nennenswerten Radialbeanspruchungen auftreten.

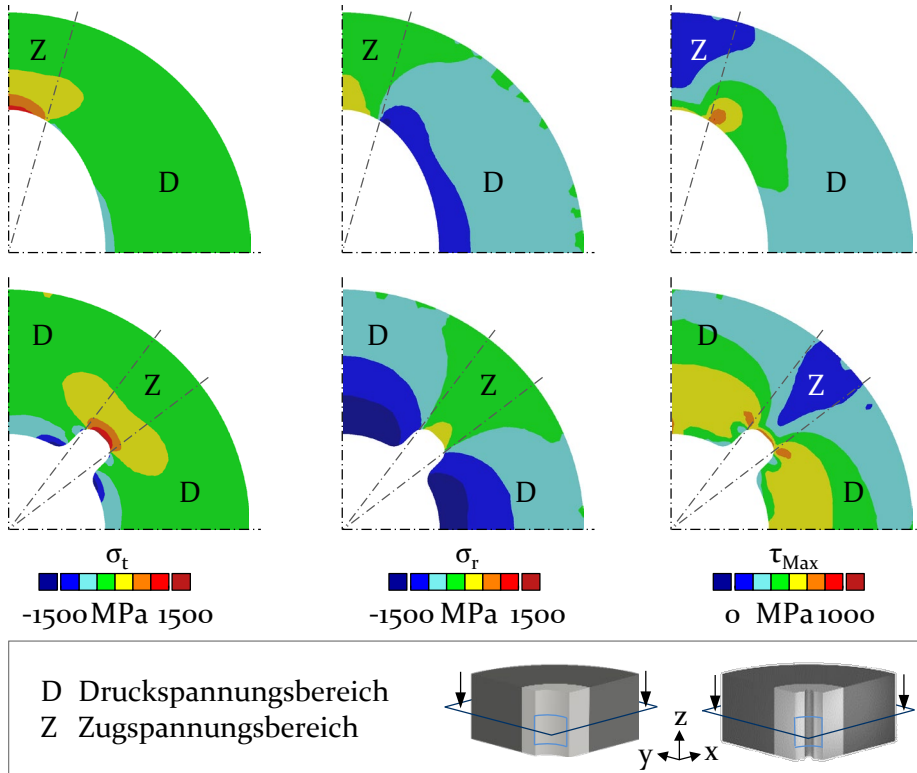


Bild 15: Werkzeugbelastung am Prozessende und Einteilung in Zugspannungs- und Druckspannungsbereiche

Beide Bereiche bilden Herausforderungen für die Prozessführung. Die wechselnden Tangentialbelastungen im Zugspannungsbereich begünstigen Ermüdungsversagen. Hohe Kontaktdrücke, wie sie im Druckspannungsbereich vorliegen, führen zu verstärktem Werkzeugverschleiß [56]. Weiterhin beeinflusst die ungleichmäßige Radialverschiebung, wie in Bild 14 gezeigt, die Maßhaltigkeit der hergestellten Bauteile. Zusätzlich sind am Übergang von Zug- und Druckspannungsbereichen Schubbeanspruchungen vorhanden. Eine Schubspannung ist im Gegensatz zu einer Normalspannung parallel zur Schnittebene des betrachteten Elements ausgerichtet. Eine derartige Belastung würde zu einer Drehung führen, wenn keine Anbindung zu weiteren Elementen vorläge. In zusammenhängenden Bauteilen führen Schubdehnungen deshalb zu einer Winkelverzerrung. Da Schubbelastungen die Einleitung von Mikrorissen begünstigen [59], sind sie potentiell kritisch für das Ermüdungsversagen. Die Entstehung der Schubbeanspruchung im Modellprozess wird daher in Bild 16 genauer un-

tersucht. Um die Winkelverzerrung infolge der Schubspannungen zu visualisieren, wird in der Simulation ein Partikelfeld mit Abmessungen von 1 mm x 1 mm in der elliptischen Geometrie und 1 mm x 1,6 mm bei den Funktionselementen über den Bereich der größten Schubbelastung gelegt.

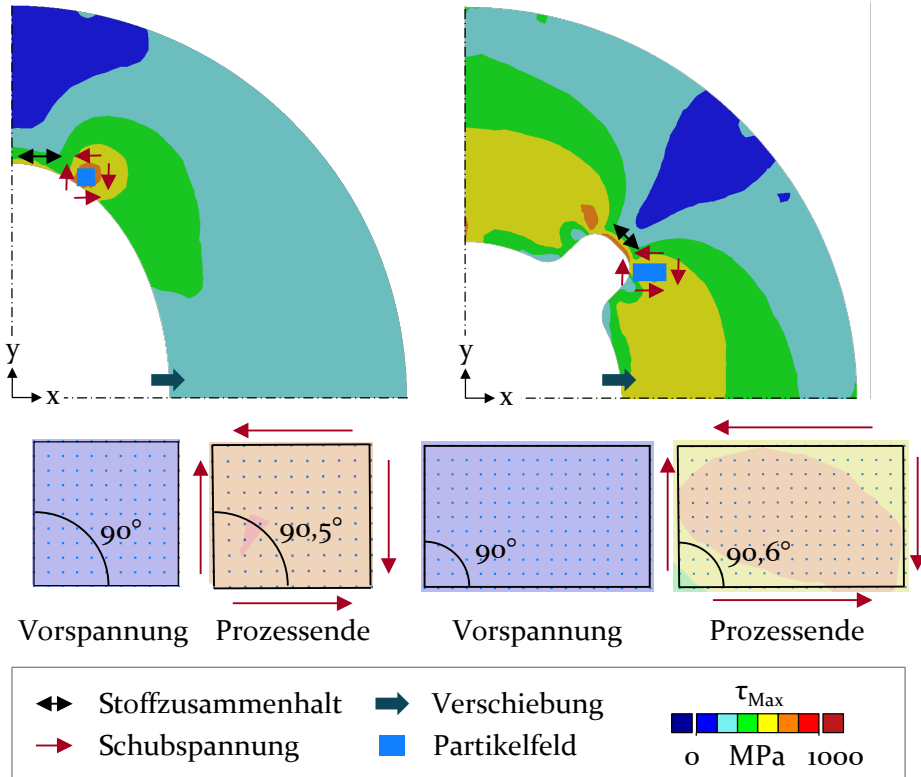


Bild 16: Entstehung der Schubspannungen

Während das Partikelfeld zu Prozessbeginn mit einem Kantenwinkel von 90° angelegt ist und in der Vorspannung nicht verzerrt wird, vergrößert sich der Winkel zu Prozessende auf $90,5^\circ$ (Oval) und $90,6^\circ$ (Funktionselemente). Diese Winkelverzerrung wird durch Schubbeanspruchungen am Übergang der Zug- und Druckspannungsbereiche ausgelöst. Die großen Radialverschiebungen im Druckspannungsbereich bewirken an der unteren Kante der Partikelfelder eine Schubspannung. Im Druckspannungsbereich kann diese durch eine Verschiebung in x-Richtung abgebaut werden. In direkter Nähe zum Zugspannungsbereich ist dies jedoch nicht möglich, da in x-Richtung ein Stoffzusammenhalt an der Ellipsenhauptachse und den Funktionselementen besteht. Entsprechend kann nur die untere Kante des Partikelfelds in x-Richtung verschoben werden, was zu einer Vergröße-

rung des Kantenwinkels und damit zu Schubdehnungen führt. Die Werkzeugbelastungen sind demnach durch Zug- und Druckspannungsbereiche sowie Schubspannungen an deren Übergang gekennzeichnet.

Die Höhe der Spannungen in den Bereichen ist abhängig von der Bauteilgeometrie. Als Maß für den Grad der Unrundheit wird daher im Folgenden das Aspektverhältnis der elliptischen Innenkontur variiert und die Vorspannung und die maximal auftretende Beanspruchung im Zugspannungsbereich sowie die maximalen Schubspannungen zu Prozessende ausgewertet. Hierzu wird die Ellipsenhauptachse bei 30 mm beibehalten und die Ellipsennebenachse auf den Faktorstufen 10 mm, 15 mm, 20 mm und 25 mm variiert. Dies ermöglicht die Analyse von Aspektverhältnissen von 3:1, 2:1, 3:2 und 6:5. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird die Ausgangshöhe des Werkstücks jeweils so angepasst, dass die Endhöhe wie in der bisher untersuchten Variante immer 16 mm beträgt. Die Ergebnisse sind in Bild 17 dargestellt.

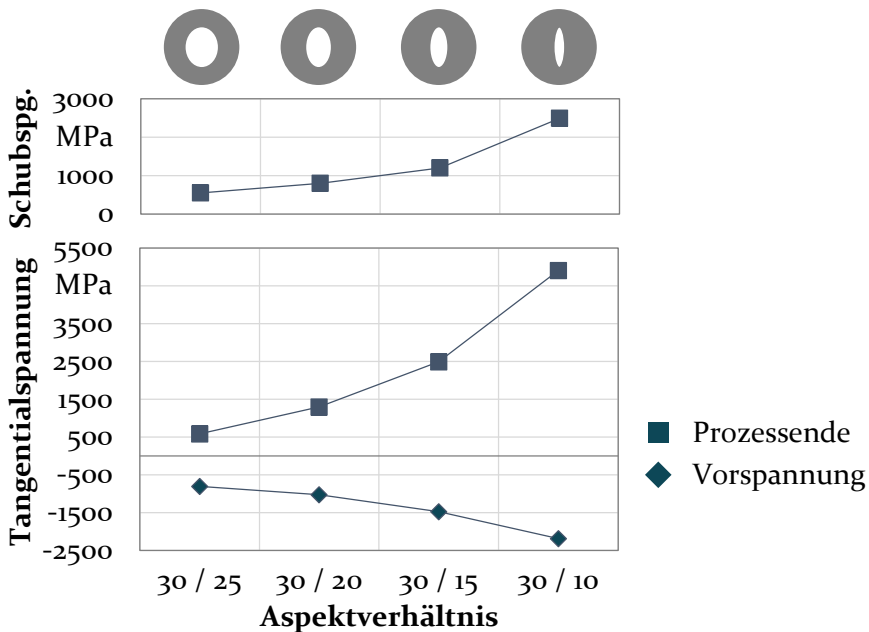


Bild 17: Werkzeugbeanspruchung in Abhängigkeit des Aspektverhältnisses der Ellipse

Mit größerem Aspektverhältnis besteht eine höhere Unrundheit und damit ein stärkerer Einfluss auf die Werkzeugbeanspruchung. Dies betrifft sowohl die maximale Vorspannung, als auch die Zug- und Schubspannungen zu Prozessende. Die Vorspannung nimmt betragsmäßig von -809 MPa für ein Aspektverhältnis von 30/25 auf -2191 MPa für 30/10 zu. Wie bereits in den grundlegenden Untersuchungen des Spannungszustands erkannt

wurde, übertreffen die im Prozess entstehenden Beanspruchungen infolge der unrunder Innenkontur die erhöhte Vorspannung. Aus diesem Grund nimmt die maximale Schubspannung von 547 MPa für 30/25 auf 2491 MPa für 30/10 und die kritische Zugspannung von 583 MPa auf 4907 MPa zu. Dieser hohe Wert ist in der Praxis nicht erreichbar, da die statische Festigkeit des Matrizenwerkstoffs gemäß Abschnitt 4.1.2 mit etwa 2900 MPa deutlich geringer ist. Beim Aspektverhältnis von 30/20 treten Zugspannungen von 1298 MPa auf, welche klar unterhalb der statischen Festigkeit liegen, jedoch dennoch potentiell kritisch hinsichtlich Ermüdungsversagen sind. Diese Geometrie wird daher als Basis für weitere Untersuchungen verwendet. Zunächst wird im folgenden Abschnitt der Einfluss einer Vorspannung durch Armierungen auf den Spannungszustand umfassend analysiert.

5.4 Analyse der Armierungswirkung

Das Einpressen von Matrizen in Armierungsringe induziert eine tangentielle Druckvorspannung. Bestehende Auslegungsrichtlinien basieren auf Werkzeugen für das Vollvorwärtsfließpressen mit rotationssymmetrischen Geometrien [16]. Für unrunde Geometrien sind keine detaillierten Auslegungsrichtlinien bekannt. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Armierungswirkung bei den unrunder Geometrien des Modellprozesses untersucht. Neben dem Vergleich der Beanspruchungen mit und ohne Armierung werden zur Erhöhung des Prozessverständnisses Armierungen mit unterschiedlichen Außenkonturen untersucht. Bild 18 zeigt die Tangentialspannung in armierten und nicht armierten Werkzeugen. Bei einer Vorspannung durch eine Armierung erfahren die von der Kreisform abweichenden Bereiche die größte Druckspannung. Die Beanspruchung wird gleichmäßig über die gesamte Matrizenhöhe eingebracht. Die Armierung ist mit Zugspannungen beansprucht, welche von innen nach außen abnehmen. Zu Prozessende sind in der Umformzone armierter Matrizen die in Abschnitt 5.3 beschriebenen Zug- und Druckspannungsbereiche vorzufinden. Zugspannungen treten dabei an den von der Kreisform abweichenden Stellen auf, welche zuvor die höchste Vorspannung erfahren hatten. Bei nicht armierten Matrizen ist der Ort der größten Zugbeanspruchung derselbe. Der Betrag der Spannung ist jedoch höher, da die Zugbelastung nicht durch eine Vorspannung verringert wird. Weiterhin sind nicht nur in der Umformzone Zugbeanspruchungen vorhanden, sondern über der gesamten Höhe des Werkzeugs.

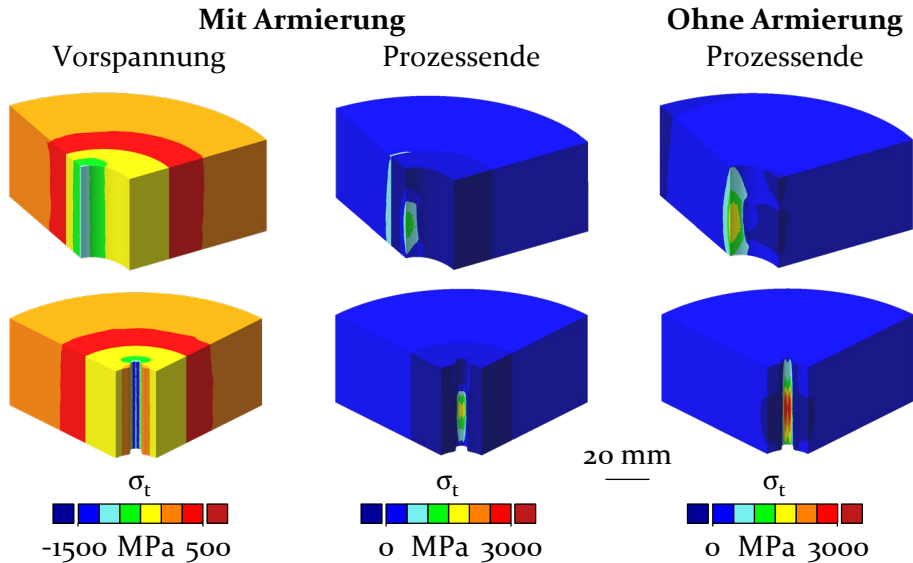


Bild 18: Tangentialspannungen von armierten und nicht armierten Werkzeugen

Es lässt sich schließen, dass eine Armierung bei nicht-rotationssymmetrischen Innengeometrien die größte Vorspannung am Ort der maximalen Prozessbeanspruchung aufbringt. Mit dem verwendeten Haftmaß ist sie jedoch nicht ausreichend, um die Zugspannungen vollständig zu kompensieren. Eine Erhöhung des Haftmaßes würde zu einer höheren Druckvorspannung führen. Dies ist jedoch einerseits oft teuer, da für sehr große Vorspannungen Bandarmierungen benötigt werden. Andererseits ist das Haftmaß durch die Druckfestigkeit der Matrizen und die Zugfestigkeit der Armierung begrenzt. Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Vorspannung ist die Verwendung eines größeren Außendurchmessers der Armierung. Bei rotationssymmetrischen Anwendungen wird das vier- bis sechsfache des Matrizeninnendurchmessers empfohlen, da bei einer weiteren Vergrößerung die Wirkung des höheren Durchmessers nachlässt [16]. Die Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auf unrunde Geometrien wird im Folgenden untersucht. Für eine Erhöhung des Prozessverständnisses werden zudem unrunde Armierungen simuliert. Hierzu wird für die ovale Geometrie eine elliptische Armierung eingesetzt, deren x- und y-Abmessungen getrennt voneinander variiert werden. Hierdurch wird bestimmt, ob der Armierungsdruck im Zug- oder Druckspannungsbereich entscheidend für die Vorspannung der ermüdungskritischen Stellen ist. Es werden vollfaktoriell fünf Faktorstufen zwischen 75 mm und 175 mm eingestellt, was circa dem dreifachen bis siebenfachen der Matrizeninnenabmaße entspricht

und somit den in Richtlinien empfohlenen Bereich sowie darüberhinausgehende Werte abdeckt. Der Einfluss unrunder Armierungen auf die Tangentialspannung in der Vorspannung und zu Prozessende wird in Bild 19 dargestellt. Die Werte auf der Diagonalen des dreidimensionalen Diagramms stellen dabei rotationssymmetrische Armierungen dar.

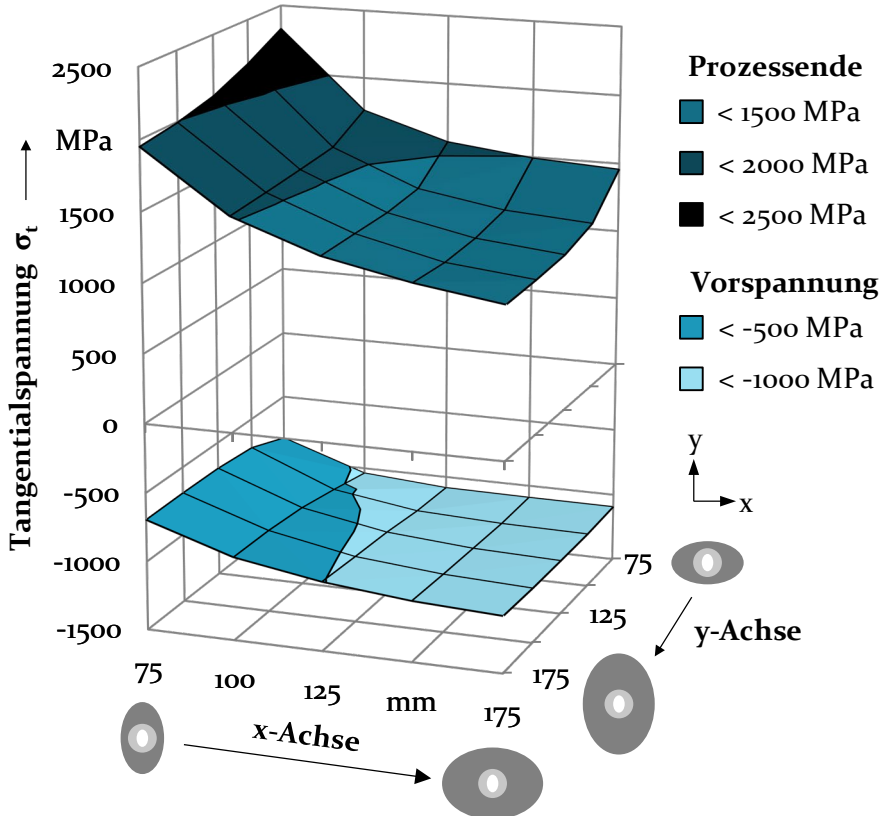


Bild 19: Tangentialspannung in Abhängigkeit der Außengeometrie der Armierung

Die erzielte Vorspannung nimmt betragsmäßig mit einer Vergrößerung der x-Achse der Armierung zu. Mit einer y-Achse von 125 mm liegt die Vorspannung für eine x-Achse von 75 mm bei -696 MPa und für 175 mm bei -1106 MPa. Eine Variation der y-Achse wirkt sich hingegen nur unwesentlich auf die Vorspannung aus. Bei $x = 125$ mm verändert sich die Vorspannung bei Änderung der y-Abmessungen von 75 mm auf 175 mm nur von -997 MPa auf -1086 MPa. Wie in Bild 14 gezeigt, liegt die höchste Verschiebung in der Vorspannung an der x-Achse der Ellipse vor. Entsprechend wirkt sich eine Änderung der Armierungsabmessungen in diesem Bereich stärker aus. Die beschriebenen Effekte bestehen auch in der maximalen Belastung zu Prozessende. Eine größere x-Achse beeinflusst den

Spannungszustand positiv, während eine Änderung der y-Achse nur einen kleineren Einfluss hat. Lediglich y-Abmessungen von 75 mm führen zu einer deutlichen Erhöhung der Spannungen im Vergleich zu den restlichen Abmessungen. Dieser Wert liegt außerhalb der für runde Bauteile empfohlenen Richtlinien und sollte auch für unrunde Geometrien nicht verwendet werden. Die Änderung der Spannung mit variierender x-Achse ist zu Prozessende stärker ausgeprägt als im Vorspannungszustand. Während bei $y = 125$ mm in der Vorspannung eine Differenz von 420 MPa zwischen $x = 75$ mm und $x = 175$ mm vorliegt, ist die maximale Belastung bei $x = 75$ mm mit 2061 MPa um 940 MPa größer als bei $x = 175$ mm mit 1118 MPa. Es besteht demnach keine reine Superposition der Vorspannung mit der Prozessspannung. Die Armierungsaußengeometrie beeinflusst auch die im Prozess auftretende Belastung. Eine mögliche Erklärung ist eine höhere Steifigkeit, welche die maximalen im Prozess vorliegenden Radialverschiebungen und damit die Werkzeugbelastung verringert. Um dies zu überprüfen, wird die Radialverschiebung in Abhängigkeit der Armierungsaußengeometrie untersucht und in Bild 20 dargestellt.

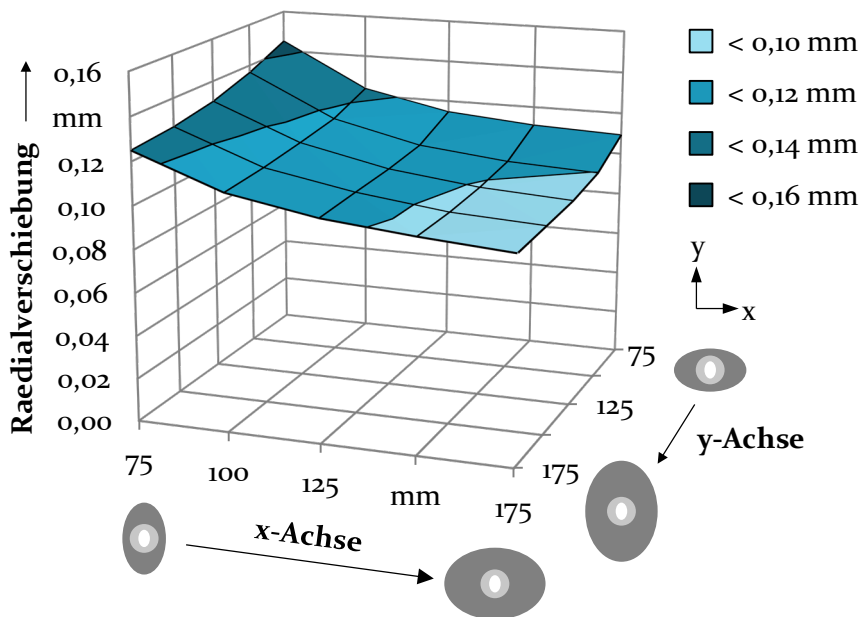


Bild 20: Radialverschiebung in Abhängigkeit der Außengeometrie der Armierung

Die zu beobachtenden Effekte entsprechen dem Verhalten der Tangentialspannung zu Prozessende. Die Radialverschiebung ist insbesondere von den Dimensionen der x-Achse beeinflusst. Für $y = 125$ mm nimmt die Verschiebung von 0,130 mm bei $x = 75$ mm auf 0,097 mm bei $x = 175$ mm ab. Bei Variation der y-Achse ist wiederum nur mit der kleinsten Abmessung

von 75 mm eine deutliche Änderung der Verschiebung zu sehen. Entsprechend beeinflusst die Armierungsgröße die Radialverschiebungen und damit neben der Vorspannung auch die im Prozess auftretenden Beanspruchungen. Wie bei runden Matrizen nimmt der Effekt der Geometrie bei höheren Abmessungen ab. Während die Radialverschiebung von $x = 75$ mm auf $x = 100$ mm im Mittel um 0,018 mm verringert wird, ist sie von $x = 150$ mm auf $x = 175$ mm im Mittel nur um 0,002 mm kleiner. Die Auslegungsrichtlinien für runde Bauteile können hinsichtlich der Armierungsaußengeometrie demnach auch auf unrunde Werkzeuginnengeometrien angewendet werden. Um die Ergebnisse zu verifizieren, wird die Anwendung unrunder Armierungen bei der Geometrie mit Funktionselementen in Hinblick auf die maximalen Tangentialspannungen in der Matrize untersucht und in Bild 21 dargestellt. Hierzu wird als Referenz die runde Armierungsgeometrie mit $\text{Ø}125$ mm herangezogen. Als unrunde Geometrie wird ein abgerundetes Quadrat mit Seitenlängen von 125 mm verwendet. Zum Vergleich wird zudem eine kreisförmige Geometrie mit dem Umkreisdurchmesser der unrunder Geometrie von 156 mm simuliert.

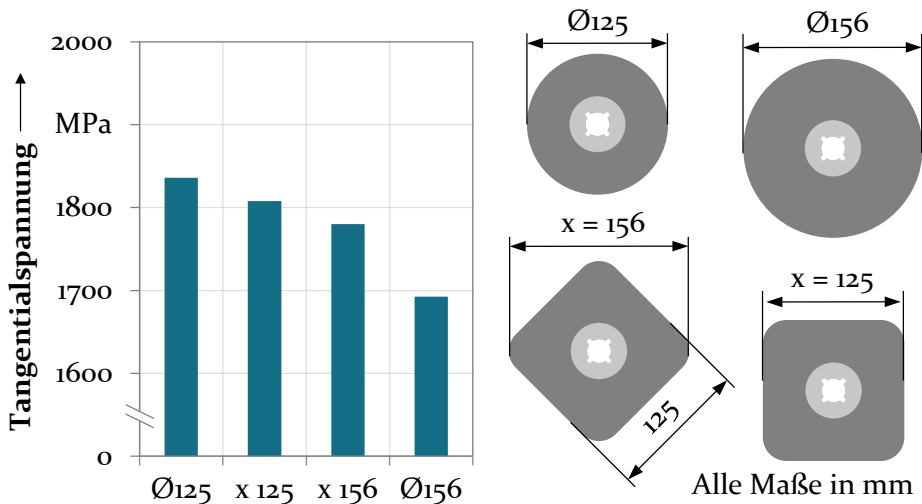


Bild 21: Einfluss der Armierungsaußengeometrie auf die Tangentialspannung in der Matrize mit Funktionselementen

Die Ergebnisse stimmen mit den Erkenntnissen aus der ovalen Geometrie überein. Die maximalen Tangentialspannungen von 1836 MPa in der runden Geometrie mit Durchmesser 125 mm sind bei einer Vergrößerung der Armierung im Druckspannungsbereich mit 1780 MPa geringer als bei einer Vergrößerung im Zugspannungsbereich mit 1808 MPa. Eine rotationssymmetrische Armierung mit dem Umkreisdurchmesser der unrunder Geometrien führt mit 1693 MPa zu den geringsten Beanspruchungen.

Aus den Untersuchungen wird deutlich, dass die Beeinflussung des Druckspannungsbereichs für die Vorspannung durch Armierungen entscheidend ist. Eine höhere Druckwirkung auf den Zugspannungsbereich hat nur einen geringen Einfluss auf das Ergebnis. Eine reine Variation der Armierungsabmessungen im Druckbereich ergibt jedoch keinen Vorteil gegenüber einer Vergrößerung des Gesamtdurchmessers, welche fertigungstechnisch leichter realisierbar ist.

5.5 Ableiten von werkzeugtechnischen Herausforderungen bei der Umformung unrunder Bauteilgeometrien

Anhand des Modellprozesses wurde eine grundlegende Untersuchung der Werkzeugbeanspruchung bei unrunder Matrizeninnengeometrien durchgeführt. Die wesentlichen Erkenntnisse sind in Bild 22 zusammengefasst.

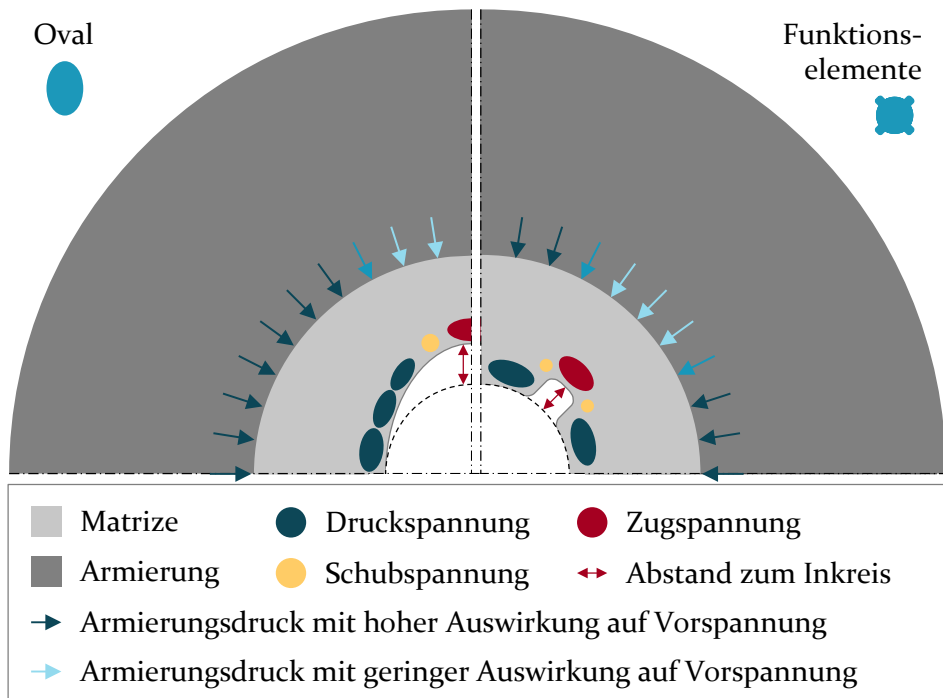


Bild 22: Zusammenfassung der Erkenntnisse zur Werkzeugbeanspruchung und Armierung von Matrizen mit nicht-rotationssymmetrischer Innenkontur

Auf Basis der Analyse der Werkzeugbeanspruchungen wurde eine Einteilung der Matrizenquerschnitte in Druckspannungs- und Zugspannungsbereiche eingeführt. Während Druckspannungsbereiche von hohen Verschiebungen und radialen Druckbeanspruchungen gekennzeichnet sind, sind in Zugspannungsbereichen tangentiale Zugbelastungen vorherrschend. Im Übergang der beiden Bereiche ist zudem ein Maximum an Schubspannungen aufzufinden. Zugspannungsbereiche entstehen grundlegend an den Stellen mit der größten Querschnittsabweichung der Matrizeninnenkontur von ihrem Inkreis. Dies liegt daran, dass am Inkreis die größten radialen Verschiebungen vorliegen, welche zu tangentialem Zug in den von ihnen entfernten Bereichen führen. Dieser Spannungszustand ist innerhalb der untersuchten Geometrien übertragbar. Die getrennten Zug- und Druckspannungsbereiche entstehen sowohl bei der ovalen Innenkontur als auch in der Geometrie mit Funktionselementen. Nachdem auch die Entstehungsmechanismen analog für beide Geometrien gelten, lässt sich auf eine Übertragbarkeit auf unrunde Matrizeninnenquerschnitte allgemein schließen.

Je stärker die Geometrie von der Kreisform abweicht, desto höher ist der Einfluss auf die Werkzeugbelastung und desto größer werden die Beanspruchungen. Für die elliptische Geometrie sind die maximalen Zugspannungen ab einem Aspektverhältnis von $2/1$ bereits hinsichtlich der statischen Festigkeit des eingesetzten Werkstoffs in einem kritischen Bereich. Weiterhin führt eine Armierung unrunder Matrizen zu höheren Vorspannungen je größer das Aspektverhältnis ist. Das maximal einsetzbare Armierungsmaß zur Reduktion der Zugbeanspruchungen ist damit insbesondere für stark von der Kreisform abweichende Werkzeuggeometrien durch die Druckfestigkeit der Matrize begrenzt. Daher wird empfohlen, in einstufigen Prozessen Matrizeninnenkonturen mit einem Aspektverhältnisse von maximal $3/2$ einzusetzen.

Unterschiede zwischen den untersuchten Geometrien des Modellprozesses bestehen in der Anzahl der Zugspannungsbereiche. Bei der Ellipse betrifft dies nur die beiden gegenüberliegenden Stellen an der Ellipsenhauptachse. Bei Funktionselementen ist ein Zugspannungsbereich pro Funktionselement, also in einem Abstand von 90° zueinander, angeordnet. Zusätzlich ist der Übergang der Bereiche durch eine diskrete Änderung des Querschnittsdurchmessers gekennzeichnet. Während bei der ovalen Geometrie der Abstand vom Inkreis in Richtung der Ellipsenhauptachse kontinuierlich zunimmt, ist bei den Funktionselementen nur im Bereich der Elemente eine Abweichung von der Kreisform vorhanden.

Der Werkzeugbelastungszustand bewirkt Herausforderungen bei der Umformung unrunder Bauteilgeometrien. Schubspannungen können mikrostrukturelle Anrisse einleiten, welche bei zyklischer Belastung durch Zugnormalspannungen geöffnet und vergrößert werden [59]. Daher sind zur Beurteilung der vorliegenden Belastungen hinsichtlich Ermüdungsversagen die tangential wechselnden Spannungen im Zugspannungsbereich sowie die Schubspannungen relevant. Weiterhin ist durch die ungleichmäßige Radialverschiebung der Matrizen ein Einfluss auf die Maßhaltigkeit der Bauteile gegeben.

Ein Einsatz von Armierungen anhand konventioneller Richtlinien der ICFG [16] ist auch bei unrunder Matrizeninnengeometrien sinnvoll. Die Tangentialbeanspruchung im Zugspannungsbereich wird durch eine Vorspannung verringert. Anhand der Untersuchung von unrunder Armierungsgeometrien wurde gezeigt, dass eine Änderung der Armierungsaußenkontur im Druckspannungsbereich deutlich größere Auswirkungen auf den Spannungszustand hat als im Zugspannungsbereich. Dementsprechend trägt der Armierungsdruck an der langen Ellipsenachse und den Funktionselementen nur unwesentlich zur Vorspannung bei. Es verbleibt eine Restzugbelastung, welche nach wie vor als negativ hinsichtlich des Ermüdungsversagens der Werkzeuge zu bewerten ist. Eine Erhöhung des Armierungshaftmaßes zur Vermeidung dieser Restzugspannung ist häufig nicht oder nur unter hohem Aufwand umsetzbar. Daher sind weitere werkzeugtechnische Maßnahmen zu untersuchen, welche den ungleichmäßigen Beanspruchungen durch eine lokal erhöhte Vorspannung im Zugspannungsbereich entgegenwirken. Hierzu ist eine experimentelle Ermittlung des Einflusses des Armierungssystems auf die Werkzeuglebensdauer notwendig. Im folgenden Kapitel wird zu diesem Zweck ein Modellversuch ausgelegt.

6 Aufbau eines Modellversuchs zur experimentellen Erforschung des Ermüdungsverhaltens von Kaltmassivumformwerkzeugen

Ziel der Untersuchungen in diesem Kapitel ist die Bereitstellung einer Methode zur experimentellen Untersuchung des Ermüdungsversagens von Matrizen unter Berücksichtigung der Werkzeuggeometrie. Hierdurch kann der Einfluss der Werkzeuginnenkontur und des Vorspannungssystems auf die Werkzeuglebensdauer und Rissbildung erforscht werden. Der Einsatz eines Modellversuchs ermöglicht dies ohne eine zeit- und materialaufwändige Bauteilproduktion. Aktuell verfügbare Laborversuche abstrahieren den Werkzeugbeanspruchungszustand auf Modellgeometrien mit einachsigen Belastungen. Hierdurch ist keine Verifizierung der numerischen Analyse hinsichtlich der Vorhersage der risskritischen Beanspruchungen in Abhängigkeit der Werkzeuggeometrie möglich. Weiterhin können keine mehrachsigen Beanspruchungszustände untersucht werden, weshalb eine Armierungswirkung nur durch eine Verschiebung der Mittelspannung abbildbar ist. So wird die in Realprozessen auftretende Überlagerung der tangentialen Zugspannungen mit radialen Druckspannungen aus der Armierung oder auftretende Schubspannungen im Übergang der Zug- und Druckspannungsbereiche in konventionellen Versuchen nicht berücksichtigt.

Daher wird im Folgenden ein Modellversuch zur Analyse des Ermüdungsversagens bei mehrachsigen Spannungszuständen analog zur Kaltmassivumformung aufgebaut. Der Versuch basiert auf der Substitution von Stahlrohlingen durch Elastomerkörper, welche zyklisch in einer Matrize komprimiert werden und hierdurch einen gleichmäßig verteilten Innendruck erzeugen. Nach einer numerischen Analyse des Versuchs wird das Verhalten der Elastomere mit Bezug auf deren Verschleiß untersucht. Anschließend wird das auftretende Ermüdungsversagen in Form der Werkzeuglebensdauer und Rissbildung untersucht und die neue Versuchsmethode hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Vorhersage des Ermüdungsverhaltens bei unterschiedlichen Werkzeugkonzepten bewertet.

6.1 Versuchsprinzip

Im Modellversuch werden Elastomere in einer Matrize komprimiert. Während das Materialverhalten von Elastomeren meist als inkompressibel angenommen wird, gilt dies nicht für sehr hohe hydrostatische Drücke [140]. Daher wird bei einer Volumenabnahme von Elastomerkörpern ein hoher Druck in vergleichbarem Bereich zur Umformung von Stahlbauteilen erzeugt. Wegen der Elastizität der Elastomere federn sie nach der Kompression wieder in ihre Ausgangsform zurück. Hierdurch ist eine zyklische Prüfung ohne Wechsel der Elastomerprobe möglich. Der Versuchsaufbau ist in Bild 23 dargestellt. Es werden Matrizen mit elliptischen Innenkonturen eingesetzt, da die Fertigung der Komponenten mit engeren Toleranzen im Vergleich zur Geometrie mit Funktionselementen möglich ist. Hierdurch kann das Elastomer mit derselben Geometrie wie die Matrizeninnenkontur gefertigt werden und ein geringer Spalt von maximal 5 μm zwischen Stempel und Matrize eingestellt werden, um einen Austritt des Elastomers aus dem Druckraum zu erschweren.

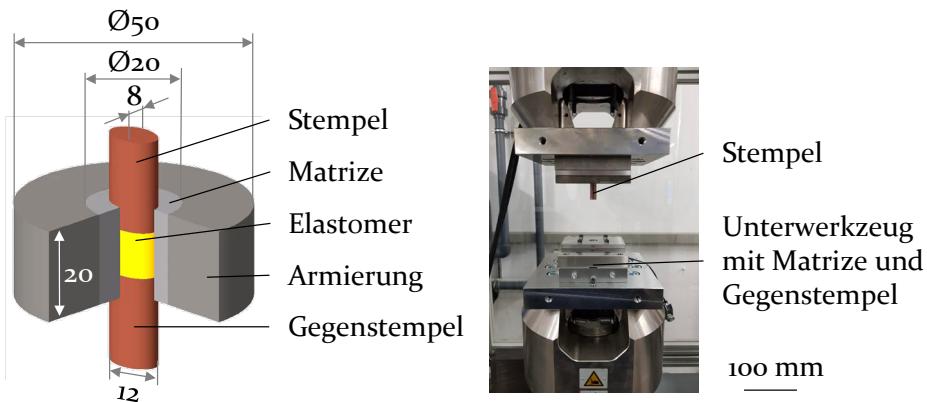


Bild 23: Versuchsaufbau und Einbau in Prüfmaschine

Der grundlegende Versuchsaufbau entspricht dem des Modellversuchs aus Kapitel 5. Ein ovaler Stempel wird in eine armierte Matrize mit ovaler Innenkontur eingeführt und bringt eine Kraft auf. Der runde Stahlkörper wird durch ein elliptisches Elastomer ersetzt, welches komprimiert anstatt plastisch verformt wird. Als Elastomerwerkstoff wird für eine hohe Inkompressibilität und Kantenstabilität Vulkollan[®] von der Firma Covestro AG mit einer maximalen Härte von 92 Shore A verwendet. Bei der Kompression gibt das Elastomer den erzeugten Druck an das umliegende Werkzeug weiter, wodurch ein Innendruck auf die Matrize erzeugt wird. Die Werkzeugaktivteile sind analog zum Modellprozess aus ASP2023, die Armierung aus 1.2344. Stempel und Gegenstempel sind zum Verschleißschutz mit TiAlCN

beschichtet. Die zu verwendenden Kräfte und Frequenzen werden im weiteren Verlauf untersucht, wobei auf eine Übertragbarkeit zu den Beanspruchungen der Kaltmassivumformung sowie stabile Versuchsbedingungen geachtet werden muss. Daher sollen Kräfte verwendet werden, die zu einem Innendruck auf die Matrize von 1000 MPa bis 2000 MPa führen. In diesem Druckbereich wird die Verwendung von konventionellen Armierungen empfohlen [16]. Die Werkzeuge werden in eine dynamische Prüfmaschine Hydropulser Amsler HA250 eingebaut, welche eine Maximalkraft von 250 kN hat. Um mit diesem Kraftangebot die gewünschten Drücke zu erreichen, wird die Geometrie aus dem Modellprozess skaliert, sodass die ovale Kavität Halbachsen von 4 mm und 6 mm besitzt. Eine Kraft von 150 kN entspricht bei dieser Geometrie einem Druck von 2000 MPa. Die Höhe der Matrize beträgt 20 mm, die Ausgangshöhe des Elastomers 10 mm. Die Werkzeuge werden an Halteplatten montiert, die an den Spannvorrichtungen der Prüfmaschine verschraubt werden. Die Regelung der zyklischen Prüfung wird kraftbasiert durch einen PID-Regler mit den Einstellungen $P = 0,5$, $I = 0,1$ und $D = 0,0$ durchgeführt. Für eine Analyse des im Versuch erzeugten Spannungszustands wird im nächsten Abschnitt ein Simulationsmodell aufgebaut.

6.2 Numerische Abbildung

Analog zum Modellprozess wird der Ermüdungsversuch mit der Software Simufact.Forming 15.0 numerisch abgebildet. Aufgrund der zyklischen Symmetrie des Prozesses ist die Simulation eines 90° -Segments ausreichend. Es wird ein entkoppelter Ansatz mit separater Berechnung der Kompression und Werkzeugbelastung verwendet. Die Materialeigenschaften des Elastomers werden anhand der Charakterisierung in Kapitel 4 mit einem E-Modul von 111 MPa und einer Querdehnzahl von 0,498344 eingestellt. Da nur die Beanspruchungsart der Kompression im Versuch relevant ist, ist keine Berücksichtigung von hyperelastischen Effekten der Elastomere notwendig. Die maximale Kompression wird durch Verfahren des Stempels so eingestellt, dass die Ausgangshöhe des Elastomers um 1,5 mm verringert wird. Dies ermöglicht einen Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Versuchsergebnissen. Der Vulkollankörper wird mit Hexaedern bei einer Kantenlänge von 0,24 mm und einer Verfeinerung auf 0,12 mm ab einem Durchmesser von 7 mm vernetzt. In der Werkzeugbelastungssimulation werden die Werkzeuge mit Tetraederelementen bei einer maximalen geometrischen Abweichung von 0,01 mm diskretisiert. Es wird ein Lastzyklus vom entlasteten Elastomer zur maximalen Kompression von 1,5 mm berechnet. Um die Simulation zu validieren, werden im Versuch neben der

Kraft auch die Dehnung an der Ellipsenhauptachse auf der Matrizenunterseite gemessen. Hierzu werden Dehnungsmessstreifen HBM XY11-3/350 verwendet. Die Messrichtung ist orthogonal zur Ellipsenhauptachse orientiert, sodass Zugbeanspruchungen in tangentialer Richtung erfasst werden.

Die in Simulation und Experiment erreichten Kräfte und Dehnungen sind in Bild 24 dargestellt. Bei $n = 3$ Wiederholversuchen beträgt die Maximalkraft im Experiment $149,5 \text{ kN} \pm 0,3 \text{ kN}$. Die numerisch ermittelte Kraft weicht mit $147,8 \text{ kN}$ um $1,2 \%$ ab. Diese Kräfte entsprechen bei Wirkung auf eine Ellipse mit den Halbachsen 4 mm und 6 mm einem Druck von 1983 MPa und 1960 MPa . Da konventionelle Armierungen in Kaltumformwerkzeugen bei Innendrücken bis 2000 MPa empfohlen werden [16], werden Belastungen in derselben Größenordnung wie bei Umformprozessen erreicht.

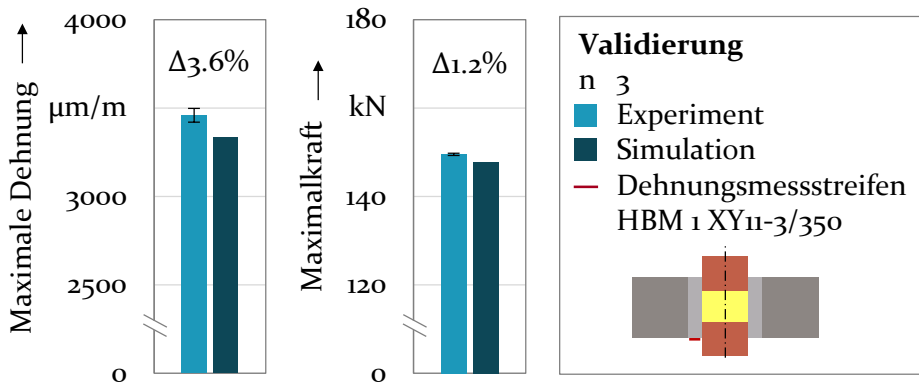


Bild 24: Validierung der Simulation

Die gemessene Dehnung beträgt im Versuch $3485 \mu\text{m}/\text{m} \pm 39 \mu\text{m}/\text{m}$. Numerisch wurde eine Dehnung von $3333 \mu\text{m}/\text{m}$ ermittelt, was einer Abweichung von $3,6 \%$ zum Experiment entspricht. Analog zum Modellprozess entstehen Zugbeanspruchungen an der Ellipsenhauptachse. Da die Dehnungen auf der Matrizenunterseite und damit außerhalb des höchstbeanspruchten Bereichs gemessen werden, ist eine quantitative Interpretation der Werte nicht sinnvoll möglich. Insgesamt ist eine gute Übereinstimmung sowohl der notwendigen Kraft als auch der entstehenden Dehnung auf der Matrizenunterseite gegeben. Es wird daher geschlossen, dass das Simulationsmodell zur Analyse der im Modellversuch entstehenden Beanspruchungen qualifiziert ist. Diese sind in Bild 25 dargestellt.

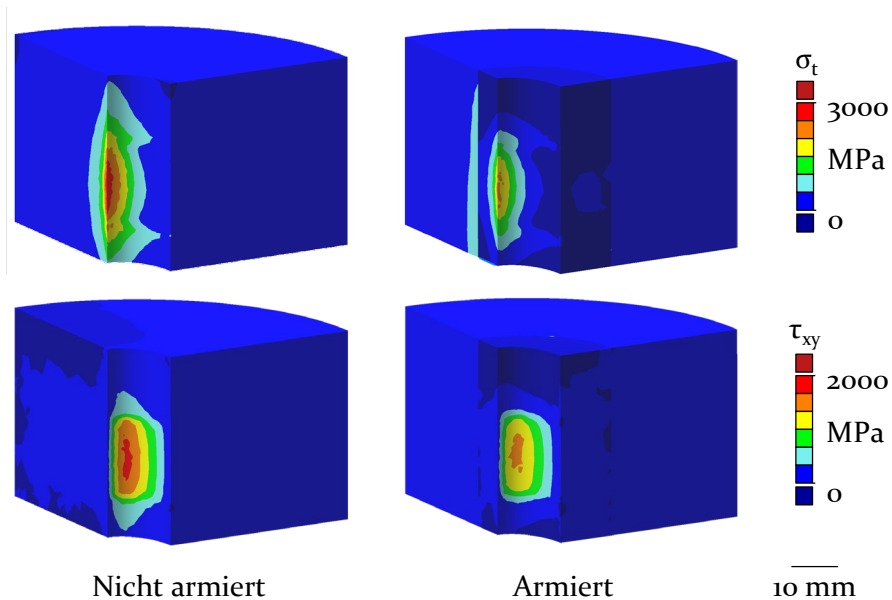


Bild 25: Numerisch ermittelter Spannungszustand im Ermüdungsversuch

Analog zum Umformprozess entstehen im Ermüdungsversuch tangentielle Zugspannungen an der Matrizenhauptachse und Schubspannungen am Übergang zwischen Zug- und Druckspannungsbereich. Weiterhin ist zu sehen, dass bei armierten Matrizen Zugbeanspruchungen nur in der Druckraumhöhe, in der das Elastomer komprimiert wird, vorliegen. Nicht armierte Matrizen sind an der Ellipsenhauptachse über der gesamten Höhe mit tangentialen Zugspannungen beansprucht, wobei die maximale Belastung in der Mitte des Druckraums vorliegt. Der Lastfall, unter dem die Matrizen im Ermüdungsversuch beansprucht sind, ist damit vergleichbar zum Modellprozess. Dies zeigt die grundsätzliche Eignung des Versuchs zur Analyse des Einflusses der Beanspruchungen aus Umformprozessen auf das Ermüdungsverhalten. Voraussetzung hierfür ist zudem, dass die Beanspruchungen über den gesamten Versuchszeitraum konstant aufgebracht werden. Daher wird im Folgenden das Versuchsverhalten bei zyklischer Beanspruchung mit Hinblick auf Verschleiß am Elastomerkörper untersucht.

6.3 Einfluss von Elastomerverschleiß

Bild 26 a) zeigt eine Elastomerprobe am Beginn und nach 2000 Zyklen des Ermüdungsversuchs. Während der Kunststoff den Beanspruchungen grundsätzlich standhält, sind an den Kanten Verschleißspuren zu sehen.

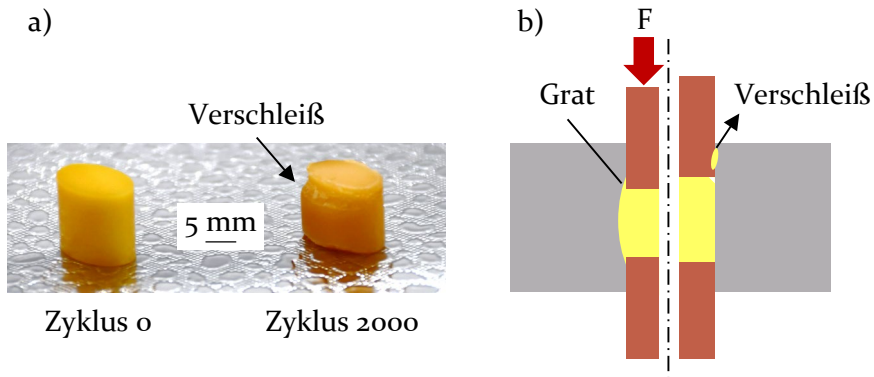
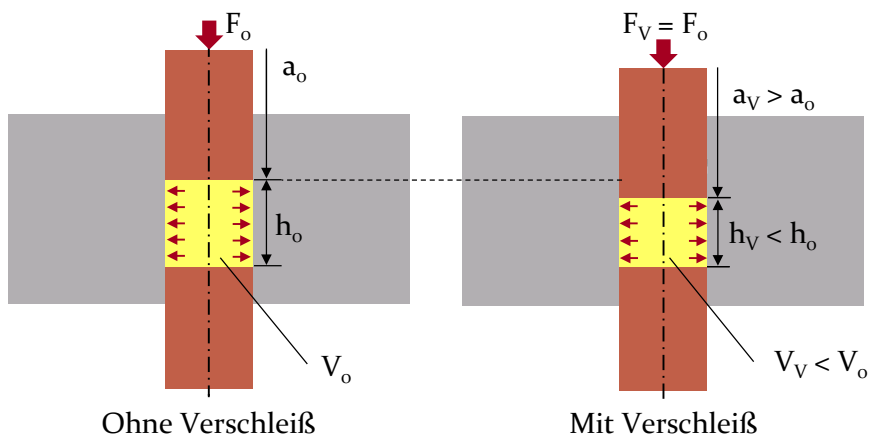


Bild 26: a) Verschleiß am Elastomerkörper, b) Mechanismus der Verschleißentstehung

Beim Aufbringen der Kraft wird ein Teil des Elastomers in Richtung des Spalts zwischen Stempel und Matrize gedrückt, sodass ein Grat entsteht. Bei zyklischer Kraftaufbringung wird dieser Grat vergrößert und letztendlich Elastomermaterial aus dem Druckraum befördert. Dies ist schematisch in Bild 26 b) dargestellt. Da die Matrize sich unter hohem Innendruck elastisch radial nach außen verformt, ist der Verschleiß selbst bei Einsatz eines minimalen Stempelspalts von $5\ \mu\text{m}$ nicht vollständig verhinderbar. Daher ist zu bewerten, welchen Einfluss eine Abnahme des Elastomervolumens auf den Beanspruchungszustand im Ermüdungsversuch hat. Die Auswirkungen auf die Bedingungen im Versuch sind schematisch in Bild 27 dargestellt.



V	Volumen	h	Druckraumhöhe	x_0	Werte ohne Verschleiß
F	Kraft	a	Stempelposition	x_V	Werte mit Verschleiß

Bild 27: Auswirkung des Elastomerverschleißes auf den Versuch

Im komprimierten Zustand besitzt ein nicht verschlissenes Elastomer das Volumen V_0 und die Höhe h_0 . Auf dieser Höhe wird die Matrize mit dem Innendruck von 2000 MPa belastet. Tritt Verschleiß am Elastomer auf und das Volumen V_0 verringert sich auf ein kleineres Volumen V_v , sinkt auch die Höhe des komprimierten Elastomers und belasteten Matrizenbereichs. Diese Abnahme lässt sich in-situ über den unteren Totpunkt des Stempels bestimmen, welcher durch die Maschine gemessen wird. Da der Versuch kraftgeregelt gefahren wird, bleibt der Betrag des aufgebrachtten Drucks gleich. Die Höhe, über die der Druck aufgebracht wird, nimmt jedoch ab.

Der Einfluss dieser abnehmenden Druckraumhöhe auf die maximale Werkzeugbelastung wird im zuvor aufgebauten Simulationsmodell bestimmt. Hierzu wird die ursprüngliche Höhe des Elastomers verringert und der Stempelweg so angepasst, dass die aufgebrachtte Kraft konstant bei 150 kN bleibt. Die Tangentialspannungen bei abnehmender Druckraumhöhe sind in Bild 28 dargestellt. Es wird deutlich, dass während die Vorspannung bei Einsatz einer Armierung konstant bleibt, die maximale Zugspannung mit der Druckraumhöhe abnimmt.

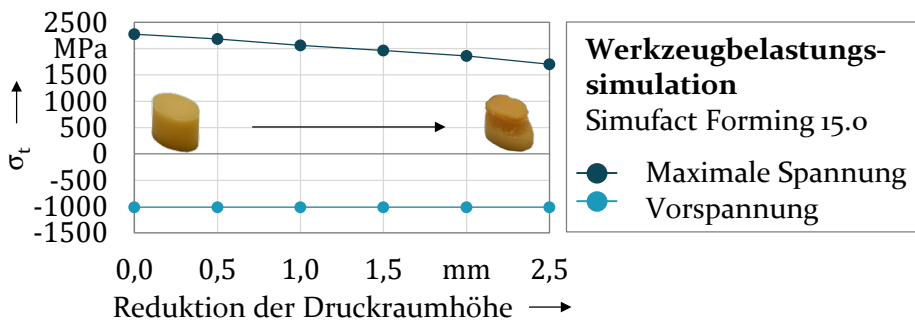


Bild 28: Numerisch ermittelter Einfluss des Elastomerverschleißes auf die Beanspruchungen

Im ursprünglichen Zustand ohne Verschleiß liegt die maximale Tangentialspannung bei 2266 MPa. Bei Abnahme der Druckraumhöhe um 1 mm ist die Spannung mit 2042 MPa um etwa 10 % geringer. Bei weiterer Reduktion der Höhe um insgesamt 2 mm nimmt die Spannung erneut um circa 10 % auf 1845 MPa ab. Nach VÖLKL sind Schwankungen der Werkzeugbelastung von $\pm 10\%$ in Umformprozessen typisch [47]. In seinen Untersuchungen bewirkt eine Änderung des Rohlingvolumens um 0,34 % in einem Kaltmassivumformprozess eine Änderung der Werkzeugdehnung um 7,5 %. In Extremfällen können Rohlingvolumina um bis zu 2 % variieren. Auch weitere Inputvariablen wie die Fließspannung schwanken um bis zu $\pm 10\%$. Um reproduzierbare Bedingungen in Übereinstimmung mit industrieller Praxis zu gewährleisten, sollten die Elastomerproben daher bei einer

um 2 mm verringerten Druckraumhöhe ausgetauscht werden. Im vorliegenden Konzept liegen die maximalen Beanspruchungen damit kontinuierlich und reproduzierbar bei $2042 \text{ MPa} \pm 10 \%$.

Um den Versuchsaufwand gering zu halten, sind möglichst seltene Elastomerwechsel anzustreben. Weiterhin sollen die hohen Lasten der Kaltmassivumformung durch entsprechend große Kräfte und Innendrücker abgebildet werden. Aus diesem Grund wird der Einfluss der Prozesskraft sowie der Frequenz, mit der diese aufgebracht wird, auf den Elastomerverschleiß untersucht. Hierzu wird die Abnahme des unteren Totpunkts und damit der Druckraumhöhe nach 2000 Zyklen bestimmt. Die Versuchskraft wird auf drei Stufen zwischen 75 kN und 150 kN variiert, da dies Drücken von 1000 MPa bis 2000 MPa entspricht. Es werden Frequenzen von 1 Hz, 5 Hz und 10 Hz getestet, um eine effiziente Versuchsdurchführung bei gleichzeitig nicht zu hohem Energie- und Wärmeeintrag in das System zu gewährleisten. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Bild 29 dargestellt.

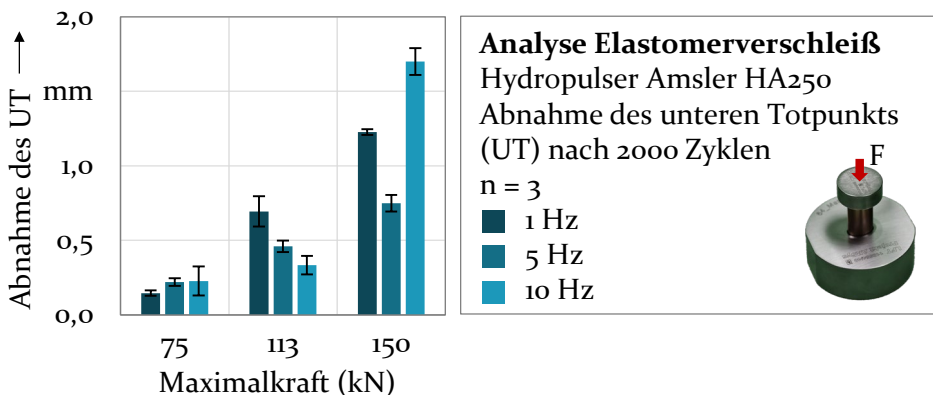


Bild 29: Einfluss der Maximalkraft und Prüffrequenz auf den Elastomerverschleiß

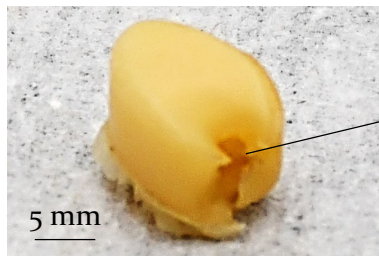
Der Elastomerverschleiß nimmt mit höherer Prozesskraft zu. Der Druck auf das Elastomer erzeugt eine radiale Verschiebung der Matrize, welche die zum Verschleiß führende Gratbildung vereinfacht. Weiterhin nimmt die Kraft, welche das Elastomer aus dem Druckraum drückt, zu. Die minimale Abnahme des unteren Totpunkts tritt bei einer Kraft von 75 kN mit etwa 0,2 mm für alle getesteten Frequenzen auf. Bei Erhöhung der Kraft ist ein unterschiedliches Verhalten für verschiedene Frequenzen zu beobachten. Bei der maximalen untersuchten Kraft von 150 kN wird der geringste Verschleiß mit einer um 0,7 mm reduzierten Druckraumhöhe durch eine Frequenz von 5 Hz erreicht. Die Werte bei 1 Hz und 10 Hz sind mit 1,2 mm und 1,7 mm deutlich höher. Die Abnahme des Verschleißes von 1 Hz auf

5 Hz ist auch bei der Kraft von 113 kN zu beobachten. Ein Erklärungsansatz ist, dass bei geringerer Stempelgeschwindigkeit das Elastomer stärker am Stempel haftet und damit leichter aus dem Druckraum gezogen wird. Nachdem der erhöhte Verschleiß bei 10 Hz nur bei der größten Kraft von 150 kN zu beobachten ist, ist davon auszugehen, dass ein starker Wärmeintrag durch eine Kombination aus hoher Kraft und Frequenz den Verschleiß begünstigt.

Um eine effiziente Versuchsdurchführung mit aussagekräftigen Ergebnissen zu ermöglichen, sind hohe Kräfte bei geringem Elastomerverschleiß anzustreben. Dies wird anhand der Ergebnisse am besten durch die Parameterkombination Kraft 150 kN und Frequenz 5 Hz erreicht. Mit diesen Einstellungen sind konsistente Versuchsbedingungen für das Testen von Umformmatrizen festgelegt. Die Versuche werden derart durchgeführt, dass 150 kN oder 2000 MPa mit 5 Hz zyklisch auf die Elastomere und über diese auf die Matrizeninnenwand aufgebracht werden. Wenn der untere Totpunkt des Stempels im Vergleich zum ersten Zyklus um 2 mm abnimmt, wird der Versuch unterbrochen und die Elastomerprobe getauscht.

6.4 Ermüdungsverhalten im Modellversuch

Die Versuche werden mit den oben aufgeführten Einstellungen bis zum Versagen der Matrizen durchgeführt. Auftretende Ermüdungsriss sind durch ein plötzliches Verfahren des Stempels, welches ein zuvor definiertes Abbruchkriterium auslöst, bemerkbar. Dies liegt daran, dass bei Auftreten eines Risses in der Matrize das unter Druck stehende Elastomer in diesen Riss fließt. Hierdurch entstehen Zugspannungen im Elastomer, welches den Bereich in der Nähe des Risses zum Platzen bringt. Ein derart geborstenes Elastomer nach einem Ermüdungsriss in der Matrize ist in Bild 30 dargestellt. Nach dem unterbrochenen Versuch werden die Matrizen ausgebaut, wobei Risse bis zur Matrizenunterseite hin sichtbar werden.



Geborstener
Bereich durch
Matrizenriss

Bild 30: Geborstenes Elastomer

Die Rissbildung und Lebensdauer wird im Folgenden für mit 3 ‰ Haftmaß armierte und für nicht armierte Matrizen untersucht. Zur Gewährleistung derselben Gesamtgeometrie wird der Durchmesser der nicht armierten Matrize auf den Armierungsdurchmesser vergrößert. Es werden jeweils fünf Matrizen je Variante getestet. Das Rissverhalten ist innerhalb der Wiederholversuche konstant und in Bild 31 dargestellt.

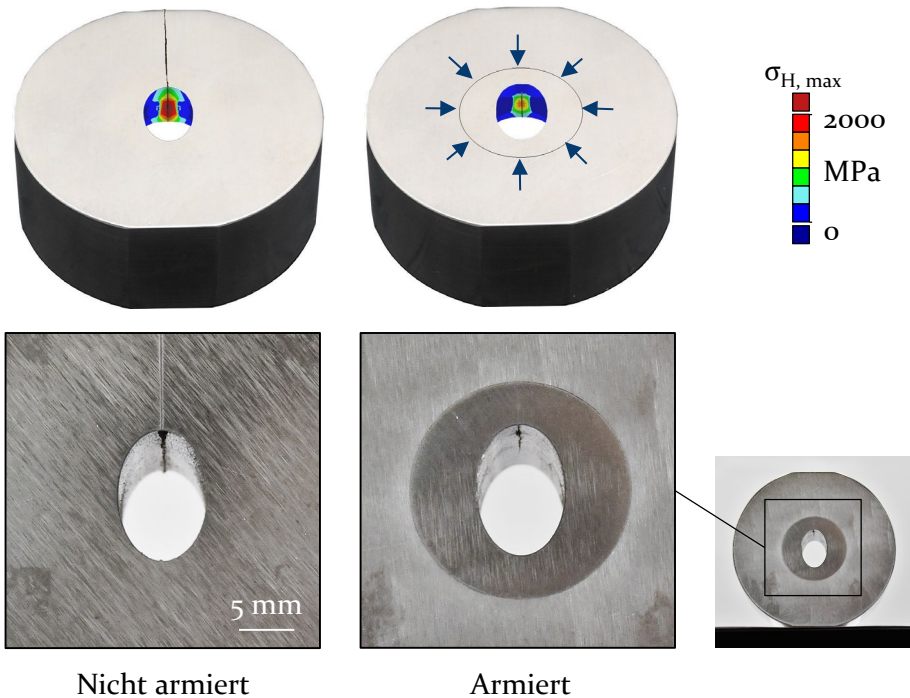


Bild 31: Ermüdete Matrizen mit und ohne Armierung

Der Rissbeginn liegt an der Ellipsenhauptachse in der Mitte des Druckraums. Von dort aus breitet sich der Riss senkrecht entlang der Hauptachse aus. Die Rissausbreitung verläuft orthogonal zur größten Zugbeanspruchung, welche in tangentialer Richtung orientiert ist. Für armierte Matrizen geschieht diese Ausbreitung nur in Richtung der Matrizenunterseite. Bei nicht vorgespannten Matrizen verläuft der Riss durchgängig von der Ober- bis zur Unterseite. Dies liegt daran, dass in nicht armierten Matrizen eine Restzugspannung über der gesamten Matrizenhöhe vorliegt. Die Druckvorspannung durch die Armierung behindert demnach die Rissausbreitung. Der Einfluss auf die Werkzeuglebensdauer wird im Folgenden analysiert. Bild 32 zeigt die Lebensdauern der fünf getesteten Matrizen mit und ohne Armierung.

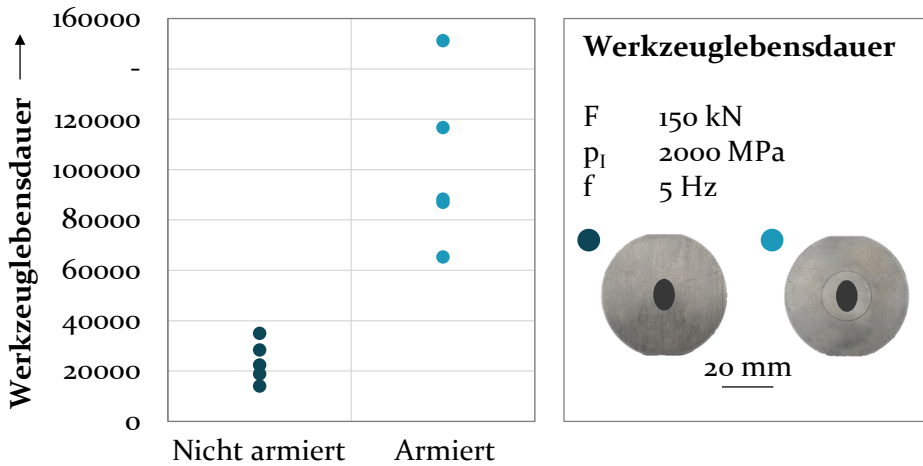


Bild 32: Werkzeuglebensdauer armierter und nicht armierter Matrizen im Modellversuch

Die erreichten Zyklenzahlen liegen zwischen 65.309 und 151.290 für armierte und zwischen 14.012 und 34.979 für nicht armierte Matrizen. Nachdem die Werkzeuglebensdauer in der Kaltmassivumformung zwischen wenigen Tausend bis mehreren Hundert Tausend produzierten Teilen liegt [154], sind die Ergebnisse in einem realistischen Bereich. Während der Versuche wurden durchschnittlich zehn Elastomerkörper für armierte und drei Elastomerkörper für nicht armierte Matrizen eingesetzt.

Hohe Schwankungen in den erreichten Standmengen bis zu einem Faktor von zehn sind für Kaltmassivumformwerkzeuge charakteristisch [65]. Selbst in konventionellen Ermüdungsversuchen variieren die Zyklenzahlen bei derselben Belastung teilweise um 100 %, wie zum Beispiel in einer Analyse der Kurzzeitfestigkeit von HSS Stahl in [69] zu sehen ist. Analysen am im Ermüdungsversuch verwendeten Werkzeugmaterial ASP2023 wurden mit einem Umlaufbiegeversuch in [155] durchgeführt. Hochvorschubgefräste Proben erreichten dabei Zyklenzahlen von 35.000 bis 70.000 bei einer Amplitude von 1600 MPa und von 70.000 bis 450.000 bei einer Amplitude von 1450 MPa. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse zum neuen Ermüdungsversuch ist jedoch begrenzt, da sie bei einer Mittelspannung von 0 MPa erzielt wurden.

Der Mittelspannungseinfluss wird anhand der unterschiedlichen Lebensdauern von armierten und nicht armierten Matrizen sichtbar. Mit durchschnittlich 101.720 Zyklen halten armierte Matrizen über viermal so lange wie nicht armierte mit 23.757 Zyklen. Die Druckvorspannung verschiebt die Mittelspannung von einer Zugbeanspruchung in Richtung Druck. Der Effekt einer höheren Lebensdauer durch eine Druckvorspannung ist aus

industriellen Kaltmassivumformprozessen bekannt. Zum Beispiel konnte in [125] die maximale Matrizenhauptspannung durch eine angepasste Armierungsstrategie von 597 MPa auf 170 MPa reduziert werden, was zu einer erhöhten Standmenge von 17.563 auf 71.323 produzierten Teilen führte.

6.5 Bewertung der Eignung des Modellversuchs zur Analyse des Ermüdungsverhaltens von Kaltmassivumformwerkzeugen

Mit dem vorgestellten Versuch ist erstmalig eine Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Kaltmassivumformwerkzeugen im Labormaßstab möglich. Durch den Einsatz von wiederholt komprimierten Elastomeren statt umgeformten Bauteilen sind im Vergleich zur industriellen Produktion höhere Frequenzen bei niedrigerem Materialaufwand möglich. Weiterhin besteht eine größere Flexibilität bezüglich der Werkzeuggeometrie und Einbausituation. Verglichen mit konventionellen Ermüdungsversuchen wie dem Umlaufbiegeversuch wird eine genauere Abbildung des mehrachsigen Spannungszustands erreicht, da die zyklische Belastung analog zur Kaltmassivumformung über einen Innendruck aufgebracht wird. Zudem werden reale Werkzeug- und Bauteilgeometrien verwendet. Dies bietet neue Untersuchungsmöglichkeiten hinsichtlich der Identifizierung von Rissorten sowie dem Einfluss von Armierungssystemen.

Die im Versuch erzielten Standmengen und Standardabweichungen liegen in einem realistischen Bereich verglichen mit Daten aus realen Kaltmassivumformprozessen und Ermüdungsversuchen an hochfesten Werkzeugmaterialien. Die Lebensdauern von konventionell armierten und nicht armierten Matrizen dienen als Vergleichswerte für neuartige Vorspannkonzeppte, die in den folgenden Kapiteln untersucht werden. Die Auswirkung einer konventionellen Armierung auf die Lebensdauer wird gemäß dem industriell bekannten Verhalten plausibel dargestellt, nachdem im Modellversuch bei Einsatz einer Armierung eine etwa vierfache Lebensdauer erreicht wird. Dementsprechend wird das Ermüdungsversagen von Kaltmassivumformwerkzeugen im Ermüdungsversuch realitätsnah abgebildet.

Durch Einsatz realer Matrizengeometrien werden kritische Bereiche hinsichtlich Ermüdungsrissbildung identifiziert. Im Fall der vorliegenden Geometrie entstehen Risse an der Ellipsenhauptachse. Dies verifiziert die numerischen Analysen aus Kapitel 5, nach denen die größte Zugspannung an diesem Ort vorliegt. Anhand der Untersuchungen von armierten und nicht

armierten Werkzeugen ist eine unterschiedliche Rissausbreitung mit geringerer Risslänge für armierte Matrizen zu erkennen. Bei Änderungen des Vorspannungskonzepts, welche durch Maßnahmen zur lokalen Armierung eingeführt werden, können potentiell neue kritische Bereiche mit wiederum verändertem Rissverhalten entstehen. Deren Analyse ist mithilfe der neuen Versuchsmethode erstmals möglich. Somit kann der Einfluss des Spannungszustands auf die Rissbildung allgemein untersucht werden.

Weiterhin ist eine Übertragung des Konzepts auf andere Geometrien durch Anpassung von Stempel, Elastomer und Matrizeninnenkontur möglich. Hierbei ist im Rahmen der Fertigungstoleranzen ein möglichst enger Spalt zwischen Matrize und Armierung anzustreben, um Elastomerverschleiß zu minimieren. Dieser stellt eine Herausforderung im Versuchskonzept dar, da durch notwendiges menschliches Eingreifen beim Tausch der Elastomerproben der Versuchsaufwand erhöht wird. Das Material Vulkolan© ist in der Lage, hydrostatischem Druck von mindestens 2000 MPa zyklisch standzuhalten. Das Versuchskonzept ist damit auch auf andere Anwendungen, welche hohen zyklisch schwellenden Innendruck benötigen, übertragbar.

7 Untersuchung lokaler Vorspannungen durch Aussparungen im Armierungsverbund

Um lokalen Zugspannungsmaxima infolge unrunder Werkzeuggeometrien entgegenzuwirken, wird eine Anpassung der Vorspannungswirkung durch Aussparungen im Armierungsverbund untersucht. Aus dem Stand der Technik ist bekannt, dass eine lokale Reduzierung des Armierungsdrucks auf einer bestimmten Matrizenhöhe eine axiale Vorspannung in diesem Bereich erzeugt [127]. Für eine erhöhte tangentielle Vorspannung werden daher vertikale Aussparungen in den Armierungsverband eingebracht, welche den Kontakt zwischen Matrize und Armierung lokal unterbrechen. Die Wirkungsweise der Aussparungen wird für durchgängige Aussparungen und anschließend für prozessangepasste abgesetzte Aussparungen untersucht.

7.1 Durchgängige Aussparung

Für die Analyse durchgängiger Aussparungen wird zunächst die grundlegende Wirkungsweise anhand von Modellvorstellungen und Simulationsergebnissen gezeigt. Anschließend werden Parameter der Aussparungen und Werkzeuggeometrien variiert und deren Einfluss auf die Wirksamkeit numerisch untersucht. Abschließend werden die Erkenntnisse durch einen Einsatz von ausgesparten Matrizen im Ermüdungsversuch experimentell verifiziert und der Einfluss des Spannungszustands auf die Lebensdauer und Rissbildung bewertet.

7.1.1 Wirkungsweise

Anhand der Analyse unrunder Armierungen wurde festgestellt, dass bei nicht-rotationssymmetrischen Geometrien der Armierungsdruck im Zugspannungsbereich nur unwesentlich zur Vorspannung der kritischen Stellen beiträgt. Wie in Bild 33 gezeigt, wird daher der Kontakt zwischen Matrize und Armierung an der Ellipsenhauptachse und den Funktionselementen durch eine über die Matrizenhöhe konstant aufgebrachte Aussparung weggenommen. Entsprechend werden zwei Aussparungen an den Enden der Ellipsenhauptachse eingebracht. In der zweiten Geometrie des Modellprozesses sind bei einer Aussparung pro Funktionselement insgesamt vier Bereiche lokal beeinflusst.

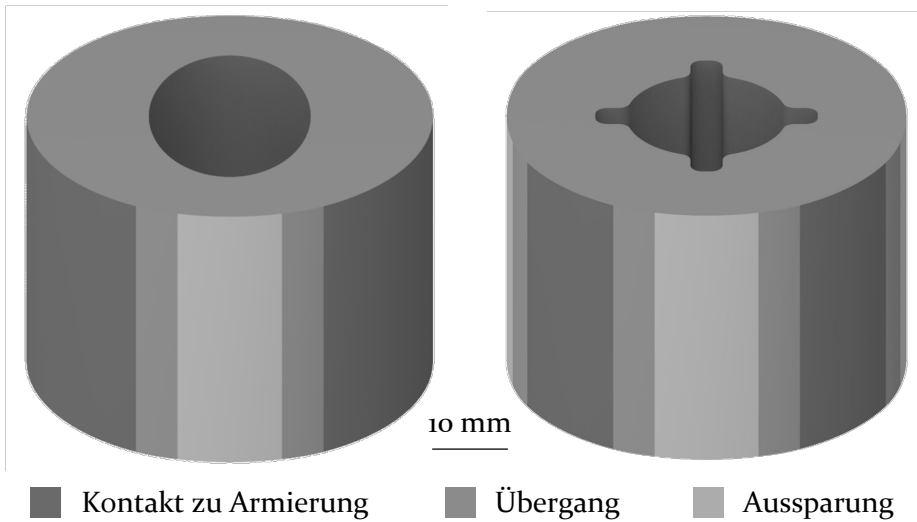


Bild 33: Visualisierung der Aussparungen

Das Einbringen der Aussparung an der Außenwand der Matrize ermöglicht ein Einpressen in die Armierung, ohne dass die Winkelposition der Matrize und des Armierungsringes zueinander definiert werden muss. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Definition der Aussparungsgeometrie wird in Bild 34 dargestellt.

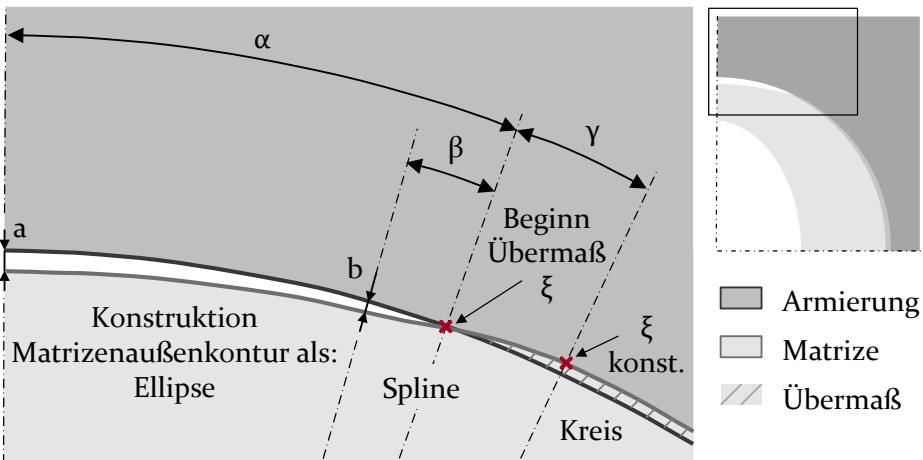


Bild 34: Konstruktion und Parameter der Aussparungen

Im höchstbeanspruchten Bereich ist ein definierter Abstand a zwischen Matrize und Armierung eingebracht. Ab dem Winkel α besteht Kontakt zwischen beiden Werkzeugen. Der Übergang zwischen Aussparung und

konstant aufgebrachtem Haftmaß wird mit einem Spline und den Winkeln β in Richtung der Aussparung und γ in Richtung des konstanten Haftmaßes definiert. Um eine kontinuierliche Veränderung der Geometrie zu gewährleisten, wird die Matrizenaußenkontur im Aussparungsbereich als Ellipse konstruiert. Zum Beginn des Splines am Übergang besteht hierbei ein Abstand $b < a$. Der Einfluss der beschriebenen Parameter wird in Abschnitt 7.1.2 untersucht. Zuvor wird die grundlegende Wirkungsweise der Aussparungen analysiert.

Durch das Einbringen einer Aussparung besteht der Kontaktdruck zwischen Matrize und Armierung in lokal begrenzten Bereichen. Dies führt wie in Bild 35 anhand der Beanspruchungsverteilung im Vorspannungszustand gezeigt, zu einer Biegung im Zugspannungsbereich. Dementsprechend wird die Druckvorspannung an der Matrizeninnenwand erhöht. Durch die Biegung entstehen jedoch auch geringe Zugspannungen an der Matrizenaußenwand sowie im Druckspannungsbereich.

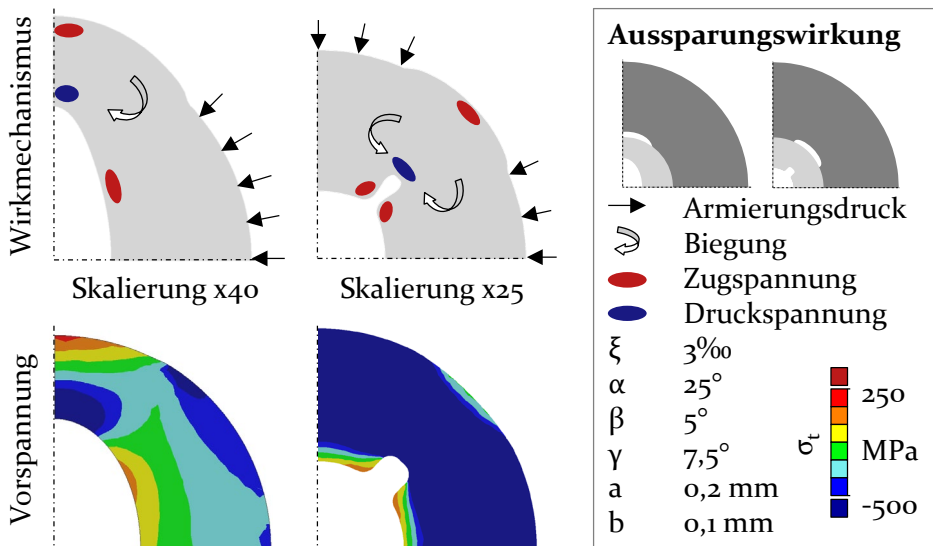


Bild 35: Wirkungsweise der Aussparungen im Vorspannungszustand

Neben der Vorspannung ist der Einfluss der Aussparungen auf die Tangentialspannungen, Schubspannungen und Radialverschiebungen zu untersuchen, um den Einfluss auf das Ermüdungsverhalten sowie die Bauteilgeometrie zu bewerten. Die Verteilung der Tangentialspannung zu Prozessende ist in Bild 36 für Matrizen mit und ohne Aussparungen dargestellt.

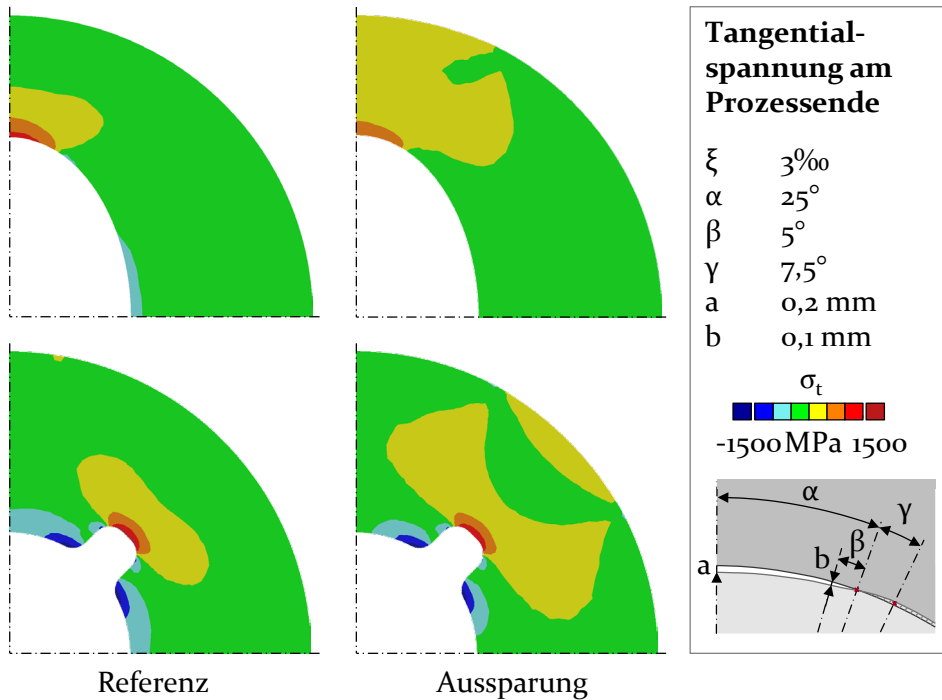


Bild 36: Tangentialspannungen am Prozessende bei Matrizen mit und ohne Aussparungen

In der ovalen Geometrie ist die maximale Zugspannung bei Einsatz von Aussparungen um etwa 300 MPa geringer als bei konventionell armierten Matrizen. Auch in der Geometrie mit Funktionselementen liegt eine etwas niedrigere Tangentialspannung zu Prozessende vor. Diese wird im Vergleich zur Referenz um etwa 100 MPa reduziert. Die lokale Vorspannungserhöhung ist demnach wirksam zur Reduzierung der kritischen Beanspruchungen im Zugspannungsbereich. Ein Erklärungsansatz zur größeren Abnahme der Spannungen in der ovalen Geometrie ist die unterschiedliche Anzahl an kritischen Bereichen und Aussparungen, die wegen des kleineren Abstands zu einer geringeren Biegewirkung bei der Geometrie mit Funktionselementen führt. Diese These ist im Rahmen der Parametervariation anhand der Anzahl der Funktionselemente zu überprüfen. Die Verteilung der Schubspannungen in ausgesparten Matrizen ist im Vergleich zu Referenzmatrizen mit konstanter Armierungswirkung in Bild 37 dargestellt.

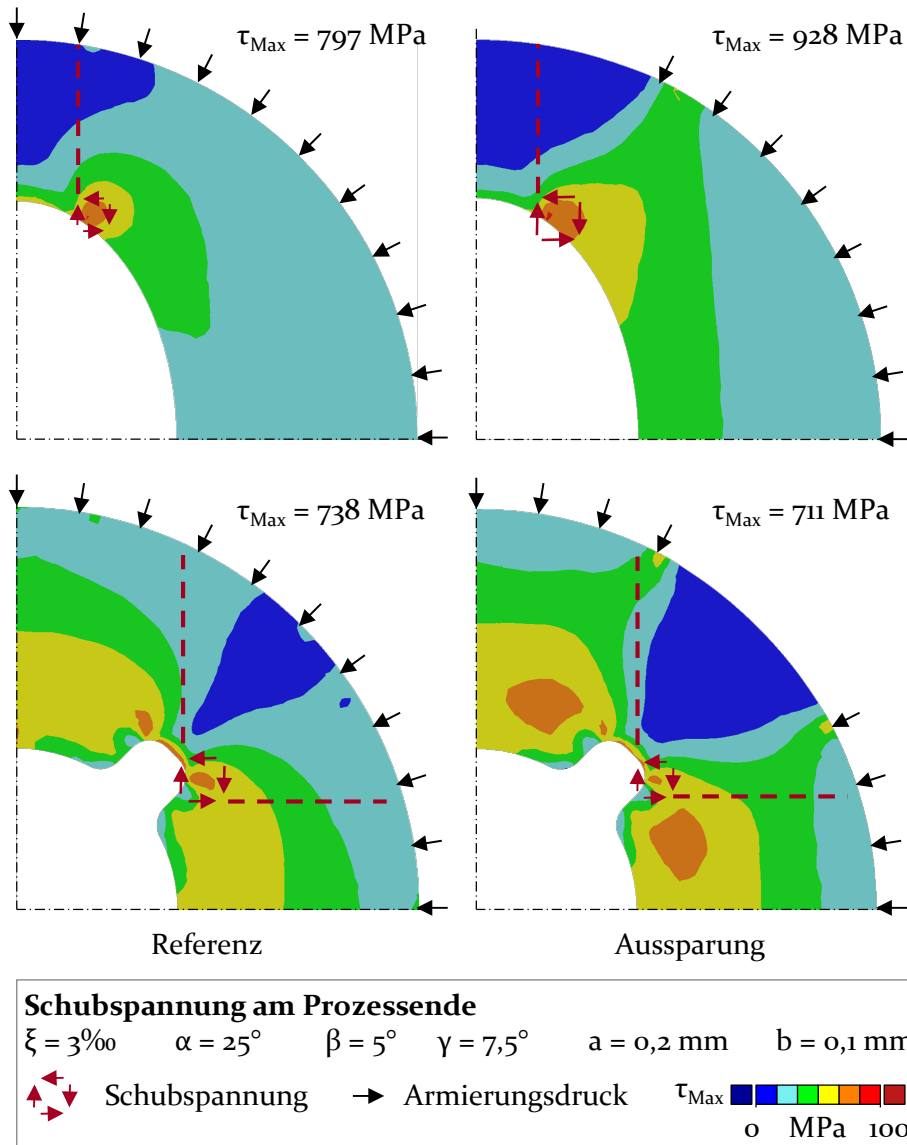


Bild 37: Schubspannungen am Prozessende bei Matrizen mit und ohne Aussparungen

In der ovalen Geometrie liegt eine Erhöhung der Schubspannungen bei Einsatz von Aussparungen vor. Der Grund dafür ist, dass im durch Schub beanspruchten Bereich die Armierungswirkung in y-Richtung wegfällt und demnach den Schubbelastungen in dieser Richtung nicht mehr entgegenwirkt. In der Geometrie mit Funktionselementen wird die zuvor maximale Schubbeanspruchung reduziert, da die Armierung in diesem Bereich in x- und y-Richtung nach wie vor auf die Schubbelastung wirkt. Es entsteht ein

neuer Ort mit erhöhten Schubspannungen, an dem die Armierung diesen nicht mehr entgegenwirkt. Insgesamt sind die maximalen Schubspannungen jedoch geringer als in der Referenzvariante. Im Ermüdungsversuch wurde gezeigt, dass die Tangentialspannungen im Zugspannungsbereich ausschlaggebend für das Ermüdungsversagen sind. Diese werden durch Aussparungen im Armierungsverbund reduziert. Der Einfluss der Aussparungen auf die Tangentialspannung ist demnach in Abhängigkeit der Aussparungsparameter zu untersuchen. Da bei der ovalen Geometrie erhöhte Schubspannungen an der Matrizeninnenwand vorliegen, welche ebenso risskritisch sein können, ist für die Ellipse auch diese Zielgröße auszuwerten.

Um einen möglichen Einfluss auf die umgeformte Bauteilgeometrie durch das veränderte Werkzeugkonzept zu untersuchen, wird in Bild 38 die im Prozess auftretende Radialverschiebung in Abhängigkeit des Werkzeugkonzepts dargestellt. Die Radialverschiebung wird hierbei als Differenz aus der Verschiebung am Prozessende und im Vorspannungszustand berechnet. Dies liegt daran, dass in der Werkzeugherstellung die Geometrie üblicherweise nach Einpressen in die Armierung endbearbeitet wird. Entsprechend wird über die Differenz die im Prozess auftretende Verschiebung abgebildet, die sich auf die hergestellte Bauteilgeometrie auswirkt.

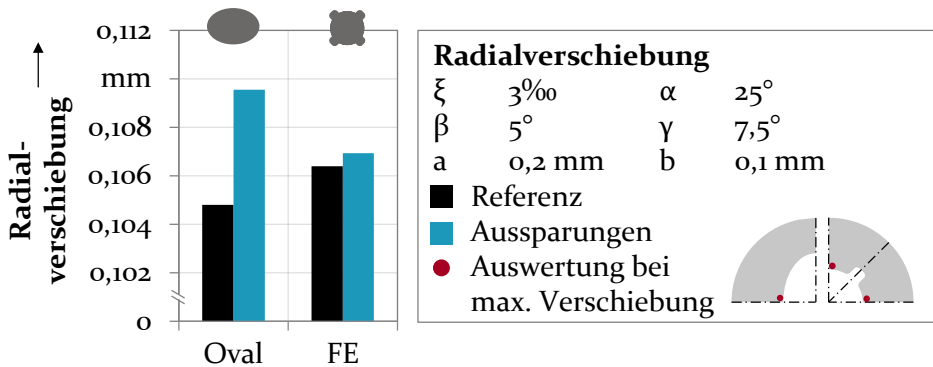


Bild 38: Maximale Radialverschiebung von Matrizen mit und ohne Aussparungen

In der ovalen Geometrie besteht bei Einsatz der Aussparungen mit 0,110 mm eine um 5 μ m größere maximale Verschiebung als in der Referenzvariante. Bei der Geometrie mit Funktionselementen ist der Unterschied mit 1 μ m noch geringer ausgeprägt. Im Kaltfließpressen werden üblicherweise Bauteilgenauigkeiten von bis zu IT8, mit Einsatz von Sondermaßnahmen auch bis zu IT6 erreicht [17]. Dies entspricht bei der Abmessung der kleinen Ellipsenhalfachse von 10 mm Abweichungen von 11 μ m und 27 μ m. Der Einfluss der Maßnahme auf die Bauteilmaßhaltigkeit

ist demnach gering. Wenn Bauteile in sehr engen Toleranzen hergestellt werden müssen, ist eine entsprechende Anpassung der Matrizeninnengeometrie bei Änderung des Werkzeugkonzepts möglich.

7.1.2 Numerische Parameteranalyse

Von den in Bild 34 beschriebenen Parametern der Aussparung sind der Aussparungswinkel α sowie der Abstand a maßgeblich für die Wirkungsweise hinsichtlich der erzielbaren Biegewirkung. Daher werden im Folgenden der Einfluss von α und a auf den Spannungszustand untersucht. Die Winkel β und γ sowie der Abstand b beschreiben den Übergang zum Bereich mit konstantem Haftmaß. Dieser soll nicht zu schroff ausgeführt sein, um einen lokal hohen Kontaktdruck zwischen Matrize und Armierung zu vermeiden. Für einen ausreichend fließenden Übergang werden die Parameter auf die Winkel $\beta = 5^\circ$, $\gamma = 7,5^\circ$ und den Abstand $b = 0,1$ mm festgelegt. Weiterhin ist durch die Position der Aussparung an der Wirkfuge zwischen Matrize und Armierung ein Einfluss des Armierungshaftmaßes zu erwarten. Nachdem pro Zugspannungsbereich eine Aussparung vorgesehen wird, ist zudem die Anzahl kritischer Bereiche relevant. Daher sollen neben dem Haftmaß auch die Werkzeuggeometrie anhand der Anzahl gleichmäßig verteilter Funktionselemente analysiert werden. Die untersuchten Parameter sind mit ihren Faktorstufen in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Versuchsplan zur Analyse durchgängiger Aussparungen

Aussparungswinkel α	Aussparungsabstand a	Matrizenhaftmaß ξ	Anzahl Funktionselemente n_f
10°	0,0 mm	1 ‰	3
15°	0,1 mm	3 ‰	4
20°	0,2 mm	5 ‰	5
25°	0,3 mm	7 ‰	6
30°	0,4 mm	9 ‰	7
35°			8
			9
			10

Bild 39 zeigt den Einfluss des Aussparungswinkels α auf den Beanspruchungszustand. Es werden Winkel von 10° bis 35° untersucht. Unterhalb von 10° ist eine Aussparung mit einem gleichmäßigen Übergang konstruktiv nicht mehr umsetzbar. Höhere Winkel als 35° werden nicht untersucht, um den Armierungsverband nicht zu sehr zu schwächen.

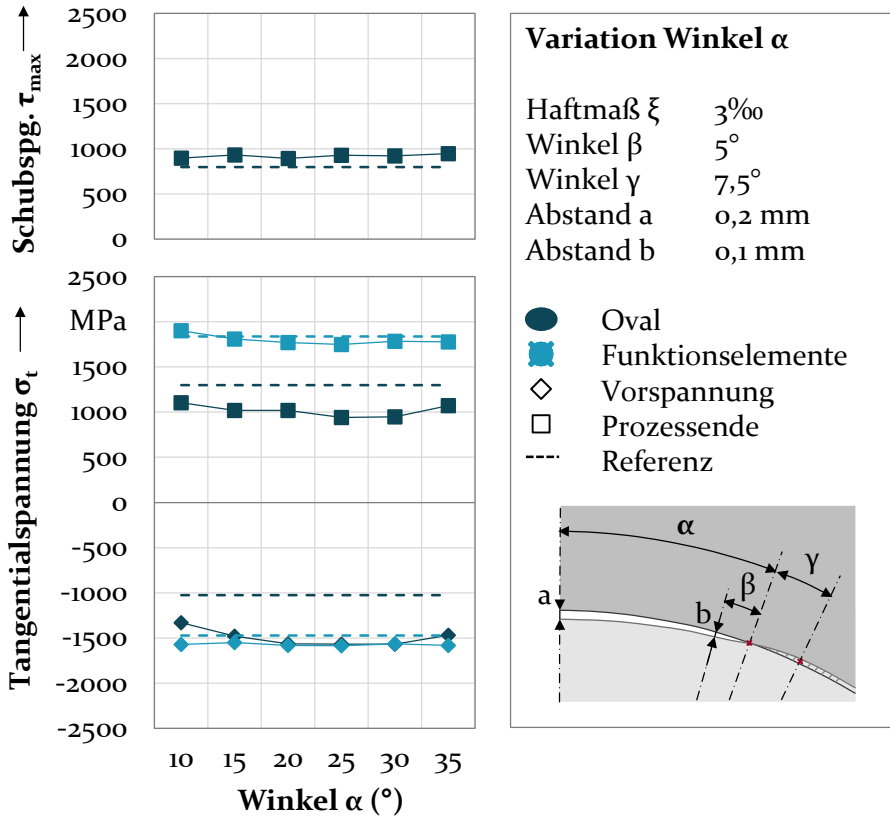


Bild 39: Spannungszustand in Abhängigkeit des Aussparungswinkels α

Für sämtliche Aussparungswinkel ist eine betragsmäßige Erhöhung der Vorspannung im Vergleich zu konventionell armierten Matrizen zu sehen. Diese ist für die ovale Geometrie stärker ausgeprägt als für die Geometrie mit Funktionselementen. Bei einem Winkel von 25° verändert sich die Vorspannung von -1024 MPa (Oval ohne Aussparung) auf -1568 MPa (Oval mit Aussparung) und von -1470 MPa (Funktionselemente ohne Aussparung) auf -1586 MPa (Funktionselemente mit Aussparung). Die erhöhte Vorspannung bewirkt eine geringere maximale Spannung zu Prozessende. Diese nimmt beim Winkel 25° für die ovale Geometrie von 1298 MPa auf 939 MPa und für die Geometrie mit Funktionselementen von 1836 MPa auf 1747 MPa ab.

Die Schubspannungen in der ovalen Geometrie sind für alle Winkel höher als in der Referenzvariante ohne Aussparung, wobei der Aussparungswinkel einen geringen Einfluss auf die Schubspannungen hat. Beim kleinsten Winkel von 10° ist die Schubspannung mit 897 MPa etwas niedriger als

beim größten Winkel von 35° mit 947 MPa. Für kleine Winkel wirkt die Armierung den Schubspannungen stärker entgegen, da näher am für die Schubspannungen relevanten Bereich Kontakt zwischen Matrizze und Armierung besteht. Dennoch ist auch bei diesem Winkel eine Erhöhung der Schubspannungen von 100 MPa im Vergleich zur Referenzvariante, deren maximale Schubspannung 797 MPa beträgt, zu verzeichnen.

Die größte Wirksamkeit hinsichtlich der Beanspruchung im Zugbereich erreichen Aussparungen bei einem mittleren Winkel von circa 25° , wobei die Schubspannungen für alle Winkel erhöht werden. Wird der Winkel auf 35° vergrößert oder auf 10° verkleinert ist die maximale Zugspannung mit 1072 MPa und 1104 MPa um 133 MPa und 165 MPa höher als für das Minimum bei $\alpha = 25^\circ$. Die Gründe hierzu werden im Folgenden anhand von Bild 40 erläutert.

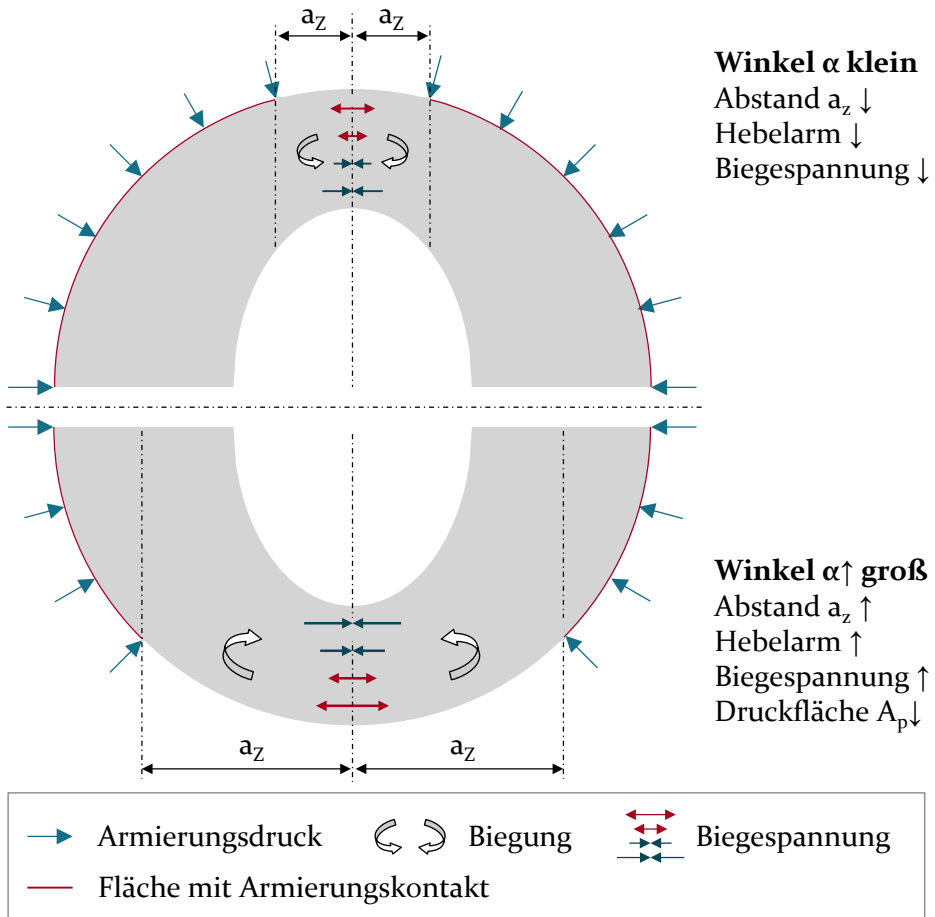


Bild 40: Einfluss des Aussparungswinkels auf die Biegewirkung

Der Aussparungswinkel α beeinflusst die Matrizenfläche, die mit der Armierung im Kontakt steht. Bei einem kleinen Winkel ist der Abstand a_z vom Bereich des Armierungskontakts zur höchstbeanspruchten Stelle gering. Dementsprechend ist auch ein kleiner Hebelarm vorhanden, welcher die durch die Aussparung induzierte Biegespannung erhöht. Je geringer der Aussparungswinkel ist, desto kleiner ist demnach die erzielte Biegewirkung. Bei einem hohen Aussparungswinkel sind Abstand a_z , Hebelarm und Biegewirkung größer. Gleichzeitig nimmt die Fläche A_p der Matrize, die mit dem Armierungsdruck beaufschlagt ist, ab. Die Gesamtwirkung der Armierung ist damit geringer. Beide Effekte gemeinsam führen dazu, dass mittlere Aussparungswinkel von circa 25° die größte Zugspannungsreduktion erzeugen. Bei deutlich kleineren Winkeln ist der Hebelarm und damit die durch die Aussparung induzierte Biegewirkung zu gering. Bei einer starken Erhöhung des Winkels ist die Gesamtwirkung der Armierung zu sehr vermindert.

Neben dem Aussparungswinkel ist die angepasste Geometrie maßgeblich durch den Abstand von der Armierung im Zugspannungsbereich gekennzeichnet. Daher werden Simulationen mit variierendem Abstand a durchgeführt und dessen Einfluss auf den Beanspruchungszustand in Bild 41 dargestellt. Es werden in $0,1$ mm Schritten Abstände von $0,0$ mm bis $0,4$ mm untersucht. Ein Abstand von $0,0$ mm bedeutet dabei, dass die Matrize vollflächigen Kontakt zur Armierung hat, wobei im Bereich des Aussparungswinkels kein Übermaß eingestellt wird. Hierbei handelt es sich demnach nicht mehr um eine Aussparung, aber weiterhin um ein lokal angepasstes Haftmaß.

Durch den Einsatz von Aussparungen mit einem Abstand von $0,1$ mm oder höher wird für alle Geometrien eine betragsmäßige Erhöhung der Vorspannung und eine Reduktion der Spannungen zu Prozessende erreicht. Die Effekte fallen wiederum für die ovale Geometrie stärker aus als für die Geometrie mit Funktionselementen. Die Schubspannungen sind im Vergleich zur Referenzvariante ohne Aussparung für alle Abstände erhöht. Der Aussparungsabstand hat mit Ausnahme des Abstands von $0,0$ mm einen geringen Einfluss auf das Ergebnis. Unabhängig vom Abstand wird auf derselben Position der Armierungsdruck aufgebaut, sodass die Biegewirkung in allen Fällen gleich aufgebracht wird. Beim Abstand $0,0$ mm besteht Kontakt zwischen Matrize und Armierung im Zugspannungsbereich. Dieser wirkt der Biegung entgegen, sodass die maximale Beanspruchung im Vergleich zu den anderen Abständen höher ist.

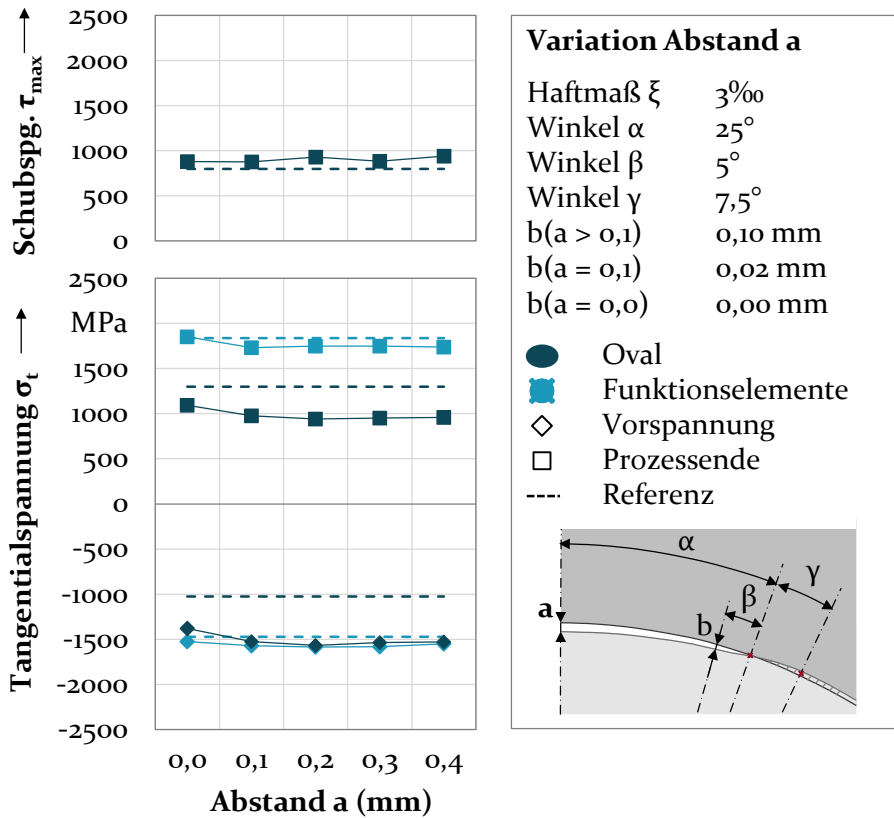


Bild 41: Spannungszustand in Abhängigkeit des Aussparungsabstands a

So beträgt die Spannung zu Prozessende für den Abstand 0,0 mm in der ovalen Geometrie 1092 MPa im Vergleich zu 939 MPa für 0,2 mm. Auch in der Geometrie mit Funktionselementen nehmen die Belastungen für den Abstand 0,0 mm mit 1911 MPa im Vergleich zu 1747 MPa für 0,2 mm zu. In diesem Fall sind die Spannungen sogar größer als bei der Referenzvariante mit 1835 MPa. Für eine maximale Wirkungsweise der Aussparungen sollte daher darauf geachtet werden, dass im Zugspannungsbereich auch nach dem Einpressen kein Kontakt zwischen Matrize und Armierung vorliegt, der der gewünschten Biegung entgegenwirkt.

Die Aussparungswirkung basiert auf einer durch den Armierungsdruck induzierten Biegespannung. Dementsprechend ist mit einem Einfluss des Haftmaßes auf ihre Wirksamkeit zu rechnen. Daher werden in Bild 42 die Spannungen in Abhängigkeit des Haftmaßes zwischen Matrize und Armierung gezeigt. Es werden Haftmaße zwischen 1 ‰ mit sehr geringer Vorspannungswirkung bis zu 9 ‰ gezeigt. Höhere Haftmaße sind fertigungstechnisch schwer zu erreichen und werden daher nicht simuliert.

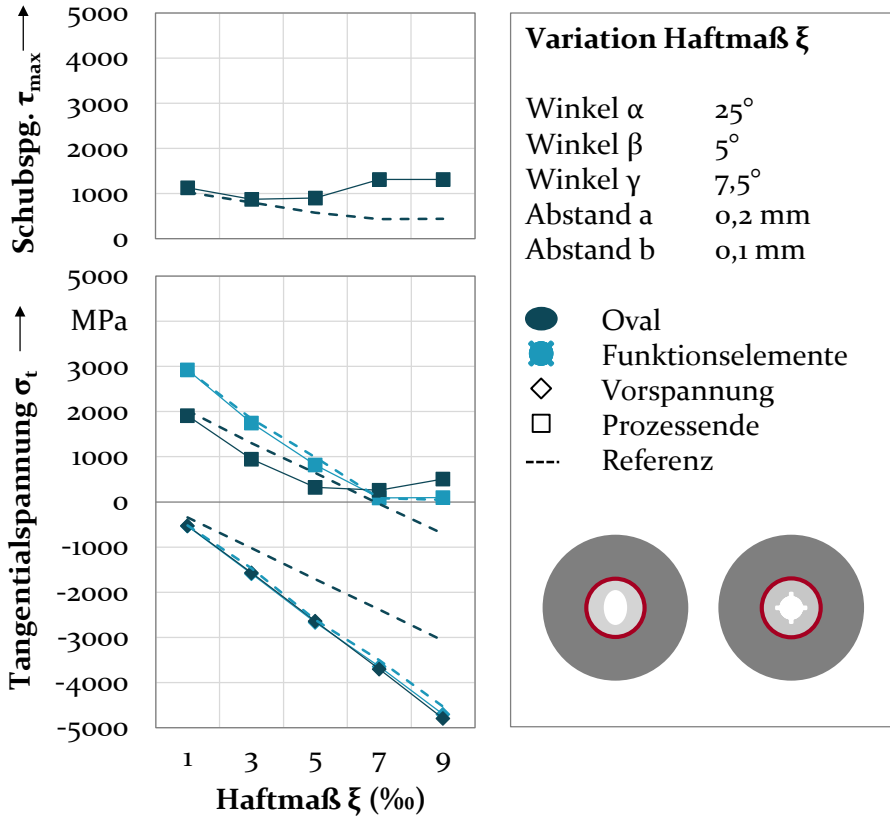


Bild 42: Spannungszustand in Abhängigkeit des Matrizenhaftmaßes ξ

Der Betrag der erzielten Vorspannung steigt linear mit dem Haftmaß an. Dies gilt sowohl für Matrizen mit als auch ohne Aussparung. Der Anstieg ist jedoch für ausgesparte Matrizen höher, da der zur Vorspannung führende Armierungsdruck durch die Biegewirkung lokal verstärkt wird. Bei einem Haftmaß von 1 ‰ beträgt die Vorspannung in der ovalen Geometrie mit Aussparung -530 MPa und ohne Aussparung -344 MPa. Bei einem Haftmaß von 5 ‰ ist die Aussparungswirkung mit einer Änderung der Spannung von -1707 MPa auf -2639 MPa größer. Der gleiche Effekt tritt bei der Geometrie mit Funktionselementen mit einer geringeren betragsmäßigen Erhöhung der Vorspannung auf. Die Aussparungswirkung nimmt daher bei größerem Haftmaß zu. Aus diesem Grund sind auch die Schubspannungen im Vergleich zu den Referenzvarianten ohne Aussparungen bei größerem Haftmaß erhöht. Die veränderte Vorspannung bewirkt bei Haftmaßen bis zu 5 ‰ geringere Zugspannungen zu Prozessende. Bei größeren Haftmaßen übersteigen die durch die Aussparungen neu induzierten Zugspannungen die zuvor kritischen Beanspruchungen. Dies ist in Bild 43 anhand der

Spannungsverteilung der ovalen Geometrie in der Vorspannung und am Prozessende bei einem Haftmaß von 9 ‰ zu sehen.

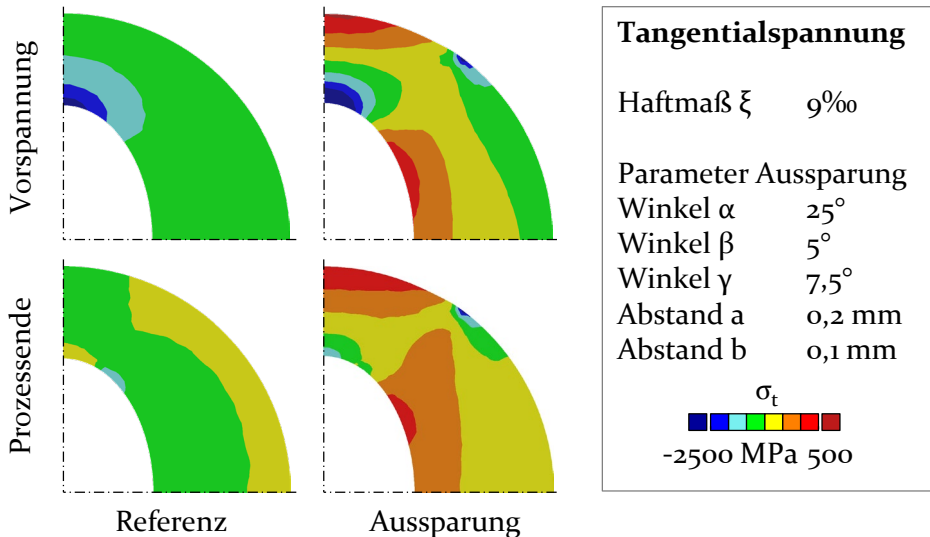


Bild 43: Spannungszustand bei hohem Haftmaß 9 ‰

Bei nicht ausgesparten Matrizen induziert die Armierung mit Haftmaß 9 ‰ nur Druckspannungen in der Matrice. Entsprechend treten auch zu Prozessende außerhalb des Zugspannungsbereichs keine relevanten Zugbeanspruchungen auf. Die Aussparungen hingegen erzeugen bereits bei der Armierung Zugspannungen von etwa 500 MPa für 9 ‰ Haftmaß. Diese sind auch zu Prozessende vorhanden und sind größer als die Belastungen im Zugspannungsbereich, welche durch das hohe Haftmaß stark verringert werden. Der Einsatz von Aussparungen ist demnach empfehlenswert, wenn eine große lokale Spannung auftritt, die aufgrund ihrer Höhe und des einstellbaren Haftmaßes nicht durch eine konventionelle Armierungswirkung eliminiert werden kann.

Sowohl in der Untersuchung der Radialverschiebung als auch der Tangentialspannung ist die Wirkung der Aussparungen für die ovale Geometrie größer als für die Geometrie mit Funktionselementen. Ein wesentlicher Unterschied der Geometrien besteht darin, dass für die Funktionselemente vier Zugspannungsbereiche zur lokalen Vorspannung im Vergleich zu zwei Bereichen an den Ellipsenenden bei der ovalen Geometrie vorliegen. Wegen der höheren Anzahl besteht ein geringerer Abstand der Aussparungen zueinander, wodurch eine kleinere Biegewirkung induziert wird und der Armierungsverbund insgesamt an mehr Stellen unterbrochen ist. Um dies zu verifizieren, wird der Einfluss der Anzahl der Zugspannungsbereiche

und damit Aussparungen in Bild 44 dargestellt. Hierfür werden Matrizen-geometrien mit drei bis zehn Funktionselementen simuliert, da dies der maximal anordenbaren Anzahl an Kavitäten entspricht. Für alle Werkzeugvarianten werden verschiedene Aussparungswinkel in 5°-Abständen simuliert und die besten Ergebnisse im Diagramm dargestellt.

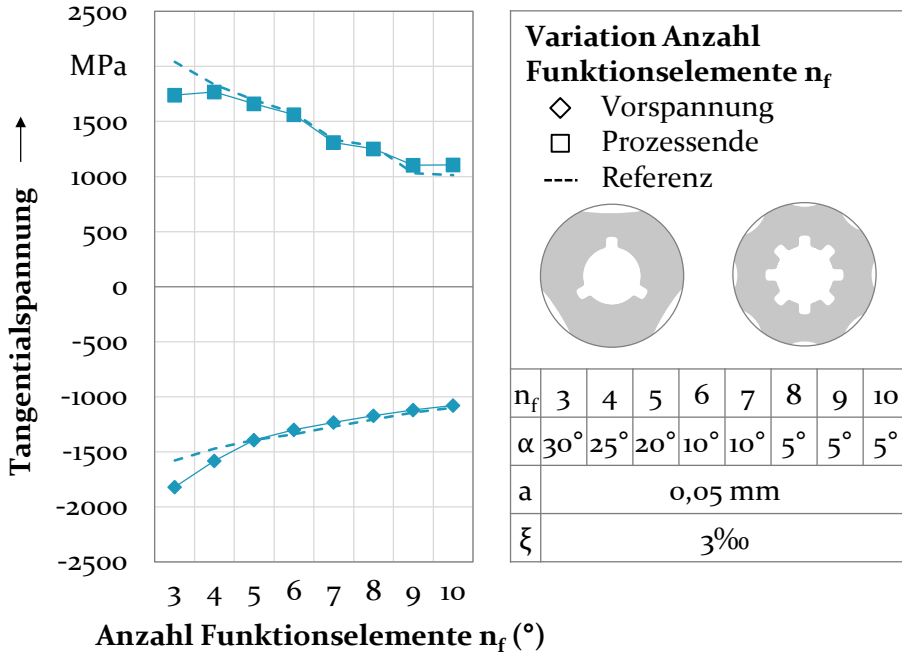


Bild 44: Spannungszustand in Abhängigkeit der Anzahl der Funktionselemente n_f

Bei Erhöhung der Anzahl an Funktionselementen nehmen die Werkzeugbeanspruchungen unabhängig vom Einsatz von Aussparungen ab. Dies liegt daran, dass mehr freies Volumen für die Umformung der Bauteilgeometrien bereitsteht. Ein entsprechendes Verhalten wurde auch bei der Herstellung von Blechmassivumformbauteilen mit Funktionselementen beobachtet [40]. Bei Einsatz von Aussparungen wird die größte betragsmäßige Erhöhung der Vorspannung und Reduktion der Spannung zu Prozessende für die geringste Anzahl an Funktionselementen bewirkt. Während die maximale Beanspruchung bei drei Funktionselementen von 2041 MPa auf 1740 MPa um 301 MPa abnimmt, ist die Reduktion bei vier Funktionselementen mit 90 MPa von 1836 MPa auf 1746 MPa weniger stark ausgeprägt. Ab fünf Funktionselementen ist keine wesentliche Änderung der Vorspannung und maximalen Beanspruchung erkennbar. Der geringere Abstand der Aussparungen zueinander und die großflächigere Unterbrechung des Armierungskontakts beeinträchtigen in diesem Fall die Wirkung. Die

Spannungsreduktion durch Aussparungen ist demnach bei Geometrien mit einzelnen, voneinander entfernten Zugspannungsbereichen am effektivsten.

Insgesamt wurde in den numerischen Untersuchungen gezeigt, dass mithilfe von Aussparungen eine lokale Vorspannung kritischer Bereiche möglich ist. Gleichzeitig treten in der ovalen Geometrie erhöhte Schubspannungen auf, welche ebenso potentiell risskritisch sind. Die Auswirkung auf die Werkzeuglebensdauer und Rissbildung ist daher experimentell zu untersuchen.

7.1.3 Analyse des Ermüdungsverhaltens

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der in den Abschnitten 7.1.1 und 7.1.2 untersuchten Spannungen auf das Ermüdungsverhalten analysiert. Hierfür werden an beiden Seiten einer mit 3‰ Übermaß armierten Matrize Aussparungen eingebracht. Der Einfluss der lokal veränderten Vorspannung auf das Ermüdungsversagen wird durch den Einsatz des Werkzeugs im in Kapitel 6 ausgelegten Modellversuch analysiert. Die verwendete Matrize ist in Bild 45 dargestellt.

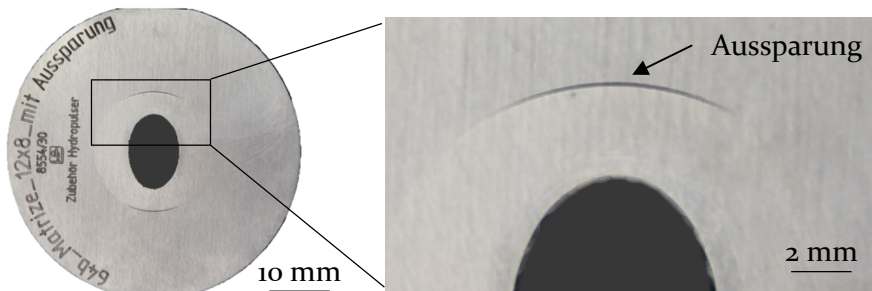


Bild 45: Eingesetzte Matrize mit durchgängiger Aussparung

Entsprechend der numerischen Ergebnisse wird die Aussparung mit einem Winkel von $\alpha = 25^\circ$ versehen. Die Übergangswinkel β und γ betragen 5° und $7,5^\circ$. Die Abstände a und b werden aufgrund der kleineren Abmessungen im Ermüdungsversuch auf $0,08$ mm und $0,04$ mm skaliert. Hiermit ist nach wie vor eine Wirkung ohne Kontakt zwischen Matrize und Armierung im Zugspannungsbereich gewährleistet. Die erreichten Lebensdauern sind im Vergleich zu Referenzmatrizen ohne Aussparung in Bild 46 aufgeführt.

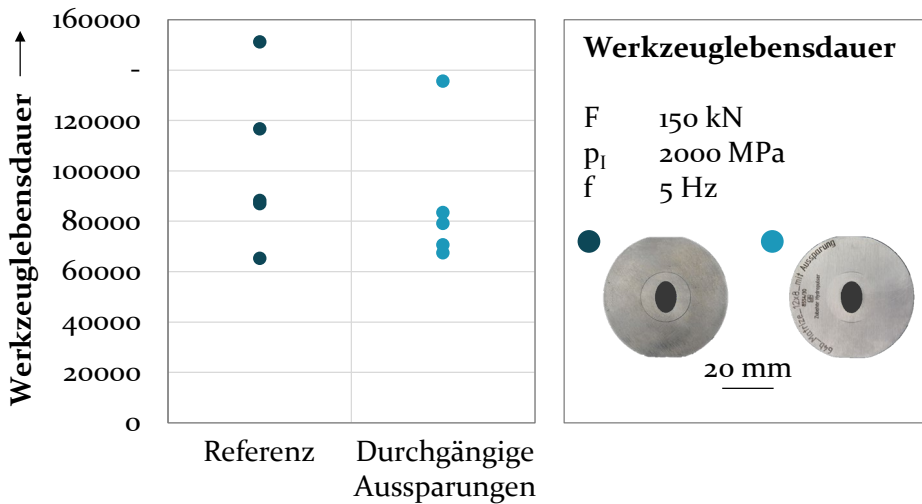


Bild 46: Werkzeuglebensdauer von Matrizen mit und ohne durchgängigen Aussparungen

Die Lebensdauer der Matrizen mit Aussparungen liegt zwischen 67.466 und 135.570 Zyklen. Der Mittelwert ist mit 87.218 ± 27.771 um etwa 15.000 Zyklen geringer als bei Matrizen ohne Aussparung. Es wurden demnach Zyklenzahlen in einem ähnlichen Bereich erreicht, wobei die angestrebte Verlängerung der Lebensdauer nicht auftritt. Um den Grund hierfür zu untersuchen, wird die Ermüdungsrisssbildung einer ausgesparten Matrize in Bild 47 gezeigt.

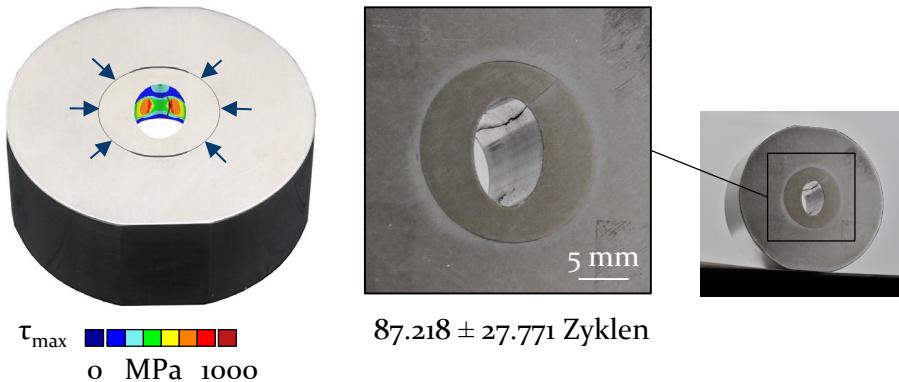


Bild 47: Ermüdungsversagen von Matrizen mit durchgängiger Aussparung

Der Riss verläuft nicht wie in den Versuchen mit konventioneller Armierung gerade an der Ellipsenhauptachse, sondern schräg versetzt dazu im Bereich der größten Schubspannungen. Diese Rissbildung trat bei allen fünf im Versuch eingesetzten Matrizen auf. Zunächst lässt sich hieraus

schließen, dass die Entlastung des Zugspannungsbereichs durch die Aussparungen wirksam ist, nachdem keine Risse in diesem Bereich vorliegen. Ermüdungsriss treten stattdessen am Ort der höchsten Schubspannungen auf. Demnach sind die durch die Aussparung vergrößerten Schubbelastungen kritisch für die Werkzeuglebensdauer, weshalb im Durchschnitt keine größere Zyklenzahl im Vergleich zu nicht ausgesparten Matrizen erreicht wird. Hierfür wäre eine Erhöhung der Vorspannungswirkung im Zugspannungsbereich bei gleichzeitig nicht deutlich zunehmenden Schubspannungen notwendig.

7.2 Abgesetzte Aussparung

Im Folgenden wird der Einsatz abgesetzter Aussparungen zur lokalen Vorspannung bei gleichzeitiger Reduzierung der Schubspannungen im Vergleich zu durchgängigen Aussparung untersucht. Da nur in der ovalen Matrizengeometrie erhöhte Schubspannungen durch die Aussparungen entstehen, werden die Untersuchungen auf diese Geometrie beschränkt. Analog zum Vorgehen bei der durchgängigen Aussparung wird zunächst das grundlegende Konzept und dessen Wirkungsweise beschrieben, bevor eine numerische Parameteranalyse durchgeführt und das Ermüdungsverhalten des Werkzeugkonzepts untersucht wird.

7.2.1 Wirkungsweise

Bei Einsatz durchgängiger Aussparungen werden infolge der lokalen Wegnahme des Armierungsdrucks in der ovalen Geometrie Schubspannungen erhöht, sodass diese ein früheres Ermüdungsversagen verursachen. Um dem entgegenzuwirken, werden abgesetzte Aussparungen wie in Bild 48 gezeigt untersucht.

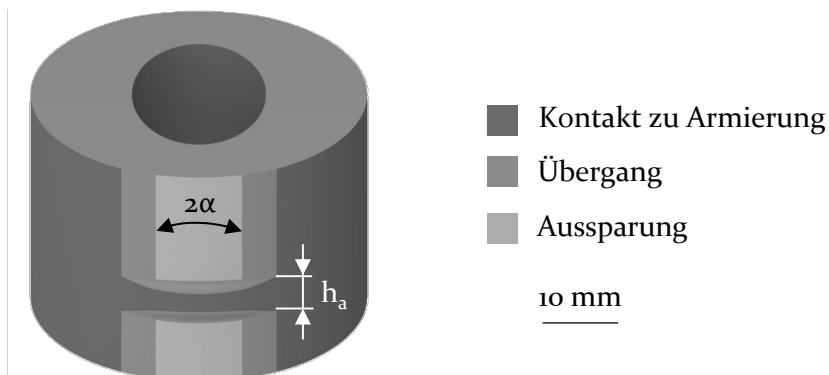
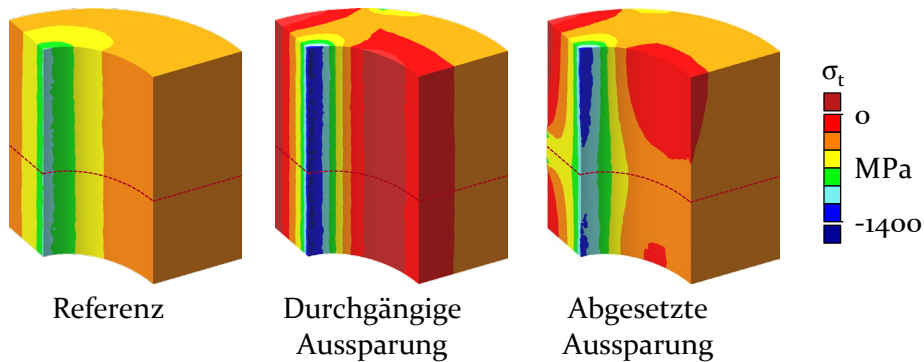


Bild 48: Konzept und Parameter der abgesetzten Aussparungen

Durch einen Absatz in der Aussparung wird die Armierungswirkung auf der Höhe der größten Beanspruchung beibehalten. Das Ziel dabei ist, die lokale Vorspannung nach wie vor durch eine Aussparung aufzubringen, den Schubspannungen jedoch durch den Absatz in der Aussparung entgegenzuwirken. Der Absatz wird daher im höchstbeanspruchten Bereich in der Mitte des Druckraums, also auf der mittleren Höhe des umgeformten Bauteils eingebracht. Die wesentlichen Parameter zur Beschreibung der Geometrie der abgesetzten Aussparung sind der Aussparungswinkel α sowie die Höhe des Absatzes h_a . Deren Einfluss wird in der numerischen Parameteranalyse untersucht. Der Übergang des Absatzes zur restlichen Aussparung wird über zwei Radien von 4 mm konstruiert. Da der Absatz eine unterschiedliche Vorspannungswirkung über der gesamten Matrizenhöhe erzeugt, werden die Spannungen zu Prozessbeginn in einer dreidimensionalen Ansicht in Bild 49 gezeigt.



Vorspannung von Matrizen mit Aussparungen

$\xi = 3\text{‰}$, $\alpha = 25^\circ$, $\beta = 5^\circ$, $\gamma = 7,5^\circ$, $a = 0,2 \text{ mm}$, $b = 0,1 \text{ mm}$, $h_a = 6 \text{ mm}$

----- Querschnitt maximaler Beanspruchung im Umformprozess

Bild 49: Vorspannung bei Einsatz durchgängiger und abgesetzter Aussparungen

Während in der Referenzvariante sowie beim Einsatz durchgängiger Aussparungen über die Matrizenhöhe konstante Vorspannungen erzeugt werden, ist die Vorspannung im Bereich des Absatzes betragsmäßig geringer als an der Ober- und Unterseite des Werkzeugs. In der Mitte des Druckraums ist die Aussparung unterbrochen, sodass die Biege Wirkung weniger stark zur Geltung kommt. Dennoch ist die Vorspannung auch im Bereich des Absatzes mit -1145 MPa betragsmäßig höher als für die Referenzvariante mit -1024 MPa . Die Auswirkung auf die Beanspruchungen zu Prozessende inklusive der Schubspannungen ist im höchstbeanspruchten Querschnitt in Bild 50 dargestellt.

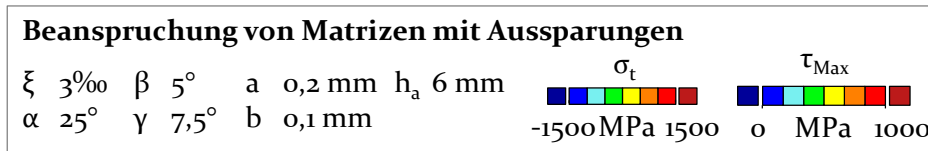
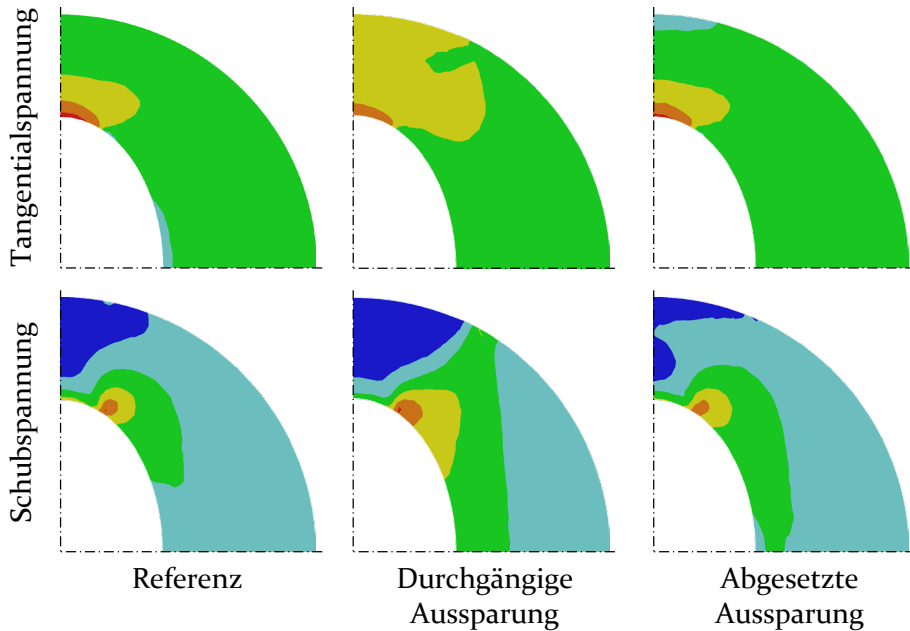


Bild 50: Tangential- und Schubspannungen bei Einsatz durchgängiger und abgesetzter Aussparungen

Die maximale Tangentialspannung wird mit durchgängigen Aussparungen wie bereits beschrieben deutlich reduziert. Auch bei Einsatz abgesetzter Aussparungen liegt mit 1221 MPa eine geringere Spannung vor als in der Referenz mit 1298 MPa. Die Abnahme der tangentialen Belastung ist für durchgängige Aussparungen mit einem Maximalwert von 939 MPa jedoch deutlich größer. Im Gegensatz dazu liegen bei durchgängigen Aussparungen mit 928 MPa höhere Schubspannungen vor. Diese betragen für die Referenzvariante 797 MPa und für die abgesetzte Aussparung 825 MPa. Der Aussparungsabsatz führt demnach zu nur geringfügig erhöhten Schubspannungen. Jedoch ist die Reduktion der Tangentialspannungen durch die unterbrochene Aussparung nicht so stark ausgeprägt. Über eine Analyse der Aussparungsparameter ist zu untersuchen, ob durch eine Anpassung des Aussparungswinkels oder der Absatzhöhe eine geringere Zugspannung bei gleichzeitig nach wie vor moderaten Schubspannungen erreichbar ist.

Analog zum Vorgehen bei der durchgängigen Aussparung wird zuvor der Einfluss auf die Radialverschiebung untersucht. Dieser ist in Bild 51 dargestellt.

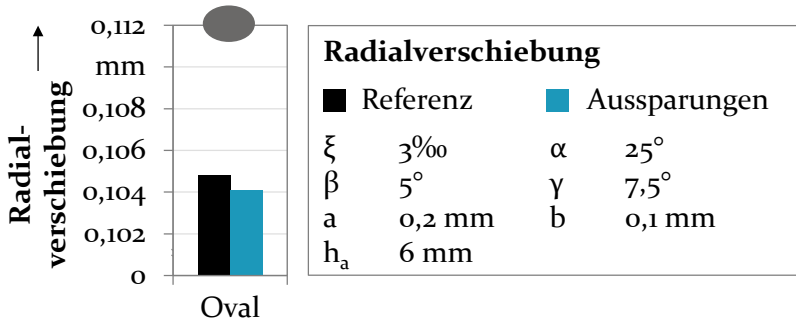


Bild 51: Maximale Radialverschiebung von Matrizen mit und ohne abgesetzten Aussparungen

Bei Einsatz einer abgesetzten Aussparung beträgt die Radialverschiebung 0,105 mm im Vergleich zu konventionellen Matrizen mit 0,104 mm. Der Unterschied ist mit 1 μ m minimal und geringer ausgeprägt als bei durchgängigen Aussparungen. Dies liegt daran, dass die Matrize mit abgesetzter Aussparung näher an der gleichmäßig vorgespannten Geometrie liegt als mit durchgängiger Aussparung. Der Absatz erhöht die Stützwirkung durch die Armierung und sorgt dementsprechend für ähnliche Verschiebungen wie in der Referenzmatrize.

7.2.2 Numerische Parameteranalyse

Die zur numerischen Analyse variierten Parameter sind mit ihren Faktorstufen in Tabelle 4 angegeben. Es werden der Aussparungswinkel α und die Absatzhöhe h_a untersucht. Die restlichen Parameter werden gemäß der Untersuchung der durchgängigen Aussparungen auf Winkel $\beta = 5^\circ$, Winkel $\gamma = 7,5^\circ$, Abstand $a = 0,2$ mm und Abstand $b = 0,1$ mm festgelegt.

Tabelle 4: Versuchsplan zur Analyse abgesetzter Aussparungen

Aussparungswinkel α	Absatzhöhe h_a
10°	2 mm
15°	4 mm
20°	6 mm
25°	8 mm
30°	10 mm
35°	

Über die Analyse des Winkels α wird untersucht, ob die Erkenntnisse aus der Parameteranalyse der durchgängigen Aussparung auf abgesetzte Aussparungen übertragbar sind. Die Absatzhöhe h_a bestimmt, wie hoch die Unterbrechung und damit die Abweichung von der Geometrie der durchgängigen Aussparung ist und wird daher hinsichtlich ihrer Auswirkung auf den Spannungszustand untersucht. Der Einfluss des Aussparungswinkels α ist in Bild 52 dargestellt. Dieser wird analog zur durchgehenden Aussparung zwischen 10° und 35° variiert.

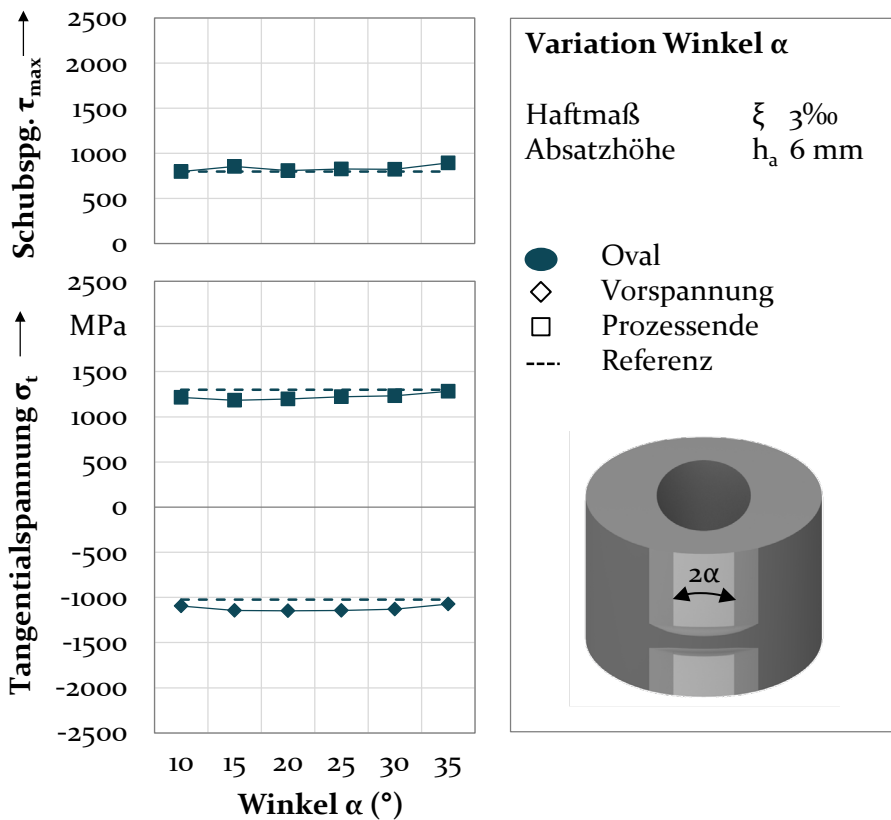
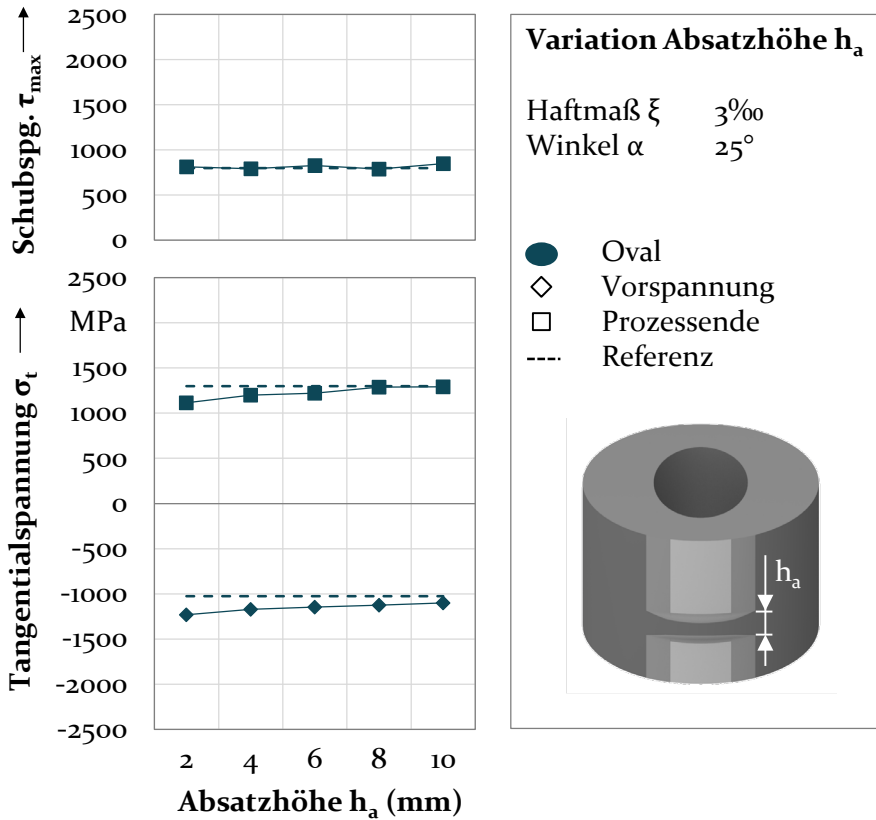


Bild 52: Spannungszustand in Abhängigkeit des Aussparungswinkels α bei abgesetzter Aussparung

Ähnlich wie bei den durchgängigen Aussparungen führen mittlere Winkel zu den betragsmäßig größten Vorspannungen. Diese werden nur auf der Höhe des Absatzes ausgewertet, um den später maximal beanspruchten Bereich abzudecken. Mit einem Winkel von 20° wird eine Vorspannung von -1147 MPa erreicht. Die maximale Vorspannung von Matrizen ohne Aussparung beträgt im Vergleich -1024 MPa. Bei deutlich geringeren oder

deutlich größeren Winkeln nimmt die Vorspannungswirkung mit -1095 MPa für 10° und -1073 MPa für 35° ab. Auch die maximalen tangentialen Beanspruchungen zu Prozessende sind mit abgesetzter Aussparung niedriger als in der Referenzvariante. Mit einem Winkel von 20° wird eine Tangentialspannung von 1197 MPa erzeugt. Im Vergleich zur Referenz mit 1298 MPa ist diese um etwa 100 MPa geringer. Bei sehr kleinen oder sehr großen Winkeln ist die Spannungsreduktion wiederum weniger stark ausgeprägt. Insbesondere beim maximalen untersuchten Winkel von 35° ist mit 1280 MPa nur noch eine sehr geringe Abnahme der Beanspruchungen vorhanden. Eine Anpassung des Winkels bewirkt keine wesentliche Änderung der Schubspannungen, welche mit etwa 820 MPa nur geringfügig höher als in der Referenzvariante mit 797 MPa sind. Lediglich der höchste Aussparungswinkel erzeugt deutlich höhere Schubbeanspruchungen mit 894 MPa. Die Erkenntnisse der durchgehenden Aussparungen sind hinsichtlich des Winkels damit auch für abgesetzte Aussparungen insofern gültig, dass mittlere Winkel in einem Bereich von 15° bis 30° für eine optimale Wirkung verwendet werden sollten. Um den Einfluss des Absatzes genauer zu untersuchen, wird die Auswirkung der Absatzhöhe auf den Spannungszustand in Bild 53 dargestellt. Es werden Abmessungen von kleinen Absätzen mit 2 mm Höhe bis zu großen Absätzen mit 10 mm Höhe untersucht, welche bereits über die Hälfte des Druckraums abdecken.

Eine geringere Absatzhöhe führt dabei zu betragsmäßig größeren Vorspannungen. Die Aussparung ist in einem kleineren Bereich unterbrochen, wodurch die Biegewirkung im höchstbelasteten Querschnitt stärker aufgebracht wird. Bei einer Höhe von 2 mm beträgt die Vorspannung -1232 MPa im Vergleich zu -1073 MPa mit einem Absatz von 10 mm und -1024 MPa ohne Aussparung. Die größere Vorspannungswirkung führt direkt zu geringeren Zugspannungen am Prozessende. Bei einer Absatzhöhe von 2 mm betragen diese 1115 MPa. Bei einem größeren Absatz von 10 mm nehmen die maximalen Beanspruchungen auf 1291 MPa zu. Hier liegen die Belastungen nur noch unwesentlich unterhalb des Referenzwertes von 1298 MPa. Die größte Wirksamkeit der abgesetzten Aussparung hinsichtlich der Tangentialspannungen ist damit mit einer geringen Aussparungshöhe gegeben, da diese Geometrie am nächsten zur durchgängigen Aussparung liegt. Dennoch werden auch bei der kleinsten untersuchten Absatzhöhe die Schubspannungen im Vergleich zur Referenzvariante nur geringfügig erhöht. Diese liegen für $h_a = 2$ mm bei 811 MPa im Vergleich zu 797 MPa ohne Aussparung. Dementsprechend sind bereits kleine Absätze ausreichend, um Schubspannungen im kritischen Querschnitt im Vergleich zu durchgehenden Aussparungen zu reduzieren.

Bild 53: Spannungszustand in Abhängigkeit der Absatzhöhe h_a

Abgesetzte Aussparungen liegen in ihrer Wirksamkeit damit zwischen konventionellen Armierungen und durchgängigen Aussparungen. Die Reduktion der Beanspruchung im Zugspannungsbereich fällt durch den Absatz geringer aus. Gleichzeitig werden die Schubspannungen, welche in Abschnitt 7.1.3 als risskritisch identifiziert wurden, deutlich reduziert. Der Einfluss dieser veränderten Beanspruchungen auf die Rissbildung und Werkzeuglebensdauer wird im folgenden Abschnitt untersucht.

7.2.3 Analyse des Ermüdungsverhaltens

Zur Analyse des Ermüdungsverhaltens werden Matrizen mit abgesetzter Aussparung hergestellt und im Modellversuch getestet. Bild 54 zeigt die eingesetzte Matrize mit abgesetzten Aussparungen an den Enden der Ellipsenhauptachse.

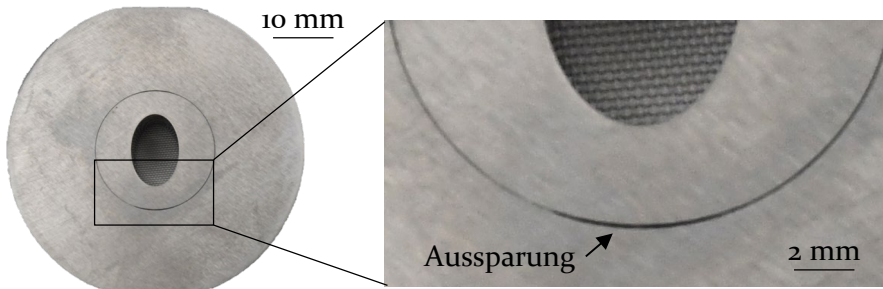


Bild 54: Eingesetzte Matrize mit abgesetzter Aussparung

Da der Absatz im Inneren zwischen Matrize und Armierung liegt und im armierten Zustand nicht sichtbar ist, ist äußerlich kein Unterschied zu Matrizen mit durchgängiger Aussparung erkennbar. Die Aussparungen werden gemäß den numerischen Ergebnissen mit einem Winkel von $\alpha = 20^\circ$ gefertigt. Der Absatz liegt auf der mittleren Druckraumhöhe und ist mit einer Höhe von $h_a = 2$ mm ausgeführt. Die hiermit erreichten Lebensdauern werden in Bild 55 gezeigt. Wegen der hohen Zyklenzahlen trat in einem Fall Werkzeugversagen nicht an der Matrize, sondern am Stempel auf. Weiterhin wurde eine Matrize mit sehr hoher Lebensdauer bei über 350.000 Zyklen als Durchläufer gewertet. Ermüdungsrisse in den Matrizen traten demnach nur in drei der fünf getesteten Varianten auf.

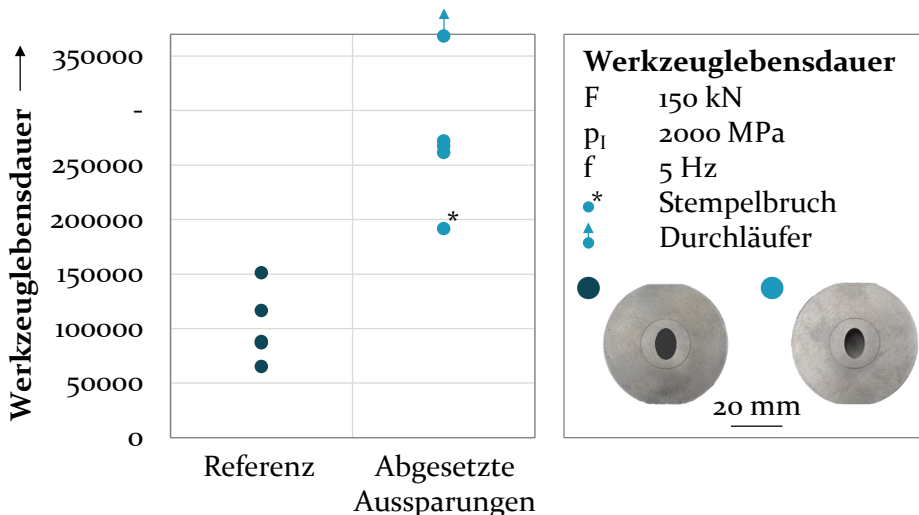


Bild 55: Werkzeuglebensdauer von Matrizen mit und ohne abgesetzten Aussparungen

Die Werkzeuglebensdauer bei Einsatz abgesetzter Aussparungen liegt zwischen 191.939 und 368.404, wobei der untere Wert durch Stempelversagen und der obere Wert als Durchläufer ohne Versagen zustande kommen. Bei

den Werkzeugen mit Ermüdungsversagen in der Matrize liegen die Zyklenzahlen zwischen 261.644 und 272.191. Die durchschnittlich erreichten Zyklenzahlen mit abgesetzter Aussparung sind damit im Vergleich zu konventionell armierten Werkzeugen etwa 2,5-mal so hoch. Die Reduktion der Tangentialspannungen bei gleichzeitig unwesentlicher Erhöhung der Schubspannungen wirkt dem Ermüdungsversagen demnach effektiv entgegen. Die zugehörige Rissbildung ist in Bild 56 zu sehen.

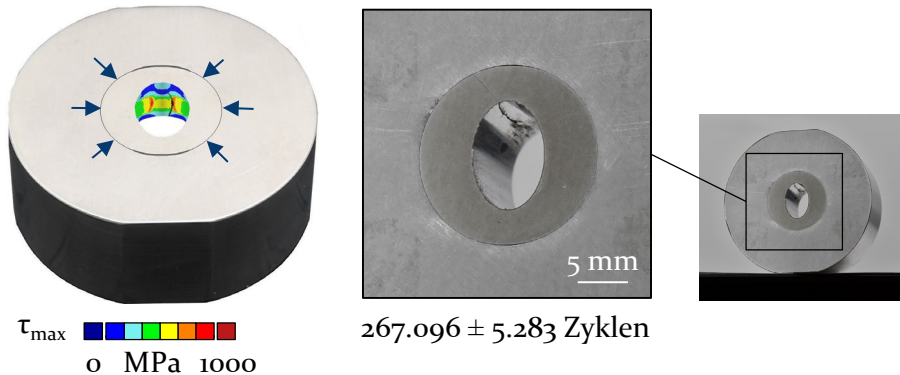


Bild 56: Ermüdungsversagen von Matrizen mit abgesetzter Aussparung

Die Rissbildung mit abgesetzter Aussparung tritt auf die gleiche Weise auf wie bei durchgängiger Aussparung. Durch die höhere Vorspannung des Zugspannungsbereichs sind die dort auftretenden Belastungen nicht mehr maßgeblich für das Ermüdungsversagen. Stattdessen treten Risse versetzt im Bereich der maximalen Schubspannungen auf. Durch die Einführung des Absatzes entsteht die Rissbildung jedoch deutlich später, sodass die Wirksamkeit abgesetzter Aussparungen zur Erhöhung der Werkzeuglebensdauer bei ovalen Geometrien nachgewiesen wurde.

7.3 Bewertung der Eignung von Aussparungen zur lokalen Vorspannung und Erhöhung der Werkzeuglebensdauer

Werkzeuge mit unrunder Innenkontur sind wie in Bild 22 gezeigt über ihren Querschnitt ungleichmäßig beansprucht. Eine lokal erhöhte Vorspannung ermüdungskritischer Zugspannungsbereiche hat Potential zur Verbesserung der Matrizenlebensdauer. Hierzu wurde in diesem Kapitel der Einsatz von Aussparungen im Armierungsverbund untersucht. Durch die Vermeidung des Kontakts zwischen Matrize und Armierung im Zugspannungsbereich bewirkt der verbleibende Armierungsdruck eine Biegung,

welche eine erhöhte Druckvorspannung an der Matrizeninnenseite einbringt. Aufgrund dieser Biegung erfahren Bereiche an der Matrizenaußenseite eine geringe Zugbeanspruchung in der Vorspannung. Da diese Bereiche im Umformprozess nicht stark belastet sind, sind sie jedoch weniger kritisch hinsichtlich Ermüdungsversagen. Durch die Aussparungen wird eine Umverteilung der Spannungen erreicht, welche den kritischen Zugspannungsbereich entlastet. Wie im Stand der Technik aufgezeigt, wurde dieses Konzept bereits für eine lokale axiale Vorspannung mithilfe von in horizontaler Richtung eingebrachten Aussparungen umgesetzt [124]. Durch numerische und experimentelle Untersuchungen in diesem Kapitel wurde der Nachweis erbracht, dass auch eine zielgerichtete Beeinflussung der tangentialen Spannungen möglich ist. Die Wirkungsweise der Aussparungen ist in Abhängigkeit ihrer Ausführung in Bild 57 dargestellt.

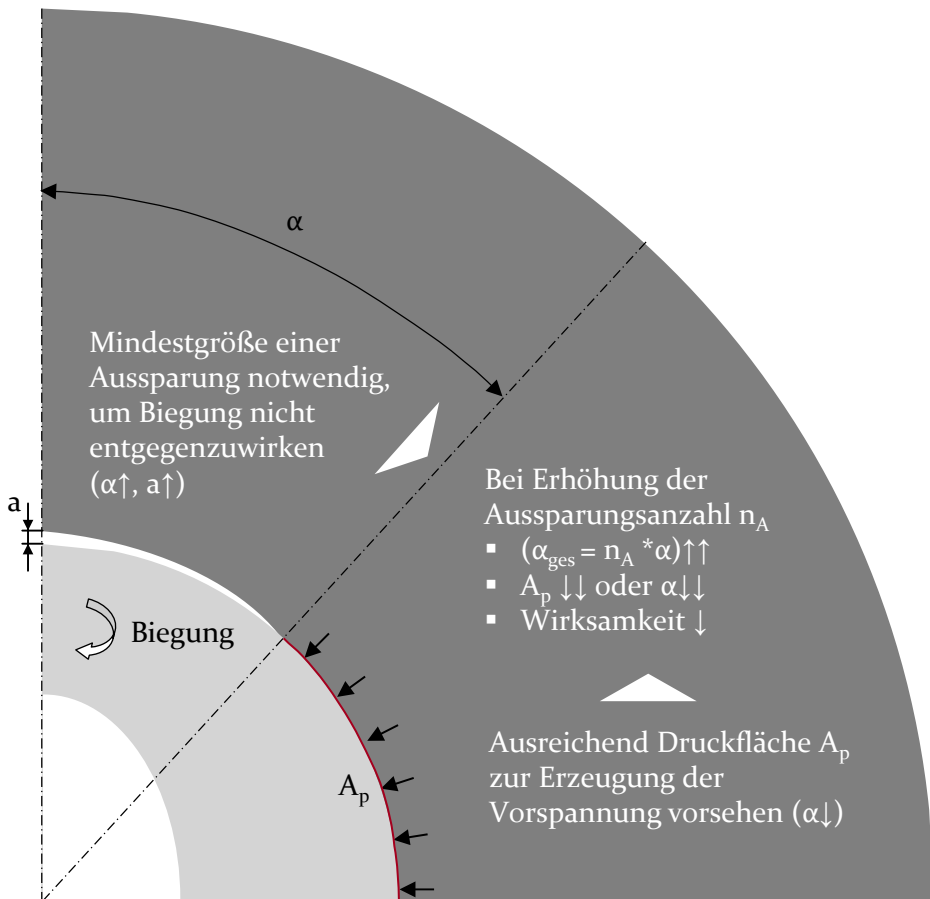


Bild 57: Wirkungsweise der Aussparungen

Die Vorspannungswirkung basiert auf einer Biegung durch Bereiche mit und ohne Übermaß zur Armierung. Um der Biegung nicht entgegenzuwirken, ist ein ausreichender Aussparungswinkel α sowie ein Abstand a vorzusehen, sodass im kritischen Bereich kein Kontakt zwischen Matrize und Armierung besteht. Für die Gewährleistung einer wirksamen Druckwirkung aus der Armierung, ist weiterhin eine nicht zu geringe Druckfläche A_p notwendig. Dies ist bei einer geringen Anzahl von zwei Aussparungen gut erreichbar. Mit Aussparungswinkeln zwischen 15° und 30° wird eine lokal erhöhte Vorspannung und dadurch eine Reduktion der maximalen Zugbeanspruchung um bis zu 350 MPa erreicht. Liegen wie in der Geometrie mit Funktionselementen mehr kritische Bereiche vor, ist auch eine höhere Anzahl von Aussparungen notwendig. Dadurch nimmt bei gleichbleibendem Winkel α die verbleibende Druckfläche, auf die die Armierung wirkt, ab. Bei einer Erhöhung der Aussparungsanzahl ist also entweder eine Reduktion des Aussparungswinkels oder der Armierungsdruckfläche notwendig. Aus diesem Grund sind Aussparungen bei einer größeren Anzahl kritischer Bereiche weniger wirksam. In der Geometrie mit vier Funktionselementen wurde daher nur eine Spannungsreduktion von etwa 100 MPa erreicht. Bei einer größeren Anzahl gleich verteilter Zugspannungsbereiche ist keine Wirksamkeit mehr gegeben. Werden Aussparungen wie beschrieben mit mittleren Winkeln und ausreichender Druckfläche eingesetzt, wird eine lokale Vorspannung im Zugspannungsbereich erreicht. Der Einfluss auf weitere Bereiche, das Ermüdungsversagen sowie die Prozessführung und Werkzeugherstellung ist in Bild 58 anhand von durchgängigen und abgesetzten Aussparungen zusammengefasst.

	Durchgängige Aussparung	Abgesetzte Aussparung
Zugspannungen	↓	↘
Schubspannungen	→ ↑ Geometrie-abhängig	→
Rissbildung im Zugspannungsbereich	↓	↓
Werkzeuglebensdauer	↘	↑
Radialverschiebung	↘	→
Fertigungsaufwand	↘	↘

Bild 58: Einfluss von Aussparungen auf die Werkzeugbelastung, das Ermüdungsversagen, die Prozessführung und Werkzeugfertigung

Neben der gewünschten Reduktion von Zugspannungen im Modellprozess tritt bei Einsatz durchgängiger Aussparungen in der ovalen Geometrie eine Erhöhung von Schubspannungen auf. Durch eine Rissbildung im Bereich höchster Schubbeanspruchung ist die Lebensdauer bei Einsatz dieser Matrizen etwas geringer. Dennoch ist bereits bei Einsatz durchgängiger Aussparungen ersichtlich, dass der Rissentstehung im Zugspannungsbereich entgegengewirkt wird. In keiner getesteten Matrize traten Risse an der Ellipsenhauptachse auf, obwohl diese mit bis zu etwa 135.000 Zyklen nur geringfügig kleinere Lebensdauern erreichten als konventionell armierte Matrizen. Um eine Reduktion der Schubspannung bei gleichzeitig nach wie vor geringeren Zugspannungen zu erreichen, ist es möglich, die Aussparung mit einem Absatz zu unterbrechen. Die Zugspannungen sind abhängig von der Absatzhöhe etwas höher als bei Matrizen mit durchgängigen Aussparungen, im Vergleich zu konventionellen Werkzeugen jedoch immer noch reduziert. Weiterhin ist im Modellprozess bereits eine geringe Absatzhöhe von 2 mm ausreichend, um Schubspannungen wirksam entgegenzuwirken und im Zugspannungsbereich nach wie vor etwa 200 MPa geringere Belastungen als bei Referenzmatrizen zu erzeugen. Im Ermüdungsversuch wurde bestätigt, dass durch den verbesserten Spannungszustand bei Einsatz von abgesetzten Aussparungen eine Erhöhung der Matrizenlebensdauer auf mehr als das 2,5-fache möglich ist. Die hierdurch erreichte Reduzierung von Werkzeugwechseln bringt sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Vorteile, da weniger Werkzeuge gefertigt werden müssen und weniger Ausschuss anfällt, der in der Einlaufphase neuer Matrizen produziert wird.

Hinsichtlich der Fertigung stellt der Einsatz von durchgängigen oder abgesetzten Aussparungen eine einfache und kostengünstige Anpassung von bestehenden Werkzeugen dar. Die Werkzeuge werden wie für konventionelle Vorspannungen hergestellt. Vor dem Einpressen in die Armierung wird die Aussparung in die Matrize eingefräst. Demnach wird dieselbe Menge an Rohmaterial wie für konventionelle Matrizen benötigt. Es wurde gezeigt, dass die Spannungsreduktion bei Aussparungswinkeln von 15° bis 30° in derselben Größenordnung liegt. Auch der Aussparungsabstand hat einen geringen Einfluss, solange im betreffenden Bereich kein Kontakt zwischen Matrize und Armierung vorliegt. Entsprechend ist keine enge Tolerierung der Aussparungen notwendig. Demnach ist durch den niedrigen Fertigungsaufwand zur Herstellung der Aussparungsgeometrie bereits bei geringer Erhöhung der Werkzeuglebensdauer ein wirtschaftlicher Vorteil gegeben.

Es besteht nur ein kleiner Einfluss von Aussparungen auf die elastische Werkzeugdeformation im Umformprozess. Die Stützwirkung der Armierung wird nur in den Zugspannungsbereichen vermindert, in denen geringe Radialverschiebungen auftreten. Den maximalen Verschiebungen in den Druckspannungsbereichen wird nach wie vor entgegengewirkt. Sofern die Bearbeitung der Matrizenendkontur nach dem Einpressen in die Armierung erfolgt, ist nur ein geringer Einfluss auf die Bauteilgenauigkeit zu erwarten. Dieser müsste nur bei sehr engen Bauteiltoleranzen im Mikrometerbereich berücksichtigt werden.

Grundlegend ist der Einsatz von Aussparungen zur Reduktion von Tangentialspannungen sinnvoll möglich, sobald unrunde Querschnitte mit bis zu vier gleichmäßig verteilten ermüdungskritischen Bereichen vorliegen. Als Richtlinie sollten sie mit einem Winkel von circa 25° an der Außenseite jedes kritischen Bereichs eingebracht werden. Dennoch wird vor der Anpassung der Werkzeuggeometrie eine Simulation der Werkzeugbelastung mit dem neuen System empfohlen. Dies liegt daran, dass je nach Bauteilgeometrie Schubspannungen infolge des Einsatzes von Aussparungen erhöht werden können. In diesem Fall ist die Verwendung von abgesetzten Aussparungen zu empfehlen, welche eine Abstützung der gesamten Matrizengeometrie auf dem höchstbelasteten Querschnitt gewährleisten.

8 Untersuchung lokaler Vorspannungen durch das Einpressen von Spannstiften

In Kapitel 7 wurde gezeigt, dass eine lokale Vorspannung durch Aussparungen im Armierungsverband den Spannungszustand sowie die Lebensdauer bei unrunder Matrizeninnengeometrien positiv beeinflusst. Diese Maßnahme ist allerdings nur für eine lokale Vorspannung von bis zu vier gleichmäßig verteilten Bereichen wirksam. Daher wird in diesem Kapitel die Möglichkeit einer lokalen Vorspannung durch in die Matrize gepresste Spannstifte untersucht. Diese sind sowohl in Kombination mit konventionellen Armierungen als auch in Fällen, in denen zum Beispiel auf Grund der Größenverhältnisse keine Armierungen verwendet werden, einsetzbar. Beide Varianten werden im Folgenden numerisch und experimentell untersucht, beginnend mit der Kombination aus Spannstiften und Armierungswirkung.

8.1 Spannstifte mit Armierung

Durch das Fügen von mit Übermaß versehenen Spannstiften in zuvor in die Matrizen eingebrachten Bohrungen wird eine lokale Veränderung der Spannungsverteilung angestrebt. Für die Montageabfolge wird wie in Bild 59 dargestellt zunächst die Matrize hergestellt und mit Bohrungen versehen. Anschließend werden Stifte in die Bohrungen eingepresst und die mit Spannstiften versehene Matrize in den Armierungsring eingeschrumpft.

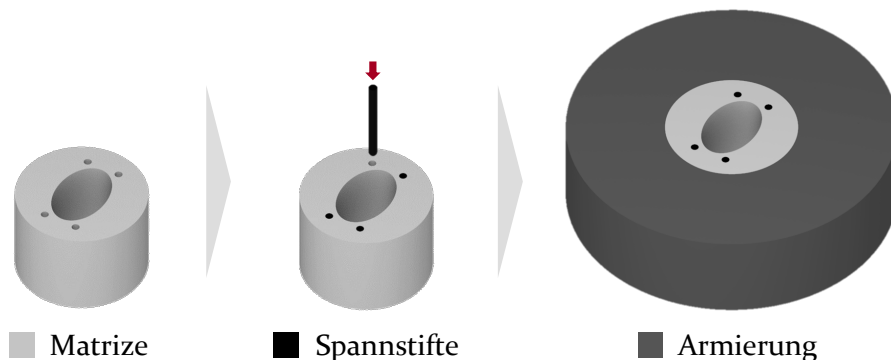


Bild 59: Werkzeugmontage bei Einsatz von Spannstiften

Um die Fügbarkeit der Stifte zu gewährleisten, sollten die Spannstifte zylindrisch ausgeführt werden und ein gewisses Maß an Duktilität besitzen. Als Werkstoff wird daher der Schnellarbeitsstahl HSS 6-5-2 mit einem E-Modul von 210.000 MPa verwendet.

8.1.1 Wirkungsweise

Beim Einpressen von Stiften in Bohrungen entsteht eine radiale Druckspannung um die Bohrung [156]. Durch die Aufweitung liegen zudem Zugspannungen in tangentialer Richtung vor [156]. Die Positionierung der Spannstifte ist demnach entscheidend für ihre Wirkung. In Matrizen mit lokalen Zugspannungen sollten Spannstifte derart angeordnet werden, dass ihre Druckwirkung den Prozessbelastungen entgegenwirkt, ohne dass die Zugspannungen um den Stift einen ermüdungskritischen Bereich fördern. Das Konzept der Spannungsüberlagerung durch Spannstifte ist in Bild 60 dargestellt.

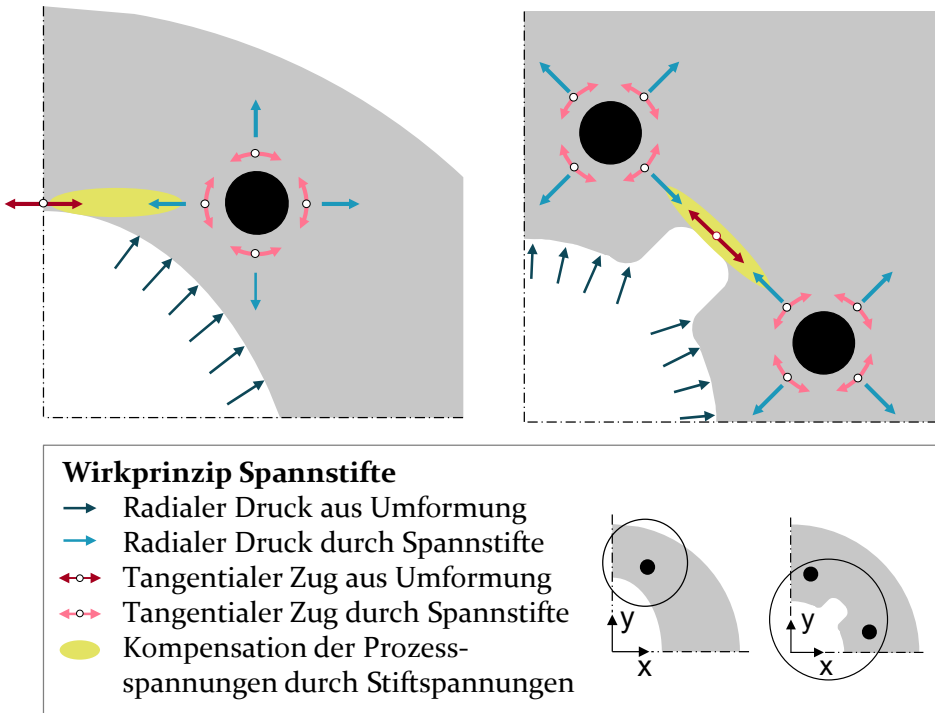


Bild 60: Modellvorstellung der entstehenden Spannungen beim Einsatz von Spannstiften

Tangentiale Zugspannungen treten in der Matrize während des Umformprozesses an der Ellipsenhauptachse sowie der Rückwand der Funktionselemente auf. Um diesen entgegenzuwirken, sollten Spannstifte in gerader

Linie zu den Beanspruchungen positioniert werden. In diesem Fall wirkt der radiale Druck aus dem Einpressen der Stifte den kritischen Prozessbelastungen direkt entgegen. In Hinblick auf die Positionierung der Spannstifte ist daher der orthogonale Abstand c_s zum Ort der kritischen Spannung relevant. Hierbei wird der Abstand zur Bohrungskante verwendet, da die Druckspannungen in Richtung der kritischen Belastung von dort ausgehen. Weiterhin beeinflussen der Stiftdurchmesser d_s sowie sein Übermaß ξ_s in Bezug zur Stiftbohrung die eingebrachten Spannungen. Diese Parameter sind in Bild 61 veranschaulicht. In der ovalen Geometrie wird auf jeder Seite der Ellipsenhauptachse ein Spannstift eingebracht. In der Geometrie mit Funktionselementen wird mit der Positionierung einer Bohrung auf jeder Seite der Elemente die doppelte Anzahl an Stiften pro kritischem Bereich benötigt.

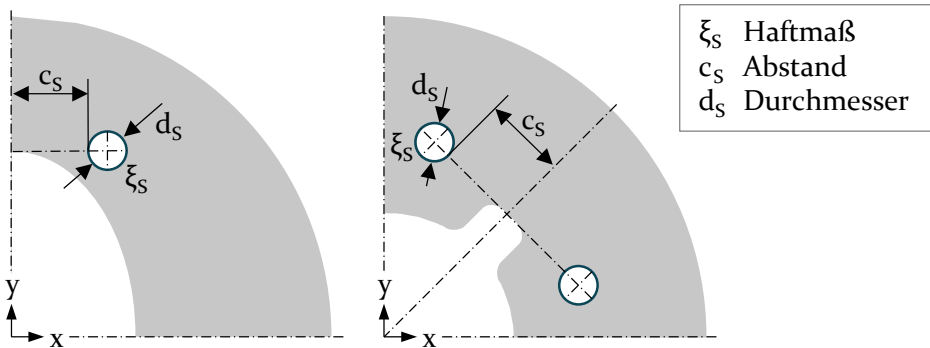


Bild 61: Veranschaulichung der Spannstiftparameter

Der Einfluss der Stiftparameter wird in Abschnitt 8.1.2 untersucht. Zuvor wird die Spannungsverteilung in der Prozesskette mit Vorspannen der Matrizen und Beanspruchung bei der Umformung in Bild 62 analysiert.

Beim Einpressen der Stifte entstehen wie beschrieben Zug- und Druckspannungen um die Stiftbohrung. Durch die Positionierung neben den Zugspannungsbereichen wird hierdurch bereits vor der Verwendung der Armierung eine Druckvorspannung an der Ellipsenhauptachse sowie an der Rückwand der Funktionselemente erreicht. Diese beträgt für die elliptische Geometrie -101 MPa und für die Geometrie mit Funktionselementen -184 MPa. Die geringere Vorspannungswirkung in der elliptischen Geometrie ist darauf zurückzuführen, dass der radiale Abstand der Stiftbohrung zur Matrizeninnenwand kleiner ist als bei der Geometrie mit Funktionselementen. Daher liegt eine kleinere Stützwirkung des Spannstifts durch die Matrize vor, welche die induzierte Druckspannung vermindert.

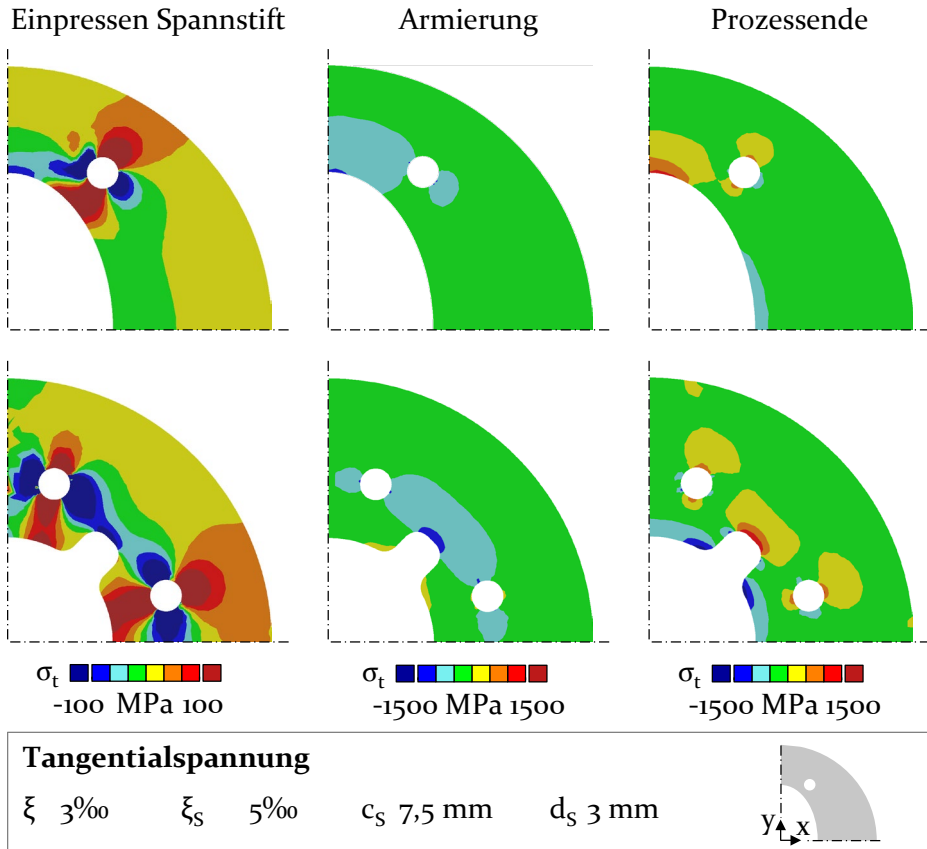


Bild 62: Tangentialspannungen bei Verwendung von Spannstiften

Weiterhin entstehen Zugspannungen um die Stiftbohrungen, die sich bis zur Matrizeninnenwand auswirken. In der elliptischen Geometrie liegen daher nach Einpressen der Spannstifte Tangentialspannungen bis zu 236 MPa an der Matrizeninnenwand vor. Bei der Geometrie mit Funktionselementen betragen diese maximal 155 MPa. Die durch die Stifte induzierten Zugbelastungen befinden sich jedoch nicht im ermüdungskritischen Bereich. Die Zugbeanspruchung wird daher durch den Einsatz der Spannstifte vom Zugspannungsbereich in Richtung des Druckspannungsbereichs umverteilt. Beim Einpressen der mit Spannstiften versehenen Matrize in die Armierung überlagern sich die Armierungsspannungen mit den Stiftspannungen. Daher werden die Zugspannungen um die Stiftbohrungen reduziert. Die maximale Vorspannung wird mit -1151 MPa an der Ellipsenhauptachse und mit -1690 MPa an den Funktionselementen erreicht. Die Vorspannung ist durch die Superposition mit den Stiftspannungen betragsmäßig um etwa 100 MPa (Oval) und 200 MPa (Funktionselemente)

größer als ohne Verwendung der Spannstifte. Die Beanspruchung der Matrix wechselt für jedes hergestellte Bauteil zwischen dem Vorspannungszustand nach Einpressen der Armierung und der maximalen Belastung zu Prozessende. Zu diesem Zeitpunkt sind auch bei Einsatz von Spannstiften die charakteristischen Zug- und Druckspannungsbereiche vorhanden. Die maximalen Zugbeanspruchungen sind jedoch mit 1214 MPa für die ovale Geometrie und 1728 MPa für die Geometrie mit Funktionselementen geringer als ohne Einsatz von Spannstiften. Grundlegend ist die lokale Beeinflussung des Spannungszustands damit zielführend möglich. Zu Prozessende sind jedoch erneut Zugspannungen um die Stiftbohrung vorhanden. Diese sollten mit Hinblick auf potentiell ermüdungskritische Beanspruchungen untersucht werden. Die bisherige Darstellung der Tangentialspannung ist mit Bezug auf ein Koordinatensystem in der Matrizenmitte berechnet. Wie in Bild 63 veranschaulicht ist, sind Radial- und Tangentialspannungen für ein Koordinatensystem in der Bohrungsmitte unterschiedlich orientiert. Nur in direkter Linie von der Matrizenmitte zur Bohrungsmitte sind die Spannungsrichtungen identisch.

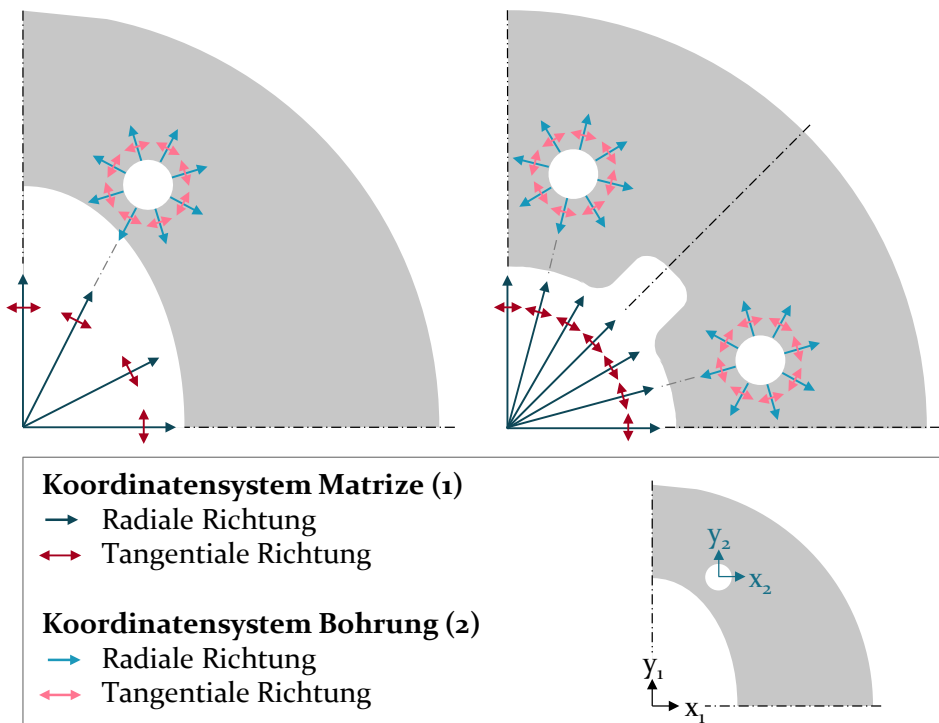


Bild 63: Spannungsrichtung in Abhängigkeit des Koordinatensystems

Da Spannungen infolge des Stifts umlaufend um die Bohrung entstehen, ist das Koordinatensystem in der Bohrungsmitte besser zur Bewertung der Beanspruchung an dieser Stelle geeignet. Diese Spannungsverteilung ist in dargestellt.

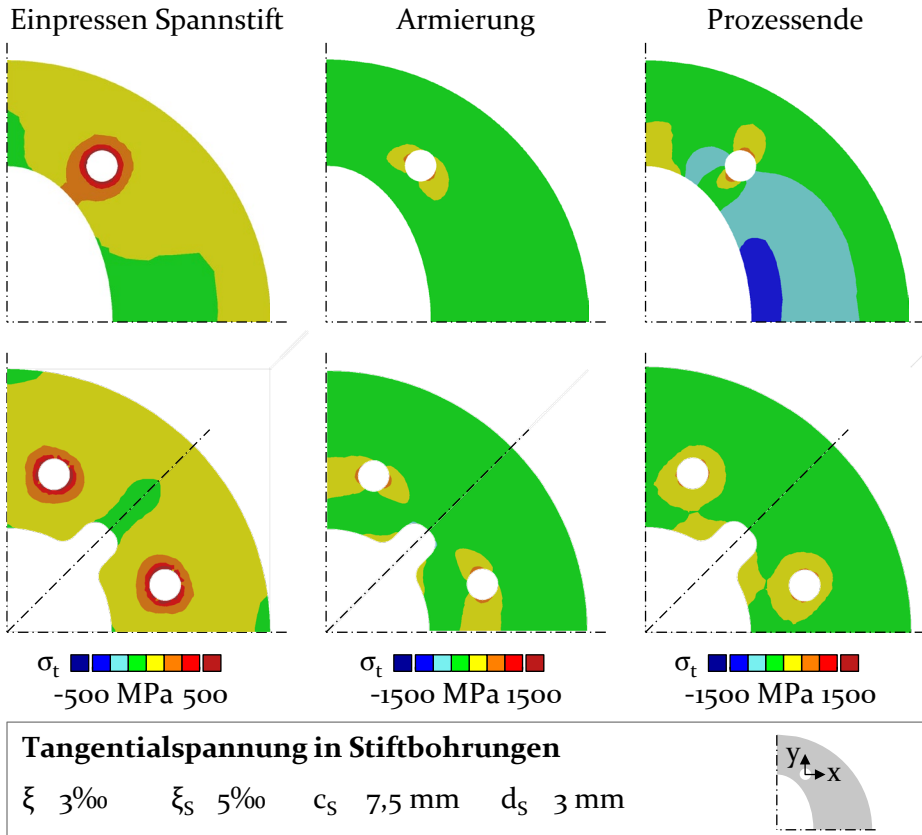


Bild 64: Bohrungsspannungen bei Verwendung von Spannstiften

Nach Einpressen der Spannstifte entstehen in tangentialer Richtung um die Stiftbohrung Zugspannungen. Da die Armierungswirkung hauptsächlich in globaler tangentialer Richtung aufgebracht wird, werden die Bohrungsspannungen, die parallel zur Matrizeninnenkontur verlaufen, beim Einsatz von Armierungen reduziert. An den anderen Seiten der Bohrung liegen jedoch trotz der Armierung nach wie vor Zugspannungen vor. Bei Überlagerung des Vorspannungszustands mit der Prozessbelastung kehren sich die Bohrungsspannungen um. Durch den Druck auf die Matrizeninnenwand werden die Zugbeanspruchungen aus der Vorspannung reduziert. Dafür werden die parallel zur Innenkontur orientierten Bohrungsseiten mit einer

Zugspannung beansprucht. Es liegen dementsprechend um die Stiftbohrung zwei Wechselbelastungen vor. Die parallel zur Matrizenkontur orientierte Bohrungsseite ist mit einer Beanspruchung von Druck in der Vorspannung zu Zug am Prozessende belastet. Auf der anderen Bohrungsseite wechselt die Belastung von Zugspannungen zu Prozessbeginn zu Druckspannungen am Prozessende. Aus diesen Beanspruchungen können Ermüdungsrisse an den Stiftbohrungen entstehen. Die Entstehung von Mikrorissen an den Stiftbohrungen ist für die Prozessführung unkritisch, solange sie keine kritische Länge erreichen und bis zur Matrizeninnenseite durchbrechen. Daher sind die Zugbeanspruchungen zu Prozessende, welche sich in größerer Nähe zur Matrizeninnenwand befinden, als kritischer zu bewerten. Diese sollten zusätzlich zu den globalen Zugbelastungen als Zielgröße in der Parametervariation untersucht werden.

Neben den tangentialen Zugnormalspannungen sind gemäß der Analyse der Aussparungen Schubspannungen potentiell kritisch für eine Ermüdungsrisseinleitung. Daher wird die Verteilung der maximalen Schubspannungen untersucht und in Bild 65 im Vergleich zur Referenz ohne Spannstifte dargestellt.

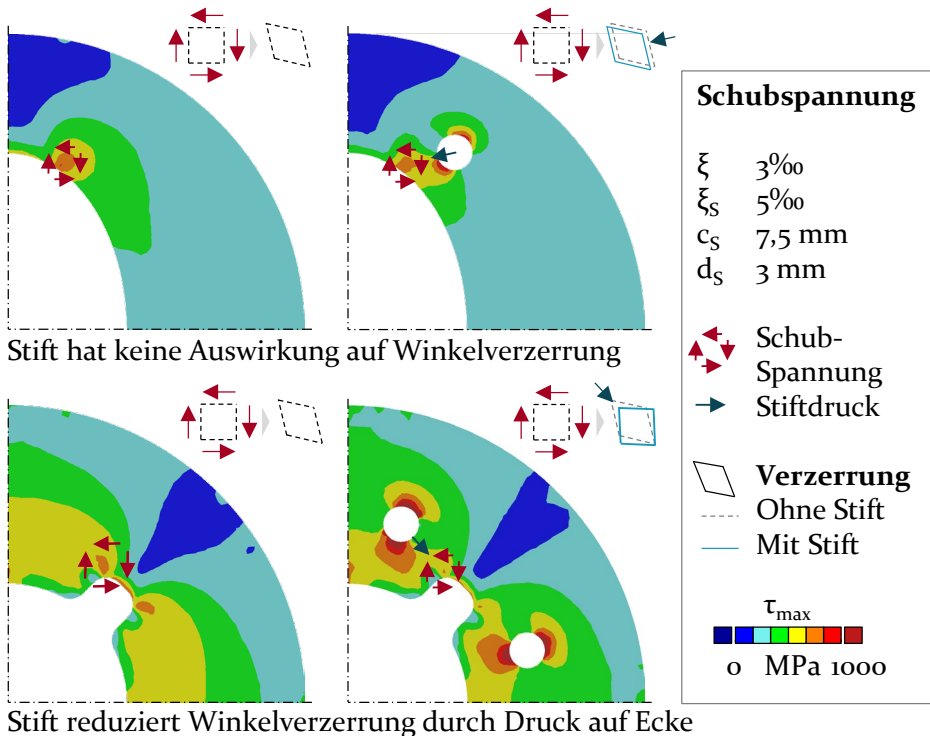


Bild 65: Schubspannungen zu Prozessende bei Einsatz von Spannstiften

Während der Einsatz von Spannstiften für die Ellipse keinen wesentlichen Einfluss auf die Schubspannungen am Übergang der Zug- und Druckspannungsbereiche hat, werden diese in der Geometrie mit Funktionselementen reduziert. Dies liegt an der Orientierung der maximalen Schubspannung relativ zur Spannstiftposition. In der Geometrie mit Funktionselementen wirkt der Stiftdruck der Winkelverschiebung infolge der Schubspannungen direkt an der verzerrten Ecke entgegen. Der seitlich wirkende Spannstiftdruck in der elliptischen Geometrie verursacht hingegen nur eine Verschiebung ohne Winkeländerung. Die Schubspannungen im Übergangsbereich sind bei Einsatz der Spannstifte im Vergleich zur Referenzvariante nicht erhöht. An den Stiftbohrungen liegen hingegen weitere Schubspannungen vor, welche an derselben Stelle der höchsten Zugbeanspruchungen angeordnet sind. Diese Spannungsüberlagerung begünstigt eine Entstehung von Ermüdungsrissen an den Bohrungen, welche in der Parametervariation über die maximale tangentielle Bohrungsspannung bewertet wird.

Zuletzt wird der Einfluss der veränderten Werkzeuggeometrie auf die Bauteilgenauigkeit untersucht. Hierzu ist die maximale Radialverschiebung in Bild 66 dargestellt.

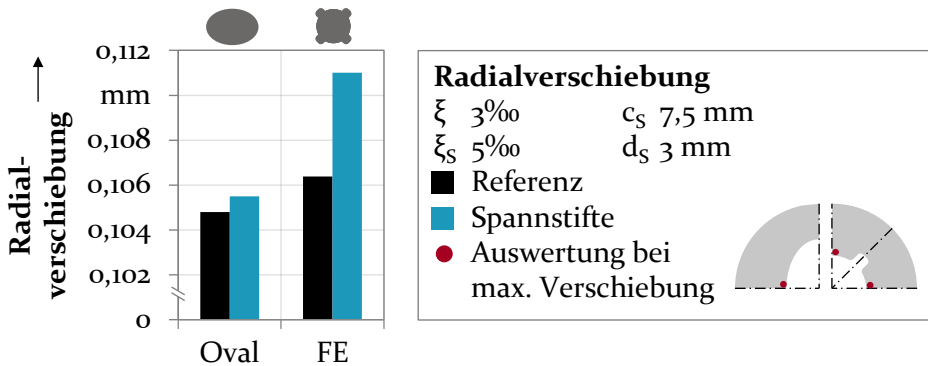


Bild 66: Radialverschiebung bei Einsatz von Spannstiften

In der ovalen Geometrie liegen mit 0,106 mm minimal höhere Verschiebungen bei Einsatz der Spannstifte im Vergleich zu 0,105 mm bei konventionellen Matrizen vor. In der zweiten Geometrie sind die Verschiebungen bei Einsatz von Spannstiften mit 0,110 mm um 4 μm größer als in der Referenzvariante mit 0,106 mm. Hintergrund für die geringfügig höhere Verschiebung mit Spannstiften ist die mit einem E-Modul von 210 GPa kleinere Steifigkeit des Stiftmaterials im Vergleich zum Matrizenmaterial mit 230 GPa. Die Änderung ist mit maximal 4 μm jedoch gering und nur bei sehr engen Bauteiltoleranzen relevant.

8.1.2 Numerische Parameteranalyse

Die erzeugten Spannungen beim Einpressen eines Stifts in eine Bohrung hängen von Haftmaß und Durchmesser der Bohrung ab. Daher werden diese Parameter im Folgenden numerisch untersucht. Weiterhin wird die Position des Stifts in Form des Abstandes zur kritischen Beanspruchung untersucht. Zuletzt ist die Werkzeuggeometrie anhand der Anzahl der Funktionselemente zu analysieren. Hierdurch lässt sich die Wirksamkeit für eine höhere Anzahl enger beieinanderliegender kritischer Bereiche untersuchen, welche für den Einsatz von Aussparungen begrenzt ist. Die untersuchten Parameter sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Versuchsplan zur Analyse von Spannstiften mit Armierung

Stifthaftmaß ξ_s	Stiftdurchmesser d_s	Stiftabstand c_s	Anzahl Funktionselemente n_f
1 ‰	1 mm	4,5 mm	3
3 ‰	2 mm	6 mm	4
5 ‰	3 mm	7,5 mm	5
7 ‰	4 mm	9 mm	6
9 ‰	5 mm	10,5 mm	7
			8
			9
			10

Die vom Spannstift ausgehenden Beanspruchungen hängen von seinem Haftmaß ab. Dieses wird daher im Rahmen der Fügbarkeit zwischen 1 ‰ und 9 ‰ variiert. Bei einem Bohrungsdurchmesser von 3 mm entspricht dies einem absoluten Übermaß von 1,5 μm bis 13,5 μm . Der Einfluss des Haftmaßes auf den Spannungszustand wird in Bild 67 dargestellt. Die Tangentialspannungen an der Matrizeninnenwand werden dabei wie beschrieben anhand eines Koordinatensystems in der Matrizenmitte, die Bohrungsspannungen anhand eines Koordinatensystems in der Mitte der Bohrungen bestimmt.

Mit einem höheren Stifthaftmaß nimmt der Betrag der tangentialen Vorspannung an der Matrizeninnenwand näherungsweise linear zu. Bei einem geringen Haftmaß von 1 ‰ ist die Vorspannungswirkung mit -1061 MPa (Oval) und -1536 MPa (Funktionselemente) nur minimal größer als ohne Spannstift mit -1024 MPa und -1470 MPa. Bei einem Haftmaß von 9 ‰ werden die Vorspannungen betragsmäßig hingegen deutlich auf -1247 MPa und -1871 MPa erhöht.

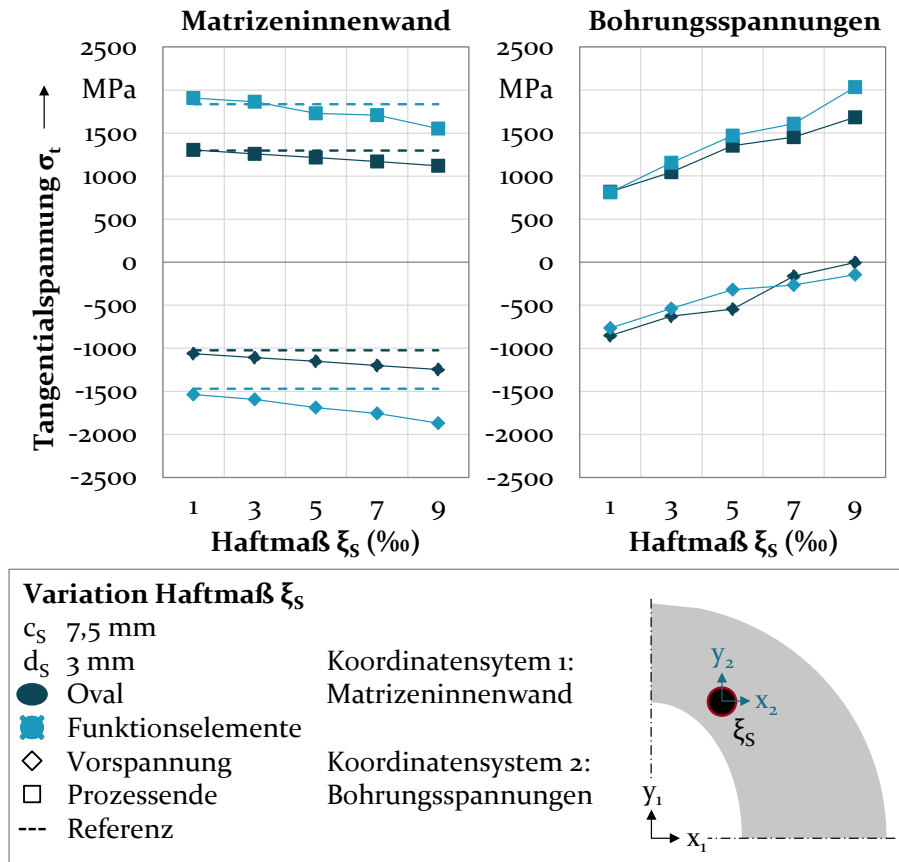
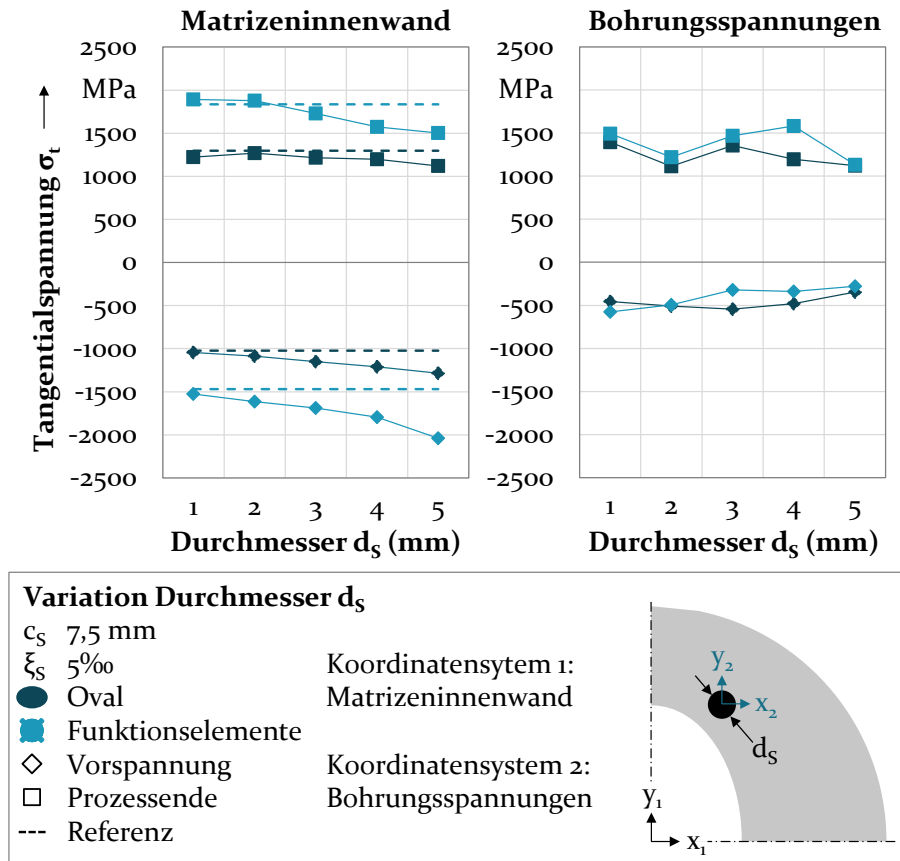


Bild 67: Einfluss des Stifthaftmaßes ξ_s auf den Spannungszustand

Durch die größeren Vorspannungen werden die maximalen Beanspruchungen im Zugspannungsbereich bei hohen Haftmaßen herabgesetzt. Bei einem sehr geringen Haftmaß von 1 ‰ liegen die Spannungen zu Prozessende minimal über den Referenzwerten. Dies wird vermutlich durch den geringeren E-Modul der Stifte im Vergleich zur Matrice hervorgerufen, welcher durch die minimal höhere Vorspannung nicht ausgeglichen wird. Mit einem Haftmaß von 5 ‰ werden bereits deutlich niedrigere Spannungen von 1214 MPa (Oval) und 1728 MPa (Funktionselemente) erreicht. Bei 9 ‰ betragen diese 1121 MPa und 152 MPa. Die Beanspruchung ohne Spannstifte ist hierfür im Vergleich um etwa 180 MPa und 280 MPa höher. Dieser Unterschied wird durch die mithilfe der Spannstifte eingebrachten lokalen Vorspannungen erreicht.

Ein höheres Haftmaß bewirkt jedoch nicht nur die gewünschten höheren radialen Spannungen um die Stiftbohrung. Durch den größeren Druck auf

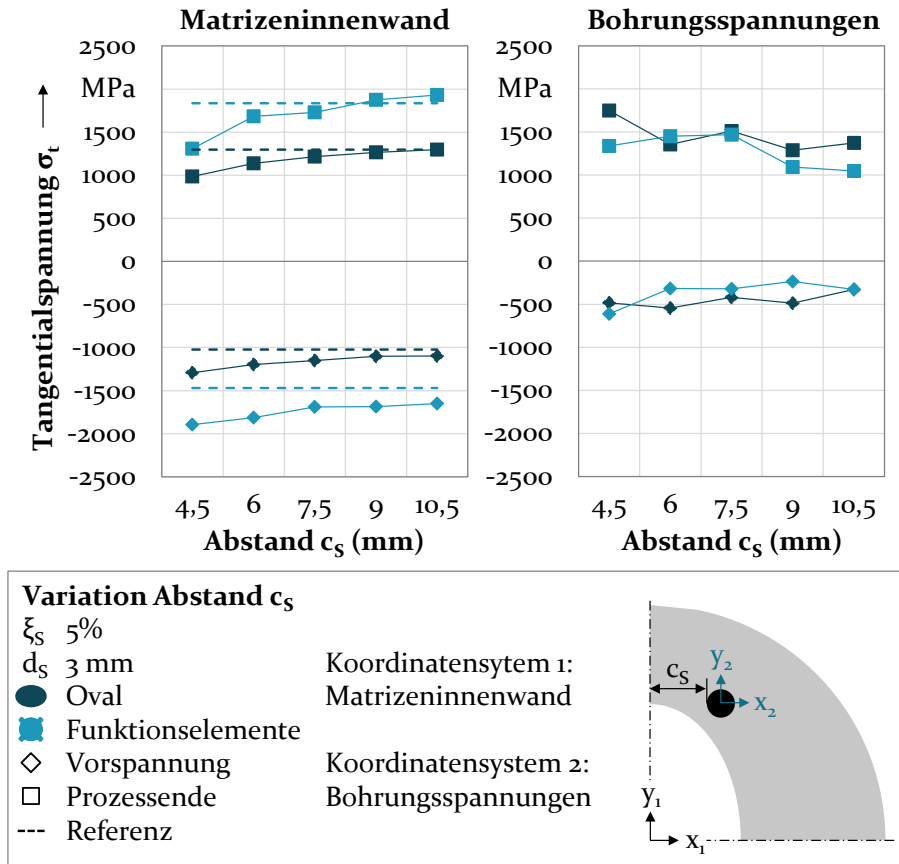
die Bohrung nehmen auch die tangentialen Bohrungsspannungen zu. Während diese zu Prozessende für 1 ‰ nur 816 MPa (Oval) und 811 MPa (Funktionselemente) betragen, liegen die Werte für 9 ‰ bei 1683 MPa und 2030 MPa. Ab einem Haftmaß von 5 ‰ für die ovale Geometrie und 7 ‰ für die Geometrie mit Funktionselementen übersteigen die Bohrungsspannungen die Belastungen im Zugspannungsbereich. Nachdem die Vorspannung in der Bohrung jedoch geringer ist als im Zugspannungsbereich, liegt eine geringere Amplitude der zwischen Zug und Druck wechselnden Belastung vor. Dennoch ist auf die mögliche Entstehung von Ermüdungsrissen in der Stiftbohrung bei hohen Haftmaßen zu achten. Die vom Stift erzeugten Spannungen werden weiterhin von seinem Durchmesser beeinflusst, welcher in Bild 68 untersucht wird. Im Rahmen der Herstellbarkeit und des verfügbaren Bauraums zur Positionierung in der Matrice werden Werte von 1 mm bis 5 mm simuliert.

Bild 68: Einfluss des Stiftdurchmessers d_s auf den Spannungszustand

Die durch die Spannstifte erzeugte Vorspannung nimmt betragsmäßig mit höherem Bohrungsdurchmesser zu, da das beim Einpressen erzeugte Spannungsfeld vergrößert wird. Bei sehr kleinen Durchmessern reichen die Stiftspannungen kaum an den Zugspannungsbereich heran, sodass die Vorspannungen sich nur um 20 MPa auf -1045 MPa (Oval) und um 55 MPa auf -1525 MPa (Funktionselemente) verändern. Beim höchsten Stiftdurchmesser liegen hingegen Vorspannungen von -1287 MPa und -2039 MPa vor. Durch die Druckvorspannung nimmt die Belastung an der Matrizeninnenwand für große Stiftdurchmesser am Prozessende ab. Für den größten untersuchten Durchmesser von 5 mm liegen diese bei 1120 MPa (Oval) und 1501 MPa (Funktionselemente), was einer Reduktion um 180 MPa und 530 MPa entspricht. An den Bohrungsspannungen ist kein eindeutiger Trend zu sehen. Mit einem konstanten Haftmaß ist die maximale Spannung an der Bohrungssinnenseite beim Verpressen runder Bauteile theoretisch konstant. Entstehende Abweichungen sind zum einen durch die Nähe zur Matrizeninnenwand, zum anderen durch eine notwendige unterschiedliche Vernetzung der Bohrungen im Simulationsmodell erklärbar. Insgesamt ist im Rahmen des verfügbaren Bauraums die Verwendung möglichst großer Stifte zu empfehlen. Dies bietet zusätzlich Vorteile in der Herstellung, da weniger enge Passungen zur Herstellung der Haftmaße notwendig sind und die Zugänglichkeit für weitere Bearbeitungsschritte der Oberfläche verbessert wird.

Die Positionierung der Stifte sollte so erfolgen, dass der radiale Stiftdruck der Zugbelastung direkt entgegenwirkt. Daher wird der Einfluss des orthogonalen Bohrungsabstands zum Ort der maximalen Zugspannung mithilfe der Simulation untersucht und in Bild 69 dargestellt. Dieser wird zwischen 4,5 mm und 10,5 mm variiert. Bei einem Abstand von 4,5 mm ist die Bohrung in der ovalen Geometrie in y-Richtung nur noch etwa 1 mm von der Matrizeninnenwand entfernt. Bei der maximalen Position 10,5 mm liegen die Bohrungen bereits nahe an der Trennfuge zur Armierung. Der Einfluss der Stiftposition auf den Spannungszustand wird in Bild 69 gezeigt.

Bei Verwendung kleiner Bohrungsabstände ist der Stift näher am kritischen Bereich angeordnet, sodass die Vorspannung betragsmäßig erhöht wird. Beim kleinsten Abstand von 4,5 mm ist die Vorspannungswirkung mit -1292 MPa (Oval) und -1896 MPa (Funktionselemente) etwa 300 MPa und 400 MPa größer als beim Einsatz von Matrizen ohne Spannstifte. Der Einfluss des Stiftabstands ist damit in einer ähnlichen Größenordnung wie eine Änderung seines Haftmaßes oder Durchmessers.

Bild 69: Einfluss des Stiftabstands c_s auf den Spannungszustand

Bei zunehmenden Abständen nimmt die Vorspannung betragsmäßig ab, wobei auch für $c_s = 10,5$ mm mit -1097 MPa und -1649 MPa nach wie vor eine höhere Wirkung als ohne Spannstifte erreicht wird. Auch zu Prozessende sind die Belastungen im Zugspannungsbereich für geringe Bohrungsabstände am niedrigsten. Beim Abstand von $4,5$ mm wird eine Reduktion der maximalen Spannungen um circa 300 MPa (Oval) und 500 MPa (Funktionselemente) erreicht. Der Einfluss des Abstandes auf die Bohrungsspannungen ist insbesondere in der Vorspannung nicht stark ausgeprägt. Zu Prozessende liegen lediglich in der ovalen Geometrie bei einem Abstand von $4,5$ mm deutlich erhöhte Beanspruchungen in der Bohrung vor. Zur Erklärung wird in Bild 70 die Spannungsverteilung bei diesem Abstand gezeigt.

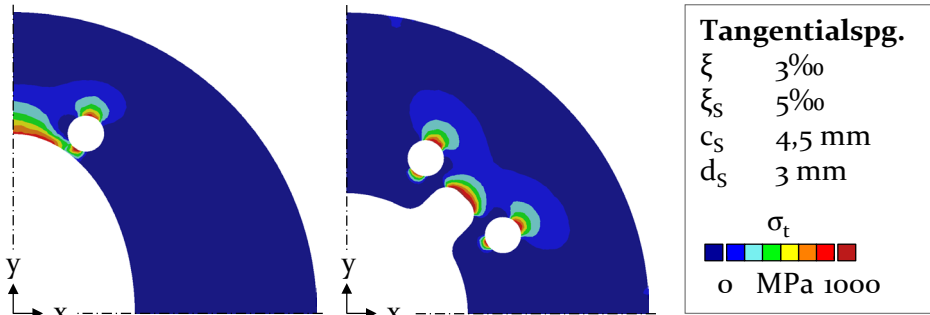


Bild 70: Spannungsverteilung bei kleinem Abstand $c_s = 4,5$ mm

In der Geometrie mit Funktionselementen ist selbst bei kleinem Abstand eine klare Trennung zwischen den Bohrungsspannungen und dem Zugspannungsbereich vorhanden. Dies liegt an dem schrofferen Querschnittsübergang, der mehr Platz für eine Positionierung der Spannstifte bietet, ohne dass diese sehr nahe an die Matrizeninnenwand gelangen. In der ovalen Geometrie ist zu sehen, dass sich die Spannungsfelder aus Prozess- und Bohrungsspannung überlappen. Die Beanspruchung an der Bohrung wird demnach durch die Belastung an der Matrizeninnenwand weiter erhöht.

Eine Limitierung der in Kapitel 7 untersuchten Aussparungen ist, dass diese nur für eine begrenzte Anzahl an Zugspannungsbereichen wirksam einsetzbar sind. Um das Potential der Spannstifte für anspruchsvollere Geometrien zu belegen, werden Simulationen mit Geometrien mit bis zu zehn Funktionselementen durchgeführt. Der Bohrungsabstand wird bis zu sechs Funktionselementen auf 4,5 mm definiert, da hierfür die größte Spannungsreduktion erreicht wurde. Ab einer Anzahl von sieben Funktionselementen überschneiden sich die pro Element angeordneten Spannstifte, weshalb in diesen Fällen nur noch ein Stift genau zwischen zwei benachbarten Elementen angeordnet wird. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Bild 71 abgebildet.

Für sämtliche Geometrien wird eine betragsmäßige Reduktion der Vorspannung sowie der maximalen Beanspruchung erreicht. Die maximale Belastung ist für $n_f = 3$ bis $n_f = 6$ um etwa 450 MPa niedriger als in den Referenzwerkzeugen ohne Spannstifte. Bei $n_f = 7$ Funktionselementen ist die Spannungsreduktion mit etwa 200 MPa geringer, da der Abstand zum kritischen Bereich bei der Positionierung zwischen zwei Funktionselementen zunächst abnimmt. Bei einer höheren Anzahl an Funktionselementen wird durch die geringere Entfernung eines zwischen zwei Elementen angeordneten Stifts zum Ort der maximalen Belastung wiederum eine größere Reduktion der Spannungen erreicht. Damit ist für alle Werkzeuggeometrien

ein verbesserter Beanspruchungszustand im Zugspannungsbereich möglich.

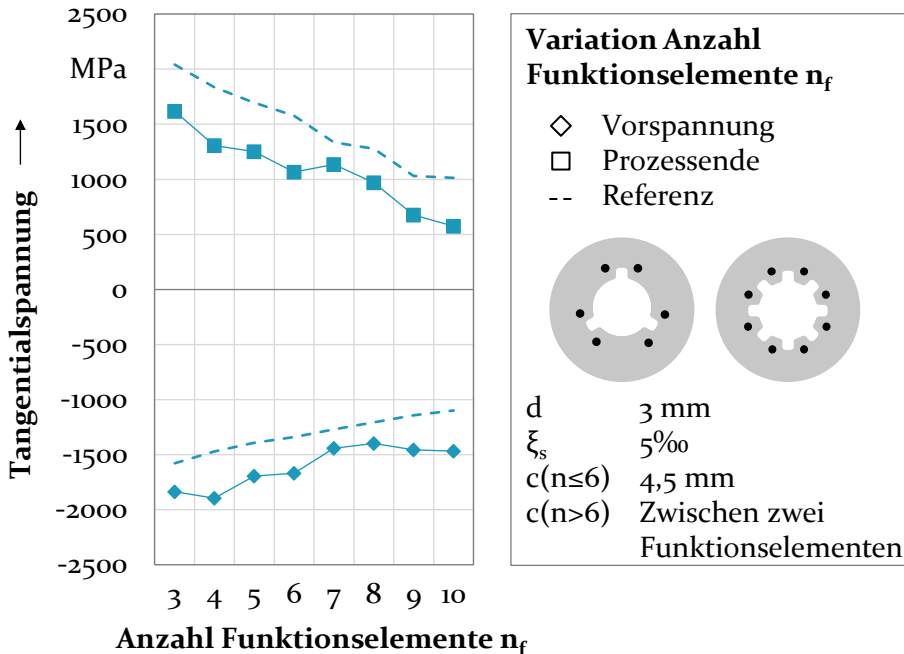


Bild 71: Einfluss der Anzahl an Funktionselementen auf den Spannungszustand bei Einsatz von Spannstiften

Insgesamt zeigen die numerischen Analysen, dass eine lokale Beeinflussung der Werkzeugbelastung durch Spannstifte möglich ist. Bei geeigneter Anordnung werden die in konventionellen Matrizen risskritischen Spannungen reduziert. Gleichzeitig treten neue zyklisch belastete Zonen an den Stiftbohrungen auf, welche bei hohen Haftmaßen die Beanspruchungen im Zugspannungsbereich übersteigen. Die Lebensdauer und Rissbildung bei Einsatz von Spannstiften in armierten Matrizen wird daher im folgenden Abschnitt experimentell untersucht.

8.1.3 Analyse des Ermüdungsverhaltens

Zur Analyse der Werkzeuglebensdauer werden armierte Matrizen mit Spannstiften versehen und im Ermüdungsversuch eingesetzt. Die verwendeten Matrizen sind in Bild 72 dargestellt.

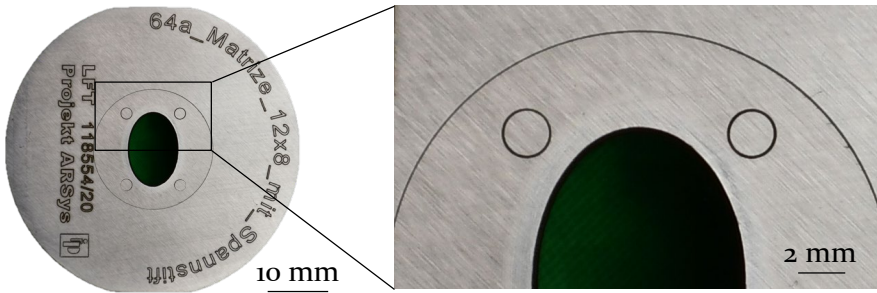


Bild 72: Im Versuch eingesetzte armierte Matrice mit Spannstiften

Es werden Spannstiftdurchmesser von 2 mm bei einem Haftmaß von 5 % und einem Abstand von 4 mm eingesetzt. Nachdem die Matrizengeometrie im Ermüdungsversuch kleiner ist als im Referenzprozess, sind größere Stifte aufgrund des Platzbedarfs nicht verwendbar. Der Abstand und das Haftmaß wurden mit Hinblick auf eine große Vorspannungswirkung bei gleichzeitig moderaten Bohrungsspannungen gewählt. Die erreichten Zyklenzahlen der Werkzeuge sind in Bild 73 im Vergleich zu konventionell armierten Matrizen aufgeführt. Die Lebensdauer der mit Spannstifte versehenen Matrice liegt zwischen 10.163 und 42.660 Lastzyklen. Mit einem Durchschnitt von 21.405 ± 13.014 Zyklen ist sie deutlich geringer als die Lebensdauer der Referenzmatrice mit 101.720 ± 33.183 Zyklen.

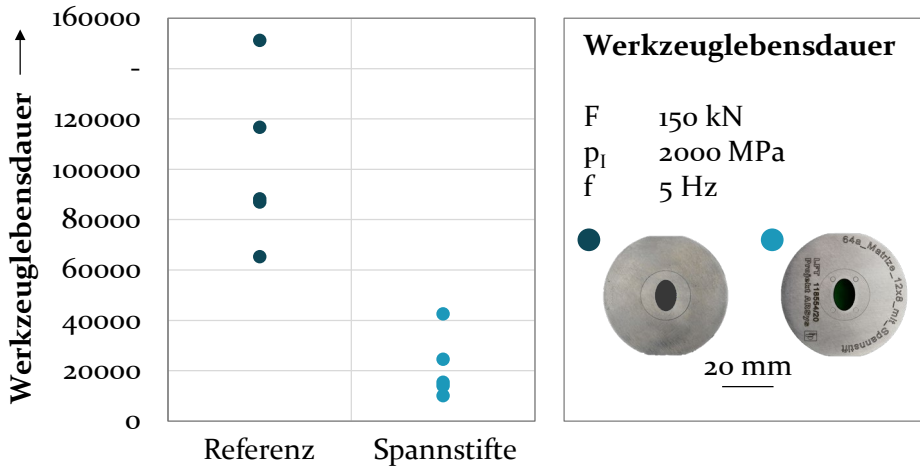


Bild 73: Werkzeu­glebensdauer armierter Matrizen mit und ohne Spann­stifte

Grund für die geringere Lebensdauer sind Ermüdungsrisse, die an den Stiftbohrungen auftreten. Ein solcher Riss ist in Bild 74 dargestellt. Risse an den Stiftbohrungen liegen in allen fünf getesteten Matrizen vor, wobei teilweise an mehreren oder allen Stiftpositionen Risse zu sehen sind.

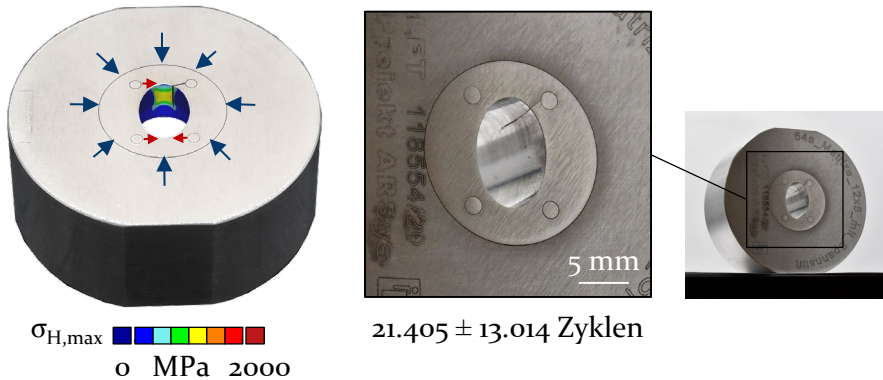


Bild 74: Rissbildung in armierten Matrizen mit Spannstiften

Die Bohrungsspannungen sind in dieser Matrizenvariante deutlich kritischer als die Beanspruchungen im Zugspannungsbereich. Durch die nahe Position zur Matrizeninnenwand brechen die Risse in die Umformzone durch und führen zu einem frühzeitigen Werkzeugversagen. Ein verstärkender Faktor ist, dass die Bohrungen zur Einhaltung der Toleranzen erodiertechisch eingebracht werden. Hierdurch erhält die Bohrungsoberfläche ermüdungsfördernde Zugeigenstressungen [84]. Aufgrund des geringen Bohrungsdurchmessers ist keine polierende Nachbearbeitung der Oberfläche zur Reduktion der Eigenstressungen möglich. Das Potential von Spannstiften ist demnach in größeren Werkzeugen höher, in denen Stifte mit höherem Durchmesser in einem größeren Abstand zur Matrizeninnenwand eingebracht werden können. Dies ist bei Einsatz einer nicht armierten Matrize gegeben, welche im folgenden Abschnitt untersucht wird.

8.2 Spannstifte ohne Armierung

Eine Armierung von Matrizen ist aufgrund großer Abmessungen, geringen Bauraums oder zu hoher Druckspannungen nicht immer sinnvoll möglich. In diesem Fall hat der Einsatz von Spannstiften Potential, welche ohne die geometrischen Einschränkungen durch Armierungen größer ausgeführt und flexibler positioniert werden können. Die Wirkweise wird zunächst numerisch untersucht und anschließend im Ermüdungsversuch verifiziert.

8.2.1 Wirkungsweise

Beim Einsatz von Spannstiften ohne Armierung werden die Matrizen nicht von außen vorgespannt. Zur Gewährleistung derselben Gesamtgeometrie

wird der Matrizendurchmesser dafür auf den Außendurchmesser der Armierung vergrößert. Hierdurch besteht mehr Bauraum für eine Positionierung größerer Spannstifte. Dies wird in Bild 75 anhand von Stiften mit einem Durchmesser von 10 mm veranschaulicht.

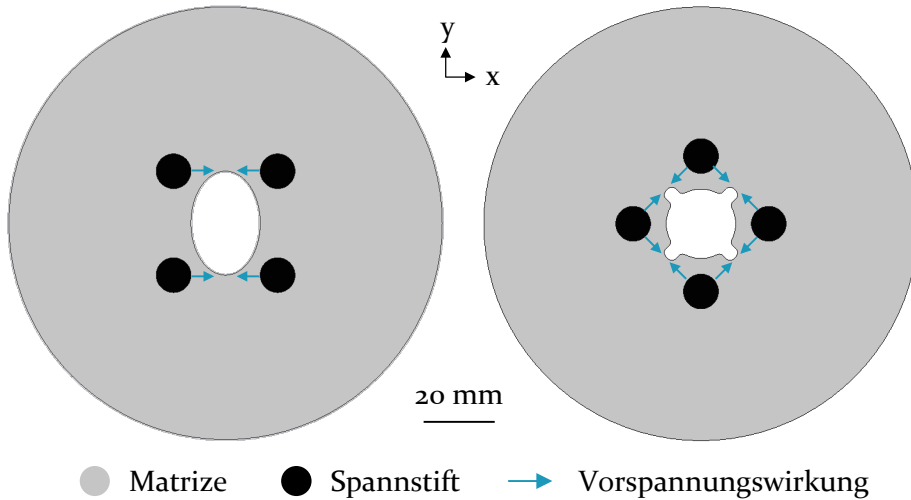


Bild 75: Positionierung von Spannstiften ohne Armierung

In der elliptischen Geometrie ist eine Erhöhung des Stiftdurchmessers und eine Verschiebung entlang der x-Achse über die gesamte Matrizengröße möglich. In der Geometrie mit Funktionselementen wirkt bei großen Durchmessern ein Stift auf zwei Funktionselemente. Die Position der Stifte ist damit derart festgelegt, dass diese in gerader Linie zu den Zugspannungen an der Rückwand dieser beiden Funktionselemente liegen.

Zur Analyse der Wirkung von Spannstiften ohne Armierung sind in Bild 76 die Tangentialspannungen in Bezug zur Matrizenmitte für Werkzeuge mit und ohne Spannstifte dargestellt. Ohne Einsatz von Spannstiften oder Armierungen besteht keine Vorspannung in der Matrize. Werden Spannstifte verwendet, wird eine Druckvorspannung an der Ellipsenhauptachse und der Rückwand der Funktionselemente erreicht. Diese beträgt -505 MPa (Oval) und -649 MPa (Funktionselemente). Die Stiftwirkung ist durch den größeren verwendeten Durchmesser höher als bei einem kombinierten Einsatz von Spannstiften und Armierung, übersteigt jedoch nicht die durch Armierungen erreichbare Vorspannung. Durch die Tangentialspannungen um die Stiftbohrungen entstehen Zugbeanspruchungen an der Matrizeninnenwand von bis zu 619 MPa (Oval) und 751 MPa (Funktionselemente).

Diese Beanspruchungen werden nicht durch eine Armierungswirkung reduziert, überlagern sich bei der Umformung jedoch mit der Prozessbelastung im Druckspannungsbereich.

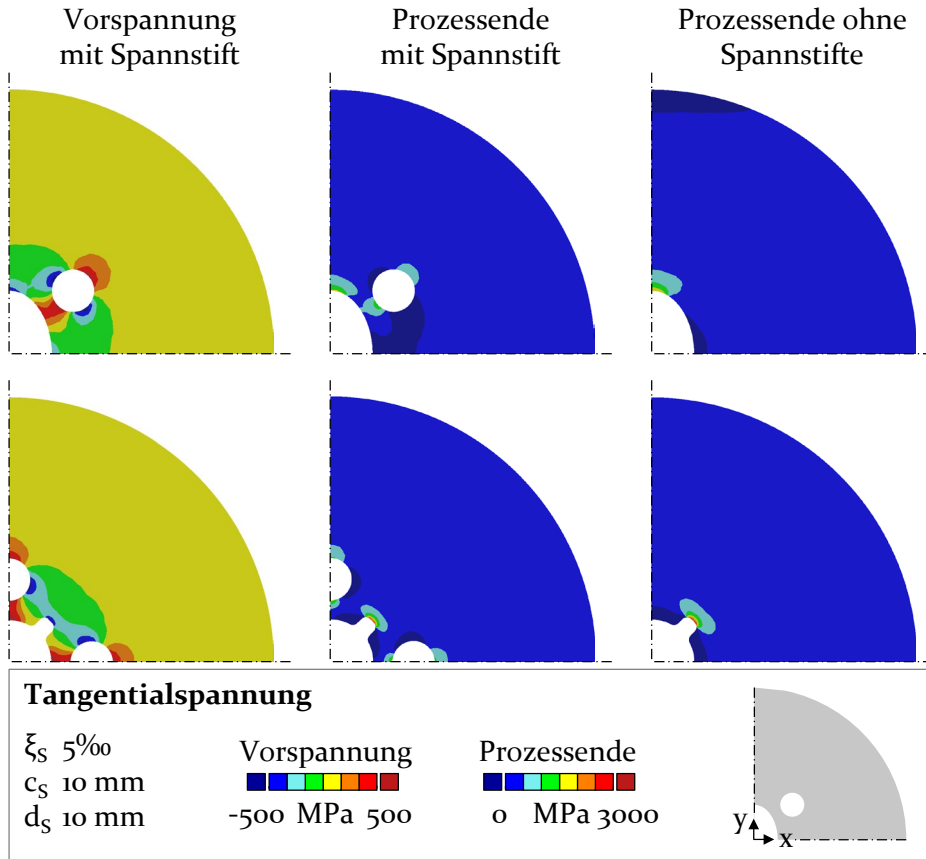


Bild 76: Spannungsverteilung bei Einsatz von Spannstiften ohne Armierung

Die kritischen Beanspruchungen in der Matrizeninnenwand entstehen dementsprechend an der Ellipsenhauptachse und der Rückwand der Funktionselemente. Hier liegen ohne Einsatz von Spannstiften Zugspannungen von bis zu 2042 MPa und 3234 MPa vor. Diesen wird durch die Druckvorspannung bei Einsatz von Spannstiften entgegengewirkt, sodass die Spannungen auf 1795 MPa und 2936 MPa reduziert werden. Es bestehen jedoch weiterhin Zugspannungen direkt an den Stiftbohrungen. Daher wird analog zur Parameteranalyse in Abschnitt 8.1.2 der Einfluss des Stiftdurchmessers, des Stifthaftmaßes und der Stiftposition auf die Spannungen in der Matrizeninnenwand und den Bohrungen untersucht. Zuvor wird in Bild 77 der Einfluss der größeren Spannstifte auf die Bauteilgeometrie anhand der

Radialverschiebung untersucht. Hierbei werden als Referenz nicht armierte Matrizen ohne Spannstifte herangezogen.

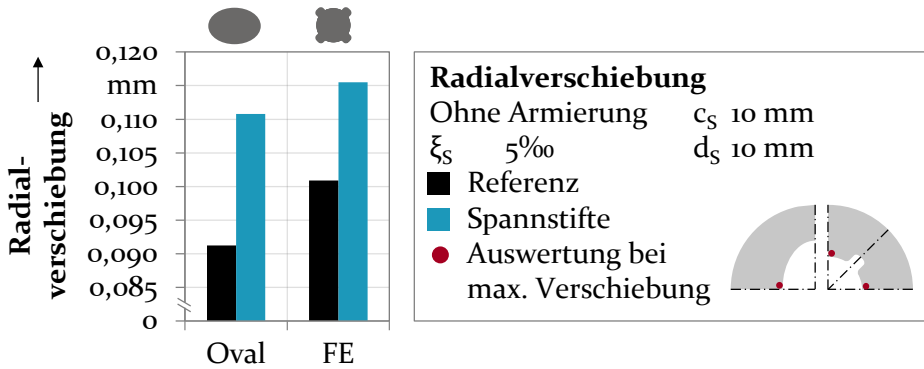


Bild 77: Maximale Radialverschiebung bei Einsatz von Spannstiften ohne Armierung

Die maximale Radialverschiebung ohne Spannstifte beträgt 0,091 mm (Oval) und 0,101 mm (Funktionselemente). Sie ist damit geringer als bei Einsatz einer Armierung, da der Matrizenwerkstoff einen höheren E-Modul besitzt als der Armierungswerkstoff. Aus demselben Grund nimmt die Verschiebung bei Einsatz von Spannstiften zu. Sie ist mit 0,111 mm (Oval) und 0,116 mm (Funktionselemente) um 20 μ m und 15 μ m größer als bei konventionellen nicht armierten Matrizen. Die höhere Zunahme der Verschiebungen im Vergleich zum Einsatz von Spannstiften mit Armierung liegt an dem größeren Matrizenvolumen, das durch den Spannstift und damit einen Werkstoff mit geringerem Elastizitätsmodul ersetzt wird. In der Prozessauslegung sollte in Abhängigkeit der verwendeten Werkstoffe demnach auf eine mögliche Änderung der Bauteilgeometrie im Bereich von wenigen Hundertstel Millimeter geachtet werden. Diese kann durch eine Simulation der Verschiebungen und entsprechende Korrektur der ursprünglichen Matrizeninnengeometrie kompensiert werden.

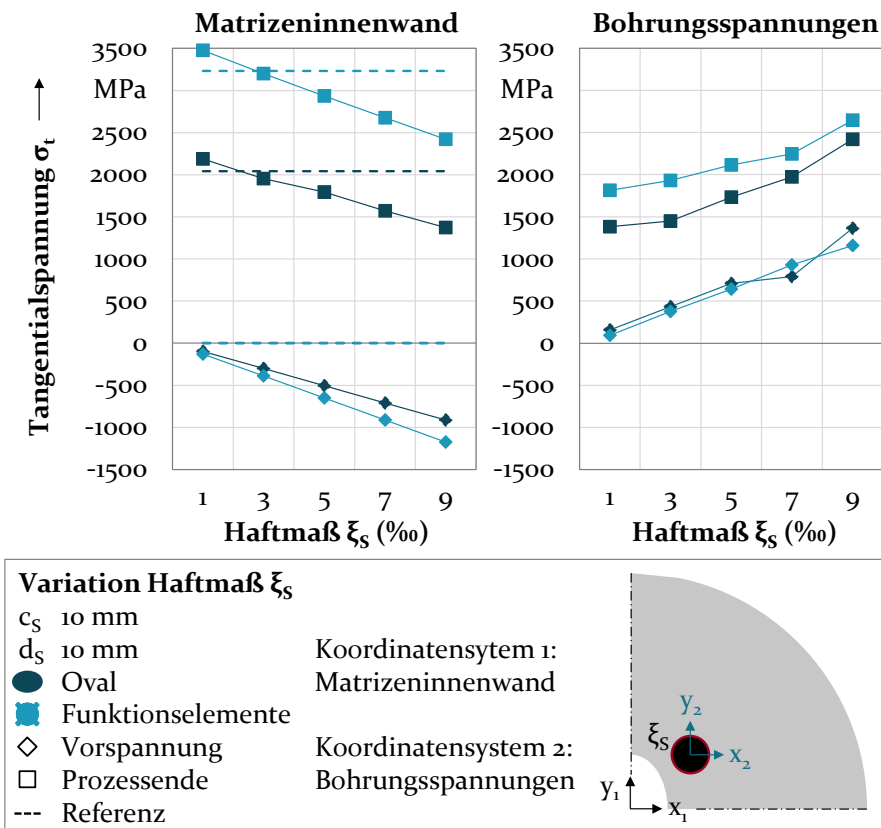
8.2.2 Numerische Parameteranalyse

Im Folgenden werden die Stiftparameter hinsichtlich Haftmaß, Durchmesser und Abstand zum Zugspannungsbereich variiert. Die Untersuchungen werden analog zu den Spannstiften mit Armierung durchgeführt, wobei durch den größeren zur Verfügung stehenden Platz größere Stiftdurchmesser und -abstände möglich sind. Die Parameter werden daher auf den in Tabelle 6 angegebenen Faktorstufen variiert. Im Fall der Geometrie mit Funktionselementen wird keine Untersuchung des Stiftabstands durchgeführt, da die Stiftposition zwischen zwei Funktionselementen festgelegt ist.

Tabelle 6: Versuchsplan zur Analyse von Spannstiften ohne Armierung

Stifthaftmaß ξ_s	Stiftdurchmesser d_s	Stiftabstand c_s (Oval)
1 ‰	5 mm	10 mm
3 ‰	10 mm	15 mm
5 ‰	15 mm	20 mm
7 ‰	20 mm (Oval)	25 mm
9 ‰		

Zielgrößen der Analyse sind analog zu den Untersuchungen mit Armierung die Tangentialspannungen an der Matrizeninnenwand und um die Stiftbohrung. In Bild 78 ist der Einfluss des Haftmaßes abgebildet. Es werden Haftmaße von 1 ‰ bis 9 ‰ untersucht, was bei einem Stiftdurchmesser von 10 mm absoluten Übermaßen von 5 μm bis 45 μm entspricht.

Bild 78: Einfluss des Stifthaftmaßes ξ_s bei Einsatz von Spannstiften ohne Armierung

Es besteht ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen dem Haftmaß und den erzeugten Spannungen an der Matrizeninnenwand. Ein

höheres Stifthaftmaß vergrößert die um die Bohrung entstehenden Spannungen, sodass die Vorspannungen betragsmäßig erhöht werden. Hierdurch werden die maximalen Spannungen zu Prozessende herabgesetzt. Bei einem hohen Haftmaß von 9 ‰ wird eine Reduktion der Prozessbelastungen von 2042 MPa auf 1372 MPa (Oval) und von 3234 MPa auf 2421 MPa (Funktionselemente) erreicht. In der ovalen Geometrie sind die Spannungen damit in etwa so groß wie beim Einsatz von Armierungen ohne Spannstifte. Durch das zunehmende Haftmaß werden auch die Spannungen um die Stiftbohrung erhöht. Diese sind bereits im Vorspannungszustand positiv, da sie nicht durch eine Armierungswirkung reduziert werden. Zu Prozessende sind sie in der ovalen Geometrie bei 5 ‰ in etwa so hoch wie die Spannungen an der Innenwand. In der Geometrie mit Funktionselementen liegen ab 7 ‰ höhere Zugspannungen in der Bohrung als an der Matrizeninnenwand vor. Durch die größere Entfernung der Bohrung zur Matrizeninnenkontur ist eine Rissfortpflanzung von der Bohrung zur Umformzone jedoch erschwert. Weiterhin ist bei größeren Stiftdurchmessern ein Polieren der Bohrung möglich, welche ermüdungsfördernde Eigenspannungen aus dem Erodierprozess reduziert.

Der Einfluss des Stiftdurchmessers wird in Bild 79 untersucht. Für die ovale Geometrie werden Durchmesser zwischen 5 mm und 20 mm simuliert. In der Geometrie mit Funktionselementen ist aufgrund der festgelegten Position zwischen zwei Elementen kein größerer Durchmesser als 15 mm möglich, da die Stiftbohrung sich ansonsten mit der Matrizeninnenwand überschneidet.

Die maximalen Beanspruchungen in der Innenwand werden infolge einer höheren Vorspannungswirkung mit größerem Stiftdurchmesser reduziert. Bei einem Durchmesser von 15 mm betragen die maximalen Spannungen 1516 MPa (Oval) und 2279 MPa (Funktionselemente) im Vergleich zu 2042 MPa und 3234 MPa ohne Spannstifte. Bei großen Durchmessern besteht eine vergleichsweise geringe Änderung der Bohrungsspannungen. Dementsprechend ist im Rahmen des verfügbaren Bauraums der Einsatz von möglichst großen Stiftdurchmessern zu empfehlen. Dies gilt sowohl für den Einsatz von Spannstiften mit Armierungen als auch ohne Armierungen.

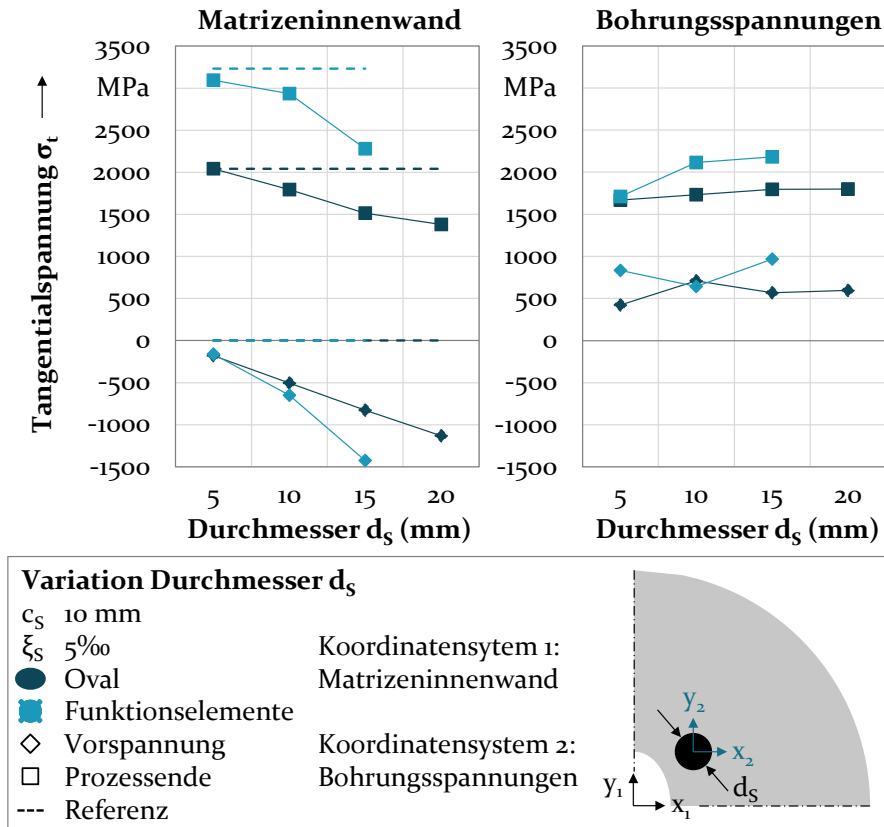
Bild 79: Einfluss des Stiftdurchmessers d_s bei Einsatz von Spannstiften ohne Armierung

Bild 80 zeigt den Einfluss des Stiftabstands auf den Beanspruchungszustand. Es werden Abstände zwischen 10 mm und 25 mm untersucht. Der Minimalwert von 10 mm wird gewählt, um eine ausreichende Distanz zwischen der Innenwand und dem Spannstift in radialer Richtung zu gewährleisten. Beim maximalen Abstand von 25 mm liegen die Stifte bereits nahe am äußeren Rand der Matrize. Die Geometrie mit Funktionselementen wird in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt, da die Stiftposition hierfür genau zwischen zwei Elementen festgelegt ist.

Durch einen geringeren Abstand des Spannstifts zum Zugspannungsbereich sind die maximal wirkenden Druckspannungen um die Bohrung näher zu den kritischen Zugspannungen positioniert. Daher werden bei kleinerem Abstand eine betragsmäßig größere Vorspannung sowie geringere Belastungen zu Prozessende erreicht. Die kleinsten Zugspannungen liegen beim Abstand von 10 mm mit 1795 MPa vor. Für diese Position sind aller-

dings auch die maximalen Bohrungsspannungen mit 1734 MPa deutlich höher als bei der nächsten Faktorstufe mit 1389 MPa für 15 mm. Dennoch sind selbst bei einem Abstand von 10 mm die Bohrungsspannungen geringer als die Spannungen in der Matrizeninnenwand.

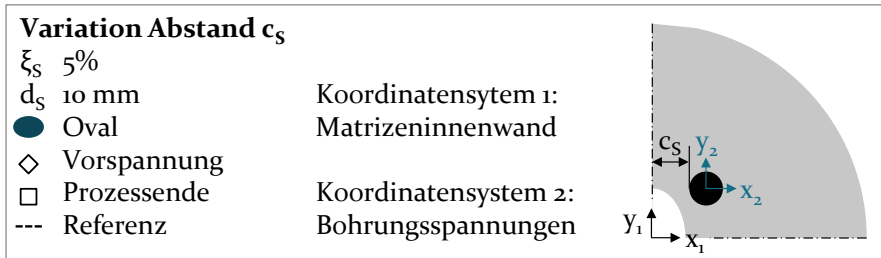
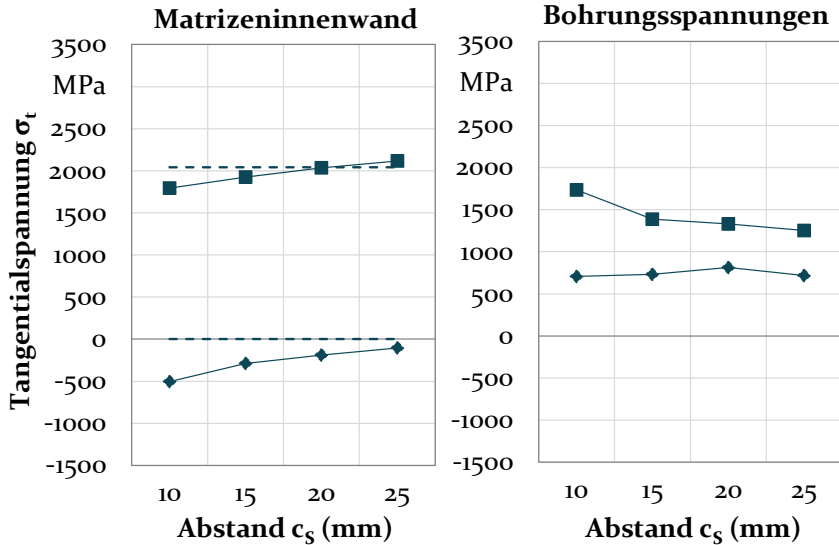


Bild 80: Einfluss des Stiftabstands c_s bei Einsatz von Spannstiften ohne Armierung

Insgesamt sind die Zugbeanspruchungen ohne Armierung höher als mit Armierung. Dafür ist mehr Bauraum zur Positionierung größerer Spannstifte vorhanden, wodurch deren Vorspannwirkung erhöht wird. Es treten nach wie vor Spannungen in den Stiftbohrungen auf. Diese nehmen jedoch bei weiter entfernter Positionierung ab und sind insgesamt geringer als die Beanspruchungen im Zugspannungsbereich. In den untersuchten nicht armierten Matrizen für ovale Bauteile besteht daher Potential zur Verbesserung der Werkzeuglebensdauer, welches im folgenden Abschnitt durch einen Einsatz im Ermüdungsversuch verifiziert wird.

8.2.3 Analyse des Ermüdungsverhaltens

Die Vorspannungswirkung von Spannstiften in nicht armierten Matrizen wird im Folgenden mit Hinblick auf das Ermüdungsversagen untersucht. Hierzu wird die in Bild 81 gezeigte Matrizengeometrie verwendet.

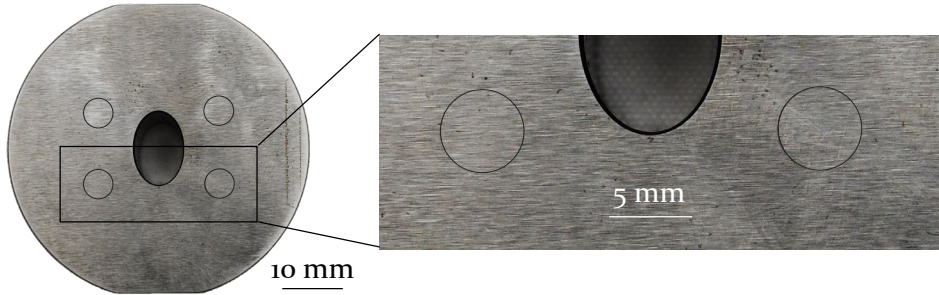


Bild 81: Im Ermüdungsversuch eingesetzte Matrize mit Spannstiften ohne Armierung

Es werden Stifte mit einem Durchmesser von 5 mm und einem Haftmaß von 5 ‰ eingepresst. Der Abstand der Bohrungskante zur Ellipsenhauptachse beträgt 7,5 mm. Mit diesen Parametern soll der Entstehung von Rissen in der Bohrung entgegengewirkt und gleichzeitig eine wirksame Vorspannung des Zugspannungsbereichs erreicht werden. Die erzielten Werkzeuglebensdauern sind im Vergleich zu Matrizen ohne Vorspannung in Bild 82 aufgeführt.

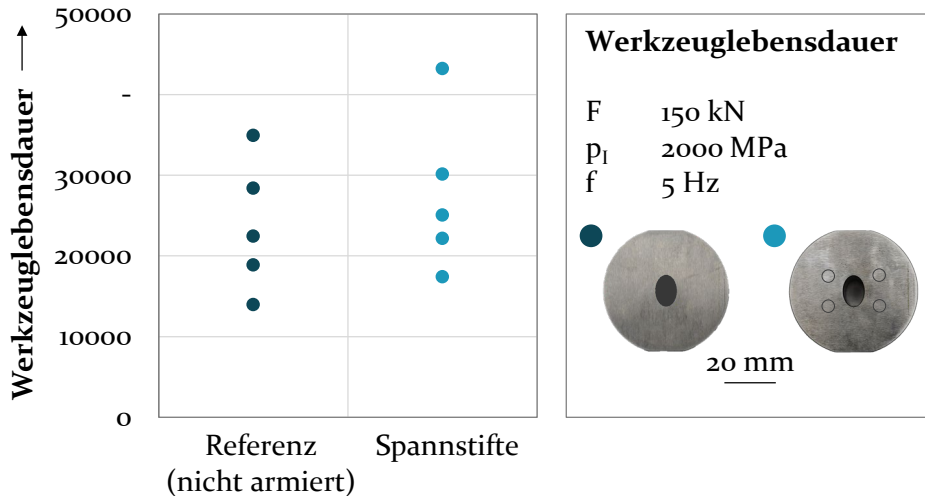


Bild 82: Werkzeuglebensdauer nicht armierter Matrizen mit und ohne Spannstifte

Mit Einsatz von Spannstiften werden Werkzeuglebensdauern zwischen 17.456 und 43.252 Zyklen erreicht. Im Vergleich liegen die Lastzyklen nicht

armierter Matrizen ohne Spannstifte zwischen 14.012 und 34.979. Durchschnittlich erhöht der Einsatz von Spannstiften bei den nicht armierten Matrizen damit die Lebensdauer um etwa 4000 Zyklen oder 16 %. Die zum Ausfall führende Rissbildung ist in Bild 83 gezeigt.

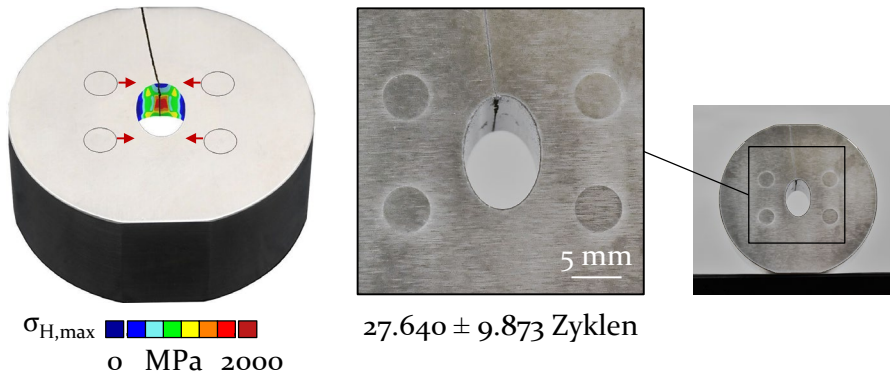


Bild 83: Rissbildung bei Einsatz von Spannstiften ohne Armierung

Die Risse entstehen wie bei den Referenzmatrizen an der Ellipsenhauptachse. Dies ist für alle fünf getesteten Werkzeuge der Fall. Ebenso liegt der Riss über der gesamten Matrizenhöhe vor. Die Rissausbreitung verläuft demnach von der Initiierung im Druckraum sowohl zur Ober- als auch zur Unterseite, wie bereits bei nicht armierten Matrizen ohne Spannstifte gezeigt wurde. Der Riss verläuft auf der Matrizenunterseite nicht wie bei den Referenzmatrizen exakt in Richtung der Ellipsenhauptachse, sondern leicht in Richtung eines Spannstifts verdreht. Grund hierfür ist vermutlich eine minimal unterschiedliche Vorspannungswirkung der Spannstifte links und rechts des Zugspannungsbereichs durch fertigungsbedingte Maßabweichungen. Die Bildung von Ermüdungsrissen an den Bohrungen wurde durch den größeren Stiftdurchmesser und -abstand im Rahmen der Versuche verhindert. Dementsprechend ist in den nicht armierten Matrizen sogar der Einsatz höherer Stifthaftmaße möglich, um die Vorspannung an der Ellipsenhauptachse weiter zu erhöhen.

8.3 Bewertung der Eignung von Spannstiften zur lokalen Vorspannung und Erhöhung der Werkzeuglebensdauer

Da die Wirksamkeit einer lokalen Einstellung der äußeren Armierungswirkung durch Aussparungen für eine hohe Anzahl an kritischen Bereichen begrenzt ist, bietet eine Vorspannung von innen zusätzliches Potential zur

Reduktion versagenskritischer Beanspruchungen in Werkzeugen für unrunde Bauteilgeometrien. Durch das Einpressen von Spannstiften in Matrizenbohrungen entsteht ein Spannungsfeld aus radialen Druck- und tangentialen Zugbeanspruchungen um die Stiftbohrung. Bei geeigneter Positionierung direkt neben den tangentialen Prozessspannungen wirkt der Druck des eingepressten Stifts diesen entgegen, während die Zugspannungen des Stifts in unkritischen Bereichen vorliegen. Es besteht eine Umverteilung der ermüdungsinduzierenden Belastungen aus dem Zugspannungsbereich hin zur Stiftbohrung und dem Druckspannungsbereich. Die Wirkung von Spannstiften in Abhängigkeit ihrer Parameter ist in Bild 84 zusammengefasst.

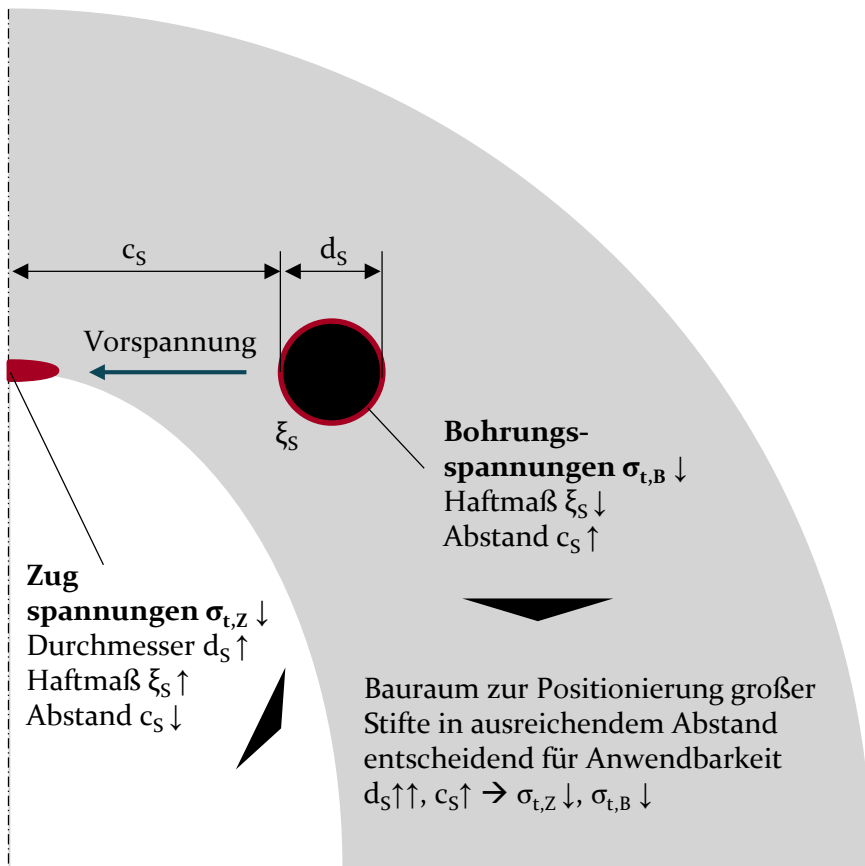


Bild 84: Wirkung von Spannstiften

Die Vorspannung durch Spannstifte und damit die Reduktion der Beanspruchungen im Zugspannungsbereich wird durch hohe Stiftdurchmesser, -haftmaße und geringe Abstände maximiert. Gleichzeitig entstehen

Spannungen um die Stiftbohrung, welche bei hohem Stifthaftmaß und geringem Abstand kritischer werden. Da bei gleichem Abstand der Stiftekante kein wesentlicher Einfluss des Durchmessers auf die Bohrungsspannungen besteht, ist die Verwendung von großen Stiften in hohem Abstand zu empfehlen. Hierfür ist genügend Bauraum zur Positionierung großer Stifte notwendig. Spannstifte sind grundsätzlich sowohl in armierten Werkzeugen als auch in Matrizen ohne Armierung einsetzbar. Bei nicht armierten Werkzeugen ist mehr Platz zur Positionierung der Stifte verfügbar. Daher wurde in numerischen Untersuchungen bei armierten Matrizen eine geringere Spannungsreduktion als bei nicht armierten Matrizen festgestellt. Diese beträgt für die ovale Geometrie etwa 300 MPa und 700 MPa, für die Geometrie mit Funktionselementen circa 500 MPa und 1000 MPa. Die Wirkung ist beim Einsatz an Funktionselementen größer, da durch den im Vergleich zur Ellipse schrofferen Übergang von der Grundkreisform zum Zugspannungsbereich eine nähere Positionierung des Spannstifts bei nach wie vor großem radialen Abstand zur Matrizeninnenkontur möglich ist.

Es besteht unterschiedliches Potential für den Einsatz von Spannstiften bei Werkzeugen mit kleinem und großem Bauraum. Daher ist der Einfluss von Spannstiften für diese beiden Kategorien in Bild 85 auf Basis der Untersuchungen an armierten und nicht armierten Matrizen dargestellt.

	Spannstifte bei geringem Bauraum	Spannstifte bei großem Bauraum
Zugspannungen	↘	↓
Bohrungsspannungen	↑	↗
Rissbildung an Bohrungen	↑	→
Werkzeuglebensdauer	↓	↗
Radialverschiebung	↗	↗
Fertigungsaufwand	↑	↗

Bild 85: Einfluss von Spannstiften auf die Werkzeugbelastung, das Ermüdungsversagen, die Prozessführung und Werkzeugfertigung

Bei kleinem Bauraum wird trotz einer Reduktion der Zugspannungen keine Verbesserung der Werkzeuglebensdauer erreicht. Dies liegt an der Entstehung von Ermüdungsrissen an den Stiftbohrungen infolge der hohen Bohrungsspannungen. Auch mit großem Bauraum sind Belastungen an den

Stiftbohrungen unvermeidbar. Bei Positionierung in ausreichendem Abstand sind diese jedoch geringer als die verbleibenden Spannungen im Zugspannungsbereich, wodurch Risse an den Stiftbohrungen vermieden werden. Die Zugspannungsreduktion bei gleichzeitig moderaten Bohrungs- spannungen wirkt sich daher positiv auf die Ermüdungsfestigkeit der Werkzeuge aus. Im Modellversuch wurde die Lebensdauer durch den Einsatz von Spannstiften in nicht armierten Matrizen um 16 % erhöht.

Für die Fertigung der Matrizen mit Spannstiften ist im Vergleich zu konventionellen Werkzeugen die Erzeugung der Bohrungen und Stifte sowie der Fügevorgang notwendig. Da die Stifte eine zylindrische Geometrie aufweisen, sind diese als Normteile aus Schnellarbeitsstahl verwendbar. Die Herstellung der Bohrungen ist bei größeren Durchmessern mit einer weniger engen Tolerierung und damit mit geringerem Aufwand möglich. So entspricht das Haftmaß 5 ‰ bei einem Stiftdurchmesser von 2 mm einem absoluten Übermaß von 5 µm, bei einem Durchmesser von 10 mm bereits 25 µm. Die Herstellung der Passungen macht insbesondere bei kleinen Durchmessern eine erodiertchnische Fertigung der Bohrungen notwendig. Da durch diese häufig eine rissfördernde Schicht mit Zugeigen- spannungen induziert wird [84], sollten potentielle Riskeime durch eine polierende Nachbearbeitung entfernt werden. Bei ausreichend großen Bohrungen ist die Zugänglichkeit hierfür gewährleistet, wodurch Rissen von der Stiftbohrung aus weiter entgegengewirkt wird.

Die Matrizen deformation wird nur verändert, wenn das Material des Spann- stifts eine geringere Steifigkeit aufweist als der Matrizenwerkstoff. Es besteht daher ein geringer Einfluss der Spann- stifte auf die Werkzeugauffe- derung und die hergestellte Bauteilgeometrie. Bei dem im Modellprozess vorliegenden Steifigkeitsunterschied von 20 GPa tritt selbst beim Einsatz großer Spann- stifte mit Durchmesser 10 mm nur eine Änderung der Ver- schiebung um wenige Hundertstel Millimeter auf. Diese kann bei sehr en- gen Bauteiltoleranzen durch eine vorhergehende Simulation der Matrizen- deformation und entsprechende Korrektur der Geometrie ausgeglichen werden. Hierfür ist die Kenntnis der Materialkennwerte des Stift- und Matrizenwerkstoffs entscheidend, da die Differenz der E-Moduln maßgeb- lich für die Werkzeugdeformation ist.

Insgesamt sind Spann- stifte zur lokalen Vorspannung von großen und an- spruchsvollen Werkzeugen geeignet, bei denen die Prozessspannungen kritischer sind als entstehende Bohrungs- spannungen und eine flexible Positionierung großer Stifte gewährleistet ist. Für diese Anwendungsfälle besteht hohes Potential zur Erhöhung der Lebensdauer, nachdem beliebig

viele kritische Bereiche vorgespannt werden können und das Konzept unabhängig vom Vorhandensein einer Armierung einsetzbar ist.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Fertigungsprozesse der Massivumformung ermöglichen eine ressourcenschonende Produktion metallischer Bauteile durch hohe Rohstoffausnutzung. Nachdem in Kaltumformverfahren keine Erhitzung der Rohlinge durchgeführt wird, werden im Vergleich zur Warmumformung maßhaltigere Bauteile mit besseren Oberflächen bei gleichzeitig geringerem Energieeinsatz produziert. Allerdings liegen durch die Umformung bei Raumtemperatur hohe Kräfte und hohe Werkzeugbelastungen vor. Weiterhin werden zur Erfüllung von Leichtbaupotentialen verstärkt anspruchsvolle, nicht-rotationssymmetrische Bauteilgeometrien angefragt. Die Umformung derartiger Bauteile erzeugt besonders hohe Werkzeugbelastungen, was frühzeitiges Werkzeugversagen durch Ermüdungsrisse zur Folge hat. Ein etablierter Ansatz zur Erhöhung der Werkzeuglebensdauer ist eine Druckvorspannung durch Armierungen. Mit dieser werden Zugspannungen reduziert, welche für die hochharten Werkzeugmaterialien besonders kritisch sind. Hierzu werden Umformmatrizen in Armierungsringe eingepresst, welche von außen Druck auf die formgebenden Werkzeuge ausüben. Bestehendes Wissen und Auslegungsrichtlinien zur Anwendung von Armierungen basieren auf rotationssymmetrischen Matrizeninnengeometrien. Da ein hoher Bedarf für den Einsatz bei unrunder Geometrien besteht, wurde in dieser Arbeit die Vorspannung und deren Einfluss auf das Ermüdungsversagen von Matrizen für nicht-rotationssymmetrische Bauteilgeometrien erforscht.

Die Basis hierfür bildet die grundlegende Analyse der in Matrizen mit nicht-rotationssymmetrischer Innengeometrie entstehenden Werkzeugbeanspruchung anhand einer elliptischen und einer mit vier gleichmäßig verteilten Funktionselementen versehenen Geometrie. Durch eine numerische Analyse der Werkzeugbelastung wurde gezeigt, dass voneinander getrennte Zug- und Druckspannungsbereiche sowie Schubspannungen an den Bereichsgrenzen auftreten. Radiale Beanspruchungen in den Druckspannungsbereichen erzeugen eine Matrizendeformation, welche in den Zugspannungsbereichen zu tangentialen Zugbelastungen führt. Diese sind an den am weitesten von der Kreisform abweichenden Stellen vorzufinden und als kritisch hinsichtlich des Ermüdungsversagens zu bewerten. Bei Einsatz von Armierungen entsteht eine ungleichmäßige Druckvorspannung mit der höchsten Vorspannung in den Zugspannungsbereichen. Entscheidend hierfür ist der Armierungsdruck an den von den kritischen Stellen

entfernten Druckspannungsbereichen, da dieser den zur Spannungsentstehung maßgeblichen radialen Drücken und Verschiebungen entgegenwirkt. Dementsprechend trägt der Armierungsdruck im Zugspannungsbereich nur unwesentlich zur Vorspannung bei. Da die Vorspannung durch die Fügbarkeit von Matrize und Armierung sowie deren mechanischen Belastbarkeitsgrenzen nicht unbegrenzt erhöhbar ist, reicht eine konventionelle Armierung häufig nicht zum Verhindern eines Ermüdungsversagens aus.

Um das Ermüdungsverhalten experimentell zu untersuchen, wurde ein Modellversuch zur Analyse von realen Werkzeuggeometrien im Labormaßstab ausgelegt. Bei diesem werden Matrizen mit elliptischer Innenkontur mit einem zyklisch schwellenden Innendruck beaufschlagt, welcher die Belastung aus der Umformung von Stahlteilen nachbildet. Zur wiederholbaren und effizienten Versuchsdurchführung wird der Innendruck durch die Kompression von Elastomeren aufgebracht. Diese benötigen einen hohen Druck zur Volumenreduktion, welcher an das umliegende Werkzeug weitergegeben wird. Durch die Elastizität der Prüfkörper kehren sie nach der Belastung wieder in ihre ursprüngliche Form zurück und sind damit für eine zyklische Prüfung geeignet. Sofern auftretender Verschleiß am Elastomerkörper durch ein regelmäßiges Austauschen nach festgelegten Intervallen berücksichtigt wird, sind reproduzierbare Versuchsbedingungen gewährleistet. Der neue Versuch ermöglicht damit erstmals eine Untersuchung der Ermüdung von realen Umformwerkzeugen im Labormaßstab. Zur Vergleichbarkeit mit Kaltmassivumformverfahren wurde ein maximaler Innendruck von 2000 MPa eingesetzt. In nicht armierten Matrizen trat Ermüdungsversagen dabei über viermal schneller auf als in konventionell armierten Matrizen. Dennoch versagten auch vorgespannte Matrizen im Ermüdungsversuch nach näherungsweise 100.000 Zyklen. Für eine verbesserte und zur Massenproduktion wirtschaftlichere Werkzeuglebensdauer wurden daher Maßnahmen zur lokalen Vorspannung der kritischen Bereiche erforscht.

Hierbei wurde zunächst eine lokal angepasste Armierungswirkung durch Aussparungen in der Matrize untersucht. Wird der Armierungsdruck in den Zugspannungsbereichen unterbrochen, entsteht eine Biegespannung, welche zu einer lokal erhöhten Vorspannung führt. Voraussetzung hierfür ist, dass ein ausreichend großer Bereich zur Erzeugung der Biegung ausgespart ist und gleichzeitig ausreichend Fläche mit dem Armierungsdruck beaufschlagt ist, um die Gesamtdruckwirkung nicht zu stark abzuschwächen. Daher nimmt die Wirksamkeit der lokalen Vorspannung mit der Anzahl der kritischen Bereiche und damit der Anzahl an Aussparungen ab. Eine

Verbesserung des Spannungszustands ist für bis zu vier gleichmäßig verteilte kritische Bereiche gegeben. In Abhängigkeit der Geometrie ist zudem eine Erhöhung der Schubspannungen im Übergang zwischen Zug- und Druckspannungsbereichen möglich. Aus diesem Grund erzielten mit Aussparungen versehene Matrizen im Ermüdungsversuch durchschnittlich geringfügig kleinere Lebensdauern als konventionell vorgespannte Matrizen. Der Ort der Rissentstehung verlagerte sich vom Zugspannungsbereich zur Zone höchster Schubspannungen. Um erhöhte Beanspruchungen außerhalb des Zugspannungsbereichs bei Einsatz von Aussparungen zu reduzieren, ist das Einfügen eines Absatzes möglich. Dieser stützt im höchstbelasteten Querschnitt die Matrize, sodass die Aussparung nur über- und unterhalb der kritischen Zone angebracht ist. Hierdurch wird im Vergleich zu durchgängigen Aussparungen eine etwas geringere Reduktion der Zugspannungen bewirkt, wobei die Schubbeanspruchung nicht mehr wesentlich erhöht wird. Mit dieser Werkzeugvariante wurde im Ermüdungsversuch eine über 2,5-fache Lebensdauer im Vergleich zu konventionell vorgespannten Matrizen erreicht.

Da die Wirksamkeit von Aussparungen für Geometrien mit vielen kritischen Bereichen begrenzt ist, wurde weiterhin der Einsatz von in die Matrize gepressten Spannstiften zur Erzeugung einer inneren Vorspannung untersucht. Nachdem hierbei um die Stiftbohrung orientierte radiale Druck- und tangentielle Zugspannung entstehen, wirkt der Stiftdruck bei geeigneter Positionierung in direkter Linie zum Zugspannungsbereich den Prozessbelastungen entgegen. Es entstehen jedoch auch Zugspannungen um die Stiftbohrung, welche im Ermüdungsversuch zu einem verfrühten Reißen in diesem Bereich führten. Da die Bohrungsspannungen bei nahem Abstand zur Matrizeninnenwand zunehmen, ist eine Positionierung in ausreichender Entfernung vorzusehen. Um weiterhin eine wirksame Beeinflussung der Prozessspannungen zu ermöglichen, sollten Stifte mit großem Durchmesser eingesetzt werden. Dementsprechend ist ausreichend Raum zur Positionierung der Stifte für eine zielführende Anwendung notwendig. Im Ermüdungsversuch wurde dies anhand von nicht armierten Matrizen nachgewiesen, für die mit Einsatz von Spannstiften eine um durchschnittlich 16 % höhere Lebensdauer erreicht wurde. Spannstifte sind damit auch in Geometrien einsetzbar, in denen zum Beispiel aufgrund ihrer Abmessungen keine Armierung verwendet wird.

Mit dem Einsatz von Spannstiften und Aussparungen stehen neue Möglichkeiten zur lokalen Vorspannung und Verbesserung der Werkzeuglebensdauer von Matrizen mit nicht-rotationssymmetrischer Innenkontur

zur Verfügung. Es wurde experimentell nachgewiesen, dass diese Maßnahmen in der Lage sind, die Werkzeugstandmenge zu erhöhen. Auf Basis der Untersuchungen wurden Anwendungshinweise zur praktischen Umsetzung der Maßnahmen bereitgestellt. Hiermit besteht ein Beitrag zur Erweiterung der werkzeugtechnischen Grenzen in der Kaltmassivumformung, wodurch die energetischen und ressourcentechnischen Vorteile dieses Verfahrens auf ein breiteres Bauteilspektrum anwendbar sind.

In zukünftigen Untersuchungen sollten Matrizen mit Aussparungen und Spannstiften in industriellen Umformprozessen eingesetzt werden, um das wirtschaftliche Potential in der Serienproduktion nachzuweisen. Weiterhin ist die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf Bauteile mit Querschnittsübergängen, welche zu einer zusätzlichen Axialbelastung führen, zu überprüfen. Hierzu sollte der in dieser Arbeit ausgelegte Ermüdungsversuch hinsichtlich neuer Geometrien erweitert werden.

10 Summary and outlook

Metal forming processes enable a resource efficient production due to a high degree of material utilization. As the billets are not heated in cold forging operations, lower energy consumption as well as parts with better geometrical accuracy and surface quality are achieved compared to hot forging. However, the plastic deformation at room temperature necessitates high forming forces and tool loads. Furthermore, geometrically complex part geometries with non-circular symmetrical cross-sections are in increasing demand in order to enable lightweight design. When forming such parts the tool load is especially high and leads to die failure due to fatigue cracks. An established approach to prevent fatigue failure is the use of compressive prestressing, which reduces tensile stresses that are especially critical for the hard tool materials. For this purpose, dies are pressed into reinforcement rings, which exhibit an external pressure on the highly loaded tools. Current knowledge regarding reinforcement design is based on rotationally symmetrical geometries. Therefore, the prestressing and its influence on fatigue failure in dies for non-rotationally symmetrical parts was analysed in this thesis.

For this purpose, the tool load in dies for elliptical parts and geometries with four equally distributed functional elements was analysed numerically. Results showed that separate areas dominated by compressive or tensile stresses occur, with shear stresses resulting at the transition. Radial loads in the compressive stress areas lead to an elastic die deformation. This causes tangential tensile loads in the tensile stress areas, which are located where the die deviates the most from the circular geometry. When using reinforcements, the highest prestress is achieved in the tensile stress areas. The reinforcement pressure located far from these areas is essential for the prestress, as it impedes the radial die deformation leading to tensile stresses. The reinforcement pressure directly at the critical areas is therefore not essential for the prestressing effect. As the prestressing strength is further limited due to the joinability and mechanical properties of die and reinforcement, a conventional prestressing is often not sufficient to prevent fatigue failure.

In order to analyse fatigue failure, a new model test was designed. This test enables the investigation of real tool geometries without an actual part production. The forming of steel is modelled by a cyclically swelling inner pressure, which is created by the compression of elastomers. The high pressure needed to reduce an elastomer's volume is transferred to the tested die.

Due to the elasticity, the specimens regain their original shape after loading, so that cyclic testing is enabled. Provided that occurring wear on the elastomers is considered by exchanging them at fixed intervals, reproducible test conditions are ensured. The new test therefore enables the fatigue analysis of real cold forging dies at a laboratory scale. For the comparability with cold forging processes, a maximum inner pressure of 2000 MPa was used, which caused fatigue failure in the tested dies. On average, the use of reinforcements led to a more than fourfold increase in die life. However, even prestressed dies showed fatigue failure after about 100,000 cycles. To provide an improved and economic die life for mass production, measures for an increased local prestress of critical areas were analysed.

Firstly, a locally adapted interference was investigated by introducing gaps in the outer die geometry. Omitting the reinforcement pressure in the tensile areas causes a bending stress and locally increases the induced prestress. This applies as long as the gap is sufficiently large while at the same time the reinforcement pressure still acts on a significant part of the die. For this reason, the prestressing effect is reduced when a higher number of gaps is necessary to strengthen a large number of critical areas. The concept is therefore feasible for up to four uniformly distributed critical areas. Depending on the die geometry, an increase in shear stresses occurs when using gaps. That is why dies with adapted interference on average reached slightly lower die life than conventionally prestressed dies. The crack location changed from the tensile stress area to the position of the highest shear stresses. To reduce these loads, it is possible to interrupt the gaps, so that the reinforcement pressure acts on the entire die at the highest loaded cross-section. In this case, gaps are only present above and below the critical area. This slightly reduces the local prestressing effect, but also inhibits the formation of higher shear stress and still achieves lower tensile stresses than conventional reinforcements. Therefore, dies with interrupted gaps achieved 2.5 times the die life compared to globally prestressed tools.

Since the effectiveness of gaps is limited for parts with a high number of critical elements, a second measure was researched in the form of stress pins. These are pressed into the die inducing radial compressive and tangential tensile stresses around the pin bores. With a suitable positioning in direct line to the tensile areas, the pin pressure directly reduces the critical process loads. However, additional tensile stresses form around the pin bore, which led to fatigue failure and a reduced die life in the experiment. As the stresses around the pin bore increase at a low distance to the inner die wall, they should be positioned at a sufficient distance. In order to still

ensure an effective influence on the process stresses, pins with large diameter should be used. Therefore, sufficient space for the positioning of stress pins is essential for their use. This was shown in the fatigue test using dies without reinforcement, where stress pins increased the average die life by 16 %. It was thereby demonstrated that stress pins are usable in dies that are not reinforced for example due to their dimensions.

Stress pins and adapted reinforcements offer new possibilities for a local prestressing and improved tool life in dies with non-circular symmetrical cross-sections. Experimental results showed the capability of these tooling concepts to increase die life. Guidelines for their application were provided based on the analyses conducted in this thesis. This contributes to the extensions of process limits regarding tooling, thereby enabling the application of energy- and resource-efficient cold forging processes for a broader range of components.

In future research, the tooling concepts should be used in industrial forging processes in order to prove their economic potential in serial production. Furthermore, the transferability of the results to parts with changes in cross-sections that cause axial die stresses is to be investigated. For this purpose, the model fatigue test should be developed further in order to incorporate new types of part geometries.

Literaturverzeichnis

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Urgent climate action can secure a liveable future for all. Pressemitteilung 2023/06/PR(2023)
- [2] European Commission: A Clean Planet for all - A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. COM 773(2018)
- [3] Thimet, P. J.; Mavromatidis, G.: Review of model-based electricity system transition scenarios: An analysis for Switzerland, Germany, France, and Italy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 159(2022), Art. Nr. 112102
- [4] Hansen, K.; Mathiesen, B. V.; Skov, I. R.: Full energy system transition towards 100% renewable energy in Germany in 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 102(2019), S. 1-13
- [5] Statistisches Bundesamt: Energieverbrauch in der Industrie 2021 um 4,6% gegenüber dem Vorjahr gestiegen. Pressemitteilung 530(2022)
- [6] Lange, K.; Kammerer, M.; Pöhlandt, K.; Schöck, J.: *Fließpressen - Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke*. Springer, 2008
- [7] Jo, A. R.; Jeong, M. S.; Lee, S. K.; Moon, Y. H.; Hwang, S. K.: Multi-Stage Cold Forging Process for Manufacturing a High-Strength One-Body Input Shaft. *Materials* 14(2021)3, Art. Nr. 532
- [8] Ade, H.: *Massiver Fokus Massivumformung in Deutschland - Eine energieintensive energieeffiziente Branche*. Industrieverband Massivumformung, 2017
- [9] Kruzhanov, V.; Arnhold, V.; Ernst, E.: Energieeinsatz in der Massenproduktion von PM-Formteilen. *Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis* 25(2009), S. 159-173
- [10] Herlan, T.: Product Carbon Footprint an ESG-Reporting in Cold Forging. In: Ghiotti, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 55th Plenary Meeting of the International Cold Forging Group (ICFG)*, 2022, S. 126-148

- [11] McCormack, C.; Monaghan, J.: A finite element analysis of cold-forging dies using two-and three-dimensional models. *Journal of Materials Processing Technology* 118(2001)1-3, S. 286-292
- [12] VDI Verein deutscher Ingenieure e.V.: VDI 3138, Blatt 2, Kaltmassivumformen von Stählen. Anwendung, Arbeitsbeispiele, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für das Kaltfließpressen. Beuth Verlag GmbH, 1999
- [13] Engel, U.; Groenbaek, J.; Hinsel, C.; Kroiß, T.; Meidert, M.; Neher, R.; Räuchle, F.; Schrader, T.: Tooling solutions for challenges in cold forging. *UTF Science* 3(2011), S. 1-24
- [14] Ku, T.-W.: A study on two-stage cold forging for a drive shaft with internal spline and spur gear geometries. *Metals* 8(2018)11, Art. Nr. 953
- [15] International Cold Forging Group: Tool Life & Tool Quality in Cold Forging Part 1: General Aspects of Tool Life. ICFG Document No. 14/02. Meisenbach, 2002
- [16] International Cold Forging Group ICFG: Calculation methods for cold forging tools. In: International Cold Forging Group 1967-1992 - Objectives, History Published Documents, Meisenbach, 1992, S. 59-72
- [17] Klocke, F.: *Fertigungsverfahren 4 Umformen*. Springer Vieweg, 2006, 6. Aufl.
- [18] Herberitz, R.; Hermanns, H.; Labs, R.: *Massivumformung kurz und bündig*. Industrieverband Massivumformung, 2013
- [19] Pale, J. A.; Shivpuri, R.; Altan, T.: Recent developments in tooling, machines and research in cold forming of complex parts. *Journal of Materials Processing Technology* 33(1992)1-2, S. 1-29
- [20] Schrader, T.: Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge. In: Merklein, M.; Franke, J.; Schmidt, M. (Hrsg.): *Fertigungstechnik - Erlangen*, Bd. 270, Meisenbach, 2016
- [21] Klein, B.; Gänsicke, T.: *Leichtbau-Konstruktion Dimensionierung, Strukturen, Werkstoffe und Gestaltung*. Springer, 2018
- [22] Völkner, W.: Present and Future developments of metal forming: selected examples. *Journal of Materials Processing Technology* 106(2000)1-3, S. 236-242

- [23] Jafarzadeh, H.; Faraji, G.; Dizaji, A.: Analysis of lateral extrusion of gear-like form parts. *Journal of mechanical science and technology* 26(2012)10, S. 3243-3252
- [24] Hsia, S.-Y.; Shih, P.-Y.: Wear improvement of tools in the cold forging process for long hex flange nuts. *Materials* 8(2015)10, S. 6640-6657
- [25] Ku, T.-W.; Kang, B.-S.: Tool design for inner race cold forging with skew-type cross ball grooves. *Journal of Materials Processing Technology* 214(2014)8, S. 1482-1502
- [26] Merklein, M.; Allwood, J. M.; Behrens, B. A.; Brosius, A.; Hagenah, H.; Kuzman, K.; Mori, K.; Tekkaya, A. E.; Weckenmann, A.: Bulk forming of sheet metal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61(2012)2, S. 725-745
- [27] Weiß, A.; Deliktas, T.; Liewald, M.; Missal, N.: Cold forging of gear components by a modified Samanta process. *Forschung im Ingenieurwesen* (2020), S. 1-7
- [28] Kiener, C.; Merklein, M.: Research of adapted tool Design in Cold Forging of gears. *International Journal of Material Forming* (2019), S. 1-11
- [29] Jin, Q.; Gu, Z.; Hua, J.: Preform designing approach in cold orbital forging of flange gear. *Advances in Mechanical Engineering* 10(2018)10, S. 1-7
- [30] Milutinović, M.; Baloš, S.; Plančak, M.; Movrin, D.: Comparison of some mechanical properties and micro-topography of a component with non-axisymmetric geometry manufactured by cold orbital and hot forging. *Journal of Materials Processing Technology* 249(2017), S. 179-192
- [31] Han, X.; Hua, L.; Zhuang, W.; Zhang, X.: Process design and control in cold rotary forging of non-rotary gear parts. *Journal of Materials Processing Technology* 214(2014)11, S. 2402-2416
- [32] Jin, J. S.; Xia, J. C.; Wang, X. Y.; Liu, H.: Failure Analysis of a Die for Cold Precision Forging of Bevel Gears. *Advanced Materials Research* 44(2008), S. 779-786
- [33] Kang, G.; Kim, J.; Kang, B.: Numerical and experimental evaluation for elastic deformation of a cold forging tool and workpiece for a sleeve cam of an automobile start motor. *Proceedings of the*

- Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 222(2008)2, S. 217-224
- [34] Meissner, R.; Liewald, M.; Weiss, A.; Deliktas, T.: Novel approach in cold forging for efficient manufacturing of shaft-hub-assemblies. AIP Conference Proceedings 2113(2019)1, Art. Nr. 050024
- [35] Liewald, M.; Kannewurf, M.: Kaltmassivumformung: Präzision in Serie. Infostelle Industrieverband Massivumformung (2012)
- [36] Yurtdaş, S.; Kılıçaslan, C.; Kılınçdemir, N. E.; Tanrıku, B.; Karahan, B.: Increasing Cold Forging Tool Life Of M10x1. 25 Welding Flange Nut By Using Finite Element Simulation. Proceedings of the Third International Iron & Steel Symposium in Karabük (2017)
- [37] Mizuno, A.; Nomura, T.; Kitamura, K.; Matsunaga, K.: Influence of forming conditions on loads in split-forging. Procedia Engineering 81(2014), S. 358-363
- [38] Ku, T.-W.; Kang, B.-S.: Tool design and experimental verification for multi-stage cold forging process of the outer race. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 15(2014)9, S. 1995-2004
- [39] Abdullah, A.; Ling, K.; Samad, Z.; Sahudin, S.: The Effect of Corner Radii and Part Orientation on Fatigue Life of Closed-Forging Die. Journal of Applied Sciences 7(2007)19, S. 2871-2875
- [40] Gröbel, D.: Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung. In: Franke, J., et al. (Hrsg.): FAU Studien aus dem Maschinenbau, Bd. 317, FAU University Press, 2017
- [41] Merklein, M.; Opel, S.; Chinesta, F.; Chastel, Y.; El Mansori, M.: Investigation Of Tailored Blank Production By The Process Class Sheet-Bulk Metal Forming(2011), S. 395-400
- [42] Sun, X.-L.; Zhuang, X.-C.; Yang, F.-C.; Zhao, Z.: Reduction of die roll height in duplex gears through a sheet-bulk metal forming method. Advances in Manufacturing 7(2019)1, S. 42-51
- [43] Pilz, F.; Merklein, M.: Comparison of extrusion processes in sheet-bulk metal forming for production of filigree functional elements.

- CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 26(2019), S. 41-49
- [44] Henneberg, J.; Merklein, M.: Investigation on extrusion processes in sheet-bulk metal forming from coil. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 31(2020), S. 561-574
- [45] Pilz, F.; Henneberg, J.; Merklein, M.: Extension of the forming limits of extrusion processes in sheet-bulk metal forming for production of minute functional elements. Manufacturing Review 7(2020), Art. Nr. 9
- [46] Pilz, F.: Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen. In: Franke, J., et al. (Hrsg.): FAU Studien aus dem Maschinenbau, Bd. 350, FAU University Press, 2020
- [47] Völkl, R.: Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung. In: Geiger, M.; Feldmann, K. (Hrsg.): Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 191, Meisenbach, 2008
- [48] Engel, U.: Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Werkzeugen der Massivumformung. Meisenbach, 1996
- [49] Meidert, M.: Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung. In: Geiger, M. (Hrsg.): Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 172, Meisenbach, 2006
- [50] Zaidan, L. Y.; Abd, A. M.; AlShammari, M. A.: Estimation of Wear Depth as an Approach to Predict Tool Service Life in Cold Forming Process. Diyala Journal of Engineering Sciences 12(2019)2, S. 13-34
- [51] Dreher Silveira, F.; Schaeffer, L.: Evaluation of different levels of prestressing for cold forging tools by numerical simulation analysis. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 98(2018)9-12, S. 2487-2495
- [52] Körner, E.; Pingel, F.: Produktanalysen und Perspektiven der Kaltpresstechnik - Praxiseinsatz moderner Entwicklungswerkzeuge. In: Liewald, M. (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, INVENTUM, 2015, S. 59-68
- [53] Hänsel, M.; Meidert, M.; Keppler-Ott, T.: Der Werkzeugbau im Spannungsfeld von Markt- und Kundenanforderungen in der Kaltmassivumformung. In: Siegert, K.; Liewald, M. (Hrsg.): Neuere

- Entwicklungen in der Massivumformung, MAT Info Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2005, S. 45-63
- [54] Müller, C.; Filzek, J.; Groche, P.; Oehler, O.; Scherzinger, P.; Twickler, M.: Temperaturentstehung und die tribologischen Folgen bei Produktionsbeginn der Kaltmassivumformung. *Schmiede Journal* 2(2014), S. 28-33
- [55] Czichos, H.: Tribologie-Handbuch : Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Springer Vieweg, 2015, 4. Aufl.
- [56] Groche, P.; Moeller, N.; Hoffmann, H.; Suh, J.: Influence of gliding speed and contact pressure on the wear of forming tools. *Wear* 271(2011)9-10, S. 2570-2578
- [57] Richard, H. A.; Sander, M.: Ermüdungsrisse. Springer Vieweg, 2012, 2. Aufl.
- [58] Tekkaya, A.; Sonsöz, A.: Life Estimation of Extrusion Dies. *International Journal of Mechanical Sciences* 38(1996)5, S. 527-538
- [59] Radaj, D.; Vormwald, M.: Ermüdungsfestigkeit - Grundlagen für Ingenieure. Springer, 2007, 3. Aufl.
- [60] Jaeckels, H.: Ein probabilistisches Lebensdauermodell für hochbelastete Bauteile unter Ermüdungsbelastung. In: VDI-Verlag (Hrsg.): VDI-Berichte, Bd. 106, 1992
- [61] Hänsel, M.: Beitrag zur Simulation der Oberflächenermüdung von Umformwerkzeugen. In: Geiger, M. (Hrsg.): Prozeßsimulation in der Umformtechnik, Bd. 6, Springer Verlag, 1993
- [62] Lange, K.: Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft Band 4: Sonderverfahren, Prozeßsimulation, Werkzeugtechnik, Produktion. Springer, 1993
- [63] Kang, G.-J.; Kim, J.; Kang, B.-S.: Numerical analysis and design of pinion with inner helical gear by FEM. *Virtual and Physical Prototyping* 2(2007)3, S. 181-187
- [64] Falk, B.: Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung. In: Geiger, M.; Feldmann, K. (Hrsg.): Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 100, Meisenbach, 2000
- [65] Koch, J.; Völkl, R.; Engel, U.: Effective stochastic simulation for the optimization of time, costs and quality in cold forging. *International Journal of Material Forming* 1(2008)1, S. 9-12

- [66] Skov-Hansen, P.; Bay, N.; Groenbaek, J.; Brondsted, P.: Fatigue in cold-forging dies: tool life analysis. *Journal of Materials Processing Technology* 95(1998)1-3, S. 40-48
- [67] Lange, K.; Cser, L.; Geiger, M.; Kals, J. A. G.; Hänsel, M.: Tool life and tool quality in bulk metal forming. *CIRP Annals Manufacturing Technology* 41(1992)2, S. 223-239
- [68] Knörr, M.: Auslegung von Massivumformwerkzeugen gegen Versagen durch Ermüdung. In: Lange, K. (Hrsg.): *Institut für Umformtechnik*, Bd. 124, Springer Verlag, 1996
- [69] Zhang, Y.; Hu, C. L.; Zhao, Z.; Li, A. P.; Xu, X. L.; Shi, W. B.: Low cycle fatigue behaviour of a Cr-Mo-V matrix-type high-speed steel used for cold forging. *Materials & Design* 44(2013), S. 612-621
- [70] Alzati, L.; Bergmark, A.; Andersson, J.: Fatigue performance of PM steel in as-sintered state. *Proceedings of the PM AI Congress in Mumbai (2005)*
- [71] DIN 50113: Umlaufbiegeversuch, Prüfung metallischer Werkstoffe. Beuth Verlag GmbH, 1982
- [72] Sonsino, C.: Influence of load and deformation-controlled multiaxial tests on fatigue life to crack initiation. *International Journal of Fatigue* 23(2001)2, S. 159-167
- [73] Leitner, H.; Fröschl, J.; Gerstmayr, G.; Eichlseder, W.: Multiaxiale Ermüdung—Versuchsergebnisse versus Festigkeitshypothesen. *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte* 151(2006)9, S. 350-356
- [74] International Cold Forging Group: General aspects of tool design and tool materials for cold and warm forging. In: *International Cold Forging Group 1967-1992 - Objectives, History Published Documents*, Meisenbach, 1992, S. 33-58
- [75] Jung, I.: Ermüdungsfestigkeit hochlegierter Werkzeugstähle. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 65(2010)5, S. 278-284
- [76] Hayakawa, K.; Nakamura, T.; Tanaka, S.: Elastic-plastic behavior of WC-Co cemented carbide used for forging tool considering anisotropic damage and stress unilaterality. *International Journal of Damage Mechanics* 19(2010)4, S. 421-439
- [77] Noneder, J.; Merklein, M.; Engel, U.; Egerer, E.; Frank, J.; Frank, M.; Ritzenhoff, R.; Diehl, V.: Hochleistungsbauteile durch

- Kaltmassivumformung hochfester, druckaufgestickter Stähle. In: UTF Science, Bd. 3, Meisenbach, 2012
- [78] Arbak, M.: Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics. In: Merklein, M., et al. (Hrsg.): Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 227, Meisenbach, 2012
- [79] Yurtdaş, S.; Ince, U.; Kılıçaslan, C.; Yıldız, H.: A case study for improving tool life in cold forging: carbon fiber composite reinforced dies. *Research on Engineering Structures & Materials* 3(2017)1, S. 65-75
- [80] VW: Additiv gefertigtes Formwerkzeug für die Massivumformung. Patent, Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 28.03.2018
- [81] VDI Verein deutscher Ingenieure e.V.: VDI 3198, Beschichten von Werkzeugen der Kaltmassivumformung, CVD- und PVD-Verfahren. Beuth Verlag GmbH, 1992
- [82] Hinsel, C.: Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung. In: Geiger, M.; Feldmann, K. (Hrsg.): Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Bd. 102, Meisenbach, 2000
- [83] McKelvey, S.; Fatemi, A.: Surface finish effect on fatigue behavior of forged steel. *International Journal of Fatigue* 36(2012)1, S. 130-145
- [84] Andreas, K.: Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen. In: Merklein, M.; Franke, J.; Schmidt, M. (Hrsg.): Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Bd. 275, Meisenbach, 2015
- [85] Klocke, F.; Liermann, J.: Roller burnishing of hard turned surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 38(1998)5-6, S. 419-423
- [86] Radaj, D.: Ermüdungsfestigkeit-Grundlagen für Leichtbau, Maschinen-und Stahlbau. Springer Verlag, 2013
- [87] Wagner, K.: Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen. In: Merklein, M.; Franke, J.; Schmidt, M. (Hrsg.): Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 224, Meisenbach, 2011

- [88] Groenbaek, J.; Birker, T.: Innovations in cold forging die design. *Journal of Materials Processing Technology* 98(2000)2, S. 155-161
- [89] International Cold Forging Group: General recommendations for design, manufacture and operational aspects of cold extrusion tools for steel components. In: International Cold Forging Group 1967-1992 - Objectives, History Published Documents, Meisenbach, 1992, S. 73-82
- [90] Shinde, T.; Patil, I.; Walke, O.; Wagh, G.; Pawar, P.: Performance Comparison of Nitrided and Cryogenically Treated H13 Steel in Rotating Bending Fatigue. In: Seetharamu, S.; Jagadish, T.; Malagi, R.R. (Hrsg.): *Fatigue, Durability, and Fracture Mechanics - Proceedings of Fatigue Durability India 2019*, Springer, 2021, S. 515-524
- [91] Wagner, K.; Völkl, R.; Engel, U.: Tool life enhancement in cold forging by locally optimized surfaces. *Journal of Materials Processing Technology* 201(2008)1-3, S. 2-8
- [92] Reinl, S.: Hardening of Small Components with High-Power Diode Lasers: Most efficient laser source for selective changes of surface properties. *Laser Technik Journal* 7(2010)5, S. 42-45
- [93] Bartz, W.; Barnert, L.: *Tribologie und Schmierung bei der Massivumformung*. Expert Verlag, 2004
- [94] International Cold Forging Group: Lubrication aspects in cold forging of carbon steels and low alloy steels. In: International Cold Forging Group 1967-1992 - Objectives, History Published Documents, Meisenbach, 1992, S. 93-103
- [95] Bay, N.: The state of the art in cold forging lubrication. *Journal of Materials Processing Technology* 46(1994)1-2, S. 19-40
- [96] 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
- [97] Bobzin, K.; Klocke, F.; Bergs, T.; Brögelmann, T.; Feuerhack, A.; Kruppe, N. C.; Hild, R.; Hoffmann, D. C.: Dry forming of low alloy steel materials by full forward impact extrusion with self-lubricating tool coatings and structured workpieces. *Dry Metal Forming Open Access Journal* (2020)

- [98] Maeno, T.; Mori, K.-i.; Ichikawa, Y.; Sugawara, M.: Prevention of seizure in inner spline backward extrusion by low-cycle oscillation using servo press. *Procedia Engineering* 81(2014), S. 1860-1865
- [99] Löffler, M.; Andreas, K.; Engel, U.; Weikert, T.; Tremmel, S.; Wartzack, S.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Merklein, M.: Surface modifications for adaption of tribological conditions in sheet-bulk metal forming processes. In: Bouzakis, K.-D.B., K.; Denkena, B (Hrsg.): *The A Coatings*, 2016, S. 13-20
- [100] Popp, U.: Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen. In: Geiger, M.; Feldmann, K. (Hrsg.): *Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie*, Bd. 177, Meisenbach, 2006
- [101] Kovalchenko, A.; Ajayi, O.; Erdemir, A.; Fenske, G.: Friction and wear behavior of laser textured surface under lubricated initial point contact. *Wear* 271(2011)9-10, S. 1719-1725
- [102] Bech, J.; Bay, N.; Eriksen, M.: Entrapment and escape of liquid lubricant in metal forming. *Wear* 232(1999)2, S. 134-139
- [103] Popp, U.; Engel, U.: Microtexturing of cold-forging tools-influence on tool life. *proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, part B: Journal of engineering Manufacture* 220(2006)1, S. 27-33
- [104] Engel, U.: Strength vs Load - A general concept to estimate and to improve the reliability of tools in metal forming. *International Conference on Industrial Tools* (1997), S. 43-50
- [105] Ohga, K.; Kondo, K.; Jitsunari, T.: Research on precision die forging utilizing divided flow: second report, experimental study of processes utilizing flow relief-axis and relief-hole. *Bulletin of JSME* 25(1982)209, S. 1836-1842
- [106] Politis, D. J.; Politis, N. J.; Lin, J.; Dean, T. A.: A review of force reduction methods in precision forging axisymmetric shapes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 97(2018)5, S. 2809-2833
- [107] Zuo, B.; Wang, B.-y.; Li, Z.; Zheng, M.-n.; Zhu, X.-x.: Design of relief-cavity in closed-precision forging of gears. *Journal of Central South University* 22(2015)4, S. 1287-1297

- [108] Sweeney, K.: Kaltfließpressen von Schrägverzahnungen. In: Eversheim, W., et al. (Hrsg.): Berichte aus der Produktionstechnik, Bd. 6, Shaker, 2000
- [109] Tuncer, M. C.: Precision forging hollow parts. University of Birmingham, 1985
- [110] VDI Verein deutscher Ingenieure e.V.: VDI 3176, Vorgespannte Preßwerkzeuge für das Kaltmassivumformen. VDI-Verlag, 1986
- [111] Neitzert, T.: Auslegung von rotationssymmetrischen Fließpreßwerkzeugen im Bereich elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens. In: Lange, K. (Hrsg.): Berichte aus dem Institut für Umformtechnik, Bd. 62, Springer, 1982
- [112] Groenbaek, J.: Stripwound cold-forging tools - A technical and economical alternative. Journal of Materials Processing Technology 35(1992)3-4, S. 483-493
- [113] Groenbaek, J.: Bandgewickelte Armierungen von Fließpressmatrizen. In: Siegert, K. (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, DGM Informationsges. Verlag, 1993, S. 115-128
- [114] Groenbaek, J.: Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet regulierbarer Matrizen für die Massivumformung. In: Siegert, K.; Liewald, M. (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, MAT-INFO, Werkstoff-Informationsges., 2005, S. 65-81
- [115] Guel-Lopez, P.; Messmer, G.: Vorrichtung zur Verstellung des Matrizendurchmessers beim Ziehen, Durchdrücken und Fließpressen. Deutsches Patent- und Markenamt, Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 11. Dez. 2009
- [116] Groenbaek, J.: Formwerkzeug für pressbares Material. Deutsches Patent- und Markenamt, Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 03. Aug. 2006
- [117] Ngaile, G.; Rodrigues, D. S.: Die Design Architecture for Enhancing Tool Life Via Manipulation of the Elastic Strain Field of the Dies During Extrusion Processes. Journal of Manufacturing Science and Engineering 143(2021)3, Art. Nr. 031001
- [118] Gensert, H.; Rohwerder, G.: Verfahren und Formwerkzeug zur Herstellung von metallischen Werkstücken durch Kalt- oder

- Halbwarmumformen. Deutsches Patent- und Markenamt, Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 07. Feb. 2008
- [119] Baumgarten, J.: Ansätze zur Kompensation der elastischen Matrizenaufweitung bei Kaltmassivumformprozessen. In: Behrens, B.A. (Hrsg.): Berichte aus dem IFUM, PZH Produktionstechnisches Zentrum, 2003
- [120] Paldan, N. A.; Arentoft, M.; Eriksen, R. S.; Mangeot, C.: Piezo driven prestressing of die-system for microforming of metal components. *International Journal of Material Forming* 1(2008)1, S. 467-470
- [121] Groenbaek, J.: US5577406: Forming Tool. Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 1994
- [122] Vazquez, V.; Hannan, D.; Altan, T.: Tool life in cold forging - an example of design improvement to increase service life. *Journal of Materials Processing Technology* 98(2000)1, S. 90-96
- [123] Grešovnik, I.: Numerical support for optimal processes design with case study: prestressing of cold forging tools(2012)
- [124] Hannan, D.; Altan, T.: Case studies on improving the tool life of cold heading operations. *Fastener Technology International* 23(2000)4, S. 56-58
- [125] Dalbosco, M.; da Silva Lopes, G.; Schmitt, P. D.; Pinotti, L.; Boing, D.: Improving fatigue life of cold forging dies by finite element analysis: A case study. *Journal of Manufacturing Processes* 64(2021), S. 349-355
- [126] Nagao, Y.; Knoerr, M.; Altan, T.: Improvement of tool life in cold forging of complex automotive parts. *Journal of materials processing technology* 46(1994)1-2, S. 73-85
- [127] Groenbaek, J.; Nielsen, E. B.: Stripwound containers for combined radial and axial prestressing. *Journal of Materials Processing Technology* 71(1997)1, S. 30-35
- [128] Koç, M.; Arslan, M. A.: Design and finite element analysis of innovative tooling elements (stress pins) to prolong die life and improve dimensional tolerances in precision forming processes. *Journal of materials processing technology* 142(2003)3, S. 773-785

- [129] Qin, Y.: Forming-tool design innovation and intelligent tool-structure/system concepts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46(2006)11, S. 1253-1260
- [130] Bobzin, K.; Brögelmann, T.; Stahl, K.; Stemplinger, J.-P.; Mayer, J.; Hinterstoißer, M.: Influence of wetting and thermophysical properties of diamond-like carbon coatings on the frictional behavior in automobile gearboxes under elasto-hydrodynamic lubrication. *Surface and Coatings Technology* 284(2015), S. 290-301
- [131] Zahner, M.; Merklein, M.: Analysis of combined extrusion micro coining process to manufacture microstructured tappets. *Procedia Manufacturing* 15(2018), S. 272-279
- [132] DIN EN ISO 683-3: Für eine Wärmebehandlung bestimmte Stähle, legierte Stähle und Automatenstähle - Teil 3: Einsatzstähle. Beuth Verlag GmbH, 2019
- [133] DIN 50106: Testing of metallic materials - compression test at room temperature. Beuth Verlag GmbH, 1978
- [134] Hockett, J. E.; Sherby, O. D.: Large strain deformation of polycrystalline metal at low homologous temperatures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 23(1975)
- [135] Ilschner, B.; Singer, R. F.: *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik: Eigenschaften, Vorgänge, Technologien.* Springer-Verlag, 2016
- [136] Robert Zapp Werkstofftechnik GmbH: Pulvermetallurgischer Schnellarbeitsstahl ASP2023, 2008
- [137] DIN EN ISO 4957: Werkzeugstähle. Beuth Verlag GmbH, 2018
- [138] Ramezani, M.; Ripin, Z. M.: *Rubber-pad forming processes - Technology and applications.* Woodhead Publishing, 2012
- [139] Doege, E.; Baumgarten, J.; Neumaier, T.: The Concept of Active Deflection Compensation and its Application in Precision Forging. In: Inasaki, I. (Hrsg.): *10th International Conference on Precision Engineering (ICPE) - Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium,* Kluwer Academic Publishers, 2002, S. 27-31
- [140] Adams, L. H.; Gibson, R. E.: The compressibility of Rubber. *Rubber Chemistry and Technology* 3(1930)4, S. 555-562

- [141] Bayer, O.; Müller, E.: The structure of vulkollan urethan elastomers. *Angew. Chem* 72(1960), S. 934-939
- [142] DIN ISO 815-1: Elastomere oder thermoplastische Elastomere – Bestimmung des Druckverformungsrestes – Teil 1: Bei Umgebungstemperaturen oder erhöhten Temperaturen. Beuth Verlag GmbH, 2019
- [143] Dubbel, H.: *Dubbel-Handbook of mechanical engineering*. Springer Science & Business Media, 2013
- [144] Scholz, J.: *Vulkollan - Der elastische Werkstoff für höchste dynamische Beanspruchung*. P+S Polyurethan Elastomere GmbH & Co. KG, 2017
- [145] Courtney, T. H.: *Mechanical behavior of materials*. Waveland Press, 2005
- [146] Kunz, J.: Die Querkontraktionszahl in der Konstruktionspraxis. *Kunststoff Extra* 6(2011), S. 27-30
- [147] Doege, E.: *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*. Springer Vieweg, 2016, 3. Aufl.
- [148] Altan, T.; Ngaile, G.: Double Cup Extrusion Test to Evaluate Lubricants for Cold Forging. In: Tekkaya, A.E.; Homberg, W.; Brosius, A. (Hrsg.): *60 Excellent Inventions in Metal Forming*, Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 325-329
- [149] 14577-1, D. E. I.: *Metallische Werkstoffe - Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter - Teil 1: Prüfverfahren*, 2015
- [150] Hoffmann, K.: *An introduction to stress analysis and transducer design using strain gauges*. HBM, 2012
- [151] Osakada, K.; Wang, X.; Hanami, S.: Precision forging of spline by flashless die forging with axially driven die. *CIRP Annals* 46(1997)1, S. 209-212
- [152] Tekkaya, A.; Martins, P. A.: Accuracy, reliability and validity of finite element analysis in metal forming: a user's perspective. *Engineering Computations* 26(2009)8, S. 1026-1055
- [153] Tekkaya, A. E.: A guide for validation of FE-simulations in bulk metal forming. *The Arabian Journal for Science and Engineering* 30(2005)1C, S. 113-136

- [154] Skov-Hansen, P.; Bay, N.; Grønbæk, J.; Brøndsted, P.: Fatigue in cold-forging dies: tool life analysis. *Journal of Materials Processing Technology* 95(1999)1-3, S. 40-48
- [155] Pilz, F.; Gröbel, D.; Merklein, M.: Investigation of Fatigue Strength of Tool Steels in Sheet-Bulk Metal Forming. In: Fratini, L., et al. (Hrsg.): *AIP Conference Proceedings*, 2018, Art. Nr. 160022
- [156] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: *DUBBEL: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer-Verlag, 2011

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Killmann, M; Merklein, M.: Analysis of the stress state in non-axially symmetrical cold forging dies. In: *Procedia Manufacturing* 50 (2020), S. 307–313
- [P2] Killmann, M; Merklein, M.: Analysis of stress pins for the local prestressing of cold forging tools. In: *Production Engineering* 15 (2021)1, S. 119–131
- [P3] Killmann, M; Merklein, M.: Prestressing of cold forging tools for parts with functional elements. In: *XL. Colloquium on Metal Forming* (2022), S. 39–44
- [P4] Killmann, M; Merklein, M.: Local prestressing of cold forging tools by reinforcements with adapted interference. In: *Procedia Structural Integrity* 38 (2022), S. 212–219
- [P5] Killmann, M; Merklein, M.: Design of a novel fatigue test for non-circular symmetrical cold forging tools. In: Ghiotti, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 55th Plenary Meeting of the International Cold Forging Group (ICFG)* (2022), S. 181–190
- [P6] Killmann, M; Merklein, M.: Use of elastomers as pressure media for fatigue testing of cold forging tools. In: *Procedia Structural Integrity* 42 (2023), S. 66–71
- [P7] Killmann, M; Merklein, M.: Fatigue testing of cold forging tools using elastomer compression. In: *CIRP Annals Manufacturing Technology* 72(2023)1, S. 241–244

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] Lünser, T.: Numerische Untersuchungen zur Armierungswirkung an nicht-kreissymmetrischen Wirkquerschnitten. Projektarbeit (2019), Erlangen
- [S2] Schmidlein, J.: Numerische Untersuchungen zur Armierungswirkung an scharfen Querschnittsübergängen. Bachelorarbeit (2019), Erlangen
- [S3] Dormann, U.: Numerische Untersuchungen zur Armierungswirkung in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie. Bachelorarbeit (2019), Erlangen
- [S4] Li, P.: Numerische Untersuchungen zur Armierungswirkung an lokalen Querschnittsänderungen. Masterarbeit (2019), Erlangen
- [S5] Lünser, T.: Numerische Untersuchungen von Maßnahmen zur Einbringung lokaler Vorspannungen in Werkzeugen der Massivumformung. Masterarbeit (2019), Erlangen
- [S6] Dechant, S.: Titel. Numerische Untersuchung der Wirkung von Aussparungen in Armierungsverbänden (2020), Erlangen
- [S7] Steger, B.: Numerische Untersuchung der Wirkung von Spannstiften in Armierungsverbänden. Projektarbeit (2020), Erlangen
- [S8] Chen, T.: Numerische Untersuchung der Wirkung unrunder Armierungsgeometrien. Projektarbeit (2020), Erlangen
- [S9] Dengel, T.: Numerische und experimentelle Untersuchung zur Entstehung und Beeinflussung von Werkzeugbeanspruchungen an Funktionselementen. Bachelorarbeit (2020), Erlangen
- [S10] Kanygin, A.: Konstruktion und numerische Analyse von Aussparungen in Armierungsverbänden. Projektarbeit (2020), Erlangen
- [S11] Bitzelis, P.: Aktive und lokale Beeinflussung von Werkzeugbeanspruchungen in der Kaltmassivumformung. Bachelorarbeit (2021), Erlangen

- [S12] Vogel, M.: Aufbau eines Ermüdungsversuchs zur realitätsnahen Abbildung der Lasten von Kaltmassivumformwerkzeugen. Bachelorarbeit (2021), Erlangen
- [S13] Blanus, L.: Experimentelle Untersuchung der Lebensdauer von lokal vorgespannten Kaltmassivumformwerkzeugen. Bachelorarbeit (2022), Erlangen
- [S14] Vogel, M.: Untersuchung des Einflusses lokaler und globaler Armierungssysteme auf die Werkzeuglebensdauer. Projektarbeit (2023), 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
KTmfk	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

Projektierung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit 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 Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

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

Band 21: Egon Sommer

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

Band 22: Georg Geyer

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

Band 23: Rainer Flohr

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

Band 24: Alfons Rief

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

Band 25: Christoph Thim

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

Band 26: Roland Müller

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

Band 27: Günther Schäfer

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

Band 28: Martin Hoffmann

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

Band 29: Peter Hoffmann

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

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-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 Steuerungssystemen von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

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

Band 42: Armin Gropp

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

Band 43: Werner Heckel

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

Band 44: Armin Rothhaupt

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

Band 45: Bernd Zöllner

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

Band 46: Bodo Vormann

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

Band 47: Peter Schnepf

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

Band 48: Rainer Klotzbücher

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

Band 49: Wolfgang Greska

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

Band 50: Jörg Franke

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

Band 51: Franz-Josef Zeller

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

Band 52: Michael Solvie

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

Band 53: Robert Hopperdietzel

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

Band 54: Thomas Rebhahn

Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.
1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr

Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.
1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer

Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.
1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs

Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm

Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand

Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf

Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer 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 Spulnwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes

Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab.
1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus

Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer

Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber

Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.
1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke

Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller

Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner

Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.
1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.
1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind

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

Band 78: Manfred Gerhard

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

Band 79: Elke Rauh

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

Band 80: Sorin Niederkorn

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

Band 81: Stefan Schubert

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit 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 spritzgeossener 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 Planungs- und Fertigungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionsysteme 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 Negenandack

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

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab.
2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab.
2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab.
2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.
2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab.
2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab.
2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab.
2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab.
2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab.
2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren - Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab.
2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab.
2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab.
2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab.
2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab.
2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab.
2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab.
2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trocken-schmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.
2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab.
2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab.
2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab.
2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2005. ISBN 3-87525-228-4.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustier-technik mittels ultrakurzer Laserpulse

LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schal-tungsträger (3D-MID)

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

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige 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 prä-keramischer Polymere

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

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Be-stückung permanent erregter Läu-fer mit oberflächenmontierten Dauermagneten

FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechum-formprozesse

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

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßge-schneiderter Halbzeuge

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

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatroni-scherBaugruppen

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

Band 187: Michael Kerausch

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

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

Band 188: Matthias Weber

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

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestim-menden Strahl-Stoff-Wechselwir-kungen beim Laserstrahlschwei-ßen von Kunststoffen

LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirk-medienbasierte Doppelblech-Um-formung von Magnesiumlegierun-gen

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

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

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

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen ver-stärkter Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinfluss-größen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Löt-prozessen in der Elektronikpro-duction

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

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von mak-romechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme

FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.

ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließ-ortkurven bei erhöhten Tempera-turen

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

Band 197: Thomas Bigl

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

Band 198: Stephan Roth

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

Band 199: Artur Giera

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

Band 200: Jürgen Lechler

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

Band 201: Andreas Blankl

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

Band 202: Andreas Schaller

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

Band 203: Claudius Schimpf

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

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahlfließschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder.
2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

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

Band 208: Uwe Vogt

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

Band 209: Till Laumann

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

Band 210: Alexander Diehl

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

Band 211: Detlev Staud

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

Band 212: Jens Ackermann

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

Band 213: Stephan Weidel

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

Band 214: Stefan Geißdörfer

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

Band 215: Christian Matzner

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

Band 216: Florian Schüßler

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

Band 217: Massimo Cojutti

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

Band 218: Raoul Plettke

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

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte

FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam

Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery

LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch

Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald

Quasi-isothermes Laserstrahl-sintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK

LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern

FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen

LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber

Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten

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

Band 226: Peter Sebastian Feuer

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

Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak

Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics

LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz

Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen

LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm

Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik

LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit

LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung

LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.

ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert

Automatisiertes Laserstrahl-löten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen

LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler

Prozessdynamik beim Laserstrahl-schweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß

LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen

LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development

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

Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 251: Alexander Kühn
Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder.
2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metall dampffackelposition
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 Zöllner

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

Band 280: Christian Hezler

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

Band 281: Jochen 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 Borschlegl
Methods-Energy Measurement -
Eine Methode zur Energieplanung
für Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

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

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

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

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlweißßen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

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

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

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

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

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

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

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

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der härtesten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

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

- Band 306: Sebastian Suttner**
Charakterisierung und Modellierung des Spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.
- Band 307: Bhargav Potdar**
A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.
- Band 308: Maria Löffler**
Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.
- Band 309: Martin Müller**
Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.
- Band 310: Christopher Kästle**
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.
- Band 311: Daniel Vipavc**
Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.
- Band 312: Christina Ramer**
Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.
- Band 313: Miriam Rauer**
Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.
- Band 314: Felix Tenner**
Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.
- Band 315: Aarief Syed-Khaja**
Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.
- Band 316: Adam Schaub**
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.
- Band 317: Daniel Gröbel**
Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.
- Band 318: Philipp Hildenbrand**
Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.
- Band 319: Tobias Konrad**
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.
- Band 320: David Meinel**
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.
- Band 321: Andrea Zimmermann**
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.
- Band 322: Christoph Amann**
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.
- Band 323: Jennifer Tenner**
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.
- Band 324: Susan 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 Prozesskettenabildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 347: Philipp Amend

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

Band 348: Matthias Ehlert

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

Band 349: Thomas Sander

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

Band 350: Florian Pilz

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

Band 351: Sebastian Josef Katona

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

Band 352: Jürgen Herrmann

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

Band 353: Christof Küstner

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

Band 354: Tobias Gläsel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenumwicklungen für 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 Esfandyari

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

Band 359: Christian Sand

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

Band 360: Ralf Merkl

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

Band 361: Thomas Reitberger

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

Band 362: Marius Christian Fechter

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

Band 363: Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram 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, 8 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

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

ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

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

ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

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

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

ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

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

ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

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

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

ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

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

ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

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

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

ISBN 978-3-96147-583-4.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 428: Markus Lieret

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

Band 429: Petar Vukovic

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

Band 430: Fabian Knieps

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

Band 431: Julian Seßner

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

Band 432: Benjamin Samuel**Lutz**

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

Band 433: Michael Jüttner

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

Band 434: Sebastian Wiesen- mayer

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

Band 435: Clara-Maria Kuball

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

Band 436: Martin Roth

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

Band 437: Stephan Schirdewahn

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

Band 438: Andreas Rohrmoser

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

Band 439: Andreas Selmaier

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

Band 440: Thomas Kistner

Entwicklung von Modellen der Oberflächenform für die Messunsich- erheitsbestimmung von taktilen Koordinatenmessungen durch Si- mulation
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.

Abstract

Cold forging enables the energy efficient production of high-strength metal parts. However, tool fatigue due to high forming forces impedes the applicability of forging processes for intricate part geometries, which are increasingly in demand. Therefore, tool stresses and fatigue failure in cold forging dies for parts with non-circular symmetrical cross-sections were analysed depending on their prestressing system. The investigations were carried out using die load simulations and a newly developed fatigue test, in which the forging pressure is applied by cyclic compression of an elastomer specimen. Critical tensile tool loads leading to fatigue failure occur where the inner die contour deviates the most from a circular geometry. While conventional reinforcement systems are able to improve the stress state, fatigue failure still occurred after about 100,000 load cycles. Therefore, adapted prestressing systems using a local reinforcement effect were researched. On the one hand, gaps interrupting the contact between reinforcement and die induce a bending stress and locally increase the prestress in critical areas. On the other hand, stress pins pressed into the die create a local stress field around them and improve the stress state when positioned appropriately. Experimental analyses showed an increased die life of 150% for gaps and 16% for stress pins. These local prestressing systems therefore provide potential for enhancing process limits in cold forging to produce more complex part geometries.

Die Kaltmassivumformung ermöglicht eine energieeffiziente Produktion hochbelastbarer metallischer Bauteile. Werkzeugermüdung infolge hoher Belastungen beeinträchtigt jedoch die Anwendbarkeit für anspruchsvolle Bauteilgeometrien, welche zunehmend an Bedeutung gewinnen. Daher wurden Werkzeugbelastung und Ermüdungsversagen von Matrizen mit unrunder Innenkontur in Abhängigkeit ihres Vorspannsystems untersucht. Hierzu wurden Belastungssimulationen sowie ein neu aufgebauter Ermüdungsversuch verwendet, in dem der Umformdruck durch die zyklische Kompression von Elastomeren nachgebildet wird. Kritische Zugbeanspruchungen entstehen in den Werkzeugbereichen, die am weitesten vom Inkreis der Innenkontur entfernt sind. Obwohl konventionelle Vorspannsysteme zu einem verbesserten Spannungszustand führen, trat im Modellversuch Ermüdungsversagen nach etwa 100.000 Zyklen auf. Daher wurden angepasste lokale Vorspannsysteme untersucht. Einerseits wird durch Aussparungen im Armierungsverband der Kontakt zwischen Matrize und Armierung lokal unterbrochen und damit eine vorteilhafte Biegespannung induziert. Andererseits erzeugen in die Matrizen gepresste Spannstifte in ihrem Umfeld Spannungen, die bei geeigneter Positionierung den Beanspruchungszustand verbessern. Im Modellversuch wurde eine erhöhte Lebensdauer um 150% für Aussparungen und um 16% für Spannstifte erreicht. Die lokalen Vorspannsysteme haben daher Potential für eine Erweiterung der Prozessgrenzen der Kaltmassivumformung zur Herstellung anspruchsvollerer Bauteilgeometrien.

