



FAU Studien aus dem Maschinenbau 456

Manuel Reck

Grundlegendes Prozessverständnis
zur Herstellung von Bauteilen mit
texturierten Oberflächen durch
Mikroprägen in einem kombinierten
Umformprozess



Manuel Reck

Grundlegendes Prozessverständnis zur Herstellung von Bauteilen mit texturierten Oberflächen durch Mikroprägen in einem kombinierten Umformprozess

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 456

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

Manuel Reck

**Grundlegendes Prozessverständnis
zur Herstellung von Bauteilen
mit texturierten Oberflächen
durch Mikroprägen in einem
kombinierten Umformprozess**

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

Erlangen
FAU University Press
2025

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

Kontakt: Manuel Reck, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, (^{ror} <https://ror.org/oof7hpc57>)

Bitte zitieren als

Reck, Manuel. 2025. *Grundlegendes Prozessverständnis zur Herstellung von Bauteilen mit texturierten Oberflächen durch Mikroprägen in einem kombinierten Umformprozess*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 456. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-799-9

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: 978-3-96147-798-2 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-799-9 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-799-9

**Grundlegendes Prozessverständnis zur Herstellung
von Bauteilen mit texturierten Oberflächen durch
Mikroprägen in einem kombinierten
Umformprozess**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Manuel Reck, M.Sc.

aus Forchheim

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

Tag der mündlichen

Prüfung: 14.11.2024

Gutachter/in: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Prof. Dr.-Ing. Alexander Brosius
Prof. Dr. Roswitha Zeis

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Grundlegende Erkenntnisse dieser Schrift wurden während der Bearbeitung des durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Projekts „Reibungsreduzierung in geschmierten tribologischen Kontakten durch mikrotexturierte Bauteiloberflächen (DFG 426217784)“ erarbeitet. Für die Unterstützung des Fördermittelgebers sowie die hervorragende Kooperation mit Herrn Christian Orgeldinger des LSCAD in Bayreuth möchte ich mich herzlich bedanken.

Für die Betreuung der Arbeit sowie die Möglichkeit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung gilt mein besonderer Dank der Ordinaria des Lehrstuhls, Prof. Dr.-Ing. Marion Merklein. Des Weiteren danke ich Prof. Dr.-Ing. Alexander Brosius für die Übernahme des Zweitgutachtens und Prof. Dr. Roswitha Zeis für das fachfremde Gutachten meiner Arbeit. Bei Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Inf. Hinnerk Hagenah möchte ich mich zudem für sein Engagement als Prüfungsvorsitzender sowie die ausgezeichnete langjährige Zusammenarbeit bedanken.

Mein weiterer Dank gilt darüber hinaus allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für die durchwegs großartige Zusammenarbeit. In interdisziplinären Teams wurde eine Vielzahl an wissenschaftlichen Herausforderungen gemeinsam bewältigt. Besonders möchte ich mich bei Dr.-Ing. Andreas Rohrmoser und Dr.-Ing. Johannes Henneberg für die tolle Unterstützung während meiner Anfangszeiten am Lehrstuhl bedanken. Außerdem danke ich Franz He, Bastian Zettl, Thomas Wild, Alina Biallas und Jan Henning Risse für den fachlichen und fachfremden Austausch sowie die schöne gemeinsame Zeit. Einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit haben zudem meine Hiwi-Studentinnen Hana und Annie, die mich jahrelang in der Forschung begleitet haben.

Zuletzt gilt mein ganz besonderer Dank meiner Familie, die mich auf meinem akademischen und persönlichen Werdegang immer hervorragend unterstützt hat. Es ist toll, Euch immer an meiner Seite zu wissen.

Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und Forschung	3
	2.1 Funktionale Oberflächen	3
	2.1.1 Anwendungsmöglichkeiten metallischer Funktionsoberflächen mit Mikrotexturen.....	5
	2.1.2 Beeinflussung der Tribologie durch mikrotexturierte Oberflächen	7
	2.2 Fertigungsverfahren mikrotexturierter Bauteile	9
	2.2.1 Urformende Verfahren	9
	2.2.2 Trennende Verfahren	10
	2.2.3 Umformende Verfahren	13
	2.3 Zusammenfassende Bewertung des Stands der Technik.....	23
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	27
4	Verwendete Werkstoffe, Prüfeinrichtungen und Methoden... 31	
	4.1 Eingesetzte Werk- und Schmierstoffe.....	31
	4.1.1 Werkstückwerkstoffe	31
	4.1.2 Werkzeugwerkstoffe.....	33
	4.1.3 Schmierstoff.....	34
	4.2 Mikrostrukturierung	35
	4.3 Umformmaschinen	36
	4.4 Methoden zur Charakterisierung mikrotexturierter Bauteile..	36
	4.5 Methoden zur numerischen Prozessabbildung	38
5	Prozessauslegung und -analyse	41
	5.1 Bauteil- und Prozessauslegung.....	41
	5.2 Numerische Abbildung	47
	5.3 Charakterisierung der Bauteil- und Prozesseigenschaften.....	54
6	Erforschung des Einflusses textur-, prozess- und halbzeitiger Größen auf das Prozessergebnis	73
	6.1 Texturseitige Einflussgrößen	75
	6.2 Prozess- und halbzeitige Einflussgrößen.....	92

6.3	Bewertung der Einflussgrößen	102
7	Erarbeitung von Methoden zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen	105
7.1	Anpassung der Stempelgeometrie	106
7.2	Inverse Texturauslegung	111
7.3	Bewertung der Maßnahmen	116
8	Untersuchung des Einsatzverhaltens	119
8.1	Abstrahierte Prozessabbildung	120
8.2	Analyse des Werkzeugverschleißes	122
8.3	Maßnahmen zur Erweiterung der Werkzeugstandmenge	135
9	Zusammenfassung und Ausblick	143
10	Summary and Outlook	145
	Literaturverzeichnis	147

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
b	μm	Texturbreite
c_1, c_2	-	Beschleunigungskoeffizienten
d_x	μm	Abstand in x-Richtung
d_y	μm	Abstand in y-Richtung
$\vec{g}_{\text{best}_i}^n$	-	Globaler Bestwertvektor
h	μm	Texturtiefe
h_A	μm	Höhenabnahme der Texturen
h_a	mm	Absatzhöhe
h_n	-	Hubzahl
h_S	mm	Schalenhöhe
k_f	MPa	Fließspannung
$k_{f,0}$	MPa	Anfangsfließspannung
$k_{f,s}$	MPa	Sättigungsfließspannung
l	μm	Texturlänge
l_W	μm	Werkzeugseitige Texturlänge
m	-	Reibfaktor
n	-	Verfestigungsexponent
n_{Texturen}	-	Anzahl gemessener Texturen
$n_{\text{Werkstücke}}$	-	Anzahl gemessener Werkstücke
$\vec{p}_{\text{best}_i}^n$	-	Individuelle Bestwertvektor
r_1, r_2	-	Vektoren der Partikelschwarmoptimierung
R_a	μm	Mittenrauwert
R_z	μm	Rautiefe
s_V	μm	Weg der Verschiebung während Ablösung
t_0	mm	Ausgangsblechdicke
V_F	μm	Verlängerung des Fließwegs
\vec{v}_i^n	-	Geschwindigkeitsvektor
$v_{\text{Umformung}}$	mm/s	Umformgeschwindigkeit

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
A_{Textur}	%	Flächendeckungsgrad der Texturierung
E	MPa	Elastizitätsmodul
F_N	N	Normalkraft
$F_{R,\text{Gesamt}}$	N	Gesamtreibungskraft
P_o	-	Startposition Partikel
P_x	-	Endposition Partikel
α_U	°	Mittlerer Umlenkungswinkel
α_V	°	Flankenwinkel der Texturverzerrung
β_o	-	Ziehverhältnis
λ	-	Schmierfilmhöhenparameter
μ	-	Reibzahl
σ_B	MPa	Bodenspannung
σ_{max}	MPa	Maximale Hauptspannung
σ_{min}	MPa	Minimale Hauptspannung
σ_N	MPa	KontaktNormalspannung
$\sigma_{v,\text{Mises}}$	MPa	Vergleichsspannung
τ	MPa	Schubspannung
τ_{max}	MPa	Maximale Schubspannung
ϕ	-	Umformgrad
ω	-	Trägheitsgewicht

<i>Abkürzung</i>	<i>Beschreibung</i>
μMIM	Mikro-Metallpulver-Spritzgießen
CVD	Chemical Vapor Deposition
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EHD	Elastohydrodynamik
EP	Extreme Pressure
FEM	Finite Elemente Methode

HD	Hydrodynamik
HPC	Hochleistungsrechnen
HRC	Härte nach Rockwell
HSS	High Speed Steel
HV	Härte nach Vickers
IT	ISO-Toleranzklasse
KI	Künstliche Intelligenz
MPM	Material-Punkt-Methode
Nd:YAG	Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
PVD	Physical Vapor Deposition
REM	Rasterelektronenmikroskop
TZP	Tiefziehpresse

1 Einleitung

Texturierte Oberflächen sind in verschiedensten technischen Produkten des Alltags weit verbreitet. Teilweise werden die positiven Eigenschaften solcher Oberflächen für den Nutzer bereits von außen eindeutig sichtbar. Ein allgemein bekanntes Beispiel hierfür sind Rändelmutter [1], die dank dem eingebrachten Oberflächenmuster die Reibung zwischen dem Bauteil und der menschlichen Haut im Vergleich zu glatten Oberflächen erhöhen. Die Mutter kann mühelos ohne Werkzeug bewegt werden, da das Abrutschen bis zu dem erforderlichen Drehmoment verhindert wird.

Häufig sind die Anwendungen texturierter Oberflächen allerdings nicht auf den ersten Blick sichtbar. So werden zum Beispiel Solarzellen aus Silizium an deren Oberfläche mit mikroskopisch kleinen Pyramidenformen ausgestattet, um die Reflexion zu verringern und mehr Licht in der Zelle einzufangen [2]. Weitere Anwendungsbeispiele sind in vielen unterschiedlichen technischen Disziplinen zu finden. Die durch das spezielle Oberflächenmuster erzielten Effekte sind breit gestreut und auf den jeweiligen Einsatzfall abgestimmt. Im Bereich der Tribologie können zum Beispiel Reibung und Verschleiß durch das Einbringen kleinster Schmierstoffreservoirs in Axial- und Radiallagern herabgesenkt werden. Die Oberflächentexturierung von Wendeschneidplatten für Drehvorgänge trägt hier aufgrund der reduzierten Schnittkräfte, Temperaturen und Reibkräfte zu einer verbesserten Lebensdauer bei [3]. Vollkommen andere Zusatzfunktionen werden wiederum bei einem Einsatz texturierter Oberflächen in der Optik erzielt. Dank geometrischer Muster auf Straßenschildern ist deren Reflexionsrate und damit einhergehend die Sichtbarkeit aus der Ferne gesteigert [4].

Die zugrundeliegenden Herstellungsverfahren solcher Bauteile mit Mikrostrukturen können nach der Art und Weise, wie das Material verarbeitet wird in die Kategorien hinzufügender, abtragender und materialverdrängender Verfahren unterteilt werden [4]. Wirtschaftliche Gesichtspunkte der Herstellungsverfahren stehen in erster Linie im Zusammenhang mit der Prozessvorbereitung, dem Energieverbrauch während der Bearbeitungszeit sowie den Investitionskosten [4]. Texturoberflächen mit hoher Wiederholgenauigkeit können durch auf die Mikrobearbeitung angepasste Trenn- und Fügeverfahren äußerst präzise erzeugt werden [5]. Nachteilig sind die lange Prozessdauer und die hohen Kosten, da die Herstellung der Texturen meist in inkrementellen Prozessen mit vielen Einzelschritten erfolgt. Dem gegenüber stehen Prozesse der Umformtechnik. Diese zeichnen

sich neben einer hohen Materialausnutzung besonders durch gute Wirtschaftlichkeit dank kurzer Taktzeiten aus [6]. Neben der endkonturnahen Herstellung der Bauteilgeometrie besteht die Möglichkeit, bereits im Umformprozess mechanische Eigenschaften des Werkstücks positiv zu beeinflussen [7]. Die Prozesslimitationen hinsichtlich Fertigungsdauer und Produktionskosten von Füge- und Trennverfahren können durch den Einsatz der Umformtechnik zur Herstellung texturierter Oberflächen überwunden werden. Um die Potenziale der Umformtechnik vollständig auszuschöpfen ist eine Integration des Strukturierungsvorgangs in den eigentlichen Herstellungsprozess des Grundkörpers texturierter Bauteile anzustreben. Für die industrielle Umsetzung solcher kombinierten Prozesse fehlt bislang ein generelles Prozessverständnis, welches für die Auslegung der Prozessführungsstrategie essenziell ist. An dieser Stelle knüpft die vorliegende Schrift mit der Erarbeitung eines grundlegenden Prozessverständnisses für die einstufige umformtechnische Herstellung von Bauteilen mit mikrogeprägter Oberflächenstruktur an. Die umformende Herstellung dünnwandiger funktionsintegrierter Bauteile mit kaltverfestigten Bereichen bieten in diesem Kontext großes Potenzial dem Bedarf an Leichtbaukomponenten zu bedienen [8]. Zu diesem Zweck wird daher eine einstufige Prozessabfolge, bestehend aus Tiefziehen, Abstreckgleitziehen und Mikroprägen ausgelegt. Anhand dieses Verfahrens werden bauteil- und prozessseitige Einflussgrößen identifiziert und bewertet. Darauf aufbauend werden in systematischer Vorgehensweise Wirkmechanismen abgeleitet. Die umfassende Prozessanalyse ermöglicht zudem die Identifikation von Herausforderungen, deren Ursachen sowie den Prozessgrenzen. Diese Ergebnisse werden in der Entwicklung von Maßnahmen zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen genutzt. Industriennahe Werkzeugverschleißuntersuchungen liefern darüber hinaus wichtige Erkenntnisse über die Lebensdauer von mikrotexturierten Aktivteiloberflächen. In abschließenden Untersuchungen wird die Übertragbarkeit der Resultate auf weitere Werkstoffklassen und Prägestrategien geprüft. Zudem werden anwendungsnahe Auslegungsempfehlungen für einstufige Mikrotexturierungsprozesse gegeben. Diese tragen zu einem Abbau von Hürden in der Etablierung solcher Verfahren im industriellen Umfeld bei. Ähnlich zur Herstellung von Bauteilen mit makroskopischen Funktionselementen in Prozessen der Blechmassivumformung [9] werden so Möglichkeiten geschaffen, filigrane Funktionselemente auf Blechen zu fertigen.

2 Stand der Technik und Forschung

In diesem Kapitel wird ein Überblick von Anwendungsfeldern funktionaler metallischer Oberflächen sowie deren Herstellungsverfahren herausgearbeitet. Aufgezeigt werden nicht nur etablierte Einsatzmöglichkeiten, sondern auch neuartige technische Systeme, die vom Potenzial metallischer Funktionsstrukturen künftig profitieren können. Aufgrund der direkten Verknüpfung mit der vorliegenden Arbeit liegt der Schwerpunkt auf den Möglichkeiten, durch gezielte Veränderung der Oberfläche deren tribologische Eigenschaften zu beeinflussen. Zunächst wird in Abschnitt 2.1 das Spektrum mikroskopischer Strukturen in verschiedenen Bereichen technischer Produkte dargelegt. Besonders in der Medizintechnik und im Automobilbau sind systematisch strukturierte Oberflächen im Vorteil gegenüber unstrukturierten Oberflächen, da sie dem Anwendungsfall entsprechende Eigenschaftsverbesserungen ermöglichen. Darauf basierend wird in Abschnitt 2.1.2 am Beispiel industriell relevanter Komponenten die Auswirkungen von Oberflächenstrukturen auf die tribologischen Eigenschaften behandelt. Ein Schwerpunkt wird mit Abschnitt 2.2 auf aktuell eingesetzte Herstellungsverfahren von Produkten mit funktionalen Oberflächen gesetzt, da diese erarbeiteten Erkenntnisse die Grundlage für die Analyse des der Arbeit zugrunde liegenden Umformprozesses bildet. Abtragende Verfahren, welche an den eigentlichen Produktherstellungsprozess angeschlossen sind, haben hierbei bislang die größte industrielle Bedeutung. Hinsichtlich Präzision, Herstellungsdauer, Produktionskosten und Umweltverträglichkeit werden diese Produktionsmethoden umformenden Verfahren aus Abschnitt 2.2.3 gegenübergestellt. Die abschließende Bewertung des Stands der Technik kann Abschnitt 2.3 entnommen werden.

2.1 Funktionale Oberflächen

Das Verhalten technischer Produkte wird maßgeblich durch ihre spezifischen Oberflächenphänomene bestimmt [8]. Mit gezielter Funktionalisierung der Oberfläche erhalten Komponenten zusätzliche Eigenschaften, die in der Produkthanwendung genutzt werden können [9]. Eine Klassifizierung von Oberflächen wird in Bild 1 aufgezeigt. Neben der Unterteilung in funktionale und durch den Herstellungsprozess bedingte Oberflächen ist die Unterscheidung gerichteter und ungerichteter Strukturoberflächen entscheidend für die Funktionalität im späteren Bauteileinsatz. Solche funktionalen Oberflächen können unter anderem in den Bereichen der Optik, Elektronik, Tribologie, Biologie und Bionik angewendet werden [8]. Zum

Einsatz kommen technische Materialien aus allen der vier Werkstoffklassen Metalle, Keramiken, Polymere und Verbundwerkstoffe [10].

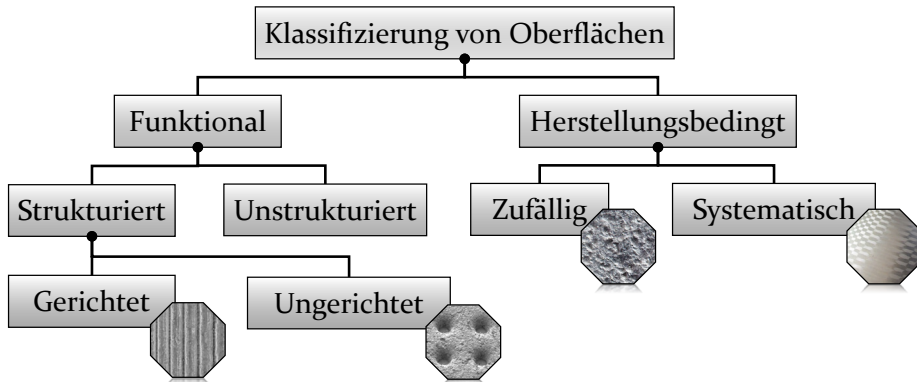


Bild 1: Klassifizierung von Oberflächen, repräsentiert durch Lasertexturierung (gerichtet), Sintern (ungerichtet), Gießen (zufällig) und Fräsen (systematisch)

Im Umfeld der funktionalen Oberflächen ist besonders das Interesse an strukturierten Bauteilen in den letzten Jahrzehnten immer weiter gestiegen [11]. Die Strukturierung erfolgt durch die gezielte Einbringung von Texturmustern an der Außenseite der Komponenten [12]. Strukturierte Oberflächen durch eine Plasmabehandlung ermöglichen etwa bei der Produktion thermo- und duroplastischer Verbundwerkstoffe eine Verbesserung des Schichtzusammenhalts durch die Erhöhung der Benetzbarkeit der Zwischenschichten [13]. Aktuelle Forschungsansätze zur Funktionalisierung von Polymeroberflächen durch eingebrachte Strukturmuster sind im Halbleiterbau zu finden [14]. Periodische Anordnungen von Löchern im Nanometerbereich auf einem Polystyrol Film werden als Maske für den Ätzvorgang des Siliziumsubstrats genutzt [15]. Resultierend aus der Strukturierung verfügt der Kondensator um eine um den Faktor vier erhöhte Ladungsspeicherkapazität, verglichen mit glatten Siliziumhalbleitern [15]. Keramische Werkstoffe können mit dem Ziel der Einstellung der tribologischen Eigenschaften mittels säurebasiertem Ätzen oder Nanosekundenlasern texturiert werden [16]. Aufgrund der geringen Duktilität keramischer Werkstoffe ist die Einbringung von Texturen und folglich scharfen Kanten allerdings nur in Verbindung mit weiteren Werkstoffklassen zielführend [17].

Wegen der weiten Verbreitung metallischer Produkte in allen Bereichen des modernen Lebens [18] ist auch für diese Werkstoffklasse die Erforschung strukturierter Oberflächen mit ihren spezifischen Eigenschaftsverbesserungen von besonderer Bedeutung. Aufgrund der bedeutenden Rele-

vanz von Metallen werden deren Anwendungsmöglichkeiten und Forschungsansätze texturierter Funktionsoberflächen im folgenden Abschnitt näher vorgestellt.

2.1.1 Anwendungsmöglichkeiten metallischer Funktionsoberflächen mit Mikrotituren

Texturen auf metallischen Bauteilen beeinflussen die Funktionalität der Oberfläche für den jeweiligen Einsatz entscheidend [19]. Unter Texturen werden zielgerichtete Veränderungen der Oberflächen mittels geometrisch definierten Formen verstanden, welche die Wirksamkeit dieser in der betreffenden Umgebung verbessern [11]. Die Texturen sind als Vertiefungen oder Erhöhungen in das Bauteil eingebracht [20]. Da die Vertiefung im Allgemeinen kleiner als die Kontaktfläche von texturierter Oberfläche und Kontaktpartner sein muss, um hohen Verschleiß in der Anwendung zu vermeiden [21], sind die einzelnen Texturabmaße im mikroskopischen Spektrum zu finden [20]. Mikrotituren sind definiert als geometrische Strukturen, bei denen mindestens zwei Dimensionen im Submillimeterbereich sind [22]. Die mikroturierten Bauteile selbst besitzen meist Außenabmessungen von einigen Millimetern bis hin zu wenigen Zentimetern [18]. Dreidimensionale Mikrostrukturen können sich dabei auf einer oder mehreren Bereichen der Oberfläche befinden [18]. Häufig eingesetzte Mikrotituren sind Zylinder, Rillen und Quader [11]. Das breite Spektrum möglicher Anwendungsfälle von mikroturierten Bauteilen wird in Tabelle 1 aufgezeigt. Diese reichen vom Maschinen- und Anlagenbau über die Luft- und Raumfahrttechnik bis hin zur Medizintechnik [23].

Die Reduktion von Reibkräften ist der bislang am häufigsten in wissenschaftlichen Publikationen untersuchte Effekt der Mikrotiturierung [20]. RYK ET AL. [24] prüfen die Wirkung einer Laseroberflächentiturierung mit Zylindern auf die Reibungsreduzierung in Kolbenringen. Im Vergleich zu untexturierten Kolbenringen werden die Reibungsverluste um bis zu 25 % herabgesenkt [24]. Elliptisches Vibrationsschneiden wird von ZHANG ET AL. [25] zur Titurierung von gehärtetem Stahl mit verschiedenen Geometrien und Formen genutzt. Die Reibkraft kann in Abhängigkeit von Form und Morphologie der Textur in Untersuchungen auf einem Stift-Scheibe Tribometer erheblich reduziert werden [25]. Aufgrund der besonderen Bedeutung von tribologischen Effekten in der Mikrotiturierung werden diese differenziert in Abschnitt 2.1.2 beschrieben.

Tabelle 1: Anwendungen metallischer Funktionsoberflächen mit Mikrot Texturen

Effekt	Anwendung	Textur	Quelle
Reibung ↓	Kolbenringe	Zylinder	[24]
Schmierspalt ↑	Zylinderlaufbuchsen	Quader	[26]
Tragfähigkeit ↑	Axiallager	Rillen	[27]
Luftwiderstand ↓	Flugzeugaußenhaut	Rillen	[28]
Wärmeableitung ↑	Kühlkörper	Quader	[29]
Adhäsion organ. Stoffe ↓	Operationsbesteck	Quader	[30]
Verankerung ↑	Hüftpfannen	Quader	[31]
Benetzung ↓	Medizinische Geräte	Wabenmuster	[32]

In der Luft- und Raumfahrttechnik kann der Luftstrom durch das Aufbringen einer widerstandsfähigen Folie mit mikro-riblets auf der Außenhaut von Flugzeugen im Passagier- und Frachtbereich verbessert werden [28]. Dieses Konzept ist aus der Natur von der Haut eines Haies inspiriert und wird bereits seit 2022 von der Firma Lufthansa AG für das Frachtflugzeug Boeing 777F eingesetzt [33]. Durch die Anwendung der Technologie bei zehn Flugzeugen dieses Typs werden jährliche Einsparungen von 11.700 Tonnen CO₂e erzielt [33]. Eine Integration der Texturen auf der metallischen Oberfläche der Außenhautteile bereits im Herstellungsprozess kann dazu beitragen, die begrenzte Lebensdauer der Folien von bislang acht Jahren [33] zu verlängern. Mikrot texturen werden außerdem für miniaturisierte Kühlkörper in der Elektroindustrie eingesetzt um mittels Vergrößerung der Oberfläche die Wärmeableitung zu steigern [29]. Durch die fortschreitende Miniaturisierung von Produkten und Systemen [34] steigt auch der Bedarf an kleinsten Kühlkörpern für elektronische Komponenten mit hoher Abwärme [35]. Die Auswirkungen der Texturgeometrie auf die Kühlleistung werden von DUANGTHONGSUK ET AL. [36] beschrieben. Gezackte Rillenstrukturen führen zu einer um bis zu 55 % gesteigerten Kühlleistung im Vergleich zu zylindrischen Pin-Anordnungen [36].

Ein weiterer Einsatzbereich metallischer Funktionsoberflächen ist die Medizintechnik. Forschungsansätze von Marmur [30] zeigen die Möglichkeiten von superhydrophoben Texturen im Hinblick auf die Vermeidung von biologischem Bewuchs an medizinischen Produkten auf. Von superhydrophoben Oberflächen wird gesprochen, wenn der Kontaktwinkel zwischen

einem Flüssigkeitstropfen und dem darunter liegenden Feststoff mehr als 150° beträgt [37]. Da zwischen der texturierten Metalloberfläche und der Flüssigkeit ein dünner Luftfilm ausgebildet wird, kann die Adhäsion organischer Stoffe reduziert werden [30]. Die Ausstattung von Operationsbesteck mit einer superhydrophoben Mikrotextur ist daher in der Lage, die Kontamination durch Blut- und Bakterienanhaftungen vermindern [38]. HIRAI ET AL. [32] zeigen des weiteren Möglichkeiten zur gezielten Einstellung der Benetzbarkeit von texturierten Oberflächen mit Flüssigkeiten auf. So ist zum Beispiel ein Wassertransport auf einer schiefen Ebene, die mit wabenförmigen Mikrotexturen ausgestattet ist, gegen die Schwerkraft möglich [32]. Dieses Wissen kann in Zukunft für die Auslegung medizinischer Geräte aus der Mikrofluidik genutzt werden [32]. Texturierte Oberflächen finden zudem Anwendung in der Prothetik [31]. Metallische Werkstoffe wie Edelstahl, Titan und Titanlegierungen sowie Kobaltlegierungen werden häufig für klinische Anwendungen wie Implantate eingesetzt [39]. Durch das Aufbringen eines Strukturmusters auf der Oberfläche von Endoprothesen wird eine verbesserte Verankerung des künstlichen Gelenks mit dem Knochen erreicht [31]. Die Texturierung ermöglicht das Einwachsen von Knochenzellen in die Prothesenverankerung und erhöht folglich die Stabilität des Implantats [40]. Dieser Verankerungseffekt wird bereits bei Hüftpfannensystemen der Firma B. Braun SE genutzt [41].

2.1.2 Beeinflussung der Tribologie durch mikrotexturierte Oberflächen

Zur ganzheitlichen Behandlung der Wirkung von mikrotexturierten Oberflächen auf die tribologischen Eigenschaften eines Systems werden zunächst die Grundlagen tribologischer Kontakte beschrieben. Darauf aufbauend wird das Potenzial von Mikrotexturen für hydrodynamische und elasto-hydrodynamische Schmierung aufgezeigt. Am Beispiel des Tassenstößels aus dem Ventiltrieb werden die Möglichkeiten texturierter tribologischer Kontakte abschließend verdeutlicht.

Ein tribologisches System kann nach CZICHOS ET AL. [42] anhand der Systemstruktur sowie der Ein- und Ausgangsgrößen beschrieben werden. Bestandteile der Systemstruktur sind Grund- und Gegenkörper, die sich relativ zueinander bewegen und vollständig oder partiell durch einen Zwischenstoff getrennt sind [42]. Die tatsächliche Kontaktfläche ist allerdings häufig bedeutend kleiner als die theoretische Fläche, welche durch die Bauteildimensionen in Kontakt steht [43]. Eingangsgrößen sind durch das Be-

anspruchungskollektiv wie beispielsweise Kräfte, Bewegungen und Temperatur bestimmt. Als Ausgangsgrößen sind Verlustgrößen wie Reibungsenergie und Materialverschleiß definiert [44]. Unterschiede in den Reibungszuständen resultieren aus den Wirkungen von Makrogeometrie, Kinematik und Oberflächentopographie [45]. In der Stribeck-Kurve [46] wird die Beziehung von Reibungszahl und Schmierfilmhöhenparameter beschrieben. Die Reibungszahl

$$\mu = \frac{F_{R,Gesamt}}{F_N} \quad (1)$$

ist mit Gleichung (1) als Quotient aus der Gesamtreibungskraft $F_{R,Gesamt}$ und der Normalkraft F_N definiert. Der Schmierfilmhöhenparameter

$$\lambda = \frac{h_F}{\sigma_R} \quad (2)$$

bezeichnet nach Gleichung (2) das Verhältnis aus Filmdicke h_F und der kombinierten Oberflächenrauheit aus Grund- und Gegenkörper σ_R . Mit dem Ziel die Energieeffizienz geschmierter tribologischer Systeme zu steigern, sind Bestrebung hin zu größeren Schmierfilmdicken und folglich niedrigeren Reibungszahlen zu verzeichnen [47]. Um dies zu erreichen, ist ein hydrodynamischer Druckaufbau anzustreben, der bei einem parallelen Spalt durch Hubbewegungen oder für konisch zulaufende Spalte durch tangentielle Bewegungen entsteht. Schmierstoff wird wegen den auftretenden Hafteffekten zwischen die Kontaktkörper gezogen, was eine Trennung der Oberflächen zur Folge hat [45]. Handelt es sich bei einem der Kontaktpartner um einen weichen Werkstoff oder tritt eine hohe Pressung auf, dann resultiert dies neben der Hydrodynamik (HD) in elastischen Effekten. Es wird daher von der sogenannten Elastohydrodynamik (EHD) gesprochen [48].

Erste Ansätze, die tribologischen Bedingungen mittels mikrotexturierten Oberflächen zu beeinflussen, werden von HAMILTON ET AL. [49] untersucht. Am Beispiel von Radialwellendichtungen wird gezeigt, dass die Lasttragfähigkeit und der Schmierpalt durch eine Texturierung gesteigert werden kann [49]. In weiterführenden Untersuchungen zeigen ANNO ET AL. [50] verbesserte Schmierungsbedingungen an Axiallagern und Gleitringdichtungen nach der Integration von Mikrotexturen. Neben der Wirkung als Schmiertaschen dienen die Texturen der Aufnahme von Verschleißpartikeln und verlängern so die Lebensdauer [51]. In den vergangenen 30 Jahren sind über 1.400 Publikationen zur Mikrotexturierung von Bauteiloberflä-

chen vor dem Hintergrund der tribologischen Beeinflussung entstanden [20]. Im Zuge des großen Interesses an den auftretenden Effekten wird von GANGOPADHYAY ET AL. [52] die Wirkung für höher belastete Systeme mit hohen Gleitanteilen am Beispiel der Kontaktpaarung aus Nockenwelle und Tassenstößel im Ventiltrieb analysiert. Danach können V-förmige Texturen auf der Tassenstößeloberfläche die Reibungsverluste im Vergleich zu polierten Varianten um bis zu 35 % herabsetzen [52]. Linienförmige Mikrotexturen auf Tassenstößeln mit einer Tiefe von bis zu 4 μm werden von WESCHTA [53] auf einem Reibungsprüfstand unter Mischreibungsverhältnissen untersucht. Die Reibungsreduktionen belaufen sich auf bis zu 18 %.

2.2 Fertigungsverfahren mikrotexturierter Bauteile

Aufgrund der guten mechanischen Eigenschaften sowie der thermischen und chemischen Beständigkeit werden für texturierte Bauteile meist metallische Werkstoffe verwendet [11]. Der jeweils geeignete Herstellungsprozess ist stark von den produktspezifischen Anforderungen abhängig [5]. Der folgende Abschnitt zeigt Möglichkeiten zur Mikrotexturierung von Metallwerkstoffen auf. Neben konventionell eingesetzten Verfahren finden auch innovative Prozesse aus aktuellen Forschungsprojekten Berücksichtigung.

2.2.1 Urformende Verfahren

Zur Herstellung mikrotexturierter Bauteile in hoher Qualität bieten urformende Verfahren großes Potenzial. Vorherrschend sind die Prozesse Mikro-Metallpulver-Spritzgießen (μMIM) und Mikroguss. Vorteile des μMIM sind die herstellbare Formkomplexität, die Anwendbarkeit auf ein breites Materialspektrum, sowie die guten mechanischen Eigenschaften der Bauteile [54]. Im Prozessverlauf werden Pulver- und Binderkomponenten zu einer Formmasse verarbeitet und anschließend auf einer Spritzgießmaschine abgeformt [55]. Anschließend wird der Binder durch Lösemittel zersetzt und das finale Bauteil kann gesintert werden [55]. Die grundlegende Eignung für die Produktion mikrotexturierter Bauteile wurde in verschiedenen Untersuchungen festgestellt [56]. Mit dem Edelstahl 1.4404 werden von FU ET AL. [57] in diesem Verfahren zylindrische Mikrostrukturen mit einem Durchmesser von 60 μm und einer Höhe von 191 μm hergestellt. Es wird dargelegt, dass ein hoher Einspritzdruck und Nachdruck sowie die Erhöhung der Werkzeugtemperatur einen positiven Einfluss auf die Füllung der Kavitäten besitzen. Die durch den Sintervorgang bei 1.300 °C

hervorgerufenen Poren behindern jedoch die Verdichtung des Materials [57]. Mikrostrukturen mit kleineren Abmessungen von rund 10 μm können durch die Verwendung von Metallpulvern, bestehend aus Partikelgrößen zwischen 2 und 5 μm , hergestellt werden [58]. Die Erzeugung zylindrischer Vertiefungen mit einem Durchmesser von 100 μm mittels μMIM wird von DAWARI ET AL. [59] aufgezeigt. In den Untersuchungen wird eine gute Verschleißbeständigkeit der gefertigten Texturoberfläche festgestellt [59]. Aufgrund der mehrstufigen Prozesskette von μMIM sind die Durchlaufzeiten sowie die anfänglichen Investitionskosten für Maschinen und Anlagen sehr hoch [60]. Wirtschaftlich einzusetzen ist das Verfahren daher nur für äußerst umfangreiche Losgrößen.

Der Mikroguss stellt die Miniaturisierung von Feingussverfahren dar. Ausgehend von der Fertigung von Mikroteilen aus Edelmetalllegierungen werden verlorene Kunststoffmodelle genutzt, um verlorene keramische Gießformen zu entwickeln [61]. Von WÖLLMER ET AL. [62] wird die grundlegende Eignung des Verfahrens für die Herstellung mikrostrukturierter metallischer Bauteile festgestellt. In [63] wird der Prozess um die Verwendung flexibler und wiederverwendbarer Silikonformen erweitert. Dies ermöglicht die Herstellung von in zwei Dimensionen gekrümmten Bauteilen mit Mikrostrukturen in Form von zylindrischen, quadratischen und rillenförmigen Vertiefungen [63]. Eine entscheidende Prozessgrenze ist die im Vergleich zu anderen Mikroumfarmverfahren hohe Rauheit der Bauteile. Diese ist der Grenzfläche zwischen der Keramikgießform und der Schmelze geschuldet [61]. Durch neue Ansätze zur Verwendung glatter Formoberflächen aus Quarzglas werden allerdings Oberflächenrauheiten von $R_a = 0,036 \mu\text{m}$ erzielt [64]. Im Mikroguss können mit bislang vorhandenem Prozesswissen Strukturen mit einer minimalen Breite von 20 μm und Aspektverhältnissen von bis zu 60 produziert werden [61]. Aufgrund der aufwendigen Einzelfertigung der Bauteile ist der Prozess vornehmlich für kleine bis mittlere Stückzahlen geeignet [61]. Bislang ist zudem kein grundlegendes Prozessverständnis für mögliche gegenseitige Beeinflussung bei einer einstufigen Kombination aus konventionellem Gießen und Mikrogussverfahren für die Herstellung großer Bauteile mit feiner Mikrostruktur vorhanden [61].

2.2.2 Trennende Verfahren

Unter den trennenden Verfahren kommen für die Mikrotexturierung von Bauteiloberflächen neben spanenden Prozessen vornehmlich thermisches

und chemisches Abtragen zum Einsatz. Am weitesten verbreitet ist das Laser-Oberflächentexturieren [12].

Lasertexturierung

Eine präzise Lasertexturierung ist mittels Nedoym-dotiertem Yttrium-Aluminium-Granat-Laser (Nd:YAG) möglich [65]. Materialanhäufungen aus geschmolzenem Material am Rand der Strukturen und die Ausbildung einer Wärmeeinflusszone sind entscheidende Prozessgrenzen der Bauteiltexturierung durch Laserabtragen [66]. Zudem ist die Produktivität aufgrund der nachgelagerten Oberflächenbearbeitung durch Laserverfahren limitiert. Für linien- und zylinderförmige Texturen liegt die maximal erreichbare Prozessgeschwindigkeit bei aktuell $0,36 \text{ m}^2/\text{min}$ [67]. Ein weiterer Aspekt, der in der Prozessbewertung nicht vernachlässigt werden darf, sind mögliche Gesundheitsrisiken durch Partikelemission. Die Partikelgröße variiert bei Laserablationsverfahren von 10 nm bis $1 \text{ }\mu\text{m}$ [68]. Studien von OBERDÖRSTER ET AL. [69] zeigen, dass durch das Einatmen solcher Partikel schwere Lungenentzündungen hervorgerufen werden können. Speziell für Partikel im Nanometerbereich ist die Entzündungsreaktion des Körpers besonders ausgeprägt [69]. Ein Jahr nach der Aufnahme von abgetragenen Partikeln werden, abhängig von Material und Partikelgröße, noch immer zwischen 7% und 50% der initialen Lungenablagerungen gemessen [70].

Ätzverfahren

Neben der Lasertexturierung ist das chemische Ätzen eine der am weitesten verbreitete trennende Texturierungstechnologie [4]. Der Materialabtrag erfolgt durch chemische Reaktionen zwischen dem zu texturierenden Metallsubstrat und bereitgestellten reaktiven Stoffen [71]. Der ablaufende Prozess ist vergleichbar mit der Korrosion, beziehungsweise der chemischen Auflösung eines Metalls durch mikroskopische elektrochemische Zellaktionen [72]. Neben Kupfer [73], Nickel und Silizium [74] können auch Stähle [75] und diamantähnliche Kohlenstoffbeschichtungen [76] texturiert werden. Stärken chemischer Ätzverfahren sind die Variabilität herstellbarer Texturgeometrien [77], die niedrige Oberflächenrauheit [75] sowie die hohe Genauigkeit [78]. Durch Anpassung der Ätzdauer ist es möglich, Texturtiefen von $0,5 \text{ }\mu\text{m}$ bis zu $1,0 \text{ mm}$ herzustellen [79]. Nachteilig sind sowohl die lange Bearbeitungsdauer von oft mehreren Minuten je Bauteil [80] als auch die aufwendige Vor- und Nachbereitung des Verfahrens [4]. Darüber hinaus wird in Ätzverfahren hochgiftige Flusssäure verwendet [81], die bereits bei indirektem Kontakt schwere Augenreizungen, Kurzatmigkeit und eine reduzierte Lungenfunktion hervorrufen kann [82].

Wegen der Toxizität von Flusssäure ist die Entsorgung äußerst aufwändig und ein Recyclingprozess ist nur unter hohem Kosten-, Energie- und Sicherheitsaufwand möglich [83]. Die aufgezeigten Herausforderungen verdeutlichen, dass die Mikrotexturierung mittels thermisch und chemisch abtragender Verfahren aufgrund langer Fertigungszeiten, Gesundheitsrisiken und ökologischen Herausforderungen nur bedingt geeignet ist.

Spanende Verfahren

Eine weitere Kategorie von Materialabtragungstechnologien sind spanende Verfahren. Diese werden bevorzugt eingesetzt, wenn thermische Prozesse einen negativen Einfluss auf das zu texturierende Bauteil besitzen [84]. Viele klassische Verfahren aus der Zerspanung wie Fräsen, Drehen und Schleifen sind auf miniaturisierter Basis für die Herstellung mikrotexturierter Oberflächen anwendbar [85].

Typischerweise wird das Mikrofräsen durch die Größe des Schneidendurchmessers des Werkzeugs charakterisiert, welche zwischen 1 µm und 1000 µm liegt [86]. Das Verfahren wird besonders im Werkzeug- und Formenbau eingesetzt, da gehärtete Werkstoffe bis über 50 HRC gefräst werden können [87]. Vorteile des Prozesses sind in der hohen geometrischen Flexibilität der Strukturen und dem breiten Spektrum an bearbeitbaren Werkstoffen begründet [88]. Im Vergleich zum Mikrodrehen und Mikroschleifen können auch nicht-rotationssymmetrische Oberflächenstrukturen erzeugt werden. Durch die lange Bearbeitungsdauer ist eine wirtschaftliche Oberflächentexturierung lediglich in kleinen Stückzahlen gegeben [89]. Weitere Herausforderungen im Mikrofräsen sind die Prozessstabilität bei der Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe [90] sowie die Entstehung von Rattermarken auf der Oberfläche durch Torsionsschwingung des Werkzeugs [91].

Die Strukturierung rotationssymmetrischer Stirn- und Mantelflächen kann daneben im Mikrodrehen realisiert werden [5]. Aufgrund der geometrischen Limitierungen des konventionellen Mikrodrehens werden vorrangig die Verfahrensvarianten des Formdrehens sowie des Längs- und Querprofileinstechdrehens [92] verwendet. Diese sind besonders für die Fertigung von Werkzeugen aus HSS-Stählen geeignet [93]. Im Mikrodrehen können präzise Strukturen mit Abmessungen von nur 5 µm gefertigt werden [94]. Die dreidimensionale Zerspanung ebener Oberflächen und Metallfolien wird durch das Mikrodrehen auch großflächig ermöglicht [5]. Eingeschränkt durch die Werkzeuggeometrie ist die Erzeugung scharfer Radien eine entscheidende Prozesslimitierung [93]. Obwohl Ansätze zur Prozess-

beschleunigung durch hochfrequente axiale Zustellbewegung mittels piezoelektrischen Aktoren bestehen [95], ist das Mikrodrehen wegen der langen Bearbeitungszeiten lediglich für hochwertige Bauteile in kleinen Stückzahlen wirtschaftlich einzusetzen. Zur Berücksichtigung serientauglicher Fertigungsprozesse werden deshalb im folgenden Abschnitt umformende Verfahren zur Oberflächentexturierung beschrieben.

2.2.3 Umformende Verfahren

Erste Umformvorgänge mit kleinen Oberflächenstrukturen datieren bereits aus einer Zeit um 600 v. Chr. mit der Prägung von Gold- und Silbermünzen [96]. Die dort geprägten Geometrien sind nach heutiger Definition durch Mikroumformung gefertigt, da es sich um eine umformtechnische Herstellung von Bauteilen oder Strukturen [97] handelt, wobei zumindest zwei Dimensionen im Submillimeterbereich liegen [98]. Unter Prägeverfahren werden im Allgemeinen Umformprozesse mit Veränderung einer Werkstückoberfläche unter hohem Druck verstanden [99]. Nach DIN 8580 [97] wird Prägen dem Druckumformen zugeordnet. Eine weitere Unterteilung ist durch die Art der Umformung der Halbzeuge möglich. Das Massivprägen ist durch die Veränderung der Werkstückoberfläche gekennzeichnet, wobei die Werkstoffdicke maßgeblich verändert wird [6]. Es ist daher der Massivumformung zuzuordnen, während das Hohlprägen ein Verfahren der Blechumformung darstellt [6]. Charakteristisch für Hohlprägeprozesse ist die konstante Blechdicke nach der Umformung. Die auf der einen Seite geprägte Vertiefung sorgt für eine Materialerhöhung auf der gegenüberliegenden Seite des Bauteils [6]. Liegt ein Prägeprozess ohne vollständig geschlossenes Werkzeug vor, so handelt es sich um ein Einprägeverfahren [100]. Häufig kommt ein Werkzeug mit geometrischen Zeichen wie Buchstaben oder Ziffern zum Einsatz [100].

Mikroprägen

Erste Bestrebungen, das Prägen von definierten Strukturmustern wissenschaftlich zu untersuchen, sind im Jahr 1998 durch Ansätze von IKE ET AL. [101] dokumentiert. Merkmale des Mikroprägens sind im Vergleich zum Prägen kleinere Strukturdetails, höhere Aspektverhältnisse sowie teils geringere Reststegdicken der Bauteiloberfläche [102]. Das Prägen mikroskopisch kleiner Strukturen ist in die Herstellung von Vertiefungen sowie in die Erzeugung erhabener Strukturen zu unterteilen [101]. Vertiefungen an der Bauteiloberfläche werden durch einen direkten Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück erzeugt, während erhabene Strukturen durch

die Füllung von Hohlräumen im Werkzeug entstehen [103]. Die Abgrenzung der Verfahren Massivprägen, Mikroprägen von Erhebungen und Mikroprägen von Vertiefungen ist schematisch anhand eines beispielhaften Werkzeugaufbaus in Bild 2 verdeutlicht.

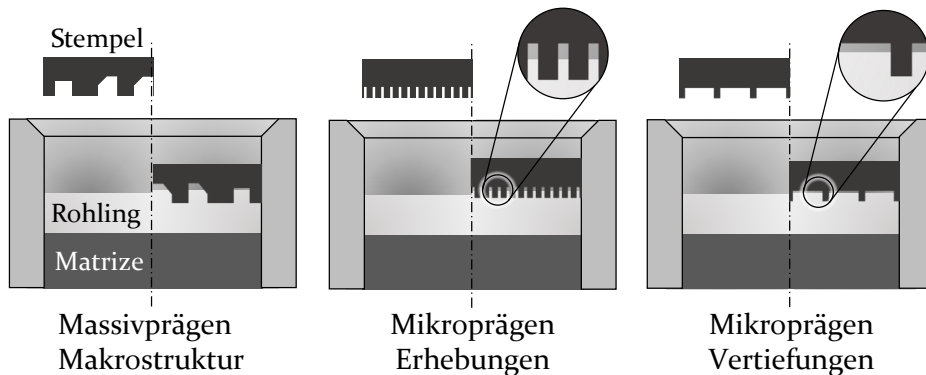


Bild 2: Schematische Werkzeugsysteme von Massivprägen [6] sowie Mikroprägen von Erhebungen und Vertiefungen

Die Ausformung erhabener Strukturen wird in [101] untersucht. An einem regelmäßigen Muster von zylindrischen Werkzeugkavitäten wird das Formfüllungsverhalten von Aluminiumhalbzeugen mit einer Ausgangsblechdicke von 2,0 mm analysiert. Bei einem Aspektverhältnis von 0,16 beträgt der Kavitätendurchmesser 175 μm und die Tiefe 28 μm . Es wird gezeigt, dass eine vollständige Formfüllung erst bei Kontaktdrücken von der mindestens 3,1-fachen Anfangsfließspannung möglich ist [101]. Aus den Umformversuchen kann abgeleitet werden, dass zwei Plastifizierungsvorgänge die Bauteilausformung beeinflussen. Das Fließen des gesamten Werkstücks sorgt wie bei Stauchprozessen aus der Massivumformung für einen starken radialen Materialfluss. Daneben ist die Ausformung der miniaturisierten Zapfen mit der Plastifizierung des oberflächennahen Werkstoffs zu erklären. Da die Fließgeschwindigkeit zum Bauteilrand hin zunimmt, resultiert eine inhomogene Füllung der Kavitäten [101]. Als weitere Prozessgrenze wird das Abscheren bereits geformter Zapfen durch den radialen Werkstofffluss identifiziert [101]. Der Einsatz von Schmierstoffen kann gezielt eingesetzt werden, um das Abscher- und Kaltverschweißverhalten der Strukturen zu steuern [101]. Im Folgenden werden im Detail prozess- und bauteilseitige Einflussfaktoren auf das Prägeresultat aufgezeigt.

Effekt von Texturgeometrie und Anordnung: In Mikroprägeprozessen beeinflusst die Geometrie des werkzeugseitigen Prägemusters maßgeblich die Umformkräfte, den Formfüllungsgrad und die Abbildungspräzision [104].

Für beidseitig liegende Kanalstrukturen wird der Einfluss der Geometrie-parameter Flankenwinkel, Kavitätsbreite und Kavitätsabstand in [105] untersucht. Es wird festgestellt, dass sich ein großer Flankenwinkel negativ auf die Formfüllung auswirkt, da die projizierte Kontaktfläche mit dem Flankenwinkel ansteigt. Unabhängig vom Flankenwinkel wird die Formfüllung von Kavitäten mit hohem Aspektverhältnis im Vergleich zu Werkzeugen mit geringem Aspektverhältnis positiv beeinflussen. Da am Prozessende grundsätzlich hohe Drücke benötigt werden, um die Werkzeugkavität vollständig zu füllen, haben Unterschiede zwischen den Werkzeuggeometrien wenig Einfluss auf den erforderlichen Druck im letzten Kalibrierungsschritt. Darüber hinaus werden die Auswirkungen des Verhältnisses aus werkzeugseitiger Kavitätsbreite und der Breite der dazwischenliegenden Stege auf die Formfüllung analysiert. Mit abnehmendem Verhältnis, was einer Vergrößerung des Abstands zwischen den Kanälen entspricht, werden höhere Drücke benötigt, um eine identische Formfüllung zu erzielen. Anhand numerischer Untersuchungen wird dieses Verhalten mit der Anfangskontaktfläche aus Werkzeug und Werkstück begründet, die bei großen Kavitätsabständen ansteigt [105]. Numerische Analysen zur Herstellung von Kanalstrukturen im Voll-Vorwärts-Fließpressen zeigen darüber hinaus, dass die Wahl des Einlaufradius der Werkzeugkavitäten einen entscheidenden Einfluss auf die Formfüllung hat. Größere Radien ermöglichen einen verbesserten Stofffluss und erhöhen dadurch erzielbare Steghöhen [106].

Effekt der Halbzeugkorngröße: SU ET AL. [107] beschreiben das Mikroprägeverhalten für Reinaluminium hinsichtlich der Auswirkungen der Korngröße auf die Verformbarkeit und die Verformungsmechanismen. Es wird festgestellt, dass bei sonst identischen Prozessparametern das grobkörnige Aluminium Vorteile in der Formfüllung im Vergleich zu ultrafeinkörnigem Aluminium bietet [107]. Als Begründung wird der höhere Verformungswiderstand des ultrafeinkörnigen Aluminiums genannt. Kleinere Korngrößen sind indes besser zur Abbildung präziser Geometrien geeignet [107]. Beim Mikroprägen grobkörniger Werkstoffe und der damit verbundenen Deformation großer einzelner Körner kommt es zu Makroradien und Verformungen, welche die Genauigkeit absenken [107]. Das Fließverhalten grobkörnigen Aluminiums ist auf intragranulare Versetzungsbewegungen zurückzuführen. Die plastische Verformung des ultrafeinkörnigen Gefüges wird durch Korngrenzgleiten und Kornrotation begünstigt [107]. Es wird außerdem eine Zunahme des Umformgrads mit steigender Umformtemperatur detektiert, die zusammen mit der Wärmeentwicklung je nach Ausgangsgefüge zu verschiedenen Kornentwicklungen führt [107]. Während

grobkörniges Aluminium im Verlauf des Mikroprägens rekristallisiert, wird für ultrafeinkörniges Material Kornwachstum festgestellt [107]. Eine ergänzende Variantenstudie zum Einfluss der Korngröße auf das Mikroprägen erhabener Strukturen wird in [108] mit Reinaluminium in mittleren Korngrößen von 16 bis 98 μm durchgeführt. Ein zunehmendes Verhältnis aus Korngröße und Kavitätbreite resultiert in einer abnehmenden Mikroumformbarkeit des Materials, solange das Verhältnis unter 0,5 liegt. Ist das Verhältnis darüber angesiedelt, so steigt mit der Erhöhung auch die Mikroumformbarkeit. Ist die Korngröße kleiner als die Kavitätbreite, kann die Umformung eines homogenen polykristallinen Materials angenommen werden. Im Gegensatz dazu wird von der Verformung eines Einzelkorns ausgegangen, wenn die Korngröße einen höheren Wert als die Werkzeugvertiefung hat. In diesem Fall wirken sich weniger Randeefekte auf die Umformung aus [108]. Vergleichbare Ergebnisse werden von WANG ET AL. [109] für das Füllungsvermögen von polykristallinem Reinnickel beschrieben. Es wird ebenfalls festgestellt, dass die Formfüllung vornehmlich von dem Verhältnis von Kavitätbreite zu Korngröße abhängt. Die Korngrößeneffekte können ab einer Kavitätbreite von 300 μm vernachlässigt werden, da die Umformung von der Mikroprägung zur Mikroextrusion übergeht [109].

Effekt der Prozessparameter: Das Prozessergebnis von Mikroumformprozessen wird von der Umformgeschwindigkeit beeinflusst. Die in konventionellen Mikroprägeverfahren untersuchten Umformgeschwindigkeiten liegen in einem Bereich von 0,1 mm/s für Reinaluminium [110], 0,2 mm/s für X₅CrNi18 10, AlMg₃ und CuZn₃₇ [111] und 5 mm/s für 16MnCr₅ [112]. Da die Geschwindigkeit in diesen Untersuchungen jeweils als konstante Eingangsgröße festgelegt ist, werden keine Effekte derselben diskutiert. In weiteren Untersuchungen [113] wird dagegen der Einfluss der Umformgeschwindigkeit auf das Prozessergebnis im Mikroprägen des Edelstahls X₅CrNi18 10 mittels elektromagnetisch angetriebenem Werkzeug analysiert [113]. Eine Geschwindigkeit von 30 m/s erzielt bei reduziertem Energiebedarf ähnlich gute Formfüllungen wie die eines quasi statischen Verfahrens. Die Werkstoffe Al_{99,5} und 1.4404 kommen in der Forschungsarbeit von SCHUBERT ET AL. [114] zum Einsatz. Der Energiebedarf ist ebenfalls geringer als bei quasi statischer Umformung. Es wird gefolgert, dass die entstehende Umformwärme nicht innerhalb der kurzen Prozesszeit abgeführt werden. Die Plastifizierung resultiert in thermisch aktivierten Prozessen im Werkstückwerkstoff, welche zu einer Reduktion des Fließwiderstands führen [115]. Ergebnisse in [116] bestätigen diese Annahme anhand von Mikroprägeversuchen von Kanalstrukturen in einem offenen Gesenk. Die gezielte Ge-

schwindigkeitseinstellung ist daher geeignet, um die Kalibrierung der Mikrostrukturen zu verbessern [116]. Des Weiteren beeinflusst die Umformgeschwindigkeit die Reibungsverhältnisse zwischen Werkzeug und Werkstück. Während eine Erhöhung der Umformgeschwindigkeit für Untersuchungen an einem Edelstahl zu einer Herabsetzung der Reibung führt, kann für Aluminium eine Zunahme festgestellt werden [117]. Um die Rauheit der mikrogeprägten Bauteiloberfläche zu reduzieren, ist die Anwendung der ultraschallgestützten Umformung möglich. Für reines Kupfer werden Rauheitsreduktionen von mindestens 50 % im Vergleich zur konventionellen Umformung detektiert. Die Begründung liegt in einem homogenen Stofffluss durch die Ultraschallschwingungen, welche eine Aufrauung der Oberfläche durch ungleichmäßigen Materialfluss in den Kavitäten verhindern [118].

Die im vorangegangenen Abschnitt diskutierten thermischen Effekte im Werkstoff werden in [119] genutzt, um die Fließspannung bei erhöhten Temperaturen herabzusetzen. Die angewendete superplastische Umformung [120] bei niedrigen Formänderungsgeschwindigkeiten und Temperaturen der 0,5-fachen Schmelztemperatur ist für die Herstellung filigraner Rippenstrukturen geeignet [119]. Die verbesserte Formfüllung von flachen Pyramidenstrukturen durch erhöhte Umformtemperaturen wird in [121] nachgewiesen. Als limitierender Faktor der Warmumformung wird die Oxidbildung mit den entsprechenden werkzeugseitigen Ablagerungen identifiziert. Mögliche Gegenmaßnahmen können die Umformung unter Schutzgas- oder Vakuumatmosphäre sein [121]. Untersuchungen mit dem Edelstahl 1.4401 berücksichtigen die thermische induzierte Rekristallisation beim Warmmikroprägen von verrundeten Kanalstrukturen [122]. Zonen verfeinerter Körner sind in der Umformzone zu finden, mit minimalen Korngrößen im Radiusbereich der Mikrokanäle. Im Vergleich zur Kaltumformung wird durch die Umformung bei Temperaturen von 890 °C eine dreimal höhere Formfüllung erzielt [123]. Untersuchungen an ultrafeinkörnigem Aluminium in [124] zeigen, dass bereits eine Temperaturerhöhung auf 300 °C ein vollständiges Übertragen von kanalförmigen Strukturen ermöglicht, während die Werkstückkavität bei Raumtemperatur nur unvollständig gefüllt wird. Des Weiteren zeichnen sich die warmgeprägten Bauteile durch eine besonders glatte Oberfläche aus [124].

Ein weiterer Prozessparameter mit maßgeblichem Einfluss auf die Formfüllung filigraner Funktionselemente ist die Reibung [125]. Für Mikroprägeprozesse wird der Einfluss des tribologischen Systems auf die Prägegeometrie von IKE ET AL. [126] bestimmt. Eine Reibungsreduktion durch die Verwendung eines Schmierstoffs führt zu einer verbesserten Formfüllung.

Dies kann mit einer herabgesetzten Stoffflussbehinderung und folglich einem erhöhten radialen Materialfluss erklärt werden. Wird die Schmierstoffmenge stark erhöht, kommt es zu einer Verzerrung der Prägegeometrie. Der in den werkzeugseitigen Kavitäten eingeschlossene Schmierstoff verhindert eine vollständige Formfüllung. Dies resultiert in kugelförmigen Prägeelementen des Werkstücks. Es wird gefolgert, dass die Rauheit des Werkstücks als Orientierungswert für die Schmierfilmdicke herangezogen werden kann [126]. Diese Ergebnisse werden in [111] für das Prägen mit offenen Nutgeometrien bestätigt. Eine Verzerrung der Prägegeometrie mit steigender Schmierstoffmenge ist allerdings nicht festzustellen, da der Schmierstoff seitlich aus den Kavitäten ablaufen kann.

Prozesskombinationen

Motiviert durch das Streben nach Kosten-, Prozesszeit- und Ressourcennutzungsreduktion werden Bauteile möglichst in einem oder wenigen Fertigungsschritten hergestellt. Um dieser Entwicklung zu begegnen sind Prozesskombinationen aus umformender Herstellung eines Grundkörpers und Mikroprägen der Oberflächentextur Gegenstand verschiedener Forschungsvorhaben. SCHRADER ET AL. [127] untersuchen das kombinierte Napf-Rückwärtsfließpressen in Verbindung mit dem Mikroprägen von Schmieraschen zur Fertigung texturierter Tassenstößel. Der Fokus liegt auf tribologischen Einflüssen auf die Genauigkeit der mikrostrukturierten Bauteile. Es wird festgestellt, dass der radiale Materialfluss im Bereich der texturierten Planfläche des Tassenstößels zu ausgeprägten Flankenwinkeln bei den Mikrotexturen führt [127]. Die hergestellten Tassengeometrien weisen durch den starken globalen auftretenden und radial ausgerichteten Stofffluss verzerrte Texturmuster auf. Die Abweichungen zwischen werkzeugseitiger und werkstückseitiger Texturgeometrie steigen mit einer Erhöhung des radialen Stoffflusses [112]. Erforschte Maßnahmen zur Reduktion des radialen Materialflusses sind der lokale Verzicht auf Schmierstoff im texturierten Bauteilbereich und die Verkleinerung des Spalts zwischen Rohling und Matrize [127]. Weiterführende Untersuchungen beschäftigen sich mit den gegenseitigen Wechselwirkungen in derselben Prozesskombination. Es wird hervorgehoben, dass der Materialfluss besonders im Randbereich zu Materialabschabung führt [128]. Eine Vergrößerung des werkzeugseitigen Abstands zwischen den Texturen resultiert in einer Genauigkeitsverbesserung und demzufolge in der Reduktion von Inhomogenitäten der Texturmuster verteilt über den gesamten Tassenboden [128]. In [129] wird ebenfalls der Stofffluss als entscheidender Faktor für die Ausbildung der Mikrogeometrie von Oberflächen bei Prägeverfahren beschrieben. Der Einfluss von Massivumformoperationen auf das Prägeergebnis wird durch

das gezielte verhindern eines globalen Materialflusses über den gesamten Rohling analysiert. Ein zweistufiger Prozess, bestehend aus Stauchen und Prägen, wird für die Untersuchungen genutzt. Der Stauchvorgang resultiert in einem vollflächigen Kontakt aus Werkstück- und Werkzeugwand. Im folgenden Prägeprozess wird so der radiale Stofffluss unterbunden. Die mikrogeprägte Geometrie entsteht ausschließlich durch den lokalen Materialfluss in den Randschichten des Halbzeugs. Resultierend daraus können nur kleine Aspektverhältnisse der erhabenen Strukturen ausgeformt werden. Im Gegensatz dazu werden im einstufigen Stauchen mit texturiertem Werkzeug größere Zapfenhöhen bei konstanter Kavitätgeometrie erzielt. Daneben besteht die Möglichkeit, den globalen Stofffluss durch eine kombinierte Umformstrategie zu unterbinden. Das Einbringen einer umlaufenden Nut durch ein partielles Scherschneiden mindert aufgrund des direkten Kontakts zwischen Werkstück und Werkzeugwand den radialen Materialfluss im anschließenden Prägevorgang. Dies resultiert in einer homogeneren Formfüllung der Geometriemuster [130]. Finite Elemente Methode (FEM) Simulationen von Prägeprozessen mit Stauchanteilen zeigen des Weiteren auf, dass die Formfüllung durch das Anbringen einer Fase an den Rohlingen erhöht werden kann [131]. Ursächlich für diesen Effekt ist die Anregung des globalen Stoffflusses während des Prägens, welche die Texturausformung verbessert. Eine weitere Möglichkeit, durch die Anpassung der Rohlinggeometrie den globalen Stofffluss zu steuern, wird von KIM ET AL. [132] aufgezeigt. Der globale Materialfluss, welcher das Erreichen hoher Aspektverhältnisse begünstigt, kann durch die Wahl einer größeren Ausgangsmaterialdicke sowie durch den Verzicht auf radiale Fließbehinderungen im Werkzeug verstärkt werden. Prozesse mit starkem globalen Stofffluss sind durch eine gerichtete ungleichmäßige Texturausbildung sowie die partielle Abscherung der Texturen limitiert [129].

Texturwalzen

Neben den Texturierungsmethoden, die sich für das Strukturieren einzelner Bauteile eignen, werden Ansätze zum kontinuierlichen Texturieren von Blechen bereits im Walzprozess erforscht. Potenziale und Grenzen des Aufwalzens funktionaler Mikrostrukturen werden daher im Folgenden im Kontext aktueller Forschungsansätze vorgestellt.

Die Arbeiten zielen unter anderem auf das Texturieren mit stochastischem Muster im Kaltwalzverfahren ab [133], mit dem Ziel durch eine systematische Rauheitserhöhung für die Weiterverarbeitung der Bleche spezifische Vorteile zu ermöglichen [5]. Diese Dressierwalzprozesse werden in weiteren Untersuchungen um die Anwendung deterministischer Texturwalzen

ergänzt [134]. Das Einbringen von Napfstrukturen mit Abmessungen im Mikrometerbereich zur Verbesserung des tribologischen Systems für die Weiterverarbeitung der gewalzten Bleche wird von PAWELSKI ET AL. [135] beschrieben. Die Vertiefungen dienen in den folgenden Umformprozessen als Schmierstoffreservoir, wodurch ein Schmierstoffabriss verhindert wird [5]. In Abhängigkeit des auf der Walze aufgetragenen Texturaspektverhältnisses kommen Nachwalzgrade im Bereich von 0,3 % bis 3,0 % zum Einsatz [136]. Anhand numerischer Analysen von Dressierwalzprozessen wird das Texturieren der Bleche als Verfahrenskombination aus Prägen und Rückwärtsfließpressen beschrieben [137]. Die aufgewalzten Texturen behalten bei der nachfolgenden Bauteilherstellung nicht die ursprüngliche Geometrie bei. Ursächlich ist die Flächenpressung zwischen Werkzeug und Werkstück im Umformprozess, welche mit einer Textureinglättung einher geht [138]. Walzverfahren sind daher zwar für das Texturieren von Blechen zur Reibungsreduktion im Herstellungsverfahren geeignet, jedoch nur bedingt für die Texturierung zur Erzielung vorteilhafter Eigenschaften in der Bauteilanwendung.

Weitere Einsatzmöglichkeiten gewalzter Texturbleche sind Zierteile von Automobilteilen, Lichtlenkdecken oder Möbelblenden. Im Vordergrund steht bei diesen Anwendungen die Aufwertung der optischen Eigenschaften [139]. So werden zum Beispiel dünne Aluminiumzierbleche mit verschiedenen Querschnittskonturen gewalzt [140]. Im Vergleich zu den im Dressierwalzen genutzten miniaturisierten Napfstrukturen zeichnen sich die hier genutzten rillenförmigen Texturen durch höhere Aspektverhältnisse sowie kleine Radien der Kavitäten aus. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Texturen nicht im Submillimeterbereich gefertigt werden und daher hinsichtlich der Werkzeugtechnik als weniger kritisch eingestuft werden können. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Herstellung von einfachen flachen Geometrien mit Texturen durch Strukturwalzen grundsätzlich möglich ist. Um die erzeugte Texturgeometrie so wenig wie möglich zu verzerren, ist eine Weiterverarbeitung ausschließlich durch Verfahren mit global geringen Umformgraden im Bauteil möglich. Geeignet sind zum Beispiel Schneid-, Loch- und Biegeprozesse [141]. Soll die Textur auf dem finalen Bauteil erhalten bleiben, sind die Weiterverarbeitungsmöglichkeiten der Bleche folglich stark limitiert.

Werkzeugverschleiß des Mikroprägens

Ein limitierender Faktor für die Effizienz von Mikroprägeprozessen ist die Lebensdauer der strukturierten Werkzeuge. Durch hohen Werkzeugver-

schleiß kommt es zu einer verringerten Qualität der geprägten Oberflächenstrukturen, was zu einer Beeinträchtigung des Einsatzverhaltens führt [142]. Das Prägen von Kanalstrukturen bei verschiedenen Umformtemperaturen mit Siliziumwerkzeugen wird in [124] analysiert. Die mittels reaktivem Ionenätzen hergestellten Werkzeuge zeigen im Kaltprägen von ultrafeinkörnigem Al 99,5 starke Ausbrüche. Dies wird auf hohe Werkzeugspannungen sowie einen unausgeglichene Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück zurückgeführt. Eine Reduktion der Ausfallrate der Werkzeuge wird durch die Anhebung der Umformtemperatur auf 300 °C und dem damit einhergehenden herabgesenkten Kraftbedarf erreicht [124]. Ein Münzprägeprozess wird von NAVARRETE ET AL. [142] mit einem kombinierten experimentellen und numerischen Ansatz hinsichtlich des Verschleißverhaltens strukturierter Prägestempel analysiert. Es wird gezeigt, dass numerisch identifizierte Zonen mit Spannungsspitzen auch in den experimentellen Verschleißuntersuchungen kritische Bereiche darstellen. Über die Veränderung der Werkzeugradialen kann eine Verlagerung des vorherrschenden Verschleißmechanismus von Abrasion hin zu Ermüdung erfolgen. Eine Beeinflussung des Verschleißes mikrotexturierter Werkzeuge ist über die Steuerung der Umformgeschwindigkeit möglich. Durch die Erhöhung der Umformgeschwindigkeit verringert sich die Reibung an den Wirkflächen mikrotexturierter Werkzeuge. Dies führt besonders bei großen Texturaspektverhältnissen zu einer Spannungsreduktion und letztlich in einer längeren Lebensdauer der Werkzeuge [117]. Umformwerkzeuge mit zylindrischen Vertiefungen werden mit dem Ziel der Verringerung der realen Kontaktfläche mit dem Halbzeug eingesetzt. Verschleißuntersuchungen zu diesen Werkzeugen werden von KLOCKE ET AL. [143] bei einer maximalen Hubzahl von 500 an einem Tiefzieh-Streifenversuch mit dem Edelstahl 1.4301 durchgeführt. Nach 500 Prägevorgängen liefern die strukturierten Werkzeuge vergleichbare Reibkoeffizienten wie zu Beginn der Experimente. Die Annahme, dass die Werkzeugtaschen nur in geringem Maße von adhäsivem Verschleiß betroffen sind, wird in Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop bestätigt [143]. Ergebnisse von GEIGER ET AL. [144] zeigen für mikrotexturierte Umformwerkzeuge des Kaltarbeitsstahls 1.2379 außerdem eine erhöhte Werkzeugstandzeit durch die eingebrachten Schmieraschen. Begründet wird die Verlängerung der Standzeit mit der Fähigkeit der texturierten Oberfläche, den Umformprozess mit Schmierstoff zu versorgen und Verschleißpartikel in den Taschen aufzunehmen. Eine MoS₂-Beschichtung der texturierten Werkzeugoberfläche zeigt keinen Einfluss auf das Verschleißverhalten [144]. In [145] wird postuliert, dass geringe Kantenverrundungen des Werkzeugs im Mikroprägen des Edelstahls 1.4301 mit Saphirwerkzeugen zu hohen Kantenbelastungen

und folglich Materialversagen führt. Diese These wird in FEM Simulationen bestätigt.

In wieweit konventionelle Maßnahmen zur Werkzeugverschleißreduktion wie Titanoberflächenbeschichtungen [146] oder das Einbringen von Druckeigenspannungen in den Randschichten durch Nitrieren oder Aufkohlen [147] für mikrostrukturierte Prägwerkzeuge zielführend übernommen werden können ist bislang nicht bekannt.

Numerische Prozessabbildung des Mikroprägens

In der Umformtechnik sind Finite-Elemente Analysen eine etablierte Methode, die geometrischen und mechanischen Bauteileigenschaften vorherzusagen, die Prozessparameter zu verbessern und die experimentellen Versuchsaufwendungen zu senken [148]. Die Ansätze klassischer Kontinuumsmechanik geraten allerdings bei der präzisen Beschreibung von Mikroformprozessen an ihre Grenzen [22]. Die Größenveränderung eines Bauteils wirkt sich bei der Herstellung von metallischen Komponenten entscheidend auf das Prozessverhalten aus. Ursächlich sind sogenannte Größeneffekte, die trotz konstant gehaltenen Verhältnissen der Geometriemerkmale bei einer Miniaturisierung des Bauteils zu einer maßgeblichen Beeinflussung des Prozessergebnisses führen [149]. Nach VOLLERTSEN ET AL. [150] können Größeneffekte in die Einflussgrößen von Dichte, Form und Mikrostruktur unterteilt werden. Es werden umfassende Beeinflussungen von mechanischen Eigenschaften [151], Tribologie [152] und Streuung des Materialverhaltens [153] beschrieben. Für Mikroprägeprozesse wird die Berücksichtigung der Größeneffekte von Reibung, Korngröße, Kavitätbreite sowie Verhältnis von Kavitätbreite zu Korngröße in einem polykristallinen Materialmodell vorgeschlagen [109]. Die Wirkungen und Wechselwirkungen dieser Parameter resultieren in einem Füllgrößeneffekt, der bei der Herstellung erhabener Texturen auftritt [109]. Eine Berücksichtigung von Größeneffekten in FEM Simulationen ist durch die Einbettung größen-spezifischer Materialkarten möglich. Die Eingangsdaten werden zum Beispiel in Druckversuchen miniaturisierter Stauchproben ermittelt [148]. Die Kornheterogenität bezüglich Korngröße, -form und -verformbarkeit wird in numerischen Analysen von LU ET AL. [154] einbezogen. Bei durchgeführten Mikrokompressionsprüfung von reinem Kupfer wird eine gute Übereinstimmung numerischer und experimenteller Ergebnisgrößen erzielt. Diese Herangehensweise resultiert aufgrund der äußerst feinen Elementvernetzung bereits bei kleinen Geometrien in hohen Rechenzeiten. Ein aktueller Ansatz zur Reduktion von Rechenzeiten in der dynamisch expliziten Simulation mittels FEM von Mikroprägeprozessen wird von XU ET AL. [155]

diskutiert. Als alternative Herangehensweise wird die Material-Punkt-Methode (MPM) angewendet, um bei verringerter Datenmenge und Berechnungszeit das Formfüllungsverhalten eines Münzprägeprozesses vorherzusagen. Weitere numerische Untersuchungen werden für das Mikroprägen von Kanalstrukturen des Edelstahl 1.4301 durchgeführt [132]. Eine von KIM ET AL. [156] aufgestellte Skalierungsgleichung wird für die Quantifizierung des Einflusses der Größeneffekte auf die Fließspannung genutzt. Es werden sowohl Korngrößeneffekte, als auch Effekte aus den unterschiedlichen Kavitätsgeometrien berücksichtigt. Mittels dieser Implementierung können die Effekte aus der Materialschwächung gemäß der Hall-Patch-Beziehung sowie die Herabsenkung der Fließspannung durch die Miniaturisierung der Geometrie im Verhältnis zur Korngröße vorhergesagt werden [132].

2.3 Zusammenfassende Bewertung des Stands der Technik

Mikrotexturierte metallische Komponenten sind in vielen Bereichen des alltäglichen Lebens präsent. Das Streben nach funktionsintegrierten Bauteilen, die neben der Primärfunktion weitere vorteilhafte Sekundäreffekte mit sich bringen, wird den Bedarf weiter ansteigen lassen. Bislang werden vornehmlich chemisch, thermisch und mechanisch trennende Verfahren zur Fertigung solcher Komponenten genutzt. Aufgrund von Schwächen hinsichtlich der Durchlaufzeiten, Materialausnutzung und Produktionskosten sind die Verfahren nur begrenzt für die Fertigung in Mittel- und Großserien wirtschaftlich einsetzbar. Demgegenüber stehen Prozesse der Umformtechnik, die das Potenzial zur Herstellung texturierter Bauteile in hoher Menge zu niedrigen Kosten bieten. Ansätze zur umformtechnischen Oberflächentexturierung gehen auf skalierte Verfahrensvarianten des Prägens zurück. Das sogenannte Mikroprägen ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen mit dem Ziel, geometrisch definierte und präzise Vertiefungen beziehungsweise Erhöhungen in die Bauteiloberfläche einzubringen.

Im Rahmen einer Vielzahl an Forschungsprojekten wird ein grundlegendes Prozessverständnis für das Mikroprägen bereitgestellt. Neben den Effekten von Texturgeometrie und Anordnung werden Größeneffekte und Auswirkungen der Prozessparameter auf Bauteilkenngrößen aufgezeigt. Bisherige Untersuchungen beziehen sich allerdings lediglich auf ebene Bauteile und untersuchen das Mikroprägen als isolierten Prozess. Dies ermöglicht eine Auslegung von Mikroprägeverfahren, die nach der Fertigung des Bauteilgrundkörpers eingesetzt werden. Daraus resultiert jedoch zwangsweise

eine mehrstufige Umformung mit weiteren Herausforderungen wie Transfer und Bauteilpositionierung für die zweite Stufe. Durch eine Integration des Texturierungsvorgangs in den Herstellungsprozess des Grundkörpers kann diesem Defizit begegnet werden.

Prozesskombinationen aus verschiedenen Disziplinen der Umformtechnik bieten Vorteile, da von Synergieeffekten profitiert werden kann. Diese eröffnen die Möglichkeit, einsatzfertige Bauteile mit Mikrotexturen in einstufigen Verfahren zu produzieren. Dieses Potenzial wird bislang wegen des fehlenden grundlegenden Prozessverständnisses noch nicht in vollem Umfang ausgeschöpft. Lücken im Stand der Technik sind vor allem in der gegenseitigen Beeinflussung der Prozesse zur Grundkörperherstellung und dem Mikroprägeprozess zu finden. Bisherige Untersuchungen beschäftigen sich mit Prozesskombinationen, die durch einen hohen radialen Materialfluss gekennzeichnet sind. Dieser wirkt sich limitierend auf das Prozessfenster zur Mikrotexturierung aus. Kombinierte Prozesse aus Mikroprägen und Fließpressen oder Stauchen sind daher für die Fertigung präziser Texturmuster ungeeignet. Ein Verständnis über Wechselwirkungen von Verfahren mit geringem Materialfluss ist trotz der vielversprechenden Verbesserungsmöglichkeiten bis jetzt nicht geschaffen. In diesem Zusammenhang fehlt grundlegendes Wissen zu Herausforderungen und Formgebungsgrenzen solcher Prozesse.

Zur Beeinflussung des Prozessergebnisses im Mikroprägen steht eine Reihe untersuchter prozess- und halbzeugseitiger Stellgrößen zur Verfügung. Prozessseitig verbessert eine Erhöhung der Umformgeschwindigkeit und Umformtemperatur die Abbildegenauigkeit der Werkzeugtextur. Zudem kann das Fließverhalten über lokale Reibungsanpassungen gesteuert werden. Halbzeugseitig ist der Effekt von modifizierten Rohlingsgeometrien zur Herabsetzung des radialen Stoffflusses erforscht. Lücken bestehen in Erkenntnissen über die Wirkung werkzeugseitiger Geometrieanpassungen auf die Umformung und den Materialfluss. Ein Machbarkeitsnachweis zur inversen Vorkorrektur der Werkzeugtexturen, um im finalen Bauteil die gewünschte Texturgeometrie zu erhalten, liegt ebenfalls nicht vor. Dies ist von großer Bedeutung, da bereits kleine Maßabweichungen zu Änderungen in den Anwendungseigenschaften des Bauteils führen.

Mit Blick auf die umformtechnische Texturierung in großen Stückzahlen sind hohe erreichbare Werkzeugstandmengen entscheidend für den wirtschaftlichen Einsatz der Verfahren. Das Wissen hinsichtlich des Verschleißes mikrotexturierter Werkzeugoberflächen beschränkt sich auf die Identifikation grundlegender Mechanismen. Materialausbrüche und Adhäsion

verkürzen die Lebensdauer der Werkzeuge. Entgegen den Ansprüchen in der umformtechnischen Serienfertigung tritt das Werkzeugversagen in den Untersuchungen bereits nach wenigen Stückzahlen auf. Mit einer maximal geprüften Hubzahl von 500 steht kein industrienahes Verständnis über den Verschleiß mikrotexturierter Werkzeuge zur Verfügung. Des Weiteren ist nicht bekannt, wie konventionelle Maßnahmen zur Verschleißreduktion auf mikrostrukturierte Werkzeuge anwendbar sind. Eine systematische Untersuchung der aufgezeigten Schwachstellen im Stand der Technik soll ein grundlegendes Prozessverständnis für kombinierte Umformprozesse zur einstufigen Werkstücktexturierung bereitstellen.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Zielsetzung dieser Untersuchung ist die Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses für die umformtechnische Herstellung dünnwandiger Bauteile mit mikrogeprägter Oberflächenstruktur in einem einstufigen Verfahren. Dadurch soll die Basis für eine serientaugliche und nachhaltige Mikrotexturierung direkt im Bauteilproduktionsprozess geschaffen werden. Die zur Erreichung der Zielsetzung angewandte methodische Vorgehensweise (Bild 3) ist in drei Abschnitte unterteilt. Aufbauend auf der Auslegung eines einstufigen Referenzprozesses und der zugehörigen Analyse der erzielbaren Bauteileigenschaften sollen effiziente Maßnahmen zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen erforscht werden. Anschließend ist die Analyse der Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf weitere Werkstoff- und Prozessvarianten vorgesehen.

Die prozess- und bauteilseitige Analyse der experimentellen Umformversuche im Referenzprozess zielt auf die Identifikation von Herausforderungen und der Ableitung von Formgebungsgrenzen ab. Zum Einsatz kommt eine einstufige Prozesskombination aus Tiefziehen, Abstreckgleitziehen und Mikroprägen. Die bauteil- und prozessseitige Prozesscharakterisierung ermöglicht die Identifikation der Herausforderungen hinsichtlich Texturmaßhaltigkeit und deren Ursachen. Basierend darauf gilt es, Formgebungsgrenzen des Umformprozesses abzuleiten. Mittels experimentellen und numerischen Versuchsplänen sollen die Einflussgrößen von Texturmuster und Prozessführung auf die Maßhaltigkeit der geprägten Bauteiloberfläche untersucht werden. Geometrische Analysen durch Profilmessungen der Texturen bilden die Grundlage für die Erforschung der Formgebungsgrenzen. Mögliche Limitationen sind Verzerrungen der einzelnen Texturvertiefungen und Verschiebungen des Texturmusters. Für die untersuchten Einflussfaktoren sollen zur Erweiterung des Verständnisses die jeweiligen Wirkmechanismen herausgearbeitet werden.

Die daraus ermittelten Erkenntnisse sollen im darauffolgenden Abschnitt aufgegriffen werden, um den ermittelten Herausforderungen zu begegnen. Die Zielsetzung des Abschnitts ist daher die Erarbeitung zielgerichteter Maßnahmen zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen. Diese leisten einen entscheidenden Beitrag zur Verbesserung der Texturmaßhaltigkeit und folglich auch zur Eignung vergleichbarer Prozesse in der industriellen Fertigung texturierter Bauteile.

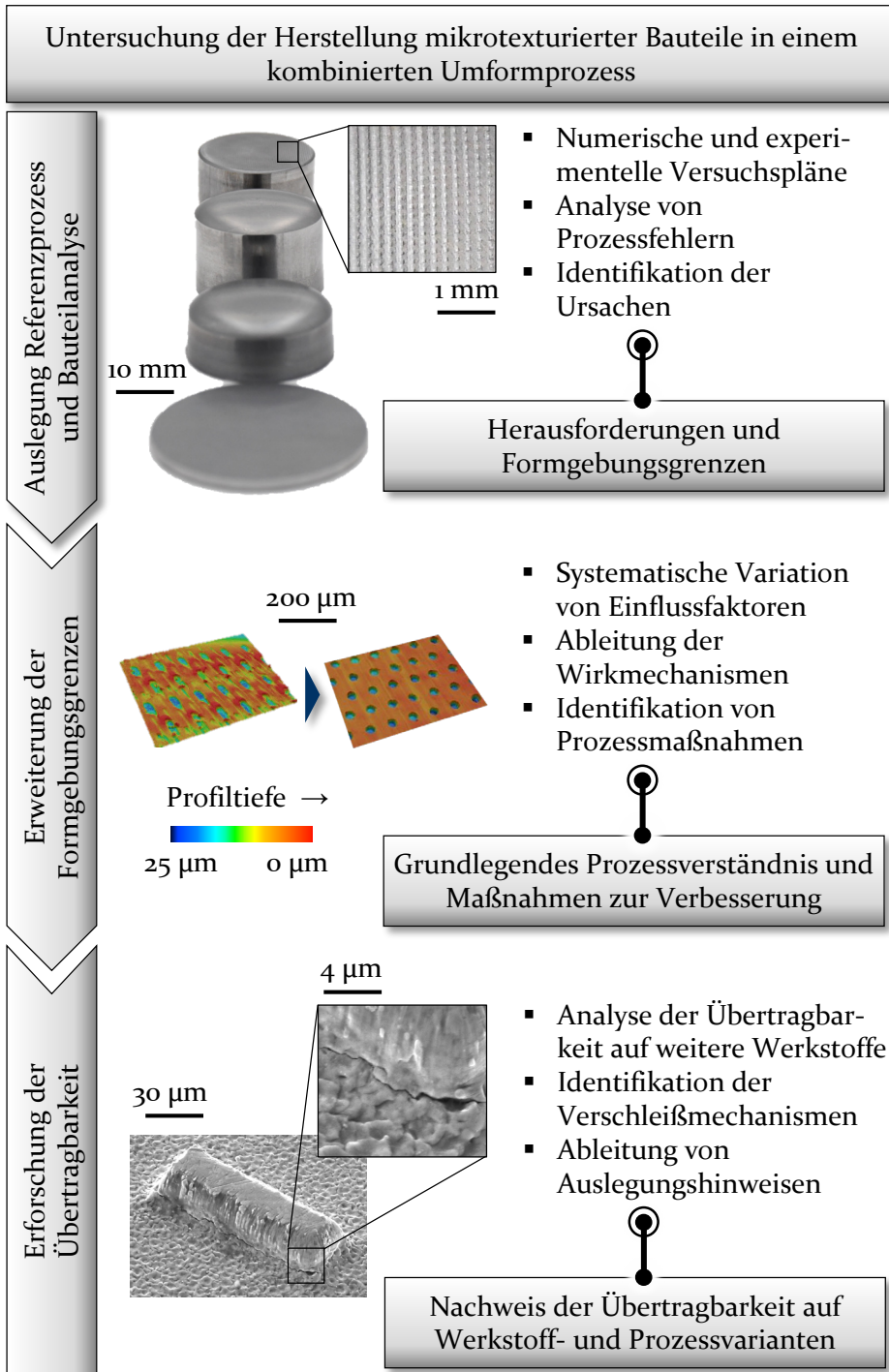


Bild 3: Methodische Vorgehensweise der Arbeit

In einem kombinierten Ansatz aus experimentellen Umformversuchen und numerischen Simulationen ist die Prozesssteuerung durch Anpassung der Werkzeuggeometrie und invers ausgelegter Texturgeometrien zu untersuchen. Die Randbedingungen aus Wirksamkeit, Komplexität und Umsetzungspotential sollen in der Bewertung der Maßnahmen Berücksichtigung finden. Vor diesem Hintergrund gilt es, konkrete Auslegungshinweise kombinierter Umformprozesse zur Ausweitung des Prozessfensters bereitzustellen.

Im darauffolgenden Abschnitt soll das geschaffene Grundlagenwissen auf weitere Werkstoffklassen angewendet werden. Die Zielsetzung ist der Nachweis der Übertragbarkeit von erarbeiteten Erkenntnissen auf Bauteile weiterer Anwendungsgebiete der Mikrotexturierung. Daher ist neben dem im Automobilbau genutzten Einsatzstahl 1.7131 die Nutzung des Edelstahl 1.4301 für medizintechnische Anwendungen und die Messinglegierung 2.0321 aus der Elektronikindustrie für vergleichende Analysen geplant. Vorgehen ist ebenfalls die Erarbeitung von werkstoffspezifischen Wirkmechanismen, um ein Verständnis für die Auswirkungen der Halbzeugfestigkeit auf die Texturmaßhaltigkeit und die Werkzeugbelastungen zu schaffen.

Abgerundet werden soll das Forschungsvorhaben durch anwendungsnahe Verschleißuntersuchungen mit einer abstrahierten Prozessvariante. In experimentellen Mikroprägeversuchen mit Bandmaterial vom Coil ist das Ziel ein grundlegendes Prozessverständnis für die auftretenden Verschleißmechanismen mikrotexturierter Werkzeuge zu erarbeiten. Querschliffe und REM-Aufnahmen geben Aufschluss über die Verschleißentwicklung nach der Umformung im Bereich zwischen 250 und 4000 Hüben. Dadurch soll für zukünftige Prozessauslegungen eine gezielte Texturauswahl in Abhängigkeit des Materialflusses in der Umformung ermöglicht werden und die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf Werkstoff- und Prozessvarianten nachgewiesen werden.

4 **Verwendete Werkstoffe, Prüfeinrichtungen und Methoden**

Dieses Kapitel dient der Beschreibung der eingesetzten Versuchswerkstoffe, deren Charakterisierung sowie die Schilderung prozessrelevanter Randbedingungen, resultierend aus der genutzten Umformmaschine. Darüber hinaus werden Methoden zur numerischen Prozessabbildung und der Charakterisierung mikrotexturierter Bauteile aufgezeigt.

4.1 **Eingesetzte Werk- und Schmierstoffe**

Das Umformverhalten metallischer Werkstoffe wird maßgeblich durch die Legierung und die Halbzeugart beeinflusst [157]. Die drei eingesetzten Werkstückwerkstoffe werden daher im folgenden Abschnitt hinsichtlich deren mechanischer Eigenschaften vergleichend gegenübergestellt. Darüber hinaus wirkt sich das tribologische System auf den Stofffluss während des Umformvorgangs aus [158]. Aus diesem Grund wird der verwendete Schmierstoff ebenfalls näher beschrieben.

4.1.1 **Werkstückwerkstoffe**

In den vorliegenden Untersuchungen wird der chrom-manganlegierte Einsatzstahl 1.7131 in der Ausgangsblechdicke $t_0 = 2,4$ mm als Referenzwerkstoff herangezogen. Der Stahl ist nach Tabelle 2 durch einen geringen Legierungsanteil an Kohlenstoff von maximal 0,19 % sowie ein Dualphasengefüge aus Martensit und Ferrit gekennzeichnet [159]. In [112] wurde bereits die grundlegende Eignung des Materials zur Herstellung umgeformter Texturbauteile nachgewiesen. Aufgrund der guten Rand- und Kernhärbarkeit wird der Werkstoff für verschleißbeanspruchte Komponenten eingesetzt [160]. Diese Eigenschaft ermöglicht die Nutzung des Einsatzstahls für Anwendungen in der Reibungsreduktion mittels texturierter Oberflächen. Durch die Nutzung dieses Werkstoffs wird vornehmlich dem Bestreben nach effizienten Systemlösungen im Maschinen- und Automobilbau Rechnung getragen. Oberflächentexturierte Bauteile bieten daneben auch für Anwendungen in der Medizintechnik [30] und der Elektrotechnik [29] großes Potenzial. Folglich wird die Übertragbarkeit der für den Referenzwerkstoff ermittelten Erkenntnisse auf in diesen Branchen genutzte Materialien überprüft. Die Werkstoffklasse korrosionsbeständiger Edelstähle für die Medizintechnik wird anhand des austenitischen 1.4301

untersucht. Dieser zeichnet sich besonders durch ein großes Temperaturspektrum in der Anwendung sowie eine hervorragende Schweißbarkeit aus [161]. Die Eignung von Kupfer-Zink Legierungen zur Fertigung texturierter Produkte für die Elektrotechnik wird darüber hinaus mithilfe des kaltumformbaren 2.0321 überprüft.

Tabelle 2: *Legierungselemente in maximalen Gewichtsprozent für 1.7131 [162], 1.4301 [161] und 2.0321 [163]*

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Cu	Zn
1.7131	0,19	0,4	1,3	0,025	0,035	1,1	-	-	-	-
1.4301	0,07	1,0	2,0	0,045	0,015	19,5	10,5	0,11	-	-
2.0321	-	-	-	-	-	-	0,3	-	64,0	Rest

Eine realitätsnahe Abbildung des Werkstoffverhaltens in numerischen Untersuchungen verlangt die präzise Beschreibung der mechanischen Eigenschaften [164]. Die Grundlagen der Werkstoffplastifizierung werden mit der Fließkurve beschrieben, die das Fließverhalten anhand der Fließspannung k_f und des Umformgrads ϕ darlegt [164]. Die Beschränkung des klassischen einachsigen Zugversuchs bezüglich der erzielbaren Umformgrade motiviert die Verwendung des Schichtstauchversuchs zur Ermittlung des Fließverhaltens [165]. Durch die höheren errichteten Umformgrade ist eine Fehlerreduktion in der anschließenden Extrapolation der experimentellen Daten möglich. Da im untersuchten Umformprozess speziell in der Prägezone Druckbelastungen dominieren, ist die Werkstoffcharakterisierung im Schichtstauchversuch, welcher eine einachsige Druckprüfung darstellt [166], gut geeignet. In Anlehnung an den konventionellen Zylinderstauchversuch [167], wird der Versuchsaufbau für Blechwerkstoffe modifiziert. Die Versuchsprobe ist ein aus fünf übereinander gestapelten Blechenden bestehender Zylinder. Es wird berücksichtigt, dass die Orientierungen der Ronden hinsichtlich der Walzrichtung des Werkstoffs übereinstimmend sind. Über zwei parallele Stauchbahnen wird die axiale Umformkraft in den Probekörper eingeleitet. Dies erfolgt auf der Universalprüfmaschine FS-300 von Walter+bai bei einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min. Das optische Dehnungsmesssystem ARAMIS der GOM GmbH ist zudem mit der Prüfmaschine gekoppelt, um die Probendehnung zu erfassen. Anschließend werden die Daten mit den mittels Kraftmessdose aufgezeichneten Kraftwerten synchronisiert. Alle drei Werkstoffe werden experimentell bis zu einem Umformgrad von $\phi = 0,4$ geprüft und anschließend mit dem mathematischen Ansatz nach HOCKETT-SHERBY [168] bis $\phi = 3,0$ extrapoliert. Bild 4

zeigt die auf diese Weise ermittelten Fließkurven. Die für den Referenzwerkstoff 1.7131 detektierte Anfangsfließspannung k_{f0} liegt bei 509 MPa. Mit 365 MPa ist die Anfangsfließspannung des Edelstahl 1.4301 um mehr als 28 % geringer. Die Messinglegierung 2.0321 weist eine Anfangsfließspannung von $k_{f0} = 304$ MPa auf.

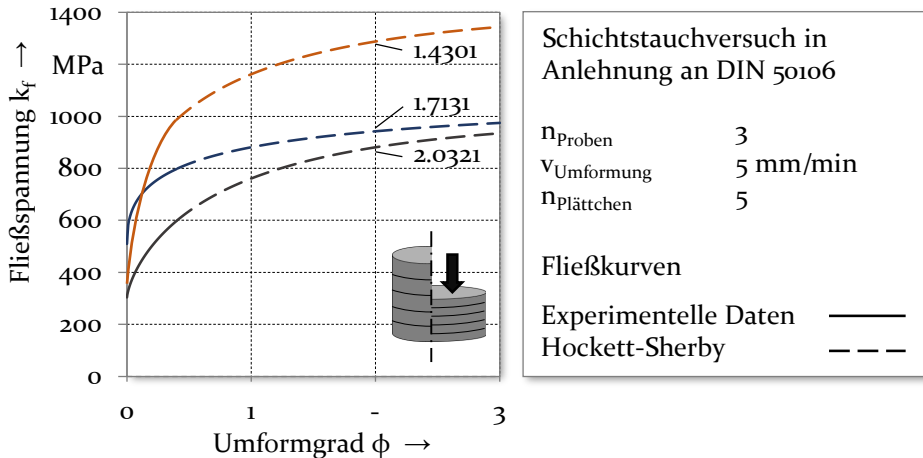


Bild 4: Im Schichtstauchversuch ermittelte Fließkurven der Werkstoffe 1.7131, 1.4301 und 2.0321

Diese Variation sorgt neben den ausgeprägten Unterschieden im Verfestigungsverhalten dafür, dass die Übertragbarkeit der Erkenntnisse anhand dieser Werkstoffe bewertet werden kann. In den vorliegenden Untersuchungen wird zudem das richtungsabhängige Fließverhalten der Werkstoffe berücksichtigt. Dies ermöglicht eine präzisere Vorhersage des Materialflusses während der Umformung [169]. Die walzrichtungsabhängige Anisotropie wird mit dem Materialmodell nach BARLAT [170] implementiert. In uniaxialen Zugversuchen werden die für dieses Modell benötigten Spannungskomponenten σ_0 , σ_{45} und σ_{90} ermittelt, die sich auf die Prüfrichtung relativ zur Walzrichtung zurückführen lassen. Dazu wird die Universalprüfmaschine Z100 der Zwick GmbH & Co. KG genutzt. Die Vorgehensweise des Zugversuchs erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 6892-1:2020-06 [171]. Darüber hinaus wird die äquibiaxiale Zugspannung σ_b aus dem Schichtstauchversuch bestimmt und in das Materialmodell implementiert.

4.1.2 Werkzeugwerkstoffe

Mikroprägwerkzeuge sind während der Umformung hohen zyklischen Kräften ausgesetzt [112]. Als Werkzeugwerkstoff für die Prägestempel wird aus diesem Grund der Schnellarbeitsstahl 1.3343 der Meusburger Georg

GmbH & Co KG ausgewählt. Dieser wird bei circa 1.200°C gehärtet und anschließend dreimal angelassen, was in einer Härte von 60 ± 2 HRC resultiert. Der Werkstoff zeichnet sich, wie Schnellarbeitsstähle im Allgemeinen, durch eine hohe Zähigkeit, Anlassbeständigkeit und Verschleißfestigkeit aus [164]. Daraus ergibt sich die spezielle Eignung für Erodierblöcke und Kaltumformwerkzeuge [172]. Die Qualifizierung des weiter verbreiteten Schnellarbeitsstahl 1.3343 als Werkzeugwerkstoff für Mikroprägeverfahren wurde in [173] untersucht und bestätigt. Der Tiefziehstempel und die Matrize werden aus dem Pulvermetallurgischen Schnellarbeitsstahl 1.3244 der voestalpine BÖHLER Edelstahl GmbH & Co. KG gefertigt. Dieser zeichnet sich neben den klassischen Eigenschaften der Schnellarbeitsstähle besonders durch eine gute Zähigkeit sowie eine hohe Schleifbarkeit aus [174]. Die Härtung des Werkstoffs erfolgt auf 62 ± 2 HRC. Tabelle 3 zeigt die Legierungselemente der beiden Werkzeugwerkstoffe in maximalen Gewichtsprozent.

Tabelle 3: Legierungselemente in maximalen Gewichtsprozent für 1.3343 und 1.3244

	C	Cr	Mo	V	W	Co	Si	Mn
1.3343	0,9	4,0	5,0	1,9	6,2	-	0,3	0,3
1.3244	1,29	4,2	5,0	3,0	6,3	8,4	-	-

4.1.3 Schmierstoff

Schmierstoffe werden in der Umformtechnik eingesetzt, um eine ausgeprägte Trennwirkung zwischen Werkzeug und Halbzeug sowie eine verminderte Reibung zu erreichen. Schmierstoff wird auf die Oberfläche des Werkstücks appliziert. Für alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Umformversuche wird das Hochleistungsumformöl CLF-65 E der Raziol Zibulla & Sohn GmbH in einer Menge von 10 ± 1 g/m² eingesetzt. Das Umformöl ist für den Einsatz in Zieh- und Prägevorgängen von Stahl geeignet [175]. Es besteht zu großen Teilen aus Mineralöl, EP-Additiven, Ester und Korrosionsinhibitoren und besitzt bei 40 °C eine kinematische Viskosität von 65 mm²/s [176]. Die Zusammensetzung des Schmierstoffs ermöglicht eine hohe Druckaufnahmefähigkeit [175], die für den Referenzumformvorgang speziell in der Prägezone benötigt wird. Weitere Charakteristika sind ein guter Verschleißschutz und die Mischbarkeit mit anderen Produkten [175]. In [177] wurde die grundlegende Eignung des Schmierstoffs für die Fertigung texturierter Bauteile im Mikroprägen nachgewiesen. Anhaftungen des Schmierstoffs auf der Bauteiloberfläche und

den Vertiefungen werden nach der Umformung mit dem Reinigungsmittel Clean 5340/1 der ZWEZ-Chemie GmbH entfernt. Das speziell für Reinigungs- und Entfettungsaufgaben für Stahlprodukte verhindert in der Anwendung mit einem Ultraschallbad die Verfälschung von Messergebnissen durch Schmierstoffrückstände in den Texturen.

4.2 Mikrostrukturierung

Zur Feinbearbeitung der Werkzeugoberflächen ist eine Maschine mit hoher Präzision erforderlich. Eine flexible Lösung für die Fertigung von mikroskopisch kleinen Texturmustern sind in diesem Kontext Mikroerodiermaschinen. Diese arbeiten nach dem Prinzip des Funkenerodierens, bei welchem eine impulsförmige elektrische Hochfrequenzentladung von einer Elektrode in das Werkstück eingeleitet wird [178]. Kleine Mengen von Werkstoffpartikeln werden dadurch aus dem Werkstück herausgelöst [178]. Während der Entladung wird die im Eingriff befindliche Elektrode mit einer dielektrischen Flüssigkeit umspült. Deren Aufgaben sind die Steuerung der Entladungspulsation, die Absorption von Wärme sowie der Abtransport von gelösten Partikeln [179]. Die Strukturierung der Werkzeuge für die Umformversuche wird auf der Bahnerodieranlage SX-200-HBM von Sarix SA durchgeführt. Der Aufbau der Maschine sowie grundlegende Technologieparameter sind in Bild 5 aufgezeigt.

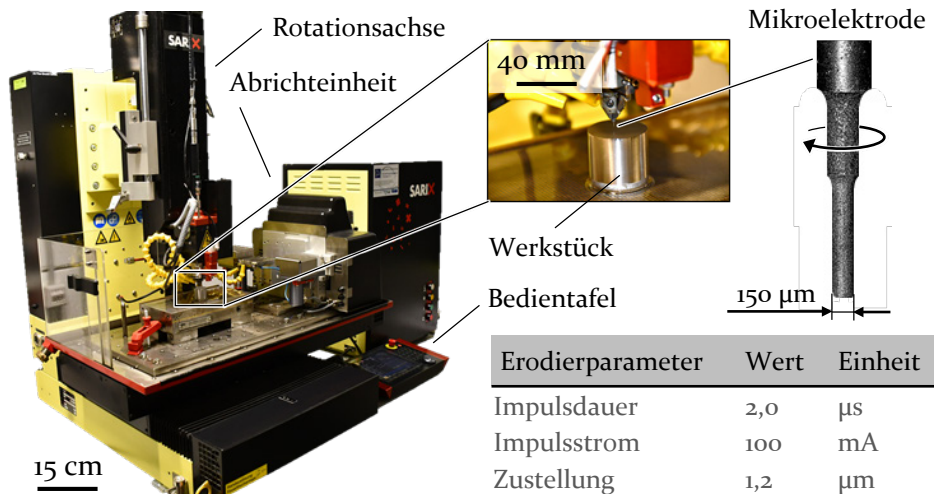


Bild 5: Aufbau und Technologieparameter der Mikroerodiermaschine SX-200-HBM

Die Mikroerodieranlage ermöglicht eine dreidimensionale Werkstückbearbeitung bei gleichzeitig hoher Präzision [180]. Mit bis zu 60.000 Umdrehungen der Elektrode pro Minute kann die Bearbeitungszeit zudem in vertretbarem Rahmen gehalten werden [180]. Da der Elektrodenverschleiß eine zentrale Herausforderung des Mikroerodierens darstellt [178], verfügt die verwendete Maschine über ein automatisches System zur Verschleißkompensation [180]. Darüber hinaus ist im Rahmen der Arbeit die Abrichteinheit von entscheidender Bedeutung. Stabelektroden können durch den Abrichtvorgang in die gewünschte rotationssymmetrische Form gebracht werden. Als Dielektrikum wird eine Emulsion aus Öl und Wasser eingesetzt.

4.3 Umformmaschinen

Für die Umformung der Blechronden zu texturierten, dünnwandigen Bauteilen wird eine den auftretenden Umformkräften entsprechende Maschine zur Verfügung gestellt. Es wird eine hydraulische Umformpresse TZP 400/3 der Lasco Umformtechnik GmbH genutzt, die eine maximale Nennkraft von 4000 kN aufbringt. Eingebundene Kraft- und Wegmesssensoren charakterisieren neben der Kraftbindung und dreifachen Wirkmöglichkeiten die Presse [181]. Im Rahmen der Untersuchungen wird die minimale Stoßelgeschwindigkeit von 5 mm/s angewendet.

Darüber hinaus wird eine weitere Umformmaschine für Verschleißanalysen der texturierten Werkzeuge benötigt. Die dazu benötigten hohen Bauteilstückzahlen motivieren die Nutzung einer Hochleistungsstanzpresse, die über eine automatisierte Materialzuführung vom Coil verfügt. Aus diesem Grund kommt für die Verschleißuntersuchungen die Schnellläuferpresse BSTA 50-95 der Bruderer AG zum Einsatz. Die maximal erreichbare Umformkraft liegt bei 500 kN, während bis zu 1120 Hube pro Minute durchgeführt werden können.

4.4 Methoden zur Charakterisierung mikrotexturierter Bauteile

Die umgeformten Bauteile sowie die texturierten Werkzeuge sollen anhand von geometrischen Kenngrößen, Höhenprofilen und Verschleißerscheinungen untersucht werden. Vor diesem Hintergrund werden verschiedene metallographische Methoden und die Konfokalmikroskopie eingesetzt.

Konfokalmikroskopie

In der Erfassung von Mikrotexturgeometrien geraten taktile Verfahren, wie sie bei Koordinatenmessgeräten genutzt werden, an ihre Grenzen. Limitiert durch den Durchmesser der Messkugeln, der selbst bei auf Mikrobauteile spezialisierten Anlagen noch bei 0,3 mm liegt [182], ist dieser Ansatz nicht geeignet, um in einem Array angeordnete Mikrotexturen zu messen. Zielführend ist im Gegensatz dazu die Konfokalmikroskopie, da erhabene Texturen unabhängig von deren Abstand zwischen einander und vertiefte Texturen ohne Begrenzung der Abmessungen charakterisiert werden können. Die texturierten Komponenten werden im Gegensatz zu taktilen Methoden flächig und berührungslos gescannt [183]. Zu diesem Zweck wird das Konfokalmikroskop VK-X 200 der Keyence DEUTSCHLAND GmbH genutzt. Das Messergebnis wird durch das Zusammensetzen einer Vielzahl an Fokusebenen mit einem Schrittweitenabstand von 0,5 – 1,0 µm erzielt. Um eine hohe Auflösung der gemessenen Topographie sicherzustellen, werden die Messungen mit einem 50-fach vergrößernden Objektiv ausgeführt. In der Auswertesoftware VK-Analyzer der Keyence DEUTSCHLAND GmbH werden die Rohdaten analysiert und durch das Einbringen virtueller Schnitte zu Profilverläufen der Texturgeometrien verarbeitet. Daneben werden zur Beurteilung der Genauigkeit des Mikroprägens und der Untersuchung des Verschleißverhaltens Höhenmessungen der Texturoberfläche benötigt. Wie in Bild 6 dargestellt, erfolgt diese Analyse mittels Definition der beiden Messbereiche von Textur und Boden.

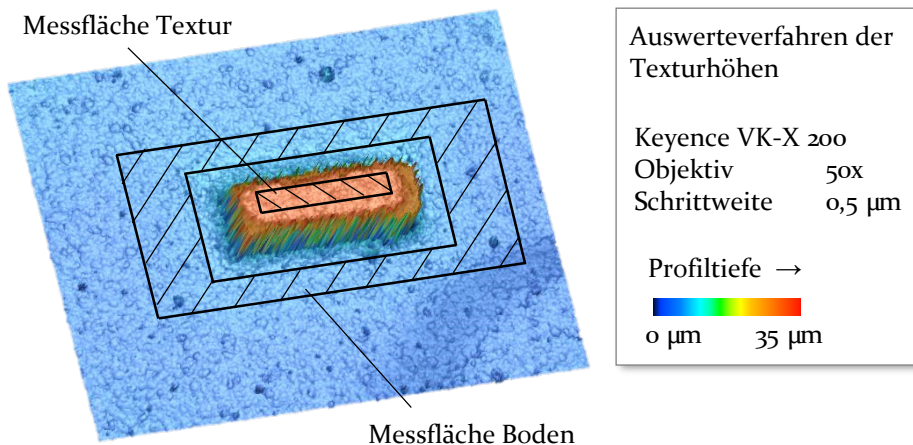


Bild 6: Auswertung der Texturhöhen mit Hilfe einer Referenzfläche im Boden

Dieses Vorgehen ist nötig, da im Messverfahren keine absoluten Höhenwerte, sondern ausschließlich relative Werte angegeben werden können.

Die Höhe der Textur ergibt sich aus der Differenz zwischen der Messfläche der Textur und der Messfläche des Bodens. Mit dem Ziel, Randeffekte zu eliminieren, wird die Größe der Texturmessflächen mit 70 % der Sollfläche der Texturoberseite definiert. Ein Abstand von 15 µm zur Textur ist für die Platzierung der Messfläche des Bodens zu berücksichtigen. Ein Bereich, welcher der fünffachen Sollfläche der Texturoberseite entspricht, wird für den Bodenbereich angewendet, um eine ausreichend große Messfläche zur Referenzierung der Texturhöhe zu erreichen.

Metallographie

Verschiedene Verfahren der Metallographie werden für die Untersuchung der Verschleißmechanismen bei der Produktion großer Stückzahlen genutzt. Qualitative Aussagen zum Verschleißverhalten werden durch Aufnahmen der werkzeugseitigen Texturen mittels eines Rasterelektronenmikroskops (REM) ermöglicht. Dazu steht das REM Modell Merlin Gemini II der Carl Zeiss AG zur Verfügung. Da der Werkstoff vakuumstabil ist und eine gute elektrische Leitfähigkeit besitzt, sind keine spezifischen Vorbereitungen für die Analyse an einem REM notwendig. Für die Beurteilung der verschleißmindernden Maßnahmen werden darüber hinaus Querschliffe der texturierten Stempel angefertigt. Das Kalteinbetten der Proben mit anschließendem Nassschleifen und Polieren ermöglicht die Analyse der oberflächennahen Schichten unter dem Auflichtmikroskop Leitz Aristomet der Leica Microsystems GmbH. Um die Gefügestruktur sichtbar zu machen wird für den Werkstoff 1.3343 eine 3 % Nitral Ätzung durchgeführt.

4.5 Methoden zur numerischen Prozessabbildung

Zur numerischen Prozessabbildung hat sich im Kontext der Umformtechnik die Finite-Elemente-Methode (FEM) etabliert [184]. Die Nutzung der FEM ist in verschiedenen Bestrebungen von Industrie und Forschung begründet. Zum einen sollen neue Produkte in kürzerer Zeit entwickelt und bestehende Produkte hinsichtlich Kosten und Qualität verbessert werden [184]. Zum anderen ermöglicht die numerische Prozessabbildung Einblick in während der Umformung auftretende Effekte. Folglich soll die Nutzung der FEM das Prozessverständnis erhöhen und mögliche Erfahrungsrückstände ausgleichen [184]. In der vorliegenden Arbeit wird die Simulationssoftware Simufact.Forming 2021.1 der simufact engineering GmbH genutzt. Die Software bietet maßgeschneiderte Lösungen für kombinierte Prozesse mit Anteilen aus der Blechumformung und der Massivumformung [185] und eignet sich daher besonders für das zu untersuchenden Verfahren. Der Einsatz der FEM erfolgt vorrangig für die numerische

Analyse verschiedener Texturvarianten, die zur Erweiterung des Prozessverständnisses beiträgt. Im Hinblick auf die Nutzung größeninvarianter Materialmodelle zur Abbildung des kombinierten Prozesses aus Makro- und Mikroumformung, ist eine Validierung auf makroskopischer Basis von besonderer Bedeutung. Alternative Ansätze zur Berücksichtigung der Größeneffekte, wie zum Beispiel das mesoskopische Werkstoffmodell von Geißdörfer [186], sind bislang aufgrund der fehlenden Standardisierung der Materialcharakterisierung und Modellintegration bislang nicht geeignet. Während die Bauteilgeometrie mit Hexaederelementen diskretisiert und idealisiert wird, geschieht dies für die Werkzeuggeometrien durch Tetraederelemente. Hintergrund sind die Vorteile von Hexaederelementen hinsichtlich der Berechnungszeit, die in der Massivumformung für Bauteilgeometrien genutzt werden [187]. Für komplizierte Werkzeuggeometrien wird dagegen empfohlen, auf Tetraederelemente zurück zu greifen [187]. Mechanische Eigenschaften der Werkstückwerkstoffe werden durch die Implementierung von Materialkarten mit den experimentell ermittelten Fließkurven und Anisotropiemodellen abgebildet. Da die zu erwartenden Kontaktdrücke besonders im Abstreckgleitziehen und Mikroprägen hoch sind, wird das Reibfaktormodell zur Modellierung des tribologischen Systems genutzt. Für die Rechnung der numerischen Modelle wird ein Hochleistungsrechner HPC von NEC zur Verfügung gestellt. Trotz Aufteilung der Simulationen auf bis zu sechs Prozesskerne wird eine Rechenzeit von 72 Stunden nicht unterschritten. Geschuldet ist dies der zwingend notwendigen hohen Netzverfeinerung des Mikroprägebereichs, wodurch die Elementzahl exponentiell ansteigt.

5 Prozessauslegung und -analyse

Dieses Kapitel dient der Darlegung der durchgeführten Prozessauslegung sowie der Analyse prozess- und bauteilseitiger Ergebnisparameter. Die Zielsetzung und die zu deren Erreichung angewandte Vorgehensweise ist in Bild 7 beschrieben. Zunächst wird ein anwendungsnaher Einsatzfall für mikrotexturierte Bauteile identifiziert und darauf aufbauend eine Demonstratorgeometrie erarbeitet. In diesen Auslegungsprozess fließen neben allgemeinen Anforderungen an den Grundkörper auch spezifische Anforderungen an die Mikrotextur der Oberfläche ein. Anhand des Demonstrators wird ein einstufiger Herstellungsprozess in Form einer Kombination verschiedener Umformverfahren ausgelegt. Experimentelle und numerische Untersuchungen dieser Prozesskombination erlauben mittels Analyse der Bauteil- und Prozessfehler die Ableitung der Formgebungsgrenzen.

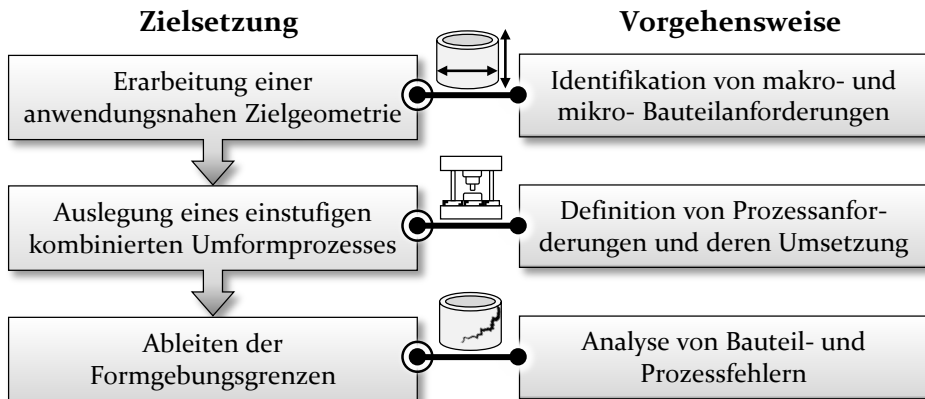


Bild 7: Zielsetzung und Vorgehensweise zur Prozessauslegung und -analyse eines kombinierten Umformprozesses zur einstufigen Mikrotexturierung einsatzfertiger Bauteile

5.1 Bauteil- und Prozessauslegung

Zur Auslegung der Bauteilgeometrie und des entsprechenden Prozesses werden bauteil- und prozessseitige Anforderungen identifiziert. Tabelle 4 zeigt wesentliche Aspekte, die bei der Auslegung Berücksichtigung finden. Für die Bauteilgestaltung bedarf es zunächst der Bestimmung eines repräsentativen Anwendungsfalls für mikrotexturierte Komponenten. Aufgrund der weiten Verbreitung im Umfeld tribologischer Beeinflussung wird die Demonstratorgeometrie für Anwendungen zur Reibungsreduktion ausge-

legt. Ein exemplarisches Einsatzgebiet sind Tassenstößel aus dem Ventiltrieb, die im Inneren von Verbrennungsmotoren in Wälz- und Gleitkontakt mit der Nockenwelle stehen [188].

Tabelle 4: Bauteil- und prozessseitige Anforderungen zur Berücksichtigung in der Prozessauslegung

Bauteilseitige Anforderungen	Prozessseitige Anforderungen
Nutzung von Werkstückwerkstoffen mit industrieller Relevanz	Bauteilherstellung mittels einstufiger Umformung
Erreichen der im Anwendungsfall geforderten mechanischen Eigenschaften	Auslegung einer Prozesskette mit hoher Übertragbarkeit auf industrielle Fertigungsverfahren
Erzeugen eines auf den Anwendungsfall abgestimmten Texturmusters	Sicherstellen der Herstellbarkeit bei Verwendung verschiedener Werkstückwerkstoffe
Homogene Texturausformung auf der gesamten Oberfläche	Geringer radialer Materialfluss während des Mikroprägevorgangs
Erzielen einer hohen Form- und Maßhaltigkeit	Bauteilentformung ohne Verzerrung des Texturmusters

Mit dem Ziel, die Übertragbarkeit der Untersuchungen sicherzustellen, werden Halbzeuge verschiedener Werkstoffklassen geprüft. In der Analyse des Referenzprozesses findet mit dem Stahlwerkstoff 1.7131 ein in der Automobilindustrie weit verbreiteter Einsatzstahl [189] Verwendung. Die Einsatzgebiete reichen von Ventilkörpern über Zahnräder bis hin zu Antriebswellen [189]. In Abschnitt 6.2 wird die Übertragbarkeit auf Messinglegierungen und Edelstahlwerkstoffe geprüft und diskutiert. So wird der Bezug zu mikrotexturierten Bauteilen aus der Elektro- und Medizintechnik hergestellt. Das auf der Oberfläche der Bauteile erzeugte Texturmuster ist individuell auf den späteren Einsatz abzustimmen [20]. In Anlehnung an die in Tabelle 1 dargestellten Elementgeometrien wird das Bauteil mit quaderförmigen Texturen ausgestattet. Besondere Anforderungen an das Bauteil bestehen hinsichtlich der homogenen Ausformung der Mikrotextur. Bereits geringfügige Geometriefehler der Texturen resultieren in einem veränderten Einsatzverhalten [190]. Um das gesamte reibungsreduzierende Potenzial auszuschöpfen, ist eine präzise und gleichmäßige Ausformung des Texturmusters über die gesamte Oberfläche anzustreben. Zu berücksichtigen ist in diesem Zusammenhang der Einfluss des globalen Material-

flusses während der Umformung auf das lokale Prägeergebnis der Texturen. Da umformtechnische Prozesse auf die präzise Herstellung von häufig einbaufertigen Komponenten in hohen Stückzahlen abzielen [191], ist sowohl für den Grundkörper als auch für das Texturmuster eine gute Form- und Maßhaltigkeit gefordert.

Die Herstellung des texturierten Bauteils wird aufgrund der guten Wirtschaftlichkeit, dank kurzer Fertigungszeiten [6], mittels Umformung durchgeführt. Zudem kann sich die in Umformprozessen erzielte Kaltverfestigung [192] positiv auf die Einseigenschaften der texturierten Oberfläche auswirken. Vor dem Hintergrund der hohen Werkstoffausnutzung [192] bieten Umformverfahren darüber hinaus die Möglichkeit zur nachhaltigen Bauteilfertigung. Sofern es möglich ist, die aus der Literatur bekannten Herausforderungen bezüglich Rückfederung sowie Maß- und Formgenauigkeit zu bewältigen, ist aus zeitlichen Gründen die einstufige Umformung einer mehrstufigen Bearbeitung vorzuziehen [6]. Ein Vorteil ist zum Beispiel, dass auf den Bauteiltransport zwischen den Stufen verzichtet werden kann [6]. Da Konstruktionsbauteile mit Materialstärken von über 2 mm oft rotationssymmetrische napf- oder nabenförmige Geometrien besitzen, sind Tiefziehverfahren weit verbreitet [193]. Die im Tiefziehen hergestellten Hohlkörper können zudem im Abstreckgleitziehen bearbeitet werden, um im Wandbereich eine kleinere Blechdicke als im Bodenbereich zu erzielen [194]. Die Anpassung der Wandstärke eines Bauteils an die Beanspruchung im Einsatz ist eine etablierte Strategie zur Umsetzung von Leichtbauzielen [195]. In Folge des Abstreckgleitziehens werden die mechanischen Eigenschaften im Wandbereich durch die Kaltverfestigung verbessert und hohe Maßgenauigkeiten sowie Oberflächengüten erzielt [194]. Darüber hinaus ist ein Fließpressen des Napfbodens nötig, um einen kleinen Radius zwischen Wand und Boden zu erzielen, sowie eine hohe Planarität des Napfbodens sicherzustellen. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher eine Prozesskombination, bestehend aus Tiefziehen einer Napfgeometrie, Abstreckgleitziehen des Wandbereichs und Fließpressen des Bodens in Verbindung mit dem Mikroprägen der Oberflächentexturen, analysiert. Um in Mikroprägeverfahren eine inhomogene Texturausformung zu verhindern, sind Prozesse mit geringem radialen Materialfluss anzustreben. Im Vergleich zu bereits untersuchten Prozesskombinationen aus der Massivumformung, bietet die ausgewählte Verfahrensvariante daher großes Potenzial zur Reduktion dieser geometrischen Abweichungen. Anforderungen in der werkzeugseitigen Umsetzung des Verfahrens ergeben sich des Weiteren durch die Nutzung der drei Werkstoffklassen Einsatzstahl, Edelstahl und Messing. Anhand numerischer Untersuchungen

können in der Prozessauslegungsphase Werkzeugspannungen mit verschiedenen Werkstückwerkstoffen ermittelt und gegebenenfalls mittels adäquater Maßnahmen verringert werden [196]. Darüber hinaus ist die Bauteilformung in einer Weise zu gestalten, dass eine Verzerrung des Texturmusters ausgeschlossen wird. Klassischerweise wird der Umformstempel aus diesem Grund mit einer Hinterdrehung ausgestattet, welche das Anhaften des Bauteils am Stempel während des Rückhubs bewirkt [191]. Folglich wird auf einen Auswerfervorgang verzichtet, da das Bauteil nach der Umformung nicht in der Matrize verbleibt und stattdessen aus dieser herausgezogen wird.

Unter Berücksichtigung der diskutierten bauteilseitigen Anforderungen aus Tabelle 4 wird der in Bild 8 dargestellte Grundkörper der Napfgeometrie als Referenzbauteil ausgelegt. Die Definition der geometrischen Maße erfolgt in Anlehnung an industriell eingesetzte Tassenstößel aus dem Ventiltrieb. Nach SERRANO ET AL. [197] sind die Voraussetzung eines kurzfristigen und umfassenden Verzichts auf Verbrennerantriebe wegen Herausforderungen der Alternativtechnologien aktuell nicht gegeben. Daher verlieren Bauteile des Verbrennungsmotors trotz fortschreitender Elektrifizierung der Antriebssysteme nicht an Relevanz für den globalen Waren- und Personentransport [45]. Kurzfristige Potenziale, die Energieeffizienz solcher Antriebe zu steigern, sind daher durch die Verbesserung bestehender System gegeben [197].

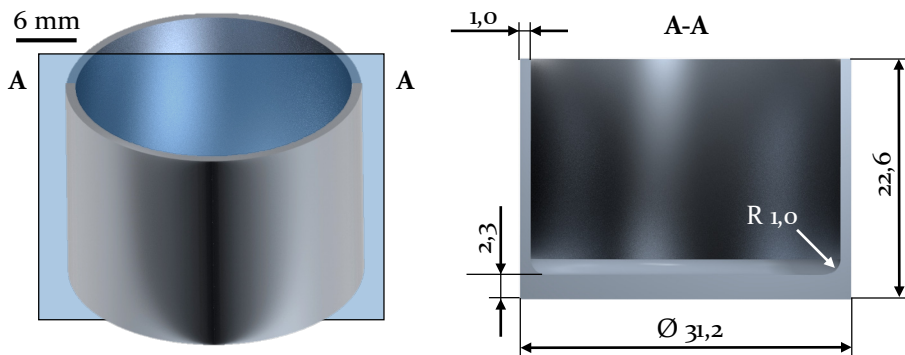
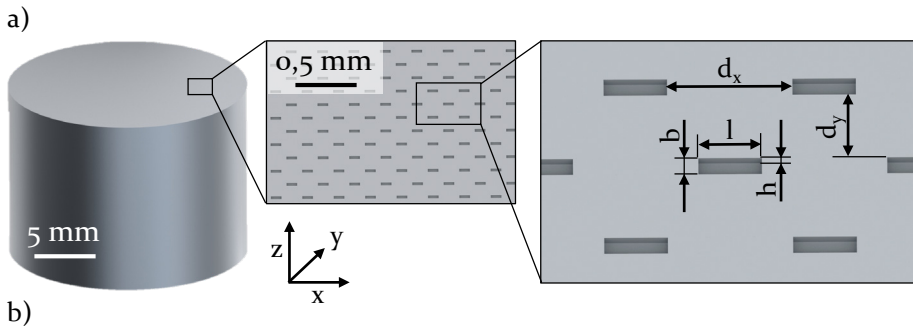


Bild 8: Sollmaße der dünnwandigen Napfgeometrie als Grundkörper

Neben dem Einsatz von funktionalen Oberflächen durch Beschichtungen weisen Mikrot Texturen auf der Bauteiloberfläche ein hohes Potenzial zur Verringerung der Reibungsverluste auf. Das im Rahmen der Arbeit verwendeten Texturmuster ist in Bild 9 a) gezeigt. Das Referenzmuster besteht aus einer Vielzahl einzelner quaderförmiger Vertiefungen, welche auf der

Außenseite des Napfbodens angeordnet sind. Ein vergleichbarer Texturierungsansatz erzielt für den Kontakt von Tassenstößel und Nockenwelle in [198] hohe Reibungsreduktionseffekte. Die Wirkweisen solcher Texturmuster sind auf viele weitere Einsatzgebiete übertragbar. Quader als Mikrotexturgeometrien stellen zum Beispiel in Axiallagern [199] und Gleitringdichtungen [20] verbesserte Reibbedingungen her.



Parameter	Wert	Einheit
Texturlänge l	100	μm
Texturbreite b	30	μm
Texturhöhe h	15	μm
Abstand in x-Richtung d_x	200	μm
Abstand in y-Richtung d_y	266	μm
Flächendeckungsgrad ΔA_{Textur}	5	%

Bild 9: Definition der Geometrieparameter (a) sowie deren Werte für das Referenzbauteil (b)

Meist weisen genutzte Texturen in der Anwendung funktionaler Oberflächen eine Tiefe von weniger als $10 \mu\text{m}$ auf [20]. Als Referenztiefe werden daher $5 \mu\text{m}$ untersucht und in Abschnitt 6.1 auf den Stufen $10 \mu\text{m}$ und $15 \mu\text{m}$ variiert. Für elasto-hydrodynamische Kontakte werden häufig Texturmuster mit niedrigem Flächendeckungsgrad ΔA_{Textur} eingesetzt [20]. Aus diesem Grund werden 5 % der Bauteilbodenfläche mit Vertiefungen texturiert (Bild 9 b). Die Abstände der Vertiefungen resultieren aus der versetzten Anordnung mittels Rhombus Muster, dem die Texturmittelpunkte als Positionierungskriterium zugrunde liegen.

Die Herstellung der beschriebenen makro- und mikroskopischen Geometrie wird durch den in Bild 10 dargestellten Werkzeugaufbau umgesetzt. Dieser ermöglicht die Vereinigung der drei benötigten Prozessschritte in

einem einzelnen Pressenhub. Der Stempel ist in der oberen Werkzeugaufnahme positioniert und überträgt die Pressenkraft auf das Werkstück. Eine Bohrung in der Abziehvorrichtung ermöglicht das Eintauchen des Stempels in selbige. Um eine hohe Positionsgenauigkeit sicher zu stellen, sind die Werkzeugplatten mit Säulenführungen verbunden. Über die untere Werkzeugaufnahme werden die Kräfte aus der armierten Matrize in den Pressentisch eingeleitet. Durch die Hinterdrehung des Stempels haftet das hergestellte Bauteil während des anschließenden Rückhubs nicht in der Matrize. An der Abziehvorrichtung wird die texturierte Tasse vom Stempel abgelöst.

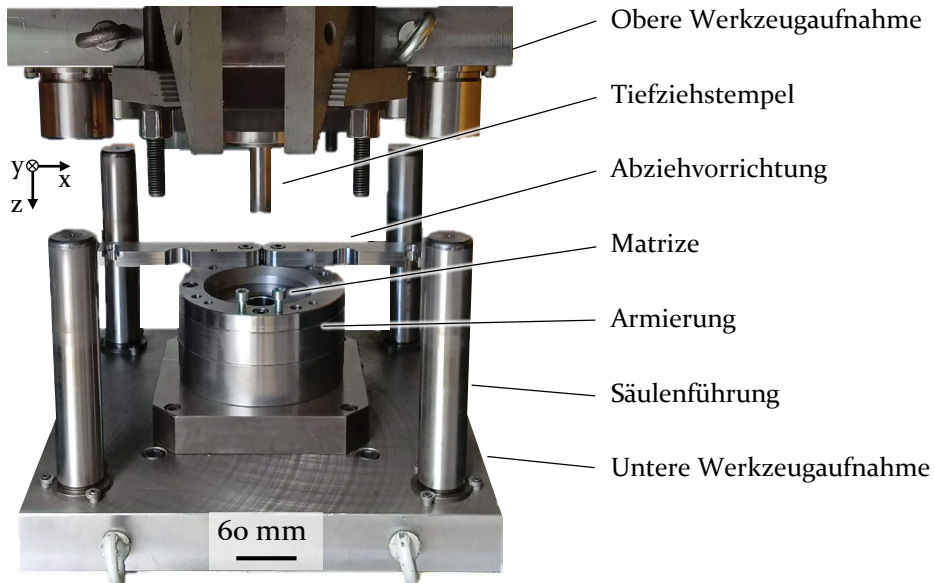


Bild 10: Werkzeugaufbau des kombinierten Umformprozesses

Die einstufige Prozesskinematik besteht aus den drei Schritten Tiefziehen, Abstreckgleitziehen und Mikroprägen (Bild 11). Zu Beginn des Prozesses trifft der schwimmend gelagerte Stempel auf eine mit Raziol CLF-65E beölte Ronde des Einsatzstahls 1.7131. Da bei dem vorliegenden Ziehverhältnis β_0 von 1,5 keine Faltenbildung erster Art zu erwarten ist, kann auf einen Niederhalter verzichtet werden [192]. Dies reduziert die Komplexität des Werkzeugsystems und ermöglicht darüber hinaus die Umformung mittels einfach wirkender Presse. Im weiteren Verlauf des Prozesses erreicht das Werkstück den konisch zulaufenden Teil der Matrize. Das hierdurch induzierte Abstreckgleitziehen ermöglicht eine gleichmäßig reduzierte Wandstärke, während die angestrebte Napfhöhe erreicht wird. Der letzte Pro-

zessschritt ist das Anstauchen des Werkstücks zwischen Stempel und Prägezyylinder. Die Strukturelemente, die sich auf der Oberseite des Prägezyinders befinden, werden dadurch in die äußere Bodenfläche der Tasse eingebracht. Auf dem Werkzeug befindet sich daher die Negativkontur der Soll-Geometrie der Mikrotexturen. In Abhängigkeit des Stempelhubes wird ein Fließpressen des Bodenbereichs und folglich eine Füllung des Tassenradius initiiert. Das geformte Bauteil wird mit dem Stößelrückzug vom Prägezyylinder gelöst und aus der Matrize befördert. Über die Abziehvorrichtung wird die texturierte Tasse vom Stempel entfernt. Mit dieser Vorgehensweise wird der konventionelle Auswerfervorgang über den Prägezyylinder eliminiert. Dadurch kann ein erneuter Kontakt des Bauteils mit den werkzeugseitigen Texturen und mögliche Prägungen weiterer Strukturmustern verhindert werden.

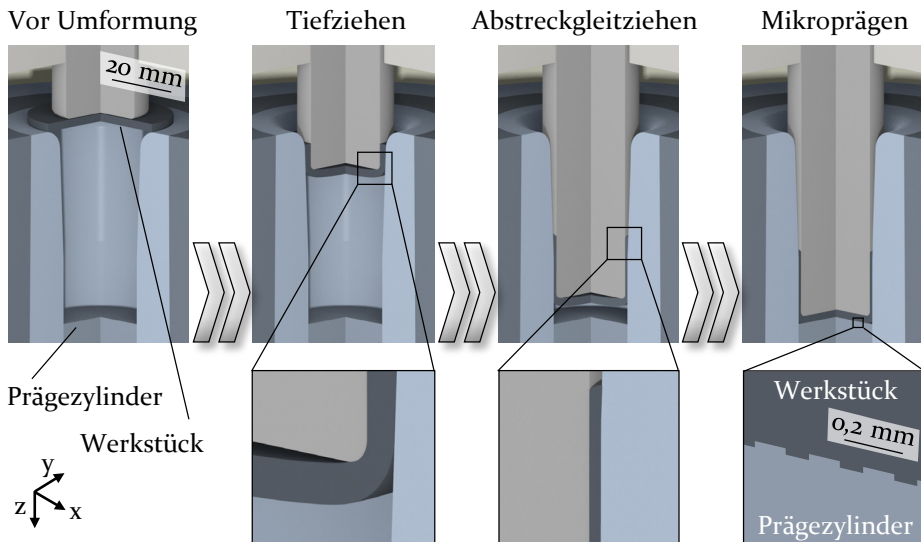


Bild 11: Prozesskinematik der kombinierten Umformung mikrotexturierter Tassen

5.2 Numerische Abbildung

Um die Synergieeffekte experimenteller und numerischer Erkenntnisse nutzen zu können, werden, wie in der Umformtechnik üblich [187], Simulationsmodelle zum Aufbau eines grundlegenden Prozessverständnisses eingesetzt. Durch die Untersuchung ergänzender Ergebnisgrößen, die in experimentellen Ansätzen nicht erfasst werden können, wird das Prozesswissen erweitert. Für die vorliegende Arbeit kommen numerische Modelle zur Identifikation prozess- und werkstückseitiger Herausforderungen zum Einsatz. Anhand der abgeleiteten Ursachen der Prozessgrenzen können

numerisch Maßnahmen für eine Prozessverbesserung entwickelt und evaluiert werden. Da entkoppelte Stofffluss- und Werkzeugbeanspruchungssimulationen eine hohe Rechenstabilität sowie vertretbare Kalkulationszeiten bieten [200], erfolgt die Prozessmodellierung nach diesem Vorgehen.

Numerisches Modell

Das numerische Modell des Referenzprozesses zur Analyse der kombinierten Herstellungsverfahren ist in Bild 12 gezeigt. Modelliert werden die Werkzeugaktivteile Stempel, Matrize und Prägezyylinder sowie das Werkstück als 90° Segment. Um die Rechendauer zu begrenzen ist das Ausnutzen von Prozesssymmetrien eines Werkstücksegments, ohne dabei einen Erkenntnisverlust zu erleiden, ein etablierter Ansatz [196]. Die Berücksichtigung der Anisotropie begründet darüber hinaus die notwendige Modellierung eines 90° Ausschnitts, da andernfalls das richtungsabhängige Materialverhalten nicht vollständig abgebildet wird. Entlang der x-Achse und der y-Achse werden dem zufolge die Symmetrieebenen positioniert.

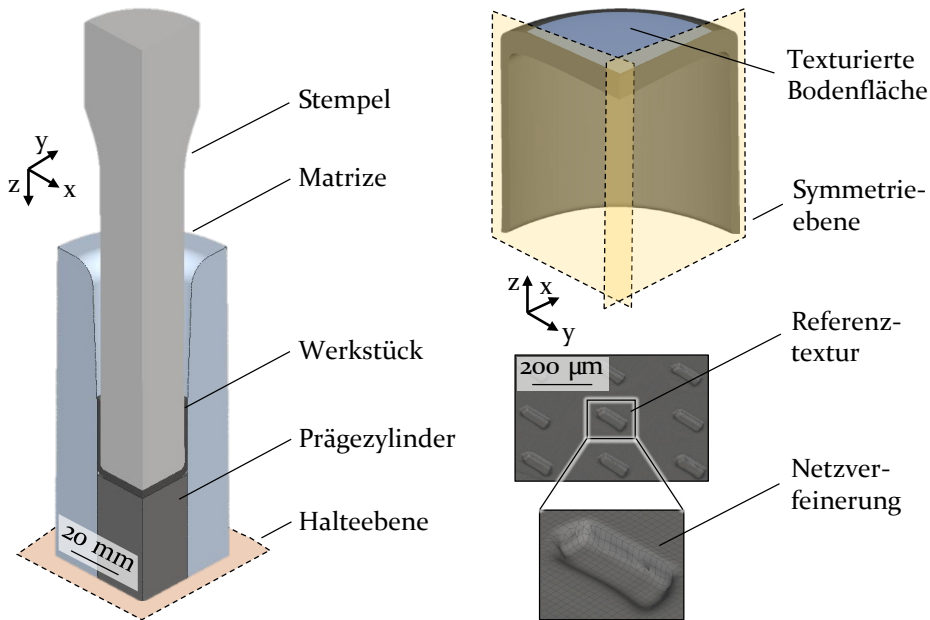


Bild 12: Numerisches Modell des Referenzprozesses

In Untersuchungen über die numerische Abbildung von Mikroprägeprozessen wird die Rechendauer als kritischer Faktor der Modellierung identifiziert [201]. Aus diesem Grund basieren die Modelle auf einer Referenztextur, die in allen Raumrichtungen von dem jeweils angrenzenden Texturelement umschlossen wird. Die in den Auswertungen herangezogene Referenz-

renztextur ist von acht Hilfstexturen umgeben, die eine realitätsnahe Abbildung des lokalen Stoffflusses sicherstellen. Da sich die Abmessungen des Grundkörpers stark von denen der Texturen unterscheiden, ist eine Herausforderung der Modellbildung der Skalenkonflikt [202]. Eine lokale Netzverfeinerung im Bereich der Texturen ist daher notwendig, um dieser Problemstellung zu begegnen [203]. In der texturierten Zone resultiert aus diesem Grund eine obere Grenze der Elementkantenlänge von $2\ \mu\text{m}$. Der Grundkörper wird durch Elemente mit einer maximalen Kantenlänge von $0,2\ \text{mm}$ vernetzt. Um die Rechenzeit zu begrenzen, wird die Simulation in die Umformung des Grundkörpers mittels Tiefziehen und Abstreckgleitziehen sowie die Herstellung der Oberflächenstruktur im Mikroprägevorgang aufgeteilt. Die Trennung erfolgt im letzten Zeitschritt, bevor ein Kontakt zwischen Werkstück und Prägezyylinder auftritt. Während eine Neuvernetzung im Laufe der Fertigung des Grundkörpers durch die Überschreitung kritischer Netzdeformationen ausgelöst wird, erfolgt die Neuvernetzung im Mikroprägen vor jedem einzelnen Zeitschritt. Die Folgen sind eine verbesserte Stabilität und die Erstellung homogener Vernetzungen.

Makro- und mikroskopische Validierung

Die Vorhersagequalität numerischer Modelle ist im Abgleich mit experimentellen Daten zu bewerten [184]. Numerische und experimentelle bauteil- und prozessseitige Zielgrößen werden daher verglichen. Makroskopische Ergebnisse des Grundkörpers finden ebenso Berücksichtigung wie mikroskopische Zielgrößen der Texturen. Die Validierung erfolgt auf Basis des numerischen Referenzmodells und den in Bild 13 gezeigten Bauteilen. Es kommen für alle Untersuchungen der Zielgrößen drei Bauteile des Werkstoffs 1.7131 zum Einsatz.



Bild 13: Durch kombinierte Umformung hergestellte Bauteile mit mikrogeprägten Texturen

Prozessseitig wird der Kraft-Weg Verlauf des numerischen Modells und der experimentellen Versuche in Bild 14 gegenübergestellt. Das Tiefziehen und

das Abstreckgleitziehen werden mit einer vorgegebenen Prozessgeschwindigkeit von 5 mm/s durchgeführt. Die maximale numerisch berechnete Prozesskraft ist mit 60 ± 5 kN für beide Prozessabschnitte vergleichbar hoch. Das numerische Modell überschätzt die Stempelkraft des Tiefziehens um bis zu $6,1 \pm 0,3$ kN. Für die beiden folgenden Prozessschritte resultiert eine gute Übereinstimmung experimenteller und numerischer Werte.

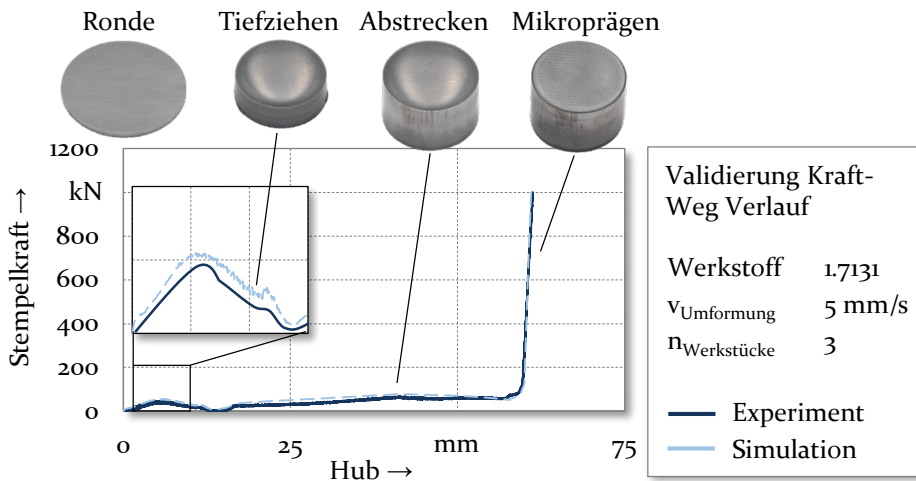


Bild 14: Prozessseitige Simulationsvalidierung durch die Stempelkraft

Die benötigte Stempelkraft fällt zwischen den beiden Prozessschritten auf 12 ± 1 kN ab. Dies ist auf den Umstand zurückzuführen, dass der Grundkörper bereits vollständig tiefgezogen ist und vor dem Erreichen des konischen Matrizeinlaufs keine weitere plastische Verformung erfährt. Das Kraftmaximum wird beim Tiefziehen nur kurzzeitig erreicht, während es beim Abstreckgleitziehen nach Erreichen des Maximums konstant hoch bleibt. In Übereinstimmung mit den Erkenntnissen aus der Literatur [6] bildet der Kraftverlauf beim Tiefziehen nahezu eine umgekehrte Parabel. Aufgrund des Materialaufbaus an der Abstreckkante im nachfolgenden Prozessschritt steigt die Kraft kontinuierlich an. Bis zu einem Hub von 56 mm wird die Wanddicke reduziert, wobei aufgrund der großen Kontaktfläche zwischen Werkstück und Matrize hohe Reibungskräfte überwunden werden müssen. Im Prägevorgang steigt die Stempelkraft durch das Stauchen des Tassenbodens nahezu linear an, bis die vordefinierte maximale Prägekraft von 1000 kN erreicht ist. Der elliptische Boden des Werkstücks wird nach dem Abstreckvorgang gegen die texturierte Oberfläche des Gegenhalters gedrückt. Anschließend wird der Bodenbereich leicht gestaucht und zusätzlich der Radiusbereich des Bechers ausgefüllt. Der steile Anstieg der Kraftkurve ist ein typisches Merkmal von Stauchprozessen [6].

Bauteilseitig erfolgt die makroskopische Modellvalidierung auf Basis des Profilverlaufs des Grundkörpers im Querschnitt. Die über drei Werkstücke gemittelten experimentellen Geometriedaten werden in Bild 15 dem numerisch ermittelten Profil gegenübergestellt.

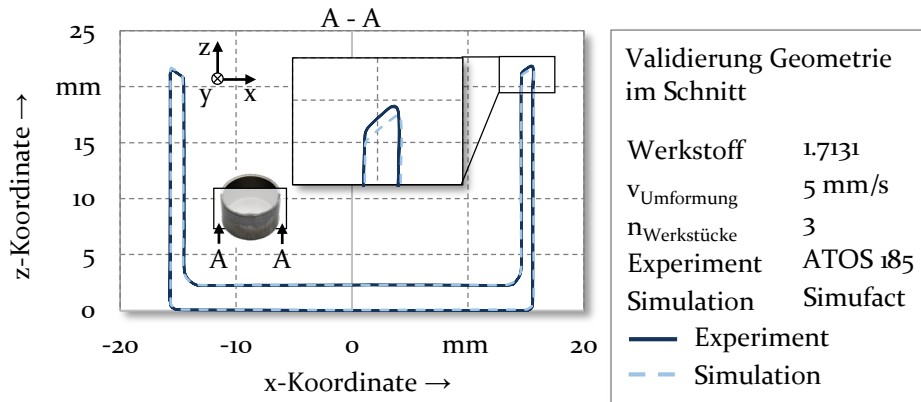


Bild 15: Bauteilseitige Simulationsvalidierung durch den Profilverlauf im Schnitt

Das numerische Modell weist hinsichtlich der Grundkörpergeometrie eine gute Vorhersagepräzision auf. Die größte Abweichung wird mit 0,10 mm im Bereich der Zargenspitzen detektiert. Bei einer maximalen Zargenhöhe von $21,90 \pm 0,05$ mm entspricht dies einer Abweichung von maximal 0,7 %. Weitere Kenngrößen wie die Bodendicken und die Wandstärke stimmen in numerischen und experimentellen Ergebnissen bei vernachlässigbar kleinen Abweichungen von maximal 0,3 % überein. Zudem wird der Innenradius und die Füllung des Außenradius durch das Anstauchen präzise prognostiziert.

Zusätzlich zu den makroskopischen Größen erfolgt die Simulationsvalidierung im Hinblick auf die mikroskopische Strukturausformung über die Texturgeometrien. Im folgenden Abschnitt werden daher drei neuralgische Texturpositionen in Bezug auf die Geometrie analysiert, indem experimentelle Werte mit den numerischen Berechnungen verglichen werden (Bild 16). Die gemessenen Texturen befinden sich im Bodenzentrum (1), auf halbem Radius (2) und kurz vor dem Eckbereich (3). Für die Messung der experimentellen Bauteiltexturen wird das Laser-Scanning-Mikroskop Keyence VK-X200 verwendet. Der numerische Profilverlauf zeigt für alle drei Positionen eine gute Übereinstimmung mit der experimentellen Profiltiefe. Sowohl die Texturtiefe als auch die Form können durch das Simulationsmodell sehr gut prognostiziert werden. Unterschiede in der materialflussabhängigen Texturausformung werden in Abschnitt 5.3 analysiert. Aus den Validierungsergebnissen der Texturprofilverläufe kann dennoch

bereits abgeleitet werden, dass der lokale oberflächennahe Stofffluss durch das numerische Modell realitätsnah abgebildet wird. Geringfügige Abweichungen, wie sie zum Beispiel am rechten Profilrand in Texturposition 2 auftreten, sind durch werkzeugseitige Fertigungsungenauigkeiten zu erklären.

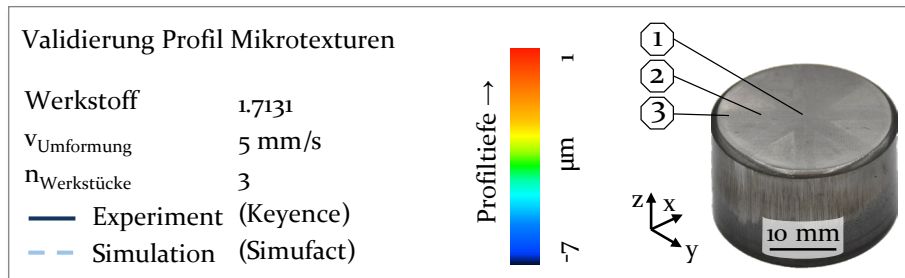
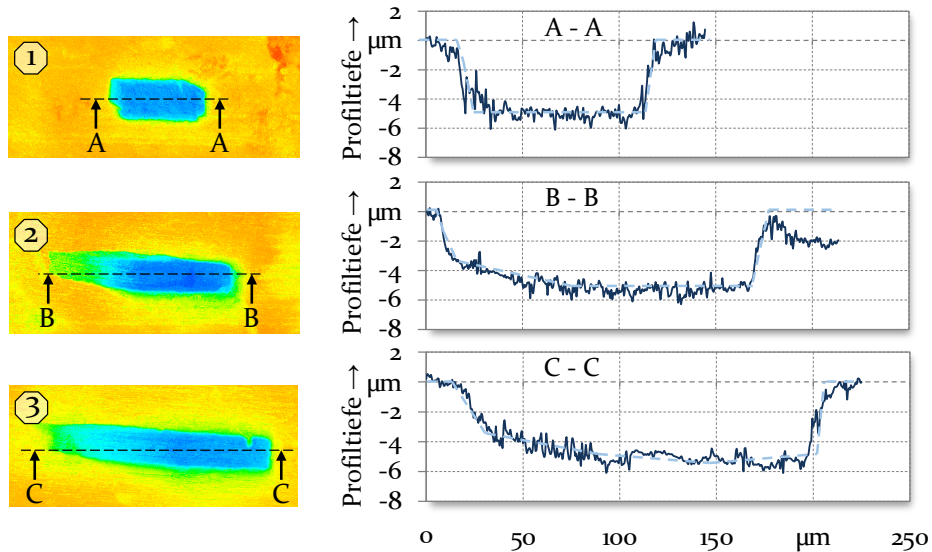


Bild 16: Bauteilseitige Simulationsvalidierung durch den Profilverlauf der Mikrostrukturen

Auf Basis des abschließenden Blechdickenvergleichs können Maß- und Formunterschiede zwischen numerischen und experimentellen Ergebnissen analysiert werden. In der Software GOM Inspect wird das Netz der Simulation mit einer 3D-Messung der in Umformversuchen hergestellten Bauteilen abgeglichen. Bild 17 zeigt den Flächenvergleich, wobei der Fokus der Analyse auf der Boden- und Zargenstärke liegt.

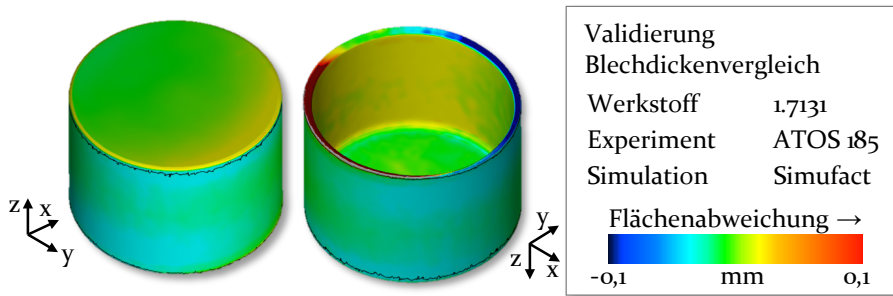


Bild 17: Bauteilseitige Simulationsvalidierung durch den Blechdickenvergleich

Im Flächenvergleich wird die gute Übereinstimmung der beiden Untersuchungsansätze bestätigt. Maximale Abweichungen von $\pm 0,1$ mm werden, in Übereinstimmung mit Bild 15, in den Zargenspitzen detektiert. Zu erklären sind die Unterschiede mit der Zentrierung des Stempels zur Matrize. Ein koaxialer Versatz zwischen den beiden Aktivteilen bewirkt eine Änderung des Materialvolumens auf den gegenüberliegenden Zargen des tiefgezogenen Halbzeugs. Im anschließenden Abstreckgleitziehen resultiert dieser Umstand aufgrund der Wanddickenreduktion in unterschiedlichen Zargenhöhen. Die Materialeigenschaften nach der Umformung werden anhand der Umformgradverteilung charakterisiert. Deren Gegenüberstellung mit der experimentellen Mikrohärteverteilung ist nach [187] zur qualitativen Simulationsvalidierung geeignet. Bild 18 zeigt den Abgleich der beiden Zielgrößen.

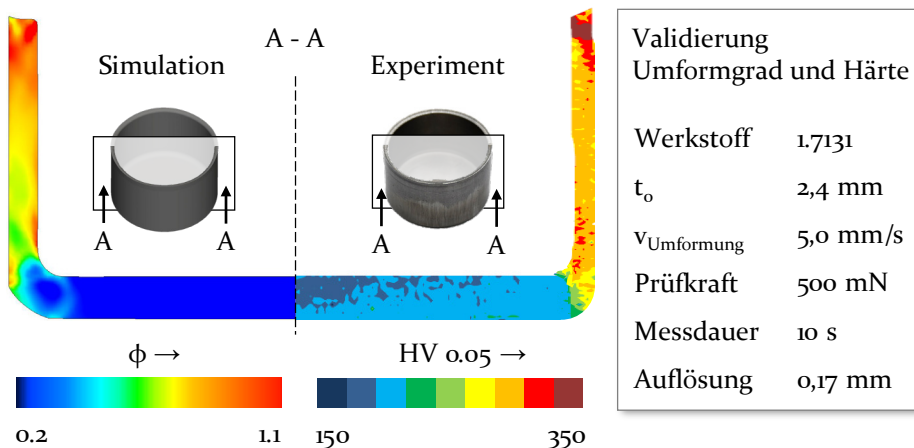


Bild 18: Bauteilseitige Simulationsvalidierung durch die Umformgrad- und Mikrohärteverteilung

Der Bereich des größten Umformgrads und der höchsten Mikrohärtigkeit wird in der Zargenspitze lokalisiert. Dies lässt sich durch die sukzessiv zunehmende Materialanhäufung an der Abstrechkante bei abnehmender Wandstärke und Wandverlängerung erklären. Das Material wird zunächst im verjüngten Bereich des Ziehspaltes aufgestaut, bis die Zarge durch den weiteren Stempelhub kontinuierlich ausgedünnt wird, was einen Materialfluss in den zylindrischen Ziehspalt bewirkt. Da durch den Abstreckvorgang nur ein geringfügiger Materialfluss aus dem Napfboden induziert wird, ist nach diesem Prozessschritt eine geringe Kaltverfestigung zu erwarten. Der folgende Stauchvorgang erklärt den Anstieg um $93 \pm 14 \text{ HV } 0,05$ im Bodenbereich im Vergleich zur Ausgangshärte von $115 \pm 6 \text{ HV } 0,05$. Dennoch weist das Material in diesem Bereich die geringsten Umformgrade und Kaltverfestigungen auf.

5.3 Charakterisierung der Bauteil- und Prozesseigenschaften

Die Fertigungsgenauigkeit in der Blechumformung ist von vier grundlegenden Einflussgrößen abhängig [192]. Diese sind die Umformmaschine, die Werkzeuggeometrie, das Werkstoffverhalten sowie die Reibungsverhältnisse [192]. Anhand der Formabweichungen, der Oberflächenausbildung und der Bauteileigenschaften kann die Fertigungsgenauigkeit des Prozesses evaluiert werden [192]. Da die Bauteilmaßhaltigkeit im Besonderen das Einsatzverhalten der Komponenten bestimmt [204], werden zunächst die Fertigungstoleranzen des Grundkörpers analysiert. Die Untersuchung der mikrogeprägten Texturen bildet daneben den Schwerpunkt der Charakterisierung der Bauteileigenschaften. Neben der Identifikation geometrischer Maßabweichungen der Texturen erfolgt die Analyse von stoffflussabhängigen Strukturverzerrungen. Diese Erkenntnisse dienen als Grundlage zur Ableitung der Formgebungsgrenzen.

Die Geometrie-, Form- und Lagetoleranzen des Grundkörpers sind in Bild 19 dargestellt. Der Wert des Außendurchmessers der Tassen beträgt $31,29 \pm 0,04 \text{ mm}$, was einer Toleranzqualität von IT8 entspricht. Dies liegt innerhalb der Grenzen klassischer industriellen Anforderungen an die Genauigkeit des Außendurchmessers. Im Vergleich zu konventionellen Tiefziehverfahren beinhaltet die gewählte Verfahrenskombination das anschließende Abstreckgleitziehen der Tassenwand und das Mikroprägen im Bodenbereich. Die durch diese beiden Prozessschritte induzierte Kaltverfestigung, welche aus einer Erhöhung der Versetzungsdichte resultiert, führt zu einer Reduzierung der Rückfederung nach der Entformung [205].

Dadurch werden die Fertigungstoleranzen des Außen- und Innendurchmessers verbessert. Bei einer Toleranzklasse von IT₁₁ unterliegt der Innendurchmesser erhöhten Ungenauigkeiten. Die Qualität des Außendurchmessers ist allerdings entscheidend für die Betriebseigenschaften von Taschenstößeln, da er in der Ventiltrieb-anwendung in direktem Kontakt mit der Führungshülse steht.

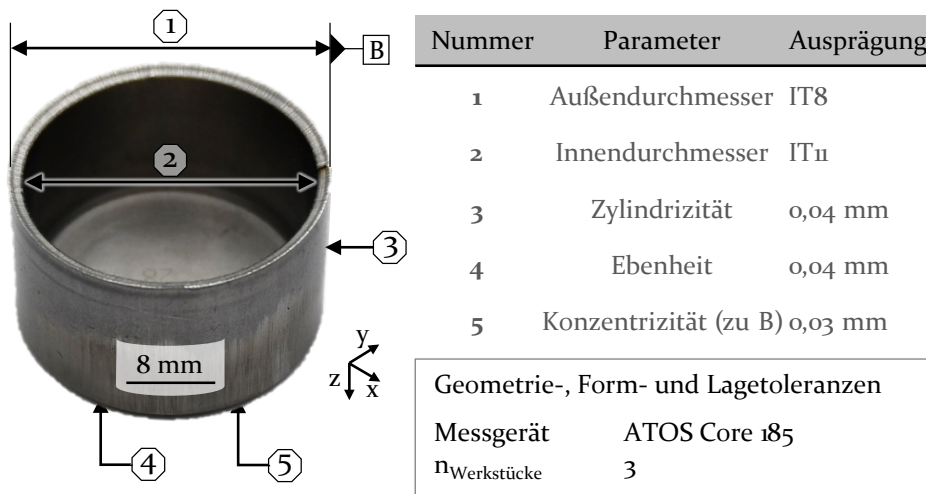


Bild 19: Geometrie-, Form- und Lagetoleranzen des Grundkörpers

Für die Zylindrizität ist das Abstreckverfahren ebenfalls ein wesentlicher Faktor. Der erreichte Wert von 0,04 mm entspricht den industriellen Vorgaben, was neben anderen Aspekten die Eignung des angewandten Verfahrens für die Herstellung des Grundkörpers bestätigt. Für eine konstante Kontaktfläche in der Anwendung der texturierten Oberfläche sollte die äußere Bodenfläche des Stößels nicht ballig sein. Der entsprechende Wert für die Ebenheit von 0,04 mm ist zwar höher als bei vergleichbaren industriellen Fertigungsverfahren, könnte aber durch das Prägen bei höheren Kräften und eine Anpassung der Stempelgeometrie mittels einer ausgleichenden Vorkorrektur weiter verringert werden.

Im Anschluss an die Feststellung der Eignung des kombinierten Umformprozesses zur Herstellung des napfförmigen Grundkörpers sind die mikroskopischen Bauteileigenschaften zu charakterisieren. Entscheidend für die späteren Einzeileigenschaften texturierten Oberflächen sind das Texturmuster sowie die Strukturtiefe und deren Abmessung [20]. Die Strategie zur Untersuchung der Bauteileigenschaften basiert daher auf der Analyse der genannten Zielgrößen. Aus dem Stand der Technik kann für kombi-

nierte Mikrotextrurierungsprozesse der Umformtechnik ein stoffflussabhängiges Texturierungsergebnis abgeleitet werden [173]. Daher erfolgt die Bauteilanalyse an sieben über den zweiten Quadranten des Tassenbodens verteilten Stellen. Position 1 bildet näherungsweise den Zentrumspunkt ab, während die Positionen 2 und 3 in x-Richtung und die Positionen 4 und 5 in y-Richtung liegen. Auf der Winkelhalbierenden sind die Messstellen 6 und 7 angeordnet. Entsprechend Bild 9 a) sind die quaderförmigen Mikrotextruren auf dem Prägezylinder in gleicher Richtung orientiert. Da im abschließenden Prozessschritt, dem Mikroprägen, die Bodendicke reduziert wird, ist in Anlehnung an Stauchvorgänge ein radialer Stofffluss vom Bodenmittelpunkt zum Bodenrand hin zu erwarten [164]. Die Auswahl der Messpositionen resultiert aus diesem Grund in Ausrichtungen der langen Quaderflanke von 0°, 45° und 90° relativ zur Hauptstoffflussrichtung. Bild 20 zeigt die Texturlänge und -breite des Referenzversuchs mit dem Werkstoff 1.7131 und der Umformkraft von 1000 kN. Wie in Bild 9 b) dargelegt beträgt die werkzeugseitige Texturlänge 100 µm und die Texturbreite 30 µm.

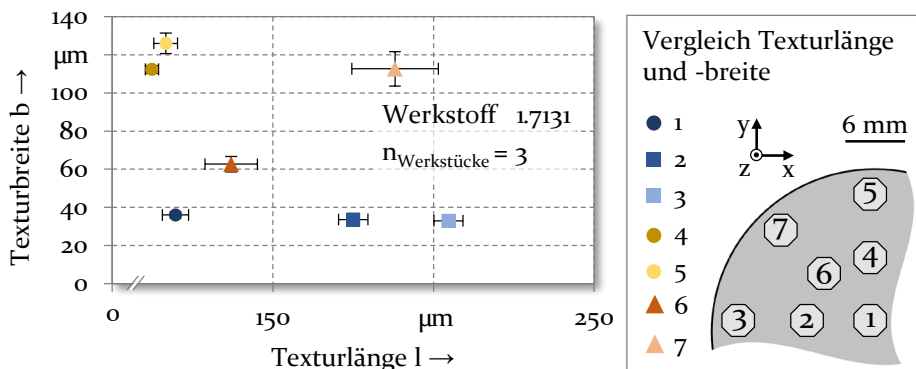


Bild 20: Vergleich der Texturlängen und -breiten an sieben charakteristischen Messstellen

Unabhängig von der Messposition resultiert im Vergleich zur werkzeugseitigen Geometrie eine Texturvergrößerung in Längen- und Breitenrichtung. Die Ausprägung dieser unterliegt allerdings positionsabhängigen Effekten. Im Bauteilzentrum wird entsprechend Position 1 mit einer Texturlänge von $119 \pm 4 \mu\text{m}$ und einer Texturbreite von $36 \pm 2 \mu\text{m}$ die geringste Vergrößerung detektiert. Zum Bauteilrand hin steigt die Texturlänge auf bis zu $204 \pm 5 \mu\text{m}$ in Position 3 an, was einer Erhöhung um 104 % im Vergleich zur Werkzeugtextur entspricht. Geringfügige Längenänderungen liegen an den Positionen 4 und 5 vor. Die gemessene Texturbreite dagegen wächst zum Bodenrand auf bis zu $116 \pm 4 \mu\text{m}$ an. Texturen, die in 45° zur Haupt-

stoffflussrichtung orientiert sind (Position 6 und 7) erfahren im Mikroprägevorgang eine Vergrößerung beider Prüfparameter. Ein Anstieg der Texturlänge um 88 % sowie eine Erhöhung der Texturbreite um 273 % wird für Position 7 detektiert. Aufgrund der ausgeprägten Positionsabhängigkeit der Geometriewerte ist von einer durch den lokalen Materialfluss ausgelöste Verzerrung der Texturen auszugehen. In einem kombinierten Umformprozess mit mikrotexturierten Werkzeugen wurde ebenfalls der oberflächennahe Stofffluss als Ursache verzerrter Texturen identifiziert [112]. Der Beleg dieser These bedarf einer Untersuchung des Stoffflusses im Mikroprägeverfahren. Mittels Analyse der experimentell gefertigten Bauteile ist eine Visualisierung des Ergebnisses des Stoffflusses im Mikroprägevorgang möglich. Daher werden in Bild 21 Vertiefungsmessungen der sieben charakteristischen Stellen dargestellt. Die Randbedingungen der Umformung entsprechen denen des Referenzversuchs aus Abschnitt 5.1 bei einer werkzeugseitigen Texturhöhe von 5 μm . Gezeigt werden exemplarische mit dem Keyence VK-X 200 erstellte Aufnahmen, da eine Überlagerung mehrerer Proben im Rahmen der qualitativen Untersuchung ungeeignet ist.

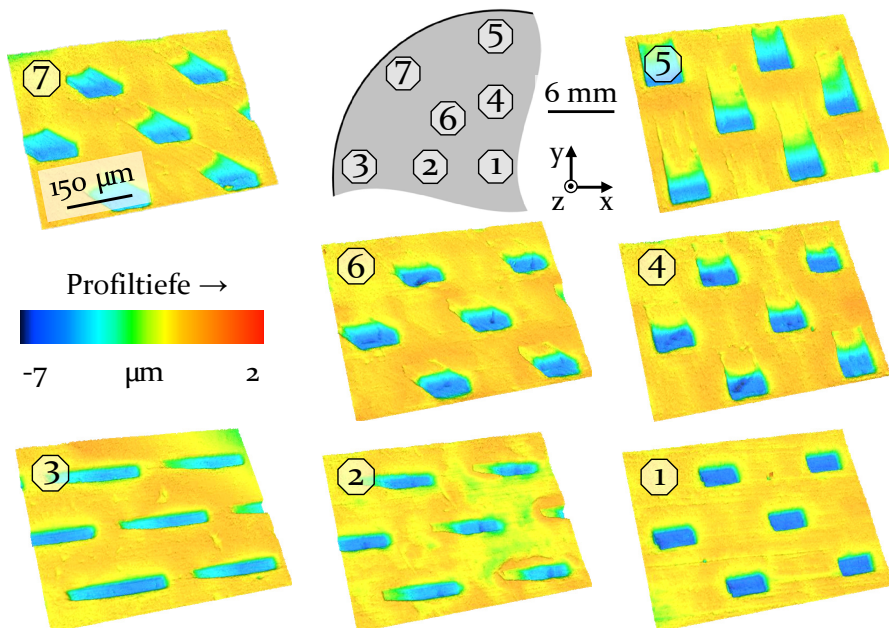


Bild 21: Profiltiefe der Texturen an sieben charakteristischen Stellen

Das positionsabhängige Verhalten wird anhand der Vertiefungsmessungen bestätigt. Während Texturen entlang der x-Achse eine signifikante Vergrößerung in Längenrichtung erfahren, resultiert für Texturen in y-Richtung

eine gesteigerte Breite. Die Texturverzerrung ist durch den lokalen Stofffluss zu erklären. Auf der Werkzeugoberfläche aufgebrauchte Texturerhebungen bewirken eine lokale Fließbehinderung. Der Werkstofffluss wird um die Texturen herumgelenkt, wodurch an der der Stoffflussrichtung abgewandten Seitenfläche der Texturen ein Hohlraum entsteht. Folglich entstehen die dargestellten Texturverzerrungen, da die Ausbildung des Hohlraums eine Vergrößerung der Prägung nach sich zieht. Je nach Ausrichtung der Textur umfließt der Werkstoff die Texturen an der kurzen Quaderseitenfläche (Positionen 2 und 3), an der langen Quaderseitenfläche (Positionen 4 und 5) oder an beiden Seiten (Positionen 6 und 7). Aufgrund der geringen Geometrieänderung in Position 1 ist im Bodenzentrum mit lediglich schwachem Stofffluss zu rechnen. Dies ist charakteristisch für Stauchprozesse rotationssymmetrischer Komponenten [164]. Da der Stofffluss anhand experimenteller Untersuchungen lediglich in limitierten Umfang untersucht werden kann, wird dieser zur detaillierten Ermittlung der Ursache-Wirkbeziehung mithilfe des numerischen Prozessmodells analysiert.

Die Verzerrung der Mikrot Texturen in Abhängigkeit der Positionen ist eine maßgebliche Herausforderung der einstufigen Umformung in Kombination mit Mikroprägen. Der Erklärungsansatz für diesen Bauteilfehler ist in der Inhomogenität des Hauptstoffflusses gegeben. Bild 22 a) stellt die Radialverschiebung des Werkstückwerkstoffs am Prozessende dar. In Position 1 ist die Radialverschiebung im Vergleich zu allen anderen Messstellen am geringsten. Dies erklärt die in Bild 21 und Bild 24 gezeigte gute Abbildungsgenauigkeit der Texturen in diesem Bereich. Eine lediglich geringe Superposition des lokalen Stoffflusses im Mikroprägen und dem globalen Stofffluss durch den Stauchvorgang des Napfbodens ist daher zur Erzielung einer geringen Texturverzerrung vorteilhaft. Höhere Radialverschiebungen sind im Gegensatz dazu in den Positionen 2, 4 und 6 festzustellen. Das lässt darauf schließen, dass der radiale Materialfluss den Stofffluss aus dem Mikroprägen in starkem Ausmaß überlagert und sich daher negativ auf die Maßhaltigkeit der werkstückseitigen Texturen auswirkt. In Bild 20 wurde experimentell gezeigt, dass die größte Texturverzerrung am Bodenrand, also den Positionen 3, 5 und 7 erreicht wird. Diese Erkenntnis steht im Einklang mit den numerisch ermittelten Radialverschiebungen, die in diesen Bereichen am stärksten ausgeprägt sind. Durch die werkzeugseitigen Texturen wird der radiale Stofffluss zudem lokal abgeschwächt. Die Reduktion kann durch die Wirkweise der Werkzeugtexturen als Fließbehinderung und der daraus resultierenden Stoffflussumlenkung begründet werden. Darüber hinaus wird ersichtlich, dass geringfügige Abweichungen der Ra-

dialverschiebung zwischen den Positionen in x-Richtung und den Bereichen in y-Richtung auftreten. Verdeutlicht wird dieses Verhalten anhand der Untersuchung der Radialverschiebungsverteilung eines vollständigen Quadranten des Napfbodens (Bild 22 b). Der Stofffluss in radialer Richtung erreicht auf halbem Radius in x-Richtung Werte von 0,05 mm, während auf der y-Achse in identischem Abstand zum Bodenmittelpunkt 0,09 mm Radialverschiebung vorherrscht.

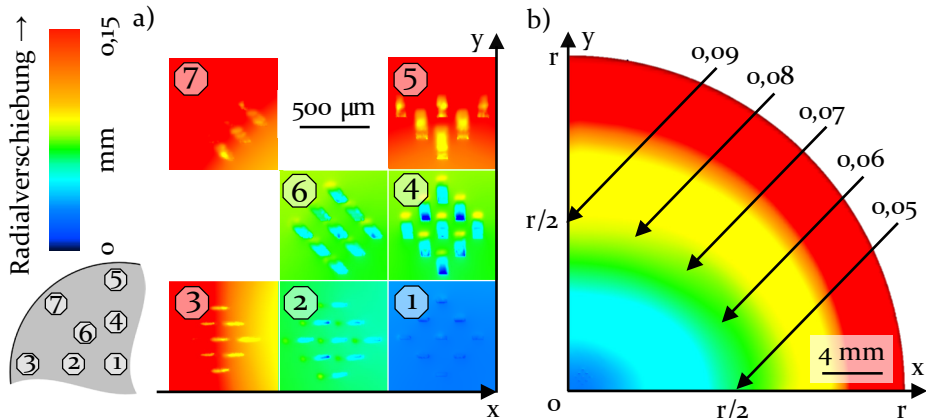


Bild 22: Radialverschiebung an sieben charakteristischen Stellen a) sowie die Radialverschiebung in Abhängigkeit der Anisotropie

Das inhomogene Werkstoffverhalten, ausgelöst durch die Kornorientierung im Walzprozess, sorgt für ein anisotropes Fließverhalten beim Stauchen. Da die Walzrichtung im numerischen Modell in x-Richtung gewählt wurde, kann geschlussfolgert werden, dass der Werkstoff 1.7131 im vorliegenden Stauchprozess dazu neigt, stärker in Querrichtung als in Walzrichtung zu fließen. Aufgrund des ausgeprägten Einflusses der Anisotropie auf die Radialverschiebungen in x- und y-Richtung ist diese in numerischen Untersuchungen der Mikrostrukturen stets zu berücksichtigen. Für die Positionen 2 und 4 wird der Stofffluss anhand der Radialverschiebung gesondert in Bild 23 a) gezeigt. Die schematische Kennzeichnung des Materialflusses trägt zur Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses der Fließwege und deren Einfluss auf die Texturverzerrung bei. Für beide Positionen ist die Radialverschiebung und somit der radiale Stofffluss in direkter Umgebung der werkzeugseitigen Texturen im Vergleich zu untexturierten Bereichen gehemmt. Die Reduktion des Materialflusses ist in den Kontaktbereichen zwischen Werkzeug und Werkstück besonders ausgeprägt. Die radiale Verschiebung wird nicht nur durch die Stoffflussumlenkung um die werkzeugseitigen Texturen gehemmt, sondern auch aufgrund der er-

höhten Reibkräfte, die aus der vergrößerten Werkzeugoberfläche im Vergleich zu untexturierten Bereichen resultieren. Die Kontaktfläche wird neben der Quaderdeckfläche um die Seitenflächen erhöht. Die Zone, die sich in Hauptstoffflussrichtung hinter den Texturen befindet, erfährt vergleichbare Radialverschiebungen wie der unmittelbare Texturbereich.

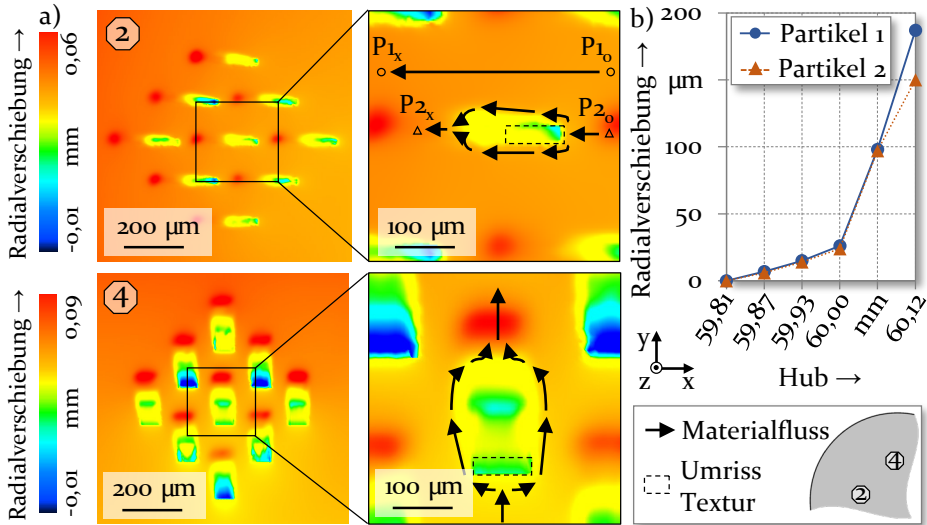


Bild 23: Radialverschiebung der Positionen 2 und 4 im Detail a) sowie der Partikelverfolgung von Position 2 b)

Die Einflusszone ist stark von der Texturgeometrieausrichtung abhängig. Durch die lokale Werkstoffumlenkung ist die Einflusszone verglichen mit der werkzeugseitigen Texturgeometrie breiter beziehungsweise länger als diese. Da für die Untersuchung im Referenzprozess nicht rotationssymmetrische Mikrot Texturen gewählt wurden, liegen abhängig von der Lage der Prägezone unterschiedliche Orientierungen zur radialen Hauptstoffflussrichtung vor. In Position 2 handelt es sich daher bei der dem Stofffluss zugewandten Fläche um die kurze Quaderseitenfläche. In Folge der geringeren Fließwege während der Umlenkung ist die Einflusszone schmaler und kürzer als die in Position 4. Die erhöhten Fließwege, die wegen der Umlenkung um die lange Quaderseitenfläche auftreten, sorgen für die Ausweitung der Einflusszone. Bild 23 b) visualisiert in diesem Zusammenhang die Radialverschiebung zwischen einem Hub von 59,81 mm und 60,12 mm. Der Partikel 1 repräsentiert einen Werkstückbereich, welcher sich im untexturierten Werkzeugbereich befindet. Im Gegensatz dazu umfließt Partikel 2 von seiner Startposition P_{2o} beginnend eine Quadertextur längsseitig bis zur Endposition P_{2x}. Partikel 1 wird im untersuchten Hubbereich um 187 μm radial zum Bodenrand hin verschoben, während die

Verschiebung im texturierten Bereich um $37\ \mu\text{m}$ darunterliegt. Bei einer werkzeugseitigen Texturlänge von $100\ \mu\text{m}$ besitzt diese reduzierte Verschiebung entscheidenden Einfluss auf das Texturierungsergebnis. Es kann insgesamt geschlussfolgert werden, dass nicht-rotationssymmetrische Werkzeugtexturen den radialen Stofffluss in Abhängigkeit der Orientierung lokal reduzieren. Da gezeigt wurde, dass der radiale Materialfluss maßgeblich die Texturverzerrung hervorruft, kann dieser Umstand begünstigend eingesetzt werden, um gezielt den Stofffluss zu reduzieren und die Texturmaßhaltigkeit zu verbessern. Die Anhebung des Flächendeckungsgrads, der im Referenzversuch bei 5 % liegt, bietet das Potenzial durch die gesteigerte Anzahl der Texturen, was mit einer stärkeren Stoffflusshemmung einhergehen ist, eine vielversprechende Maßnahme zur Erweiterung der Prozessgrenzen darzustellen.

Um das Prozessverständnis darüber hinaus zu erweitern, werden die Profilverläufe der bauteilseitigen Texturvertiefungen der auf den Achsen liegenden Positionen 1 bis 5 analysiert. Diese werden zudem den Profilverläufen werkzeugseitiger Texturen gegenübergestellt (Bild 24). Im Hinblick auf die in Bild 21 dargelegten stoffflussabhängigen Effekte erfolgt die Profiluntersuchung für die Positionen 2 und 3 im Mittelschnitt entlang der x-Achse, während für die Positionen 4 und 5 der Mittelschnitt entlang der y-Achse gewählt wird. Für beide werkzeugseitigen Texturverläufe wird eine Abweichung der Rechtwinkligkeit der Quaderseitenflächen zur Grundfläche detektiert. Flankenwinkel von bis zu 18° führen zu einer Verjüngung der Werkzeugtexturen zur Quaderdeckfläche hin. Dies ist auf das inhomogene Verschleißverhalten der Elektrode im zur Werkzeugtexturierung genutzten Mikroerodieren zurückzuführen [206]. Die ungleichmäßige Verteilung der im Eingriff befindlichen Elektrodenbereiche sorgt aufgrund des Verschleißes für eine konische Geometrie. Im Umkehrschluss resultiert daraus die Abweichung der Rechtwinkligkeit der werkzeugseitigen Texturen. An der dem Stofffluss zugewandten Texturseite wird der Flankenwinkel auf die bauteilseitigen Mikrovertiefungen übertragen. Ein entsprechendes Verhalten zeigt sich an der dem Stofffluss abgewandten Texturseite ausschließlich an Position 1. Dadurch wird die Annahme bekräftigt, dass die Materialverdrängung im Mikroprägen in diesem Bereich nicht von einem radialen Stofffluss überlagert wird. Texturen im Bodenzentrum unterschreiten zudem die werkzeugseitigen Ausgangswerte von Länge, Breite und Höhe. Ursächlich ist die elastische Deformation der Werkzeugtexturen in Verbindung mit dem Rückfederungsverhalten bauteilseitiger Strukturen. Untersuchungen eines vergleichbaren Mikroprägeprozesses zeigten, dass die

Kombination dieser beiden Einflüsse zu einer Reduktion der bauteilseitigen Kavitätsgeometrie führt [207]. Entlang der x-Achse gelegene Texturen werden mit zunehmendem Abstand zur Bodenmitte in radialer Richtung verlängert. Nach einem Bereich mit näherungsweise konstanter Texturtiefe folgen jeweils Texturflanken mit einem maximalen Winkel von 63° .

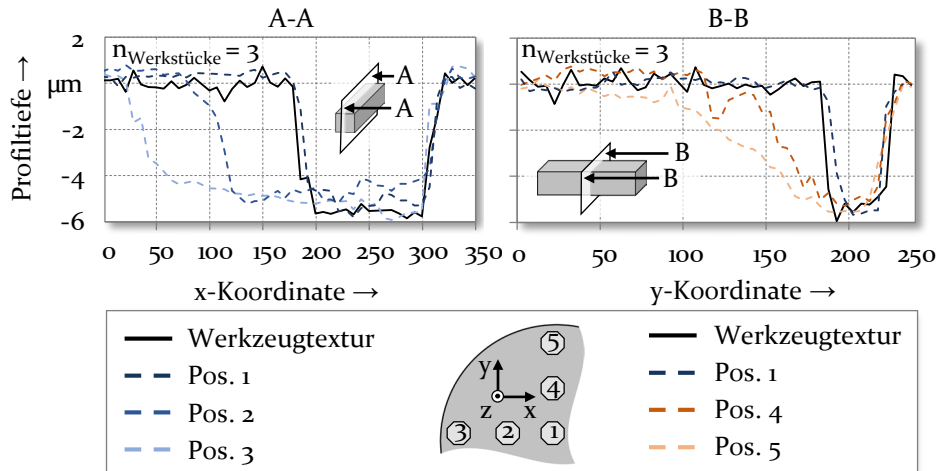


Bild 24: Profilverlauf der bauteilseitigen Texturen im Vergleich zu werkzeugseitigen Texturen

Die Grundlage der Texturvergrößerung liegt in der lokalen Umlenkung des Stoffflusses um die werkzeugseitigen Strukturen. Sobald der Werkstoff über die Deckfläche der Quader verschoben wurde, verliert dieser den Kontakt zum Gegenkörper. Durch den Verlust dessen Stützwirkung sorgt der fortlaufende Hub für eine Werkstoffverschiebung in z-Richtung. Überlagert wird diese Werkstoffverschiebung durch den radialen Stofffluss, was in Konsequenz in den ausgeprägten Flankenwinkeln resultiert.

In der Prozessanalyse mittels numerischen Modells wird mit dem Auftreten von Mehrfachprägungen eine weitere Herausforderung ermittelt. Bild 25 a) zeigt den Umformgrad der werkstückseitigen Texturen, die auf der Winkelhalbierenden von x-Achse und y-Achse liegen. Bei einem Hub von 59,50 mm wird das Texturmuster erstmals vom Werkzeug auf das Werkstück übertragen. Es folgt das Aufbringen eines zweiten, diagonal versetzten Texturmusters nach einem Hub von 59,90 mm. Aufschluss zum Hintergrund der Zweitprägung ist in der Analyse der Kontaktverhältnisse zwischen texturiertem Werkzeug und dem Werkstück gegeben (Bild 25 b). Der Kontakt wird im Bodenmittelpunkt initiiert, gefolgt von einer ringförmigen Ausbildung in Richtung des Bauteilrands. Dies führt zu einer kreisförmigen Kontaktablösung im Bereich des Bodenmittelpunkts. Im weiteren Verlauf

des Mikroprägens wird der Kontaktbereich zum Bauteilrand verlagert, bevor ein vollflächiger Kontakt des Werkstückbodens mit dem Prägezyylinder vorliegt. Der Grund für die inhomogene Kontaktausprägung liegt in der sogenannten Schalenbildung [208], die eine Aufwölbung eines tiefgezogenen Napfes im Bereich der Stempelstirnfläche beschreibt [209].

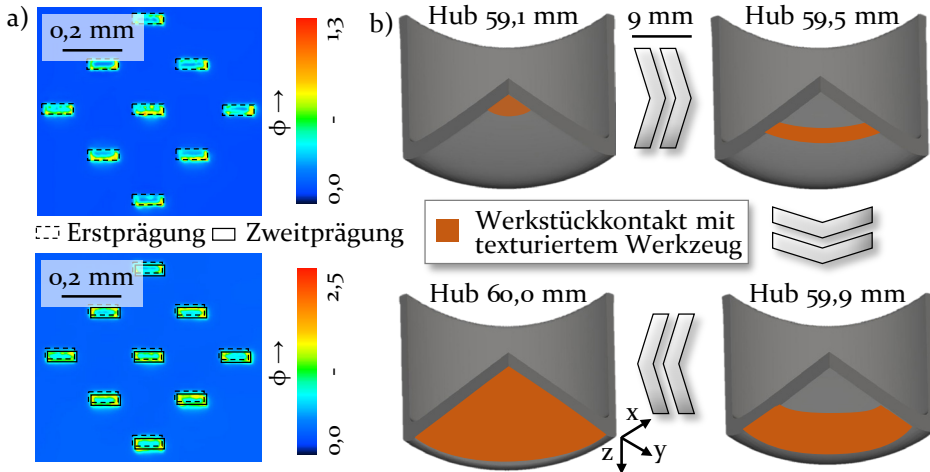


Bild 25: Mehrfachprägungen im numerischen Modell (a) sowie die zugrundeliegende Kontaktablösung von Werkstück und Prägezyylinder (b)

Die Ursache der Schalenbildung sowie des daraus resultierenden inhomogenen Kontaktzustands wird in Bild 26 verdeutlicht. Die flache Blechrunde wird zu Prozessbeginn im Tiefziehen an den Stempel angelegt, um die Napfzarge zu formen. Im Radiusbereich bewirkt der Tiefziehvorgang innen liegende Druckspannungen sowie außenliegende Zugspannungen. Zwischen dem Bodenbereich des Stempels und dem Werkstück entsteht wegen der in den Napfboden eingebrachten Biegespannungen [209] ein Hohlraum. Das geringe Ziehverhältnis β_0 von 1,5 begünstigt die Schalenbildung [210]. Der Kontaktbeginn des Werkstücks mit texturierten Prägezyylinder wird durch die konvexe Form im Bodenmittelpunkt initiiert. Eine weitere Abwärtsbewegung des Stempels bewirkt die graduelle Schließung des Hohlraums, was eine Biegung des Grundkörperbodens zur Folge hat. Aufgrund der fehlenden geometrischen Begrenzung, die durch den Hohlraum zwischen Napfboden und Stempelboden vorliegt, wird im Erstkontakt eine axiale Biegekraft F_B auf den Bodenmittelpunkt aufgebracht. Diese wird mit steigendem Hub radial nach außen verlagert. In dieser Phase wird der Kontaktbereich daher ringförmig nach außen verschoben. Im Bereich um den Bodenmittelpunkt herum wird folglich die Schalenhöhe reduziert

und gleichzeitig eine Kontaktablösung durch die nach außen verdrängte Kontaktzone bewirkt.

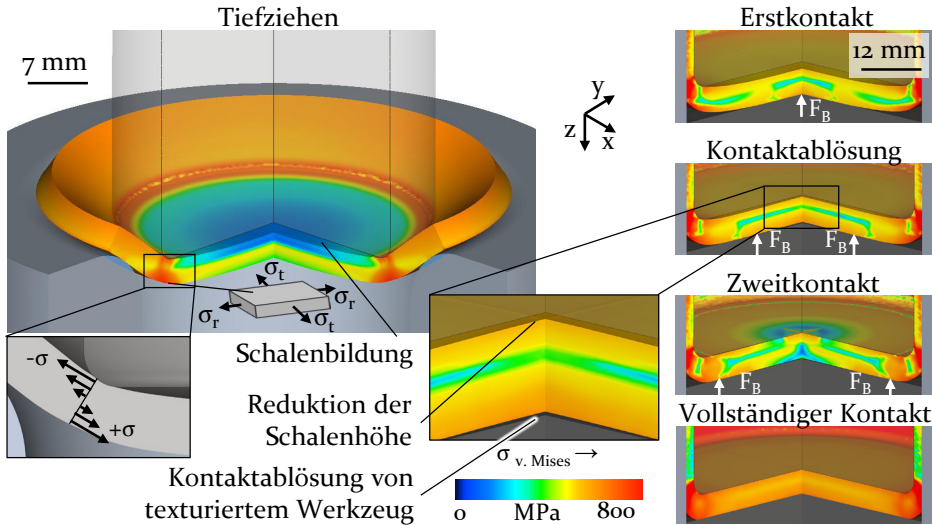


Bild 26: Spannungszustände im kombinierten Umformprozess

Die beschriebene Kontaktablösung ermöglicht auf mikroskopischer Ebene eine relative Verschiebung zwischen Werkstück und Werkzeug, was die Ausformung des sekundären Prägemusters erlaubt. Allerdings ist zu beachten, dass der fortschreitende Hub zu einer Interferenz der Zweitprägung mit dem radialen Stofffluss führt. Es kommt zu einer Einglättung der Texturen aus der Erstprägung. Aus diesem Grund treten in der experimentellen Bauteilanalyse keine Mehrfachprägungen auf. Dennoch ist diese Prozessherausforderung in der Analyse der Formgebungsgrenzen zu berücksichtigen, da bei der Textureinglättung unerwünschte Faltenbildung auftritt. Der detaillierte Zusammenhang von Kontaktablösung und Werkstoffverschiebung wird aus diesem Grund im Hinblick auf die Prozessherausforderung der Mehrfachprägung im Folgenden aufgezeigt. Der qualitative Nachweis wird in Bild 27 b) um eine quantitative Ursachenanalyse ergänzt. Bild 27 a) zeigt darüber hinaus den lokalen Kontaktzustand im Werkstückzentrum. Die Analyse erfolgt zweidimensional in der x-z-Ebene. Dennoch sind die aufgezeigten Ursachen aufgrund der Rotationssymmetrie des Werkstücks auf alle weiteren Bereiche des Napfbodens übertragbar. Grundlage der Mehrfachprägungen sind die inhomogenen Kontaktzustände im Mikroprägen in Verbindung mit einer Werkstoffverschiebung in x-Richtung (Bild 27 a). Nach dem initialen Einbringen von Texturen im Erstkontakt folgt ausgehend von der Bodenmitte die Kontaktablösung. Werkzeug- und Werkstücktexturen sind daher in diesem Bereich nicht in

Kontakt. Dieser Spalt ermöglicht während des fortschreitenden Pressen-
hubs eine Werkstoffverschiebung in radialer Richtung. Der Zweitkontakt
werkzeugseitiger Texturen erfolgt aus diesem Grund an einer zur Erstprä-
gung radial verschobenen Position.

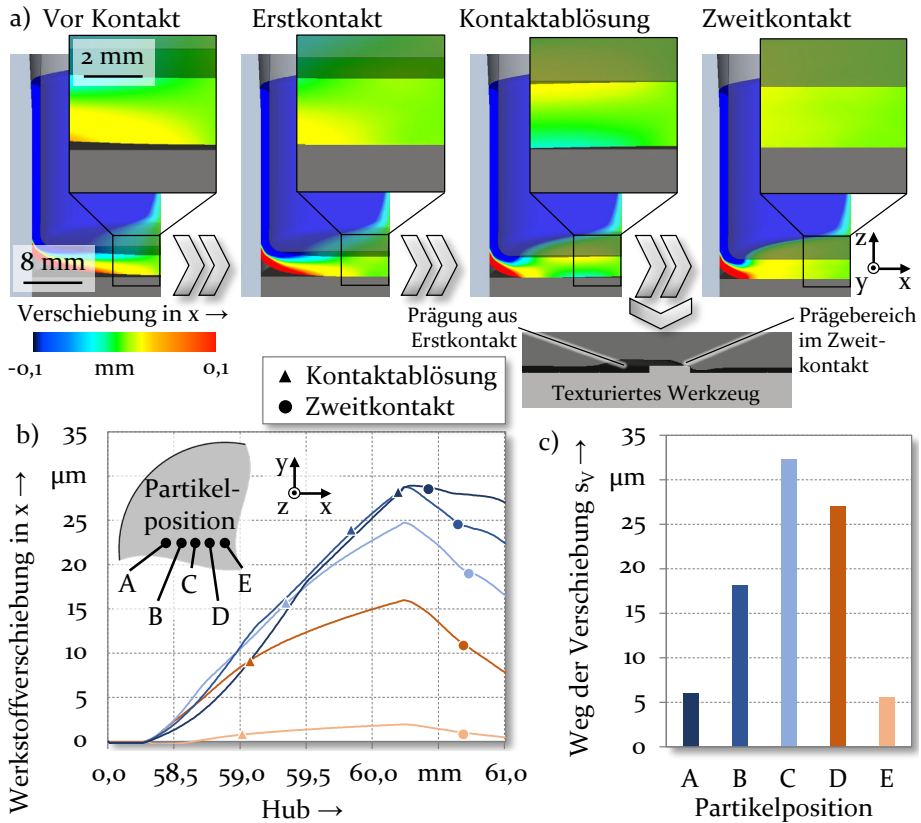


Bild 27: Kontaktablösung zwischen Werkstück und texturiertem Werkzeug (a) sowie die Analyse der Werkstoffverschiebungen während dieser Prozessphase (b) und deren Quantifizierung (c)

Zur quantitativen Untersuchung der Verschiebungen der sekundären Texturprägungen werden im numerischen Modell fünf Positionen auf der x-Achse an der äußeren Bodenfläche des Napfes analysiert. In Bild 27 b) sind die Werkstoffverschiebungen der Partikel A-E dargestellt, wobei der jeweilige Zeitpunkt der Kontaktablösung und des Zweitkontakts markiert ist. Der dazwischen befindliche Bereich definiert den Hubbereich, in welchem die Texturen aus der Erstprägung keinen Kontakt zum texturierten Prägezyylinder besitzen. Die in Bild 27 (c) dargestellte Verschiebung des Werkstoffs in x-Richtung ergibt sich folglich aus der Differenz der Werkstoffverschiebung bei Kontaktablösung und im Moment des Zweitkontakts. Die

Verschiebung wird über den zurückgelegten Weg s_V des Werkstoffs während der Kontaktablösung quantifiziert und beschreibt die Distanz zwischen den Texturen aus der Erst- und der Zweitprägung. Partikel E in unmittelbarer Nähe des Bodenzentrums ist mit einer Verschiebungsdifferenz von $5,3 \mu\text{m}$ lediglich geringfügig von diesem Prozessfehler betroffen. Zurückzuführen ist dies auf den in Bild 22 gezeigten geringen radialen Materialfluss. Zwar ist die Höhe der Werkstückablösung durch die im Bauteilradius eingeleiteten Biegekräfte stark ausgeprägt, allerdings findet während des Kontaktverlusts in der Bodenmitte lediglich eine geringe Werkstoffverschiebung statt. Anders verhalten sich die Partikel B, C und D, für die eine maximale Verschiebungsdifferenz von $32,4 \mu\text{m}$ detektiert wird. Zwischen Kontaktablösung und Zweitkontakt ruft die Verschiebung in x-Richtung ein Versetzen der Pragemuster von Erst- und Zweitkontakt hervor. Die werkzeugseitigen Mikrotexturen treffen in der Zweitprägung folglich nicht genau auf die werkstückseitigen Vertiefungen aus der Erstprägung und sorgen somit für eine ungewünschte Musterverschiebung (Bild 27 a). Partikel A erfährt darüber hinaus die stärkste Werkstoffverschiebung im untersuchten Parameterraum, ist allerdings durch eine lediglich schwach ausgeprägte Werkstückablösung charakterisiert. Ähnlich zur Formgebungsgrenze der Texturverzerrungen unterliegen auch die Mehrfachprägungen starken lokalen Schwankungen in der Ausprägungsintensität.

Die in Abschnitt 5.3 vorgestellten experimentellen Ergebnisse entstammen von den ersten mit den Werkzeugen hergestellten Bauteilen. Bislang unberücksichtigt sind von der Hubzahl abhängige Effekte. Zu diesem Zweck ist in Bild 28 die durchschnittliche werkstückseitige Texturtiefe zu Prozessbeginn bis zu einer Hubzahl von 70 an drei charakteristischen Positionen gezeigt. Die Analyse erfolgt gemittelt über drei Werkstücke bei einer Schrittweite von zehn Hüben. In Position 1 nimmt die Texturtiefe von $4,8 \pm 0,2 \mu\text{m}$ nach 70 gefertigten Bauteilen um 8 % ab. Die Position 2 und 4 sind mit einer Abnahme von 14 % respektive 27 % stärker von der Texturhöhenreduktion beeinflusst. Der Verlauf ist für alle drei Positionen nicht linear, sondern näherungsweise logarithmisch. Das damit einhergehende Sättigungsverhalten tritt für die Positionen 1 und 2 früher ein, als für Position 4. Ein Erklärungsansatz für die Tiefenabnahme ist das Auftreten von Werkzeugverschleiß, im speziellen der werkzeugseitigen Mikrotexturen. Eine Verringerung der Höhe der Werkzeugtexturen führt zu einer reduzierten Eindringtiefe und folglich zu flacher ausgeformten Werkstückkavitäten.

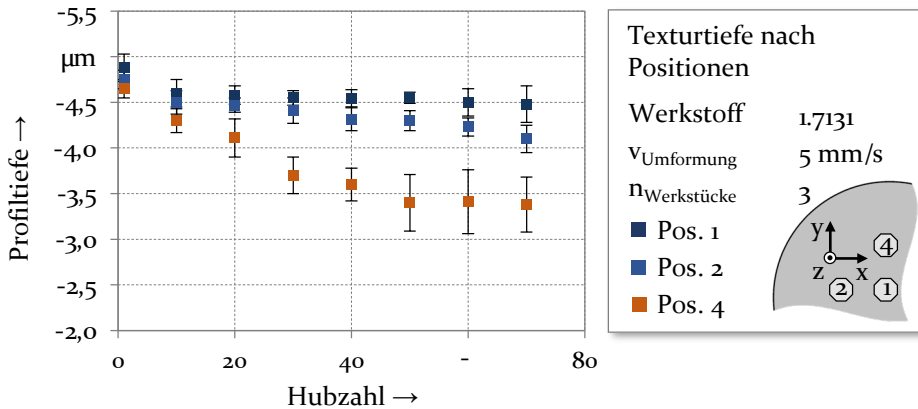


Bild 28: Werkstückseitige Texturtiefe nach bis zu 70 Hüb an drei charakteristischen Stellen

Aus der Literatur [211] geht hervor, dass der Verschleiß von Umformwerkzeugen in der Einlaufphase stark ausgeprägt ist und sich anschließend ein Sättigungszustand einstellt. Daher kann der logarithmische Verlauf der Texturtiefe mit dem Einlaufverschleißverhalten der texturierten Werkzeugoberfläche zu begründen. Auf dieser Basis wird die Belastung der Werkzeugtexturen auf kritische Spannungen hin untersucht. Darüber hinaus wird das Verschleißverhalten zur Erweiterung des Prozessverständnisses mittels experimenteller Methoden in Kapitel 1 anhand eines abstrahierten Prägeprozesses bei bis zu 4.000 Hüb an analysiert.

Die Ursache der in Bild 28 gezeigten Texturabflachungen wird in Bild 29 anhand der numerisch ermittelten Werkzeugspannungen analysiert. Die Darstellung umfasst die Vergleichsspannung $\sigma_{v.Mises}$ an den sieben charakteristischen Positionen sowie die maximale Hauptspannung σ_{\max} und die minimale Hauptspannung σ_{\min} in Position 4. Diese Auswertungsstrategie ist dafür geeignet, den auftretenden Spannungszustand in Zug- und Druckbereich zu charakterisieren und folgt daher etablierten Ansätzen der Umformtechnik [204]. Dies ist zu beachten, da der Werkzeugwerkstoff 1.3343 ein variierendes Verhalten unter Zug- und Druckbeanspruchung aufweist [212]. Alle gezeigten Beanspruchungszustände sind im finalen Prozessschritt vor der Bauteilentformung entnommen. Die angegebenen Maximalwerte beschreiben den Mittelwert aus fünf gemittelten repräsentativen Knoten des numerischen Modellbereichs. Auf der Werkzeugbodenfläche treten in allen Prüfstellen durchwegs geringere Vergleichsspannungen auf, als an den Texturen. Der Grund für die höheren Werte der Texturen ist die durch den radialen Stofffluss eingebrachte Scherspannung. Diese wird über die dem Materialfluss zugewandten Quaderfläche eingeleitet. In

dieser Zone resultieren entsprechend auch die höchsten Vergleichsspannungen. Diese sind in Position 1 mit 3.480 MPa am geringsten und steigen im Bereich 6 auf bis zu 4.980 MPa.

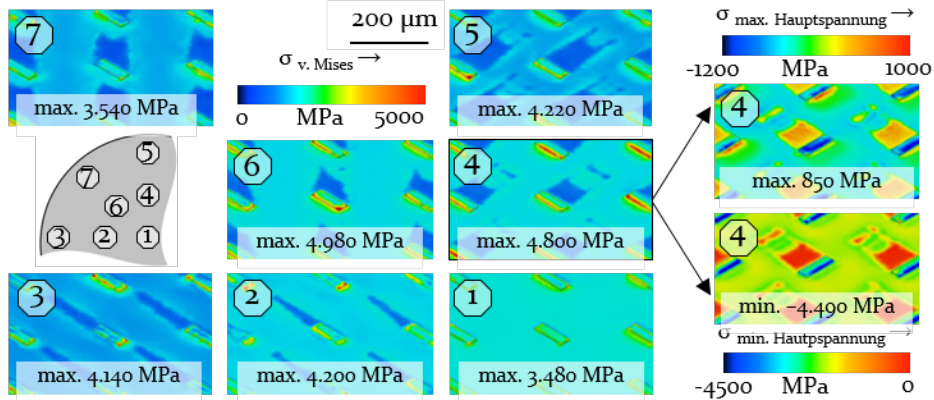


Bild 29: Werkzeugspannungen der Texturen an sieben charakteristischen Stellen

Da die Werkzeugbeanspruchungen durch einen ansteigenden Materialfluss erhöht werden [213], steht dieses Ergebnis im Einklang mit den Erkenntnissen der Stoffflussverteilung über den Napfboden. In den außenliegenden Positionen 3, 5 und 7 sind die Vergleichsspannungen niedriger, weil zwar der radiale Stofffluss höher ist, der Kontakt von Werkstück und Werkzeug allerdings spät im Prozessverlauf erfolgt. Die maximale Druckspannung von -4.490 MPa in Position 4 wird an der dem Stofffluss zugewandten Quaderseite lokalisiert, während die maximale Zugspannung von 850 MPa hinter der Textur im Werkzeugboden zu finden ist. Zu erklären ist der druckdominante Spannungszustand mit den Scherkräften, die aufgrund der Umwandlung der axialen Umformkrafteinleitung in radialen Stofffluss entstehen. Da die maximalen Druckspannungen an den Texturen die Druckfestigkeit des Werkstoffs [212] überschreiten, ist von einer verschleißbedingten Veränderung der texturierten Werkzeugoberfläche im Umformprozess auszugehen. Es ist mit abrasivem Verschleiß und Oberflächenzerrüttungen der werkzeugseitigen Texturen zu rechnen. Als Folge resultieren die in Bild 28 dargestellten sukzessiven Texturabflachungen. Die Erforschung weiterer Wirkmechanismen des Texturverschleißes ist Kapitel 1, der Untersuchung des Einsatzverhaltens, zu entnehmen.

Neben der mikroskopischen Bauteilcharakterisierung wird eine Analyse der makroskopischen Prozessherausforderungen durchgeführt. Es wird festgestellt, dass bereits nach 30 gefertigten Bauteilen eine Werkstoffein-schnürung im unteren Wandbereich des Grundkörpers auftritt. Aus diesem

Grund erfolgt auf der Grundlage von Bild 30 die Darstellung der Entwicklung des Bauteilfehlers bei steigenden Hubzahlen.

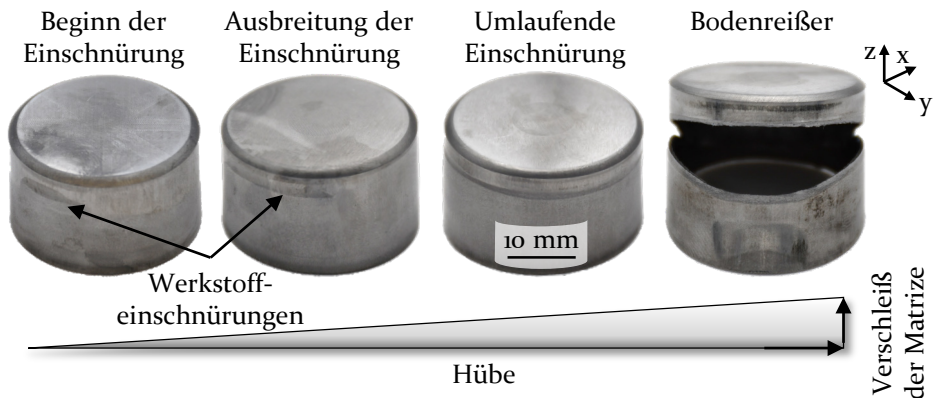


Bild 30: Prozessherausforderungen von Werkstoffeinschnürungen im unteren Wandbereich

Nach wenigen Hüben bildet sich eine lokale Werkstoffeinschnürung an der Außenwand des Grundkörpers in der Nähe des Radius aus. Mit fortschreitenden Hubzahlen folgt die Ausbreitung der Einschnürung bis diese schließlich umlaufend die Napfwand vollständig umschließt. Eine weitere Erhöhung der Hübe resultiert im Materialbruch, wobei der Boden unterhalb des Radius von der Napfwand abgelöst wird. Dieser Stadienverlauf folgt den in der Literatur [214] beschriebenen Zuständen, bestehend aus Rissbildung, Risseinleitung, Rissausbreitung und Rissarretierung. Da die Randbedingungen während der Bauteilfertigung konstant gehalten werden, ist eine verschleißbedingte Veränderung der tribologischen Systems anzunehmen. Ein Erklärungsansatz ist die Erhöhung der Wandreibung aufgrund des Verschleißes der Matrizeninnenwand. Dadurch erhöht sich die Haftreibung, die bei der Entformung des fertigen Bauteils aus der Matrize zu überwinden ist. Überschreitet die Haftreibung im unteren Wandbereich die Fließgrenze des Werkstoffs, können sich an diesen Stellen Einschnürungen bilden, die bei weiterer Reibungserhöhung zu vollständigen Bodenreißen führen.

Für die Untersuchung der Fehlerursache werden die Bauteile an der außenliegenden Wandoberfläche bezüglich der Mittenrauwerte R_a sowie der Rautiefe R_z zu Prozessbeginn bis zu einer maximalen Hubzahl von 70 bei einer Schrittweite von 10 Hüben charakterisiert. Im initialen Stadium der Lokalisierung einer Einschnürung entsteht eine Aufrauung der Oberfläche [215]. Dies motiviert die Erforschung der Entwicklung der Mittenrauwerte und der Rautiefe, mit dem Ziel eine sich ausbildende Werkstoffeinschnürung zu identifizieren.

schnürung frühzeitig zu identifizieren. Die Rauheitswerte der Bauteilaußenwand, die mit dem Perthometer MarSurf 120 gemessen werden, sind in Bild 31 gezeigt.

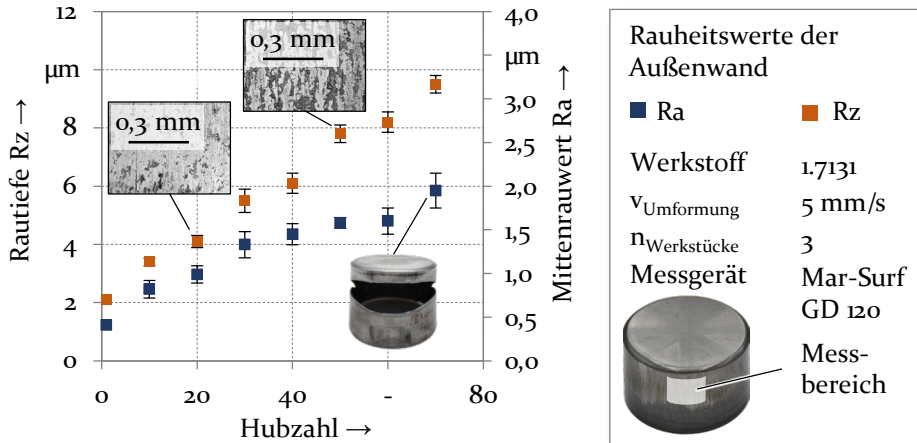


Bild 31: Rauheitswerte der Bauteilaußenwand vom Beginn der Umformversuche bis zu einer Hubzahl von 70

Der Mittenrauwert, der auf der Sekundärachse aufgetragen ist, liegt zu Prozessbeginn bei $0,41 \pm 0,05 \mu\text{m}$. Zu Beginn der Umformversuche tritt keine Einschnürung an der Bauteilwand auf. Mit steigender Hubzahl nimmt der Mittenrauwert linear zu, bevor nach 40 Hüben ein Sättigungsverhalten eintritt. In dieser Phase wird die Einschnürung lokalisiert und breitet sich wie in Bild 30 gezeigt tangential aus. Nach weiteren 30 Hüben steigt der Mittenrauwert sprunghaft auf $1,95 \pm 0,2 \mu\text{m}$ an. Dieser Anstieg kündigt die Rissausbreitung und somit die Ausbildung des Bodenreißers an. Vergleichbare Entwicklungen zeigen sich für die Rautiefe, die in näherungsweise linearem Verlauf nach 70 Hüben um 350 % über dem Ausgangswert liegt. Da alle beeinflussbaren Faktoren während der Umformung konstant gehalten werden, ist dieses Verhalten auf eine Veränderung im tribologischen System zurückzuführen. Eine erhöhte Wandreibung sorgt bei der Entformung für das Überschreiten der Fließgrenze des Werkstoffs. Dieser Anstieg resultiert aus adhäsiven Kaltverschweißungen, die am konischen Teil des Matrizeninnendurchmessers lokalisiert werden. Die ursprünglich polierte Werkzeugoberfläche verliert dadurch die reibungsreduzierend wirkende Oberflächeneigenschaft und begünstigt die Ausbildung der Einschnürungen. Als Gegenmaßnahme wird eine titanhaltige PVD Beschichtung auf der Matrizeninnenseite aufgebracht. Diese Maßnahme ermöglicht die vollständige Eliminierung dieses Prozessfehlers.

Ableiten der Formgebungsgrenzen

Zur umformtechnischen Herstellung napfförmiger Grundkörper mit mikroskopisch kleinen Oberflächentexturen wurde ein Prozess aus Tiefziehen, Abstreckgleitziehen und Mikroprägen ausgelegt. Die experimentelle Umformanalyse zeigt, dass der Prozess grundlegend geeignet ist, um einen maßhaltigen Grundkörper zu fertigen und Mikrostrukturen von strukturierten Werkzeugen auf das Werkstück zu übertragen. Dem Skalenkonflikt in der FEM zwischen kleinen Oberflächenstrukturen und vergleichsweise großen Bauteilabmessungen kann mit gezielten Anpassungen des numerischen Modells begegnet werden. Die Validierung belegt darüber hinaus die gute Prognosequalität, besonders auch im Hinblick auf die Mikrostrukturabmessungen. In der Bauteilanalyse wurden allerdings verschiedene Werkstückfehler identifiziert, deren Ursachen ermittelt wurden. Im Hinblick auf die Zielsetzung des Kapitels werden die abgeleiteten Prozessgrenzen in Tabelle 5 hinsichtlich der Ausprägung und deren zugrundeliegenden Ursachen zusammengefasst. Zudem erfolgt eine Bewertung der Prozessgrenzen unter Berücksichtigung der Auswirkung auf den Bauteileinsatz.

Tabelle 5: Prozessgrenzen und deren Ursachen

Prozessgrenze	Bewertung	Ausprägung	Ursache
Musterverzerrung	– –	Texturverlängerung in Hauptstoffflussrichtung	Stoffflussumlenkung durch werkzeugseitige Texturen
Mehrfachprägung	–	Partiell versetzte Texturmuster	Kontaktablösung zwischen Werkstück und Werkzeug
Texturabflachung	– –	Geringe bauteilseitige Texturtiefe	Verschleiß werkzeugseitiger Mikrostrukturen
Bodenreißer	–	Einschnürung im unteren Wandbereich	Wandreibung zwischen Bauteil und Matrize
kritisch	–	sehr kritisch	– –

Die durch die Texturverlängerung induzierte Musterverzerrung kann den Bauteileinsatz stark negativ beeinflussen. Für tribologische Texturoberflächen kann dies zum Beispiel bedeuten, dass die Texturabmessungen die aufgrund der Herz'schen Pressung entstandene wahre Kontaktfläche überschreiten. Dies führt zu einem beschleunigten Furchungverschleiß der

Mikrostrukturen. In diesem Kontext sind Mehrfachprägungen als unkritischer einzustufen, da diese durch die gezielte Hubsteuerung bereinigt werden können. Dennoch ist diese Prozessgrenze aufgrund der Entstehung von Falten bei der Füllung der Erstprägungen nicht zu vernachlässigen. Falten rufen in umgeformten Bauteilen Schwachstellen hervor, die im Einsatzfall in lokalem Versagen resultieren [192]. Abschnitt 7.1 stellt daher eine Prozessmaßnahme zur Eliminierung der Mehrfachprägungen und somit auch der Faltenbildung vor.

Die als weitere Prozessgrenze identifizierte verschleißbedingte Texturabflachung kann für ein stark inhomogenes Funktionsverhalten des Bauteils im Einsatz sorgen. Die präzise Abstimmung der Texturtiefe auf den jeweiligen Anwendungsfall ist essenziell [20]. Bereits geringe Abweichungen der bauteilseitigen Texturtiefe von der numerisch ermittelten Soll-Tiefe bergen das Risiko einer ineffizienten Wirkung der funktionalen Oberfläche im Anwendungsfall. Aufgrund dessen sind werkzeugseitige Texturabflachungen mit zunehmendem Verschleiß als besonders kritisch einzustufen. Eine Identifikation der Verschleißmechanismen sowie Maßnahmen zu deren Reduktion werden in Kapitel 1 dargelegt. Obwohl die makroskopischen Einschnürungen an der Napfwand mit den resultierenden Bodenreißern einen vollständigen Bauteilausfall nach sich ziehen, ist diese Prozessgrenze aufgrund des erfolgreichen Behebens als weniger kritisch einzustufen und wird aufgrund des Schwerpunkts der vorliegenden Arbeit auf das mikroskopische Prozessverständnis nicht weiter beleuchtet.

6 Erforschung des Einflusses textur-, prozess- und halbzeugseitiger Größen auf das Prozessergebnis

Bislang wird der Einsatz kombinierter Umformprozesse zur einstufigen Herstellung mikrotexturierter Bauteile durch ein unzureichendes Prozessverständnis gehemmt. Wie in Abschnitt 2.2.3 gezeigt wurde, geben Untersuchungen aus der Literatur Hinweise über die Wirkung verschiedener Prozesseinflussgrößen im reinen Mikroprägen ohne globalen Stofffluss. Die Integration des Mikroprägens in den Herstellungsprozess von Bauteilen mit Abmessungen im Millimeter- oder Zentimeterbereich wird dagegen nicht berücksichtigt. Um diese Lücke der Forschung zu schließen, wird als initiales Teilziel die Identifikation maßgeblicher Prozesseinflussgrößen verfolgt. Auf Basis der systematischen Variation der Einflussgrößen erfolgt die Analyse von bauteil- und prozessseitigen Zielgrößen sowie die Ableitung allgemeingültiger Erkenntnisse. Abschließend gilt es, die Wirkmechanismen zu ermitteln und somit Anwendern ein tiefgehendes Prozessverständnis darzulegen. Ergebnisse aus experimentellen Umformversuchen werden in diesem Zusammenhang mit validierten numerischen Untersuchungen kombiniert. Bild 32 fasst die Zielsetzungen und die jeweilige Vorgehensweise schematisch zusammen.

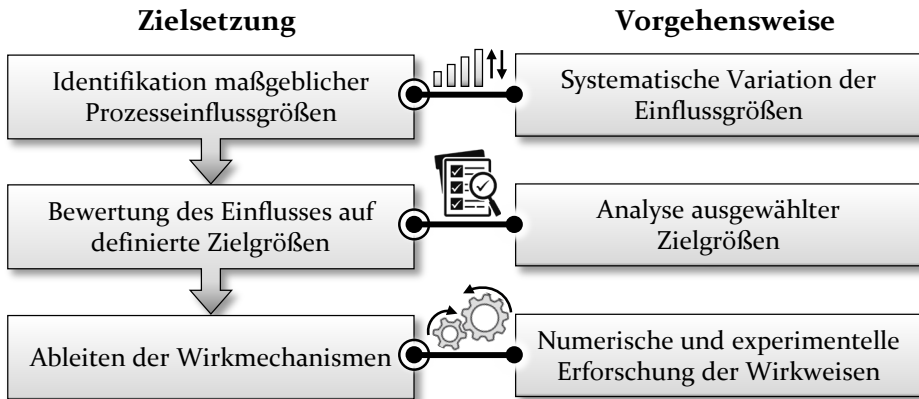


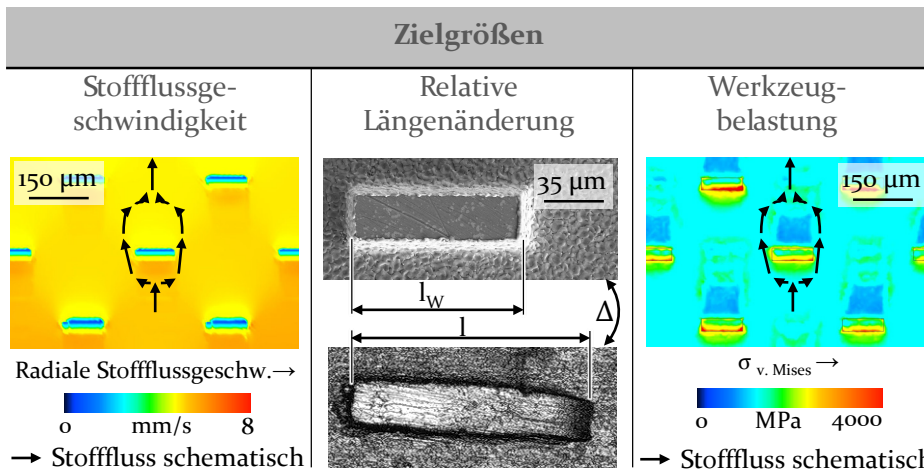
Bild 32: Zielsetzung und Vorgehensweise zur Analyse der Einflussgrößen auf das Prozessergebnis

Die gewählten Einfluss- und Zielgrößen sind in Tabelle 6 dargestellt. Da es sich bei Prägeverfahren um Prozesse der Abbildung eines Werkzeugnegativs auf der Bauteiloberfläche handelt [101], bestimmt die werkzeugseitige

Texturgeometrie das Ergebnis der oberflächennahen Ausformung. Aus diesem Grund werden zunächst der Einfluss der Texturgeometrie und der – höhe auf die Zielgrößen untersucht. Im Hinblick auf die Ableitung allgemeingültiger Wirkweisen erfolgt die Analyse der Texturgeometrie anhand der systematischen Variation des Eckradius. Dieser wird zwischen 0 und 31 μm variiert, wobei die beiden Extremwerte eine Quader- beziehungsweise eine Zylindertextur abbilden.

Tabelle 6: Einflussparameter und deren Stufen zur systematischen Prozessanalyse sowie untersuchte Zielgrößen

Parameter	Stufen (Referenz)	Einheit
Eckradius	0, 8, 16, 24, 31	μm
Texturhöhe	5, 10, 15	μm
Flächendeckungsgrad	5, 15, 25, 35	%
Prozesskraft	600 , 800 , 1000	kN
Werkstückwerkstoff	1.7131, 1.4301, 2.0321	–



Texturseitig ist außerdem der Einfluss des Flächendeckungsgrads, der das prozentuale Verhältnis aus texturierter und untexturierter Werkzeugoberfläche darstellt, erforscht werden. Anhand dieser Parametervariationen kann die Eignung des Umformprozesses für eine Vielzahl an Anwendungen funktionaler Oberflächen mit verschiedenen einsatzrelevanten Texturmustern bewertet werden [20]. Prozessseitig wird der Einfluss der Prozesskraft

durch eine Variation zwischen 600 kN und 1000 kN untersucht. Entsprechend den Ergebnissen aus Abschnitt 5.3 ist das bauteilseitige Texturergebnis maßgeblich durch den Pressenhub und folglich durch die Prozesskraft bestimmt. Eine systematische Variation dieses Faktors soll Aufschluss über die zugrundeliegenden Wirkmechanismen und Wechselwirkungen zwischen der Stauchung des Napfbodens und dem Mikroprägen geben. Die Reaktion eines Materials auf plastische Deformation hinsichtlich Energieabbau und Entropie ist darüber hinaus von den mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs abhängig [216]. Um ein breites Prozessverständnis für den kombinierten Mikroprägeprozess bereitzustellen, werden neben dem Referenzwerkstoff 1.7131 der Edelstahl 1.4301 und der Messingwerkstoff 2.0321 untersucht. Dadurch soll der primäre Anwendungsbereich des Maschinenbaus um Einsätze für die Medizin-, Lebensmittel- und Elektrotechnik erweitert werden. Auf Grundlage der Ergebnisse aus Kapitel 5 werden numerisch die Zielgrößen der oberflächennahen radialen Stoffflussgeschwindigkeit sowie der Werkzeugbeanspruchung analysiert. Die lokal vorliegende radiale Stoffflussgeschwindigkeit wurde in Abschnitt 5.3 als entscheidende Größe für die Texturverzerrung ermittelt und wird daher im Detail untersucht. Darüber hinaus gibt die Analyse der Werkzeugbelastungen Aufschluss über Bereiche mikrotexturierter Werkzeuge, die besonders verschleißkritisch sind. In einem kombinierten experimentellen und numerischen Ansatz wird darüber hinaus die Zielgröße der Texturmaßhaltigkeit untersucht. Diese wird anhand der relativen Längenänderung der geprägten werkstückseitigen Textur l_w im Vergleich zur werkzeugseitigen Textur l_w abgebildet.

6.1 Texturseitige Einflussgrößen

Im folgenden Abschnitt werden die Einflussparameter aus Tabelle 6 im Hinblick auf deren Einfluss auf die Zielgrößen untersucht. Es erfolgt eine Unterscheidung von textur-, prozess- und halbzeugsseitigen Einflussgrößen. Im Rahmen der texturseitigen Einflussanalyse werden zunächst der Effekt des Texturradius auf die Stoffflussgeschwindigkeit, die relative Längenänderung sowie die Werkzeugbelastung untersucht.

Effekt des Texturradius: In [20] werden die Wirkweisen verschiedener Texturgeometrien im Einsatz funktionaler Oberflächen aufgezeigt. Die Geometrie spielt eine entscheidende Rolle, da diese die gewünschten Effekte der Oberflächentexturierung maßgeblich bestimmt. Daher motiviert dies die Erforschung weiterer Texturformen zur Erweiterung des Prozessver-

ständnisses. Untersucht werden neben der quaderförmigen Referenzgeometrie Texturen mit inkrementell zunehmendem Eckradius. Bei einem Eckradius von $R = 31 \mu\text{m}$ wird ein vollständig verrundeter Zylinder abgebildet. Diese systematische Untersuchung der Geometrieviation bildet die Grundlage für ein Prozessverständnis zur Wirkweise von im Stand der Technik identifizierter gängiger Texturformen auf den Umformprozess. Das Soll-Volumen einer einzelnen werkzeugseitigen Textur beträgt zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse für alle Varianten $1,5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$. Die experimentell und numerisch untersuchten Texturvarianten sind in Bild 33 dargestellt.

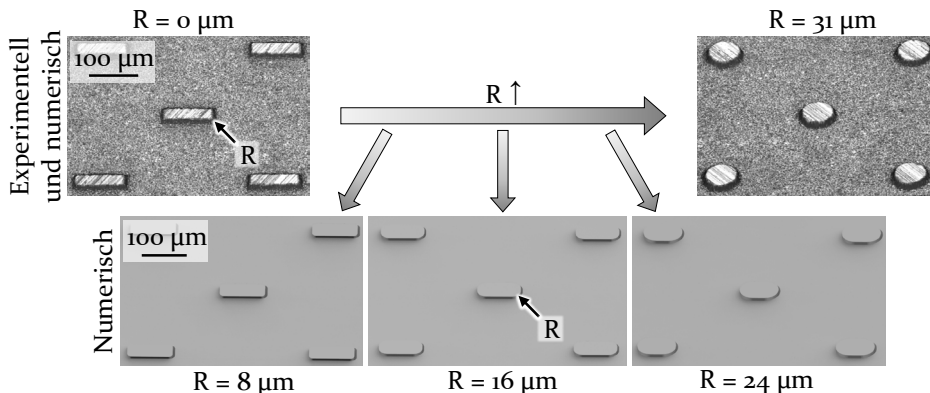


Bild 33: Systematische Variation des Eckradius zwischen 0 und $31 \mu\text{m}$

In Abschnitt 2.3 wurde ein unzureichendes Prozesswissen einstufiger Umformverfahren in Kombination mit Mikroprägen identifiziert. Im Stand der Technik bleibt die gegenseitige Beeinflussung von globalem Stofffluss sowie den lokalen Fließwegen in unmittelbarer Umgebung von Mikrotexturen unberücksichtigt. Aus diesem Grund ist zunächst ein Verständnis für den lokalen Werkstofffluss, der aus der Umformung des Grundkörpers sowie der Mikrotexturgeometrie resultiert, zu schaffen. Bild 34 zeigt den Einfluss des Eckradius der werkzeugseitigen Mikrotextur auf die numerisch ermittelte oberflächennahe Stoffflussgeschwindigkeit in radialer Richtung. Die Messungen erfolgen an drei Texturen, an jeweils drei Stellen. Berücksichtigt werden in radialer Richtung die Positionen mit Abständen von $10 \mu\text{m}$ und $5 \mu\text{m}$ sowie eine Messposition unmittelbar vor der Textur. Durch diesen Ansatz ist eine ganzheitliche Analyse des texturnahen Stoffflusses möglich. Außerdem erfolgt eine Gegenüberstellung hinsichtlich der Texturausrichtung zur Hauptstoffflussrichtung an den Positionen 1, 2 und 4. Unabhängig von der Messposition ist die radiale Stoffflussgeschwindigkeit bei der Umformung mit texturierten Oberflächen signifikant geringer als die mit untexturierten Prägewerkzeugen erreichte Geschwindigkeit. Die

Kontaktfläche zwischen Werkstück und Werkzeug beeinflusst die Reibkraft während der Umformung und folglich auch den Spannungszustand sowie den plastischen Stofffluss [217].

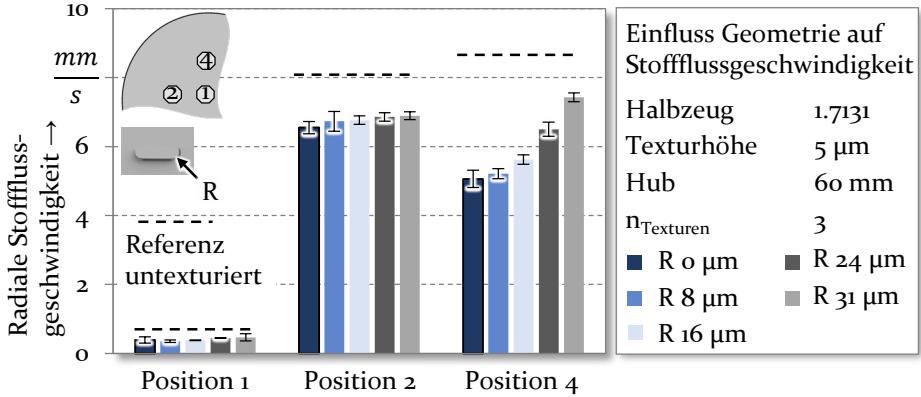


Bild 34: Einfluss des Texturradius auf die oberflächennahe Stoffflussgeschwindigkeit

Werkzeugseitige Texturen bewirken in diesem Zusammenhang eine lokale Kontaktflächenvergrößerung, was in einer Abnahme der oberflächennahen Stoffflussgeschwindigkeit resultiert. Die in Bild 23 gezeigte Umlenkung des Stoffflusses um die Texturen herum begünstigt die Abnahme der Fließgeschwindigkeit zudem. Unterschiede im Fließverhalten, die auf die Texturgeometrie zurückzuführen sind, werden besonders in Position 4 merklich. Während die mittlere Stoffflussgeschwindigkeit für Quader (R 0 μm) bei 5,1 mm/s liegt, wird für Zylinder (R 31 μm) ein Wert von 7,4 mm/s gemessen. Zurückzuführen ist dieses Verhalten auf die unterschiedlich ausgeprägte Stoffflussumlenkung für rotationssymmetrische und nicht-rotationssymmetrische Texturen. In Position 4 sind quaderförmige Texturen so angeordnet, dass die Hauptstoffflussrichtung senkrecht zur langen Seitenfläche ausgerichtet ist. Daraus resultieren für Quader längere Fließwege als für Zylinder. Die inkrementelle Vergrößerung des Eckradius bewirkt in diesem Zusammenhang die Zunahme der Stoffflussgeschwindigkeit. Zurückzuführen ist dieses Verhalten auf die abnehmenden Fließwege, die durch die texturbedingte Stoffflussumlenkung entstehen. Die Änderung der Fließwege des Werkstoffs werden im Rahmen dieser Arbeit in Abhängigkeit der Texturgeometrie anhand des arithmetischen Mittels der Verlängerung der Fließwege quantifiziert (Bild 39). Die mittlere Verlängerung der Fließwege beschreibt die durchschnittliche Zunahme der tangentialen Werkstoffverschiebung, welche durch die Fließbehinderung einer Mikrotextur ausgelöst wird. Während die mittlere Verlängerung der Fließwege,

die der Werkstoff zum tangentialen Passieren der Textur erfährt, für Quader bei $25\ \mu\text{m}$ liegt, wird der Werkstoff für Zylinder tangential um $15,5\ \mu\text{m}$ abgelenkt. Radiale Stoffflussanteile werden folglich durch zunehmende Werkstoffumlenkung reduziert. Im Vergleich zu Position 4 ist der Materialfluss für die Zylinder in Position 2 leicht gehemmt. Hintergrund ist die durch Anisotropie ausgelöste inhomogene Radialverschiebung (Bild 22). Bei isotropem Stofffluss hingegen sind für rotationssymmetrische Texturen bei gleichem Abstand zum Bodenmittelpunkt identische Fließgeschwindigkeiten zu erwarten. Aufgrund der verkürzten Fließwege durch die Orientierung der langen Seitenfläche parallel zur Hauptstoffflussrichtung resultiert für Quader in Position 2 eine um $1,5\ \text{mm/s}$ erhöhte Stoffflussgeschwindigkeit, verglichen mit Position 4. Je nach Texturgeometrie und deren Orientierung relativ zur Hauptstoffflussrichtung kann folglich die radiale Stoffflussgeschwindigkeit gesteuert werden. Die Ursache-Wirkbeziehung von werkzeugseitigen Texturen in Abhängigkeit des Eckradius wird anhand metallographischer Analysen in Bild 35 a) untersucht.

In den mittels REM aufgenommenen Abbildungen werden die lokalen Fließwege der Extremwerte $R = 0\ \mu\text{m}$ und $R = 31\ \mu\text{m}$ dargestellt. Der radiale Hauptstofffluss in y -Richtung wird durch die werkzeugseitigen Mikrot Texturen tangential umgelenkt. In diesem Bereich treffen also zwei Stoffflussrichtungen aufeinander, die unter den lokalen Druckspannungen zu einem Knicken des Werkstoffs führt. Dieses Knicken bewirkt einen Selbstkontakt der Bauteiloberfläche ohne Materialbindung, wobei die ursprünglich außenliegende Oberfläche zur inneren Kontaktfläche wird. An der dem Hauptstofffluss zugewandten Texturseite resultiert daher eine Faltenbildung. In Prozessen der Mikromassivumformung wurde ebenfalls der gegenläufige Stofffluss als Mechanismus für die Faltenbildung in filigranen Funktionselementen identifiziert [218]. Im Vergleich zur Quaderstruktur ist die Faltenbildung vor der Zylindertextur nur schwach ausgeprägt. Zur rückzuführen ist dies auf geringere tangentialen Stoffflussumlenkung. Der mittlere Umlenkungswinkel α_U , der zwischen Hauptstoffflussrichtung und der Ablenkungsrichtung entsteht, besitzt folglich maßgeblichen Einfluss auf die Faltenbildung. Je größer der Umlenkungswinkel ist, desto geringer ist der Effekt der gegenläufigen Stoffflussorientierung und folglich auch der Faltenbildung. Der Einfluss der Texturverrundung auf den Umformgrad ist darüber hinaus in Bild 35 b) gezeigt. Der Umformgrad der Zylinder liegt an allen Messstellen unter den Werten der Quadertextur. Im Bereich unmittelbar vor den Texturen ist der Gradient am stärksten ausgeprägt. Der Grund für die geringeren Umformgrade des Zylinders liegt in der schwächeren tangentialen Stoffflussumlenkung.

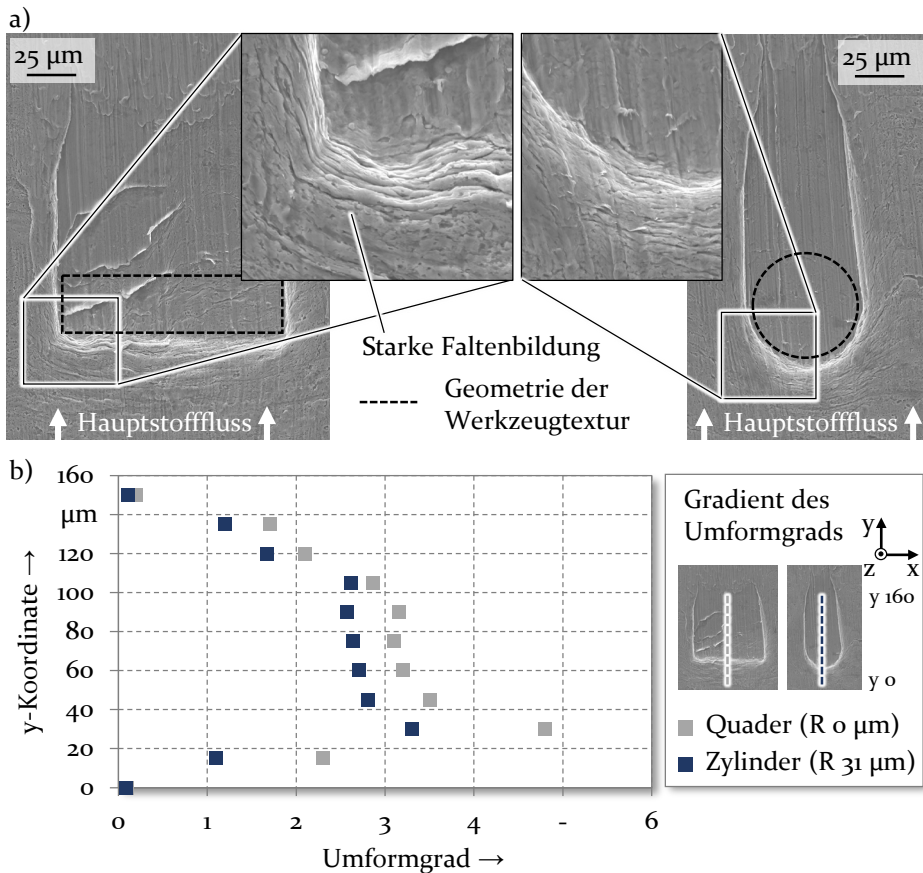


Bild 35: Fließbehinderungen in Abhängigkeit des Texturradius (a) sowie dessen Auswirkungen auf den Gradient des Umformgrads (b)

Es kann abgeleitet werden, dass Bereiche mit geringer Faltenbildung (Zylinder) aufgrund des kleineren mittleren Umlenkungswinkels schwächer verfestigt werden als Zonen mit starken Faltenbildung (Quader). Der Einfluss der unterschiedlichen Verfestigung wird im Folgenden im Hinblick auf die Belastungen der texturierten Werkzeuge untersucht.

Neben der Werkstofffließspannung bewirken höhere Fließgeschwindigkeiten bei Umformwerkzeugen nach GROCHE ET AL. [219] ansteigende Werkzeugspannungen und eine Zunahme des Werkzeugverschleißes. Um diese für makroskopische Umformwerkzeuge geltende Aussage für mikrotexturierte Werkzeuge zu verifizieren, wird in Bild 36 der Einfluss der Texturgeometrie auf die Werkzeugspannungen dargelegt. Entsprechend Bild 29 werden als Zielgrößen die Vergleichsspannung $\sigma_{v.Mises}$ sowie die maximale Hauptspannung σ_{max} und die minimale Hauptspannung σ_{min} herangezogen.

Kritische Zustände der Zug- und Druckanteile der Werkzeugbeanspruchung können über die Analyse der maximalen beziehungsweise minimalen Hauptspannung lokalisiert werden [191]. Anhand der richtungsunabhängigen Vergleichsspannung können Bereiche hoher Spannungskonzentrationen identifiziert werden, die kritisch hinsichtlich der Materialplastifizierung sind [220]. Die Auswertung erfolgt je Textur anhand der Maximalwerte, die über fünf Knoten gemittelt werden. Dies stellt einen in der Beanspruchungsanalyse von Umformwerkzeugen etablierten Ansatz dar [204]. Zudem erfolgt zur Sicherstellung der statistischen Aussagekraft die Untersuchung von drei werkzeugseitigen Texturen je Geometrievariante.

Für alle Geometrievarianten steigen die Vergleichsspannung sowie die maximale und minimale Hauptspannung in Position 2 und 4, verglichen mit dem Zentrum des Prägezyinders in Position 1. In Position 4 liegt die Vergleichsspannung für Quader ($R = 0 \mu\text{m}$) bei 3.880 MPa (+51 %) und für Zylinder ($R = 31 \mu\text{m}$) bei 3.350 MPa (+30 %). Ein ähnliches Verhalten ist in den Druckanteilen der Werkzeugspannungen zu detektieren. Im Vergleich zu Position 1 ist die minimale Hauptspannung in Position 4 für Quader um 73 % und für Zylinder um 30,17 % erhöht. Ursächlich für die Anstiege der Werkzeugbelastungen sind die in Bild 22 aufgezeigten Unterschiede in der Radialverschiebung im Tassenboden. Der Werkstoff neigt aufgrund der Anisotropie mehr dazu, in Querrichtung zu fließen. Daher ist die Radialverschiebung in Position 4 größer als in Position 2. Die damit einhergehende Erhöhung der Fließgeschwindigkeit bewirkt den Anstieg der Druckspannungen in Position 4.

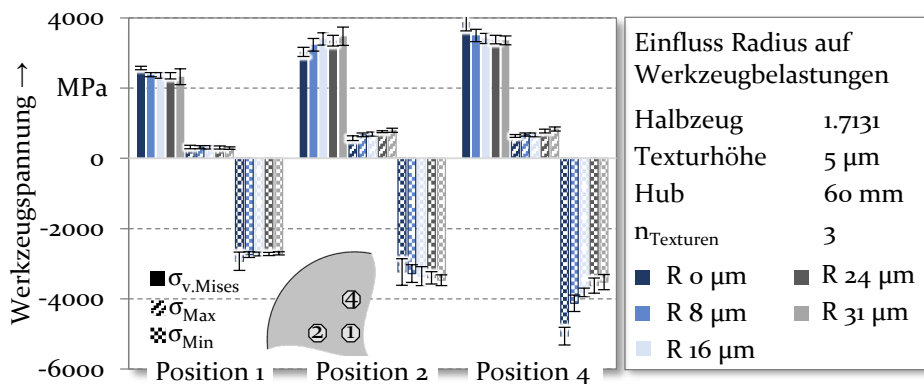


Bild 36: Einfluss des Elementradius auf die Werkzeugbelastungen

In Position 1 und 2 sind alle untersuchten Werkzeugspannungen unabhängig von der Texturgeometrie auf vergleichbarem Niveau. Dies

ändert sich allerdings mit abweichendem Auftreffwinkel des Stoffflusses auf die werkzeugseitigen Texturen. Besonders die minimale Hauptspannung ist in Position 4 stark durch den Eckradius bestimmt. Die Extremwerte liegen für Quader bei -5060 ± 250 MPa und für Zylinder bei lediglich -3510 ± 210 MPa. Für Quaderstrukturen erfolgt die Werkstoffumlenkung in diesem Bereich senkrecht zur Hauptstoffflussrichtung ($\alpha_U = 90^\circ$), während sie für Zylinder tangential in stets sich an den Hauptstofffluss annäherndem Winkel abläuft ($\alpha_U = 135^\circ$). Mit zunehmendem mittlerem Umlenkungswinkel resultiert eine geringere Kaltverfestigung, was zu niedrigeren Druckspannungen der Werkzeugtexturen führt. Aus der Literatur ist darüber hinaus bekannt, dass bei scharfkantigen Konturübergängen Spannungsspitzen auftreten [191]. Dieses Wissen kann auf das kombinierte Mikroprägen übertragen werden, indem durch eine Verrundung der Texturen für eine prozessangepasste Werkzeugauslegung gesorgt wird. Im untersuchten Prozess nehmen mit steigendem Radius besonders die Druckanteile der Werkzeugspannungen ab. Umlaufend abgerundete Texturen sind im Hinblick auf niedrige Werkzeugbelastungen und eine lange Werkzeuglebensdauer grundlegend zu bevorzugen. In numerischen und experimentellen Untersuchungen eines Münzprägeprozesses wird die Anpassung der werkzeugseitigen Radien ebenfalls als Stellhebel zur Reduktion der Werkzeugbelastungen identifiziert [142]. Zurückgeführt wird dies auf die Abnahme der Normal- und Scherbeanspruchung [142]. Die tangentielle Werkstoffumlenkung an der verrundeten Texturoberfläche bewirkt in diesem Zusammenhang die Reduktion der Fließbehinderung und folglich die Annäherung der Stoffflussgeschwindigkeit an den untexturierten Referenzwert. In Verbindung mit dem Verzicht auf scharfe Texturkanten resultieren niedrigere Werkzeugbelastungen. Die in Tabelle 5 identifizierte Prozessherausforderung der Musterverzerrung motiviert zudem die Untersuchung des Einflusses der Texturgeometrie auf die bauteilseitige Maßhaltigkeit der Oberflächenstrukturen. Die numerisch ermittelten und experimentell verifizierten Ergebnisse zeigt Bild 37. Aufgetragen ist die relative Längenänderung, welche sich aus dem Quotienten von werkzeugseitigem und bauteilseitigem Texturmaß ergibt (Tabelle 6). Für Quaderstrukturen wird in Position 1 und 2 die Texturlänge und in Position 4 die Texturbreite als Zielgröße herangezogen. Der Durchmesser dient der Analyse der Zylinderstrukturen als Zielgröße. Diese Vorgehensweise stellt die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicher, da jeweils die Verlängerung der Texturgeometrie in Hauptstoffflussrichtung berücksichtigt wird. Je Variante erfolgt die Messung, im Einklang mit der vorangegangenen Vorgehensweise, an drei Texturen.

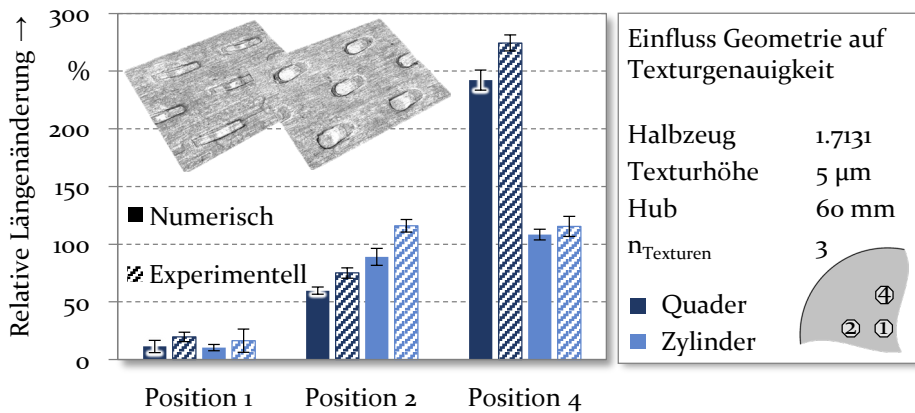


Bild 37: Einfluss der Texturgeometrie auf die bauteilseitige Texturmaßhaltigkeit

Die Stoffflusssimulation unterschätzt für alle gebildeten Mittelwerte die experimentell identifizierte Längenänderung. Ein Erklärungsansatz liegt in der Modellierung der komplexen tribologischen Lasten, die aus dem Skalenkonflikt der Umformung des Grundkörpers und dem Mikroprägen der Oberflächenstruktur resultieren [152]. Darüber hinaus ist bekannt, dass das verwendete Reibfaktormodell die Reibspannung bei niedrigen Normalspannungen überschätzt [192]. Dies beeinflusst gerade zu Beginn des Mikroprägens die numerisch berechneten Fließwege, da die zu hoch eingeschätzte Reibung in dieser Prozessphase Einfluss auf die Texturverzerrung nimmt. Alle numerischen Tendenzen der Einflussanalyse werden dessen ungeachtet durch die Umformexperimente bestätigt. In Position 1 werden Quader- und Zylindertexturen wegen der geringen Radialverschiebung (Bild 22) um lediglich 11 % beziehungsweise 10 % verlängert. Ähnliche Ergebnisse werden für einen kombinierten Mikroprägeprozess in [112] berichtet. Aufgrund der stark abweichenden Texturgeometrie und -höhe sind die Resultate allerdings nicht direkt vergleichbar. Aus dem Vergleich der Längenänderung von Position 2 und 4 lässt sich eine starke Abhängigkeit der bauteilseitigen Texturverzerrung von den geometriebedingten Fließwegen ableiten. Darüber hinaus weicht die relative Längenänderung für Zylinderstrukturen zwischen Position 2 und 4 signifikant voneinander ab. Da es sich um rotationssymmetrische Werkzeugstrukturen handelt, kann der Einfluss der Werkstoffumlenkung in Abhängigkeit der relativen Texturorientierung zum Hauptstofffluss als Ursache ausgeschlossen werden. In Bild 22 wurde der durch die Werkstoffanisotropie ausgelöste Gradient der Radialverschiebung dargelegt, welcher in Position 2 und 4 in variierenden Stoffflussgeschwindigkeiten resultiert. Anhand von Bild 38 wird untersucht, inwieweit die Anisotropie die Texturausformung beeinflusst. Für Texturen in

Position 1 ist der Hauptstofffluss in Walzrichtung orientiert, während dieser für Texturen in Position 4 in 90° zur Walzrichtung ausgerichtet ist. Verläuft der Hauptstofffluss des Bauteils senkrecht zur Walzrichtung des Blechwerkstoffs, wird eine um bis zu 20 % gesteigerte relative Längenänderung der Textur bewirkt. Ursächlich dafür ist die erhöhte Radialverschiebung in Position 4, die durch die Neigung des Werkstoffs stärker in Querrichtung zu fließen, induziert wird. Folglich wird mehr Werkstoffvolumen durch die werkzeugseitige Fließbehinderung umgelenkt und die Texturverzerrung wird erhöht. Um eine homogene Ausformung von Mikrotexturen in Umformprozessen mit radialem Hauptstofffluss zu begünstigen, sind daher Werkstoffe mit einer senkrechten Anisotropie von näherungsweise $r = 1$ zu wählen.

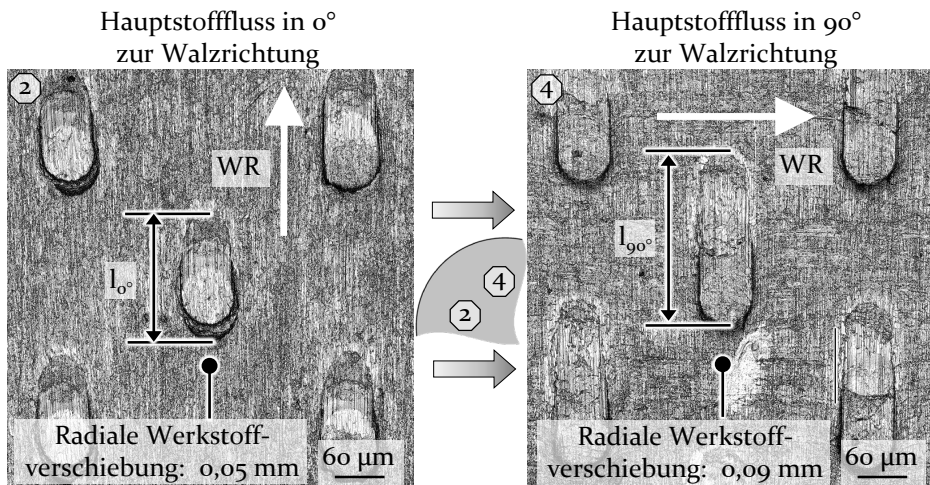


Bild 38: Einfluss der Werkstoffanisotropie auf die Texturausformung

Zusammenfassend konnten mittels Variation des werkzeugseitigen Texturradius und der Analyse bauteil- und prozesseitiger Zielgrößen grundlegende Ursache-Wirkzusammenhänge identifiziert werden. Im Hinblick auf die Erarbeitung eines umfassenden Prozessverständnisses mit allgemeingültigen Ergebnissen wird aus der systematischen Einflussanalyse von werkzeugseitigen Mikrostrukturen in kombinierten Umformprozessen in Bild 39 der Wirkmechanismus abgeleitet. Die Beeinflussung der Zielgrößen wird demnach maßgeblich durch die geometrische Fließbehinderung bestimmt, die als eine lokale Stoffflussumlenkung wirkt. Der stoffflussorientierte Mechanismus kann auf Grundlage von zwei Kenngrößen der Texturgeometrie beschrieben werden. Der mittlere Winkel der Stoffflussumlenkung α_U beeinflusst die Werkstoffverfestigung auf der dem Hauptstofffluss zugewandten Seite und wirkt sich daher auf die texturverzerrungsbedingte

Prägenauigkeit aus. Ein großer mittlerer Winkel der Stoffflussumlenkung bewirkt in diesem Zusammenhang eine lokale Reduktion der texturseitigen Werkzeugbelastungen, besonders in den Druckspannungsanteilen. Darüber hinaus wird die radiale Stoffflussgeschwindigkeit mit gesteigerter mittlerer Verlängerung der Fließwege V_F aufgrund der stärker ausgeprägten Fließbehinderung reduziert.

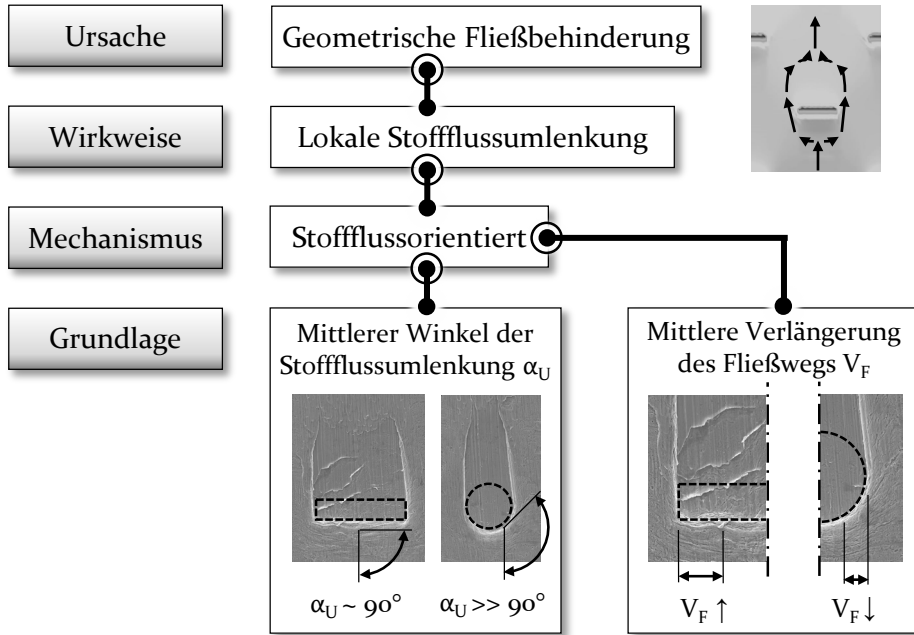


Bild 39: Wirkmechanismen erhabener Mikrotexturen auf Umformwerkzeugen

Der vorgestellte Wirkmechanismus wird in Bild 40 visualisiert. Die senkrecht zum Hauptstofffluss orientierte Stoffflussumlenkung sorgt bei den Quadertexturen in Position 4 für die Bildung eines Hohlrums hinter den werkzeugseitigen Strukturen. Dieser wird mit zunehmender Entfernung zur Textur durch den tangentialen Stofffluss von beiden Seiten geschlossen. Da im Bereich des Hohlrums keine Stützwirkung von dahinterliegendem Werkstoff vorliegt, erfolgt der Spannungsabbau durch plastisches Fließen in Richtung des Hohlrums. Für Texturen mit hohem mittleren Umlenkungswinkel liegt ein vergleichbarer Wirkmechanismus vor. Allerdings erfolgt die Stoffflussumlenkung tangential, zum Beispiel entlang eines Zylinderdurchmessers. Aufgrund der geringeren Fließbehinderung wird der Hohlraum, welcher die Musterverzerrung bildet, schneller geschlossen als bei der Verwendung von Quaderstrukturen. Die geringere Werkstoffverfestigung und die geringere Anstauung von Werkstoff sorgt

zudem für die Reduktion der Werkzeugbelastungen. Dieses Prozessverständnis wird im folgenden Abschnitt auf die Übertragbarkeit hinsichtlich der Texturhöhe sowie des Flächendeckungsgrads analysiert.

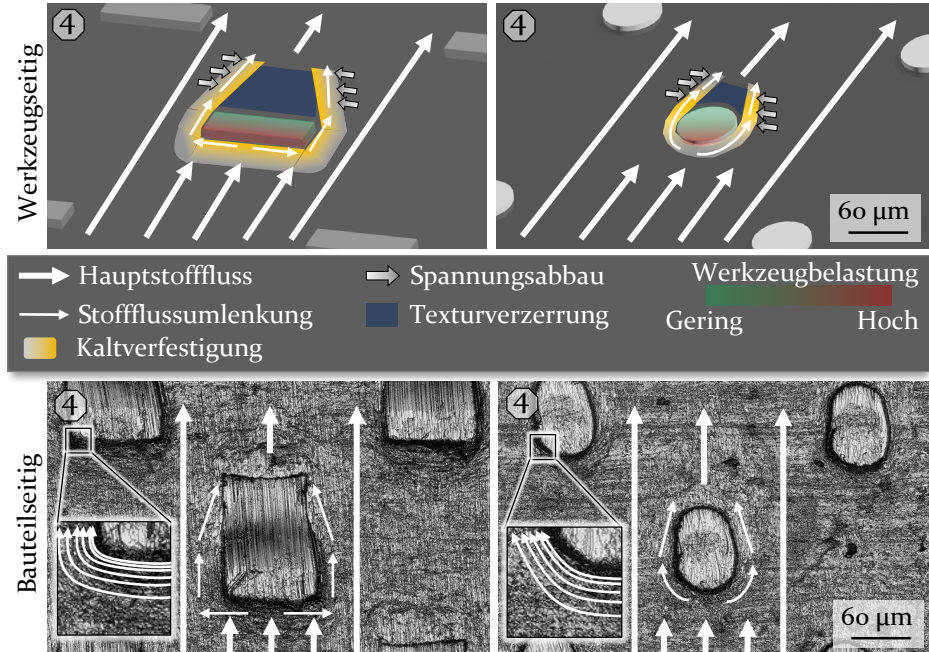


Bild 40: Schematische Wirkweise werkzeugseitiger Mikrotexturen in Abhängigkeit der Geometrie

Effekt der Texturhöhe: Wie Tabelle 6 zu entnehmen ist, wird mit der Texturhöhe ein weiterer Parameter hinsichtlich des Einflusses auf bauteil- und prozesseitige Zielgrößen untersucht. Geprüft werden neben der Referenzhöhe von 5 µm werkzeugseitige Texturhöhen von 10 µm und 15 µm. Diese Variation deckt charakteristische Texturtiefen strukturierter Oberflächen aus der Hydro- und Elastohydrodynamik ab [20]. Die Einflussanalyse erfolgt übereinstimmend mit der Vorgehensweise der vorangegangenen Geometrieuntersuchungen. Bild 41 zeigt den Einfluss der Texturhöhe auf die oberflächennahe radiale Stoffflussgeschwindigkeit. Der radiale Stofffluss wird in allen Messpositionen durch die Erhöhung der Werkzeugtexturen gehemmt. In Position 2 nimmt der Wert von 6,5 mm/s (5 µm) auf 4,5 mm/s (15 µm) ab. Die Reduktion der Geschwindigkeit ist in Position 4 bei einer mittleren Abnahme von 22 % geringer. Die radiale Stoffflusshemmung lässt sich mit der Wirkung der Texturen als Fließbehinderung erklären. Je höher das Hindernis, welches vom Hauptstofffluss passiert werden muss, desto stärker ist die Behinderung des Werkstoffflusses über die Deckfläche der

Textur. Der Werkstoff neigt folglich dazu, seitlich entlang der Textur zu fließen.

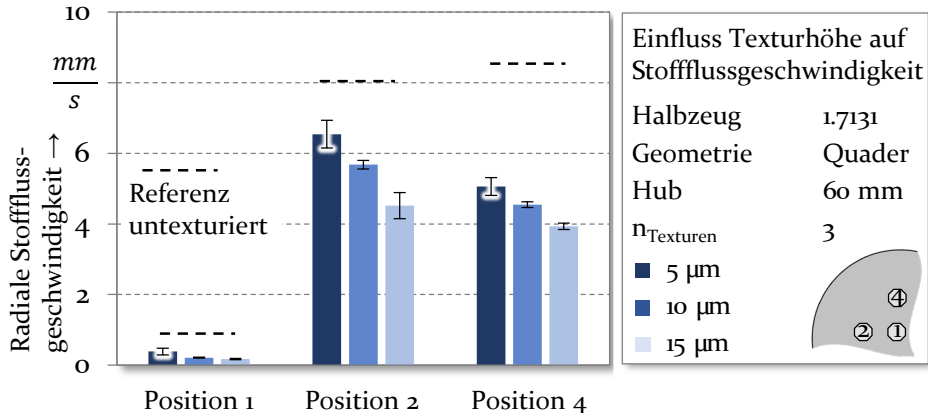


Bild 41: Einfluss der Texturhöhe auf die oberflächennahe Stoffflussgeschwindigkeit

Zudem nimmt die Kaltverfestigung aufgrund der starken Werkstoffumlenkung bei höheren Texturen zu. Dies resultiert in der Abnahme der radialen Stoffflussgeschwindigkeit. Die Wirkweise der Texturhöhe auf den Stofffluss wird zur Verdeutlichung in Bild 42 aufgegriffen und schematisch dargestellt. Im Zentrum des Napfbodens in Position 1 liegt grundlegend eine niedrige radiale Stoffflussgeschwindigkeit vor. In diesem Bereich bewirkt eine erhöhte Texturtiefe eine Werkstoffverdrängung in beide Richtungen entlang der y -Achse. Dies wirkt dem radialen Stofffluss an der dem Zentrum zugewandten Texturseite entgegen, während der Stofffluss an der gegenüberliegenden Texturseite durch den Prägevorgang beschleunigt wird. In Position 4 wird die Werkstoffverdrängung in z -Richtung durch den erhöhten Stofffluss überlagert. Die Texturtiefe von 15 μm sorgt in diesem Zusammenhang für eine verstärkte Werkstoffumlenkung über die Stirnfläche der werkzeugseitigen Textur. In Verbindung mit der hohen Radialverschiebung resultiert eine stark verzerrte Textur, deren Bodenfläche nahezu geradlinig ausläuft (Bild 42). Der Auslaufwinkel der Bodenfläche wird durch die Überlagerung des radialen Stoffflusses mit der axialen Werkstoffverschiebung durch die Abwärtsbewegung des Stempels bestimmt. Für kombinierte Umformprozesse mit Prägeanteilen ist daher die Wechselwirkung des globalen Stoffflusses mit der Werkstoffverdrängung aus dem Prägen zu berücksichtigen. Je höher die werkzeugseitige Textur ist, desto stärker ist die bauteilseitige Verzerrung, weil der axiale Stofffluss einen größeren Hohlraum hinter der Textur zu schließen hat, während der radiale Stoff-

fluss und die Werkstoffverdrängung durch das Prägen auf der dem Hauptstofffluss abgewandten Texturseite in gleicher Richtung wirken und somit die bauteilseitige Texturverzerrung hervorrufen.

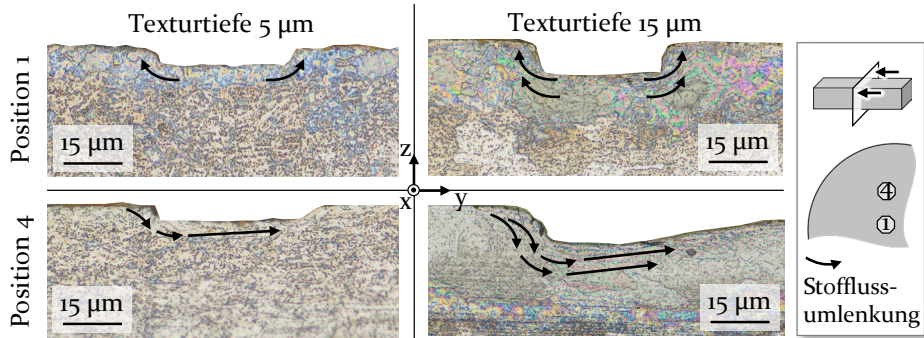


Bild 42: Schliffbild über den Einfluss der Texturtiefe auf die lokale Stoffflussumlenkung

Inwieweit sich die Texturhöhe darüber hinaus auf die Werkzeugbelastungen auswirkt, ist in Bild 43 gezeigt. Die Anteile der Zugbelastung sind von der Texturhöhe weitgehend unbeeinflusst. Im Gegensatz dazu steigen die Vergleichsspannung und die minimale Hauptspannung mit größeren Texturhöhen an.

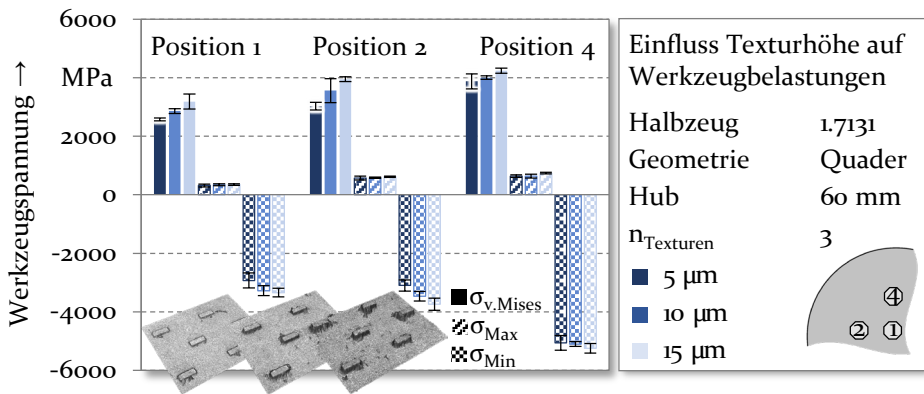


Bild 43: Einfluss der Texturhöhe auf die Werkzeugbelastungen

Besonders ausgeprägt ist der Anstieg in Position 1 und 2. Die Vergleichsspannung steigt bei einer Höhe von 15 μm in Position 1 auf 3180 ± 250 MPa (+24 %) und in Position 2 auf 3950 MPa (+30 %) an. Es werden in diesen Bereichen minimale Hauptspannungen von -3340 MPa (Position 1) und -3730 MPa (Position 2) erreicht. In der klassischen Festigkeitslehre ist die Druckspannung eines Elements ausschließlich durch die aufgebrachte Kraft in Abhängigkeit des Querschnitts bestimmt [164]. Das Aspektverhältnis

nis, welches durch den Quotienten aus Quaderhöhe und dessen Breite berechnet wird, fließt folglich nicht in die idealisierte Berechnung der Druckanteile ein. Ein möglicher Grund für die Zunahme der Werkzeugbelastung bei höheren Texturen liegt daher in der Vergrößerung der Fließbehinderung, welche zu einer Mikrofaltenbildung und einer durch die Kaltverfestigung erschwerten Umlenkung des Stoffflusses führt (Bild 45). Die auf die Texturen wirkende Radialkraft steigt dadurch an und bewirkt höhere Schubspannungen. Das Volumen an kaltverfestigtem Werkstoff vor der Textur nimmt außerdem zu, was in höheren Werkzeugspannungen aufgrund des Fließwiderstands resultiert. Schematisch dargestellt wird dieser Wirkmechanismus in Bild 45. Für Position 4 ist kein eindeutiger Einfluss der Texturhöhe auf die Werkzeugspannungen zu detektieren. Die aus der Texturhöhe resultierenden Spannungen liegen in dieser Position unterhalb des Grundniveaus der Werkzeugbelastungen, die ohnehin durch die Werkstoffumlenkung über die lange Quaderseitenfläche induziert werden. Eine Reduktion der Werkzeugbelastungen sollte folglich primär über die Ausrichtung der Texturen erfolgen, da diese Maßnahme, entsprechend dem Vergleich von Position 2 und 4, stärkeren Einfluss auf die Werkzeugspannungen nimmt als eine Abnahme der Texturhöhe. Liegen die Spannungen für den ausgewählten Werkzeugwerkstoff weit unterhalb verschleißkritischer Werte, können größere Texturhöhen aufgrund lediglich schwach ansteigender Belastungen in Kauf genommen werden. Die abschließende Einflussanalyse der Texturhöhe erfolgt anhand der Untersuchung der Präzision, dargestellt in Bild 44.

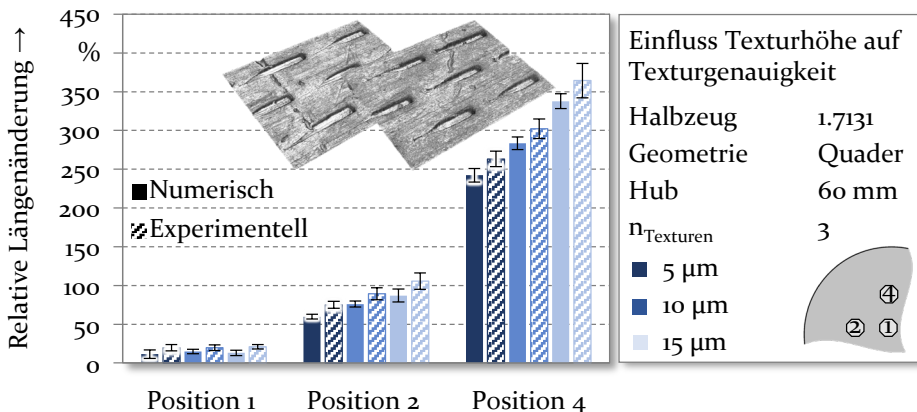


Bild 44: Einfluss der Texturhöhe auf die bauteilseitige Texturmaßhaltigkeit

In Position 1 ist die relative Längenänderung mit maximal 15 % (Höhe 10 µm) vergleichsweise gering, bei lediglich kleinen Abweichungen zwi-

schen den Texturhöhen. Dieses Verhalten wird in den experimentellen Validierungsversuchen bestätigt. Im Gegensatz dazu nimmt die Prägegenauigkeit in den Positionen 2 und 4 mit zunehmender Texturhöhe ab. Experimentell werden Längenänderungen von bis zu 106 % (Position 2) sowie 360 % (Position 4) detektiert. Zurückzuführen ist der Anstieg auf den lokalen Stofffluss in der Nähe der Quaderdeckfläche (Bild 42).

Die übergeordneten Erkenntnisse aus der Analyse der Zielgrößen werden in Bild 45 abgeleitet. Der Winkel der Texturverzerrung α_v ist bestimmt durch die Überlagerung der axialen Werkstoffverschiebung durch die Stempelbewegung und des radialen Stoffflusses durch das Stauchen des Tassenbodens. Daher ist dieser unabhängig von der Texturhöhe. Allerdings wird der Fließweg des Werkstoffs nach dem Passieren der Texturdeckfläche mit steigender Höhe verlängert. Dadurch entstehen hinter der dem Stofffluss abgewandten Seitenfläche der Texturen Hohlräume. Aus diesem Grund führt die Nutzung großer Texturhöhen zu der in Bild 44 gezeigten Reduktion der Prägegenauigkeit.

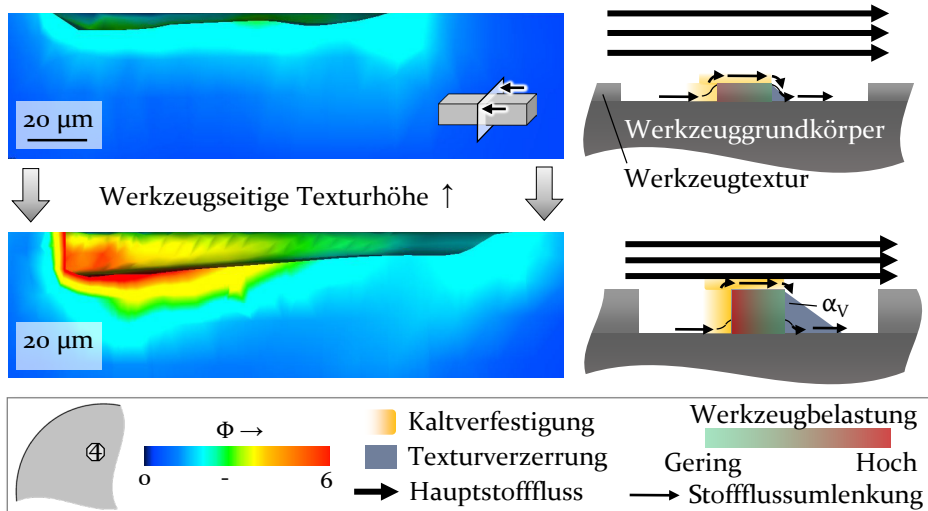


Bild 45: Schematische Wirkweise von Mikrotexturen in Abhängigkeit von deren Höhe

Die Werkstoffanstauung und -umlenkung führt zudem bei Erhöhung der werkzeugseitigen Texturhöhe zu einem Anstieg der Kaltverfestigung. Durch den erhöhten Fließwiderstand und die Schubspannungen steigt die Werkzeugbelastung außerdem an.

Effekt des Flächendeckungsgrads: Neben der Texturhöhe und der Auswahl der Geometrie ist der Abstand zwischen den Texturen entscheidend für die

anwendungsoptimierte Nutzung funktionaler Bauteiloberflächen [20]. Daraus ist die Erforschung der Zielgrößen im Hinblick auf den Einfluss des werkzeugseitigen Flächendeckungsgrads motiviert. In der Literatur sind Anwendungen mikrotexturierter Bauteiloberflächen meist im Bereich eines Flächendeckungsgrads von 5 – 40 % zu finden [20]. Die Variation der texturierten Fläche erfolgt in vier Stufen zwischen der Referenz von 5 % und der Obergrenze von 35 %. Bild 46 zeigt in diesem Kontext die Auswirkungen auf die radiale Stoffflussgeschwindigkeit.

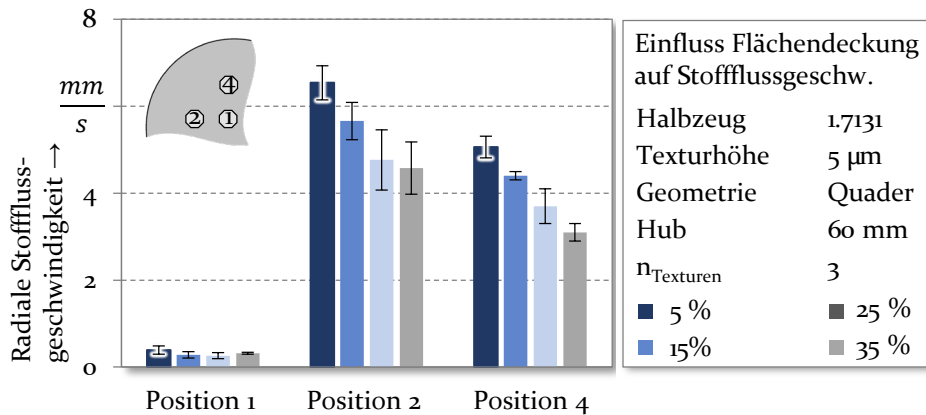


Bild 46: Einfluss des Flächendeckungsgrads auf die oberflächennahe Stoffflussgeschwindigkeit

In radialer Richtung wird der Stofffluss durch die Erhöhung der Texturdichte gehemmt. Dies zeigt sich besonders in den Positionen auf halbem Bodenradius (Position 2 und 4). Die Stoffflussgeschwindigkeit nimmt bei einem Flächendeckungsgrad von 35 % auf 4,6 mm/s (-30 %) beziehungsweise 3,1 mm/s (-39 %) ab. Ursächlich für diese Reduktion ist die Wirkung der einzelnen Texturen als Fließbehinderung, die den Stofffluss umlenken und somit in radialer Richtung abbremst. Der Effekt der Erhöhung des Flächendeckungsgrads kann auf die in Bild 39 vorgestellte Wirkweise der mittleren Verlängerung der Fließwege V_F zurückgeführt werden. Der tangentialer Stoffflussanteil nimmt mit steigendem Flächendeckungsgrad und folglich einer vergrößerten mittleren Verlängerung der Fließwege zu. Es kann daher abgeleitet werden, dass durch die definierte Einstellung des Flächendeckungsgrads die Fließwege und -geschwindigkeiten gesteuert werden können. Im Hinblick auf den Zusammenhang zwischen radialer Stoffflussgeschwindigkeit und der resultierenden Texturgenauigkeit bietet die Konfiguration der Texturdichte das Potenzial zur Prozessverbesserung. Vergleichbar ist dieses Verhalten mit der Herstellung prozessangepasster Werkzeugoberflächen durch Raustrahlen oder Mikroprägen, die mittels

gradiertener Eigenschaften eine gezielte Stoffflusssteuerung ermöglichen [221]. Die Eignung der werkzeugseitigen Mikrotexturierung zur gezielten Einstellung der Reibbedingungen wird in [222] diskutiert. Die Texturierungsdichte wurde in diesem Zusammenhang als maßgeblicher Stellhebel zur Beeinflussung des tribologischen Systems identifiziert [222]. Im Gegensatz zur Texturhöhe (Bild 41) besitzt der Flächendeckungsgrad auch in Position 4 einen entscheidenden Einfluss auf die radiale Stoffflussgeschwindigkeit. Da die Quaderstrukturen an dieser Messstelle mit der langen Seitenfläche in 90° zur Hauptstoffflussrichtung orientiert sind, steigt das Volumen des umzulenkenden Werkstoffs stark an. Dieses Volumen ist in der Untersuchung der Texturhöhe geringer, wodurch der Unterschied in der radialen Stoffflussgeschwindigkeit in Position 4 zu erklären ist. Hier wirkt ebenfalls der Mechanismus der Stoffflussumlenkung in Abhängigkeit der Zunahme der Fließwege. Die Wirkweise des Flächendeckungsgrads kann daher auf weitere Texturgeometrien übertragen werden.

Darüber hinaus wird der Einfluss des Flächendeckungsgrads auf die Werkzeugbelastungen untersucht. Die Ergebnisse für die Vergleichsspannung sowie maximale und minimale Hauptspannung sind in Bild 47 gezeigt.

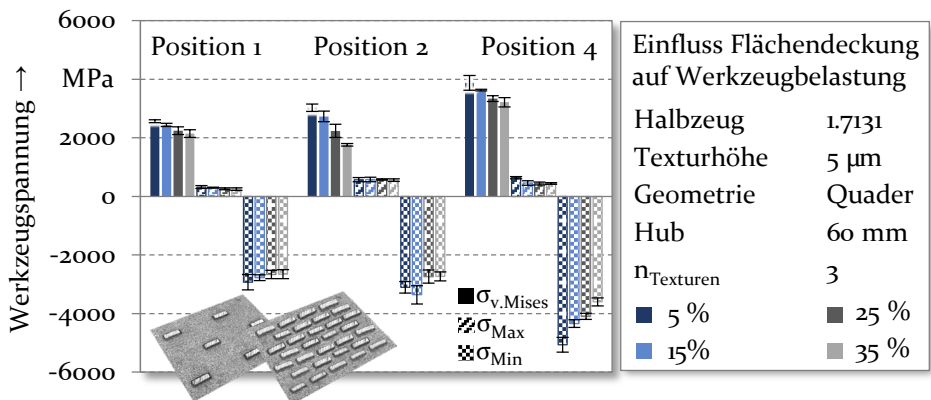


Bild 47: Einfluss des Flächendeckungsgrads auf die Werkzeugbelastungen

In Position 1 ist wegen der überlappenden Standardabweichungen kein eindeutiger Einfluss des Flächendeckungsgrads auf die Werkzeugbelastungen festzustellen. Der Stofffluss im Mikroprägen wird in diesem Bereich nur geringfügig durch den radialen Materialfluss im Stauchen des Napfbodens überlagert. Für Umformprozesse mit geringem globalem Stofffluss verfügen Änderungen des Flächendeckungsgrads daher über keinen signifikanten Einfluss auf die Werkzeugbelastungen. In Position 2 und 4 bewirkt der

erhöhte Flächendeckungsgrad allerdings eine Abnahme der Werkzeugspannungen. Für diese Auswertebereiche nehmen die Druckanteile auf -2730 MPa (-13 %), beziehungsweise -3600 MPa (-28 %) ab. Ein Erklärungsansatz liegt in der allgemeinen Reduktion der oberflächennahen Stoffflussgeschwindigkeit (Bild 46). Niedrige Fließgeschwindigkeiten wirken sich positiv auf die Werkzeugbelastungen und den Verschleiß aus [219]. Folglich kann die Lebensdauer texturierter Werkzeuge durch die Erhöhung des Flächendeckungsgrads verlängert werden. Zudem wird die Fertigungsdauer der Werkzeuge im Mikroerodieren, durch das reduzierte Volumen des zu entfernenden Materials, verringert. Die Wirtschaftlichkeit der Werkzeugherstellung wird folglich ebenfalls begünstigt.

Die Voraussetzungen zur ganzheitlichen Untersuchung des Einflusses des Flächendeckungsgrads auf die Texturgenauigkeit sind darüber hinaus nicht gegeben. Aufgrund der stoffflussbedingten relativen Längenänderung entsteht bei verringertem Texturabstand eine Verbindung der einzelnen Vertiefungen. Eine getrennte Zuordnung der Prägungen und resultierend daraus die zielgerichtete Analyse sind aus diesem Grund nicht möglich.

6.2 Prozess- und halbzeugseitige Einflussgrößen

Abschnitt 6.1 stellt ein grundlegendes Prozessverständnis mit abgeleiteten Wirkmechanismen erhabener Werkzeugoberflächen zur einstufigen Herstellung strukturierter Oberflächen unter variierenden Texturparametern bereit. Ergänzend wird im folgenden Abschnitt der Einfluss der Prozesskraft auf die Zielgrößen analysiert.

Effekt der Prozesskraft: Die Untersuchung erfolgt anhand der Referenztexturvariante mit dem Einsatzstahl 1.7131 (Bild 48). Mit steigender Prozesskraft nimmt die radiale Stoffflussgeschwindigkeit in allen Messpositionen zu. Während die Kraftvariante von 600 kN in Position 2 einen Wert von 3,7 mm/s liefert, liegt dieser bei 1000 kN mit 6,5 mm/s 76 % darüber. Die untersuchten Zwischenstufen der systematischen Untersuchung deuten auf einen linearen Zusammenhang hin. Der Grund für den ansteigenden Verlauf liegt in der Erhöhung des globalen radialen Stoffflusses. Bedingt durch die Krafterhöhung steigt der Stempelweg an. Ähnlich dem Napf-Rückwärts-Fließpressen führt die Verringerung der Napfbodendicke [164] wegen der verlängerten Fließwege zu höheren radialen Stoffflussgeschwindigkeiten. In Position 4 resultieren für alle Kraftstufen geringere Stoffflussgeschwindigkeiten. Obwohl der radiale Stofffluss aufgrund des anisotropen Fließverhaltens für untexturierte Werkzeugoberflächen in dieser Position über den Werten der Position 2 liegt, ist das Verhältnis für texturierte

Oberflächen umgekehrt. Zurückzuführen ist dies auf die unterschiedliche Orientierung der Quadertexturen, relativ zur Hauptstoffflussrichtung.

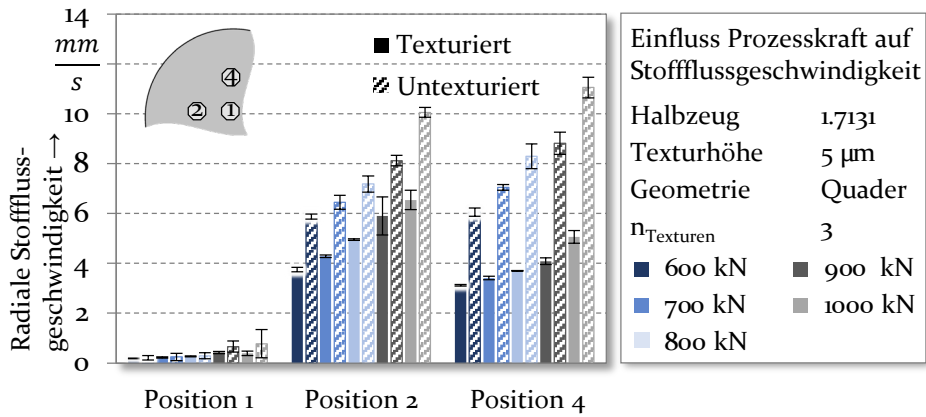


Bild 48: Einfluss der Prozesskraft auf die oberflächennahe Stoffflussgeschwindigkeit

Die Stoffflusshemmung aufgrund der starken Fließbehinderung in Position 4 überlagert die initial erhöhte Geschwindigkeit, die aus dem Fließverhalten in Querrichtung zur Walzrichtung resultiert. Die radiale Stoffflussgeschwindigkeit in Position 4 sowie die entsprechenden Schlibbilder der Quadertexturen in Abhängigkeit der maximalen Prozesskraft sind in Bild 49 gezeigt.

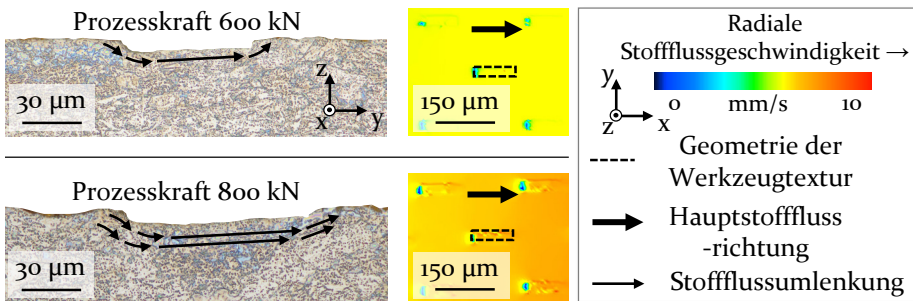


Bild 49: Einfluss der Prozesskraft auf die Texturgeometrie sowie die Radialgeschwindigkeit

Im untexturierten Bereich liegt die Stoffflussgeschwindigkeit für eine Prozesskraft von 600 kN bei 6,0 mm/s, während diese für 800 kN auf 8,3 mm/s ansteigt. Die werkzeugseitige Textur bewirkt, wie in Abschnitt 6.1 nachgewiesen, eine Umlenkung des Stoffflusses. Da der Stofffluss mit steigender Prozesskraft überwiegend durch Radialanteile (8,3 mm/s) und weniger durch Axialanteile (5 mm/s) bestimmt ist, wird der Hohlraum hinter der Textur verzögert geschlossen. Für Prozesse mit hohen axialen Stoffflussan-

teilen ist daher eine geringe Texturverzerrung durch das Füllen des Hohlraums hinter der Textur zu erwarten. Darüber hinaus resultiert für Prozesse mit vornehmlich radialen Stofffluss die dargestellte Texturverzerrung in Hauptstoffflussrichtung, welche für höhere Prozesskräfte weiter ansteigt.

Der Einfluss der Prozesskraft auf die Spannungen von texturierten Werkzeugoberflächen ist in Bild 50 dargestellt. Aufgrund der erwarteten linearen Zusammenhänge ist die Analyse auf die Prozesskräfte 600 kN, 800 kN und 1000 kN beschränkt.

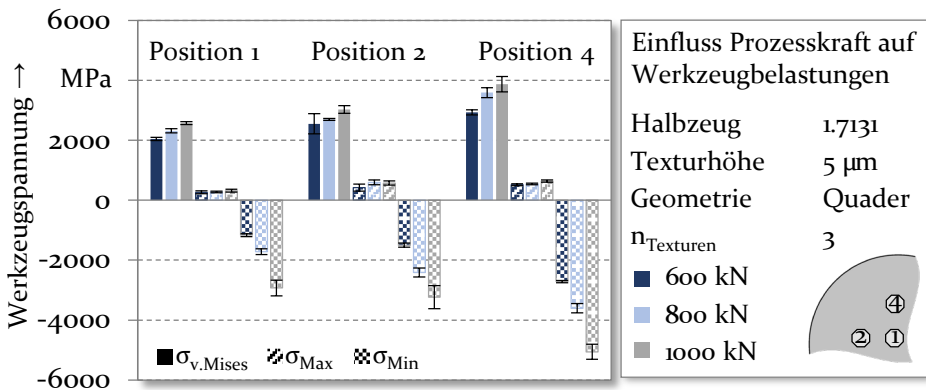


Bild 50: Einfluss der Prozesskraft auf die Werkzeugbelastungen

Die Vergleichsspannung und die minimale Hauptspannung steigen im Napfzentrum (Position 1), auf halbem Radius für in Hauptstoffflussrichtung orientierte Texturen (Position 4) und in 90° orientierte Texturen (Position 4) mit größeren Prozesskräften sukzessive an. In Position 1 liegt die Vergleichsspannung für 600 kN bei 2050 ± 50 MPa und steigt für 1000 kN auf 2570 ± 52 MPa (+25 %) an. Die Vergleichsspannungen in Position 4 liegen jeweils darüber bei 2940 ± 80 MPa (600 kN) beziehungsweise 3880 ± 250 MPa (1000 kN). Durch die Reduktion der Prozesskraft auf 600 kN können darüber hinaus die Druckspannungen reduziert werden. Der größte Einfluss wird in Position 4 festgestellt. Die minimale Hauptspannung liegt dort bei -2710 ± 90 MPa, was einer Abnahme von 46 % im Vergleich zur Prozesskraft von 1000 kN entspricht. Diese Spannungsreduktion stimmt im Allgemeinen mit Erkenntnissen zur Untersuchung der Werkzeugbelastung in Prozessen zur Herstellung makroskopischer Funktionselemente überein [204]. Abfallende Kontaktnormaldrücke sind in beiden Prozessen für die niedrigeren Spannungen, besonders in den Druckanteilen, verantwortlich. Ein weiterer Erklärungsansatz liegt in der Reduktion

der Fließwege, die sich zunächst positiv auf die Stoffflussgeschwindigkeit auswirkt und folglich auch die Werkzeugbelastung herabsenkt [219].

Des Weiteren ist die Einflussanalyse der Prozesskraft auf die Texturgenauigkeit in Bild 51 gezeigt. In Übereinstimmung mit der vorangegangenen Vorgehensweise erfolgt die Verifizierung der numerischen Ergebnisse anhand experimenteller Umformversuche. Die Ergebnisvalidierung wird auf drei Stufen bei einer Prozesskraft von 600 kN, 800 kN und 1000 kN durchgeführt.

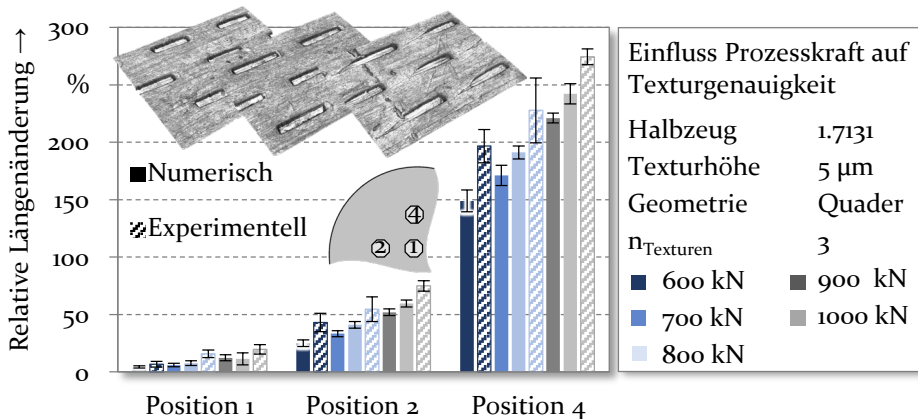


Bild 51: Einfluss der Prozesskraft auf die bauteilseitige Texturmaßhaltigkeit

Die beste Prägegenauigkeit wird bei einer maximalen Prozesskraft von 600 kN im Bodenzentrum erzielt. Die durch den lokalen Stofffluss induzierte Längenänderung beträgt in Position 1 lediglich $4 \pm 1\%$. Der Anstieg der Prozesskraft auf 1000 kN bewirkt eine Abnahme der Prägegenauigkeit. Numerisch wird eine Längenänderung von $13 \pm 5\%$ festgestellt. Die Simulation unterschätzt folglich, vergleichbar zu den Ergebnissen aus Bild 37, die Texturvergrößerung aus den Realversuchen ($20 \pm 5\%$). Der Grund für die zunehmende Längenänderung bei steigenden Prozesskräften liegt in der globalen Zunahme des radialen Stoffflusses (Bild 49). In der untersuchten Prozesskombination führen hohe Prozesskräfte für alle Messpositionen zur Erzeugung eines vollflächigen Kontakts des ursprünglich konvexen Napfbodens mit dem Tiefziehstempel und dem Prägezyylinder. Liegt dieser vollständig vor, so wird durch die Stauchung des Bodenbereichs ein Napfrückwärtsfließpressen induziert. Die daraus resultierende Erhöhung der Fließgeschwindigkeit sorgt für die Vergrößerung des Hohlraums hinter der der Hauptstoffflussrichtung abgewandten Texturseitenfläche. Der zusam-

menfassende schematische Wirkmechanismus der Prozesskraft im Hinblick auf Stofffluss, Werkzeugbeanspruchung und Texturverlängerung ist in Bild 52 dargestellt.

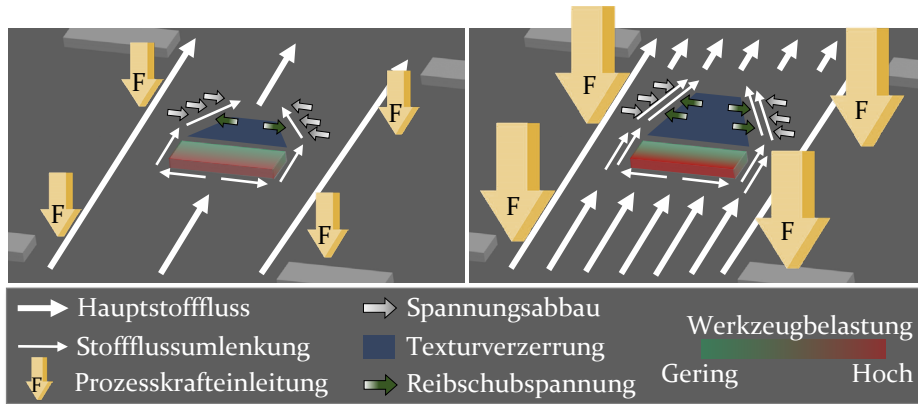


Bild 52: Schematische Wirkweise von Mikrotexturen in Abhängigkeit der Prozesskraft

Die Fließgeschwindigkeit des Hauptstoffflusses nimmt mit steigender Kraft wegen der induzierten Stauchung des Tassenbodens zu. Oberflächennah erfolgt die Umlenkung durch die Fließbehinderung seitlich um die Textur herum bei entsprechend höheren Geschwindigkeiten. Dies sorgt für einen größeren Widerstand des Materials gegen den Spannungsabbau durch plastisches Fließen in den Hohlraum. Die hohe Fließgeschwindigkeit hemmt folglich den tangentialen Stofffluss hinter der Textur. Darüber hinaus führen hohe Prozesskräfte zu einem Anstieg der Kontaktnormalspannungen σ_N [192]. Aus diesem Grund ist nach dem Reibgesetz von Shaw [223] in experimentellen Untersuchungen eine Erhöhung der Reibschubspannung anzunehmen. Diese wirkt entgegen dem Materialfluss, der zur Schließung des Hohlrums hinter der Textur führt. Dadurch wird die Vergrößerung der Texturverzerrung zusätzlich begünstigt. Der Anstieg der Werkzeugbelastungen resultiert zum einen aus den ansteigenden Kontakt-drücken, die von der axialen Krafteinleitung durch die Abwärtsbewegung des Stempels hervorgerufen werden. Zum anderen ist der Spannungszustand durch den Anstieg der Fließgeschwindigkeit bestimmt, wodurch größere Scherkräfte auf die Anbindungszone der Texturen wirken. Im Vergleich zu unstrukturierten Werkzeugoberflächen besitzen strukturierte Werkzeuge im Bereich der Texturen eine geringe Steifigkeit. Elastische Dehnungen bewirken daher auf der dem Hauptstofffluss zugewandten Texturseite Druckspannungen, während auf der Rückseite und im Bodenbereich dahinter Zugspannungen entstehen. Im Allgemeinen sollte die Prozesskraft daher soweit reduziert werden, dass gerade noch ein vollflächiger

Kontakt zwischen Napfboden und texturiertem Werkzeug vorliegt und Toleranzen der Ebenheit des Grundkörpers eingehalten werden. Die benötigte Prozesskraft F_{krit} zur Behebung der Schalenbildung im Napfboden darf nicht unterschritten werden. Aufgrund der Abhängigkeit der Schalenbildung von halbzeug- und prozessseitigen Parametern ist F_{krit} in numerischen oder experimentellen Untersuchungen zu ermitteln.

Neben der Erforschung textur- und prozessseitiger Einflussgrößen werden Erkenntnisse über die Wirkweisen unterschiedlicher mechanischer Werkstoffigenschaften im kombinierten Mikroprägen dargelegt und diskutiert. Darüber hinaus wird die Übertragbarkeit der in Abschnitt 6.1 identifizierten Wirkmechanismen belegt.

Effekt des Werkstoffs sowie Nachweis der Übertragbarkeit: In Abschnitt 4.1.1 wurde die Bedeutung der Oberflächentexturierung in verschiedenen Technologiefeldern dargelegt. Je nach Anwendungsbereich kommen vor diesem Hintergrund gezielt ausgewählte Werkstoffklassen zum Einsatz. Um zukünftig die Nutzung einstufiger Umformprozesse zur Herstellung mikrotexturierter Bauteile zu ermöglichen, soll durch die Prüfung der Übertragbarkeit auf weitere Werkstoffe ein breites Prozessverständnis bereitgestellt werden. Im Hinblick auf Komponenten aus der Medizintechnik, wie zum Beispiel chirurgische Instrumente oder Implantate, wird der austenitische Edelstahl 1.4301 untersucht. Mögliche Anwendungsgebiete der zudem erforschten Messinglegierung 2.0321 sind die Produktion elektrischer Kontaktbauteile und Steckverbindern. Die systematische Einflussanalyse erfolgt anhand der identischen Zielgrößen aus Abschnitt 6.1 und 6.2. In diesem Zusammenhang wird die Übertragbarkeit des identifizierten Wirkmechanismus der Stoffflussumlenkung erhabener Texturen in Abhängigkeit der mittleren Verlängerung der Fließwege V_F sowie des mittleren Umlenkungswinkels α_U geprüft. Die Auswirkungen des Halbzeugwerkstoffs auf die radiale Stoffflussgeschwindigkeit sind in Bild 53 gezeigt. Da eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen ist, sind alle Varianten um die Stoffflussgeschwindigkeiten im untexturierten Zustand ergänzt. Die Versuche werden weggesteuert durchgeführt und experimentell mittels übereinstimmender Restbodendicken vereinheitlicht.

Ein signifikanter Einfluss des Werkstoffs auf die radiale Stoffflussgeschwindigkeit resultiert in Position 2 und 4. Die höchste Geschwindigkeit wird jeweils für die Messinglegierung 2.0321 erzielt. In Position 2 liegt diese mit einem Wert von $7,8 \pm 0,5$ mm/s 20 % höher als die Referenzvariante des Einsatzstahls 1.7131. Ursächlich für dieses Verhalten sind die niedrigere An-

fangsfließspannung k_{f_0} des Messings sowie der geringere Verfestigungsexponent n (Bild 4). Der reduzierte Umformwiderstand ist der Grund dafür, dass die radiale Stoffflussgeschwindigkeit im untexturierten Vergleichsversuch (Bild 53) ansteigt. Darauf basierend steigt die Stoffflussgeschwindigkeit auch für texturierte Werkzeugoberflächen an.

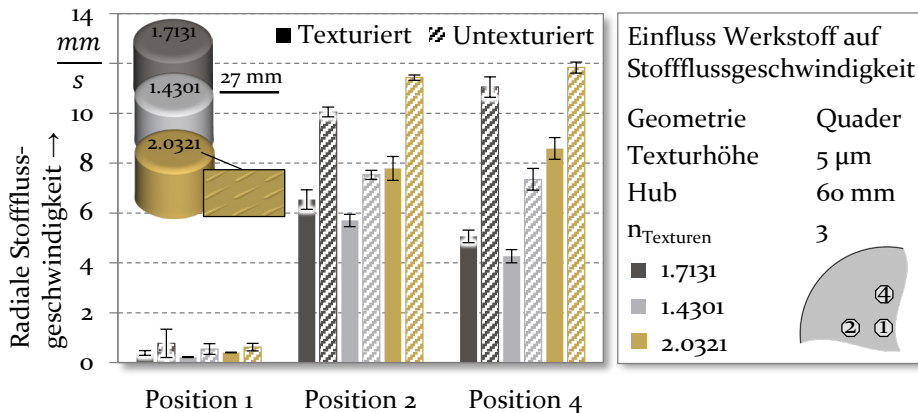


Bild 53: Einfluss des Halbzeugwerkstoffs auf die oberflächennahe Stoffflussgeschwindigkeit

Darüber hinaus wird der Stofffluss in Position 4 durch die Werkzeugtexturen für alle Werkstoffe stärker gehemmt als in Position 2. Zurückzuführen ist dies auf die Orientierung der Quadertexturen relativ zum radialen Stofffluss. Die Stoffflussumlenkung über die lange Quaderseite bewirkt für die untersuchten Werkstoffe eine stärkere Reduktion der Geschwindigkeit. Der in Abschnitt 6.1 identifizierte Wirkmechanismus der Stoffflussumlenkung in Abhängigkeit der mittleren Verlängerung der Fließwege V_F ist daher allgemeingültig für verschiedene metallische Werkstoffklassen gültig.

Die Verhältnisse aus der untexturierten und der texturierten Stoffflussgeschwindigkeit sind zudem für die beiden Werkstoffe 1.7131 und 2.0321 näherungsweise direkt proportional. Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass die Stoffflusshemmung durch werkzeugseitige Texturen in Abhängigkeit des Werkstoffs bestimmt werden kann und keine weiteren Wechselwirkungen vorliegen. Bestätigt wird diese Annahme durch die Stoffflussanalyse des Edelstahl 1.4301, der eine durch die Mikrotextrurierung induzierte Stoffflussgeschwindigkeitshemmung von $28 \pm 3 \%$ aufweist. Für den Werkstoff 1.7131 liegt dieser Wert bei $30 \pm 4 \%$ und für 2.0321 bei $29 \pm 4 \%$. Der Edelstahl bewirkt darüber hinaus in allen Messbereichen die geringste Stoffflussgeschwindigkeit. Der Grund für dieses Werkstoffverhalten ist der größere Verfestigungsexponent n , der in Bereichen großer Umformgrade in einer hohen Fließspannung k_f resultiert. Auf Basis dieser Erkenntnisse

lassen sich die geometrischen Ausprägungen der Texturen der Werkstoffe 1.4301 und 2.0321 in Bild 54 erklären.

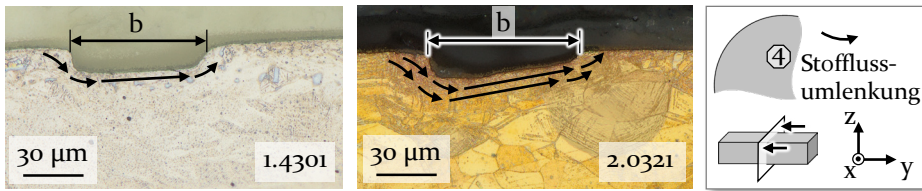


Bild 54: Schlichtbilder der Werkstoffe 1.4301 und 2.0321 im Hinblick auf die Texturbreite in Messposition 4

An der linken Texturseite erfolgt die Stoffflussumlenkung für beide Werkstoffe in vergleichbarem Ausmaß. Der verstärkte radiale Stofffluss bewirkt allerdings im Falle des Messingwerkstoffs eine ausgeprägtere Texturverzerrung. Grundlegend steht die erhöhte radiale Stoffflussgeschwindigkeit, vergleichbar mit den Ergebnissen aus Abschnitt 6.1, der Texturmaßhaltigkeit entgegen. Neben den Auswirkungen auf die radiale Stoffflussgeschwindigkeit wird die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus Abschnitt 6.1 auf die Belastungen des Prägewerkzeugs überprüft. Bild 55 zeigt die Werkzeugspannungen in Abhängigkeit der Halbzeugwerkstoffe 1.7131, 1.4301 und 2.0321.

Die Vergleichsspannungen $\sigma_{v.Mises}$ beim Einsatz des Edelstahl liegen in allen Messpositionen auf ähnlichem Niveau wie jene des Einsatzstahls. Lediglich eine schwache Tendenz erhöhter Werte für den Werkstoff 1.4301 ist zu erkennen. So bewirkt der Edelstahl in Position 2 Vergleichsspannungen von 3370 ± 330 MPa und liegt damit im Mittel 300 MPa über den Werten des Einsatzstahls. Der Grund liegt in der ausgeprägteren Werkstoffverfestigung des 1.7131 bei identischen Umformgraden.

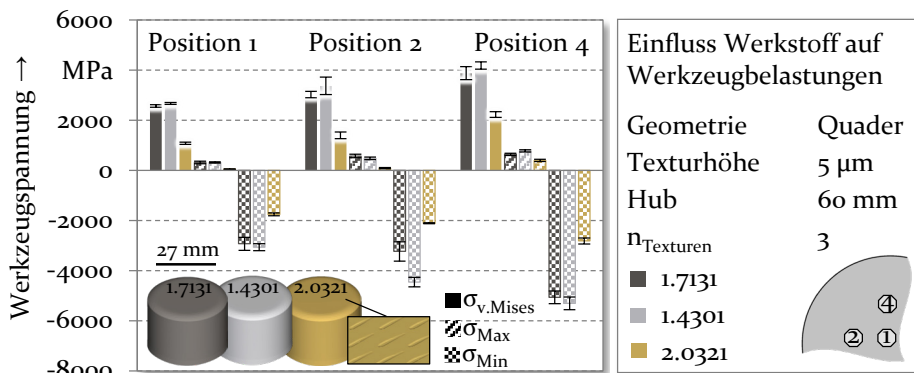


Bild 55: Einfluss des Halbzeugwerkstoffs auf die Werkzeugbelastungen

Ab einem Umformgrad ϕ von 0,14 übersteigt die Fließspannung des Edelstahl zur weiteren Werkstoffplastifizierung die Werte des 1.7131 (Bild 4). Dieses Verhalten beeinflusst die Werkzeugbeanspruchung, weil zum Prozessende im Bereich der Texturen lokal Umformgrade von über 2,5 resultieren. Die niedrige Anfangsfließspannung $k_{f,0}$ der Messinglegierung von 303 MPa erklärt die Reduktion der Werkzeugbelastung für diesen Halbzeugwerkstoff. Die Druckanteile können im Vergleich zum Referenzwerkstoff um bis zu 35 % (Position 2) und 44 % (Position 4) reduziert werden.

Abschließend gilt es zu prüfen, inwieweit die Prägegenauigkeit durch den Halbzeugwerkstoff beeinflusst wird. Vor diesem Hintergrund sind die relativen Längenänderungen der drei Werkstoffe in Bild 56 gezeigt. Die Validierung der Ergebnisse erfolgt für den Edelstahl und die Messinglegierung anhand experimenteller Umformversuche.

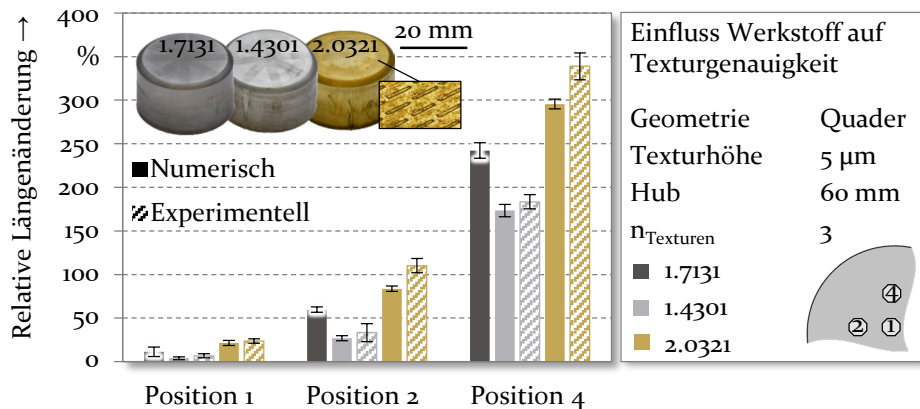


Bild 56: Einfluss des Halbzeugwerkstoffs auf die bauteilseitige Texturmaßhaltigkeit

Die Prägegenauigkeit folgt den Tendenzen aus der Untersuchung der Stoffflussgeschwindigkeit (Bild 53). Eine niedrige Werkstofffestigkeit wirkt sich negativ die Maßhaltigkeit der Texturen aus. In Position 4 resultiert für den Messing 2.0321 eine Längenänderung von 290 ± 6 % (experimentell 330 ± 13 %). Diese liegt für den Edelstahlwerkstoff 1.4301 bei 173 ± 7 % (experimentell 183 ± 8 %). Abweichungen zwischen numerischen und experimentellen Ergebniswerten sind mit der Überschätzung der Reibspannung im Reibfaktormodell zu erklären [192].

Der Mechanismus, welcher für das kombinierte Mikroprägen mit verschiedenen Werkstoffen wirkt, wird in Bild 57 nachgewiesen. In diesem Zusammenhang wird numerisch der Einfluss des Verhältnisses der Sättigungsfließspannung $k_{f,s}$ zur Anfangsfließspannung $k_{f,0}$ auf die tangentielle Stoffflussgeschwindigkeit untersucht. Das Verhältnis $k_{f,s}/k_{f,0}$ beschreibt das

Verfestigungspotenzial eines Werkstoffs und dient im Rahmen dieser Arbeit der Identifikation allgemeingültiger Erkenntnisse. Die Variation erfolgt systematisch anhand der Sättigungsfließspannung $k_{f,s}$, während $k_{f,o}$ konstant gehalten wird. Die untersuchten tangentialen Stoffflussanteile sind für die Schließung des Hohlraums hinter den Texturen verantwortlich und begünstigen somit unmittelbar die Präzision.

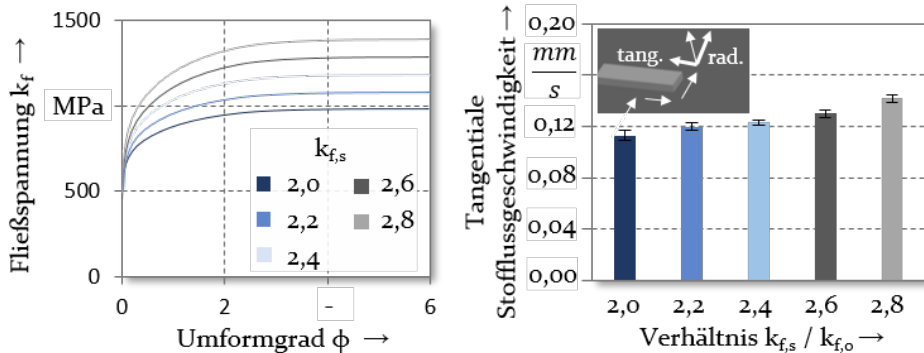


Bild 57: Systematische Variation der maximalen Fließspannung zur Identifikation der Wirkweise auf die tangentielle Stoffflussgeschwindigkeit

Es wird nachgewiesen, dass mit größerem Verhältnis $k_{f,s}/k_{f,o}$ die tangentielle Stoffflussgeschwindigkeit leicht zunimmt. Für ein Verhältnis von 1,92 liegt die Tangentialgeschwindigkeit im Mittel bei 0,11 mm/s. Diese steigt bei einem Verhältnis von 2,70 auf 0,14 mm/s an. Ein Grund für dieses Verhalten ist die Wirkung kaltverfestigter Bereiche als Fließbehinderung. Mit steigender maximaler Fließspannung resultieren neben den Texturen höhere Verfestigungen. Dadurch wird der radiale Stofffluss gehemmt, was wiederum den tangentialen Stofffluss begünstigt. Der verstärkte tangentielle Stoffflussanteil bewirkt die Füllung des Hohlraums hinter der Textur und verbessert die Maßhaltigkeit der geprägten Strukturen.

Der Wirkmechanismus, der zu den Unterschieden in der Präzision führt, ist zusammenfassend auf das variierende Verfestigungspotenzial $k_{f,s}/k_{f,o}$ der Werkstoffe zurückzuführen (Bild 57). Mit steigendem Umformgrad resultieren für Werkstoffe mit höherem Verfestigungspotenzial größere Fließspannungen. Das hohe Verfestigungspotenzial bewirkt in diesem Zusammenhang eine starke Kaltverfestigung des Werkstoffs vor und besonders neben der werkzeugseitigen Textur. Das Füllen des gebildeten Hohlraums wird durch die Verfestigung begünstigt, da verfestigte Bereiche als radiale Fließbehinderung wirken und somit den tangentialen Stofffluss verstärken. Da wegen der starken Stoffflussumlenkung ein schneller Anstieg des Umformgrads resultiert, wirkt sich das Verfestigungspotenzial

stärker auf die Texturausformung und die Werkzeugbelastungen aus, als Unterschiede in der Anfangsfließspannung.

6.3 Bewertung der Einflussgrößen

Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse aus den Abschnitten 6.1 und 6.2 wird eine Bewertung der Prozesseinflussgrößen durchgeführt. Zur Bereitstellung eines grundlegenden Prozessverständnisses wurden aus aktuellen Forschungs- und Anwendungsgebieten mikrotexturierter Oberflächen (Tabelle 1 und Abschnitt 2.2.3) relevante textur-, prozess- und halbzeugseitige Einflussfaktoren identifiziert und auf mehreren Stufen variiert.

Texturseitig







Werkzeugseitige Mikrotexturen wirken in Umformprozessen als Fließbehinderung. Entscheidend für die Beeinflussung prozess- und bauteilseitiger Ergebnisgrößen ist der Wirkmechanismus der Stoffflussumlenkung. In diesem Zusammenhang wurden der mittlere Umlenkungswinkel α_U sowie die mittlere Verlängerung der Fließwege V_F als übertragbare Wirkweisen identifiziert. Eine Erhöhung des Eckradius der werkzeugseitigen Mikrotexturen bewirkt auf Grundlage dieser Mechanismen eine Verringerung der Fließbehinderung. Die radiale Stoffflussgeschwindigkeit nimmt durch den Anstieg von α_U und der Reduktion von d_U leicht zu (Bild 34) und die Werkzeugbelastungen werden tendenziell positiv beeinflusst (Bild 36). Besonders die Druckanteile der Werkzeugspannungen nehmen aufgrund der geringeren lokalen Kaltverfestigung mit der Erhöhung des Eckradius ab. Begrenzt wird die Abrundung der werkzeugseitigen Texturen durch die im Bauteileinsatz geforderten Eigenschaften. Zur verbesserten Verankerung von Hüftpflanzen werden zum Beispiel Quaderstrukturen benötigt [31], während zur Reibungsreduktion bei Kolbenringe Zylindertexturen vorteilhaft sind [24]. Anwendungsorientierte Texturgeometrien können daher nicht immer für die Umformung angepasst werden.

Die Erhöhung der Werkzeugtexturen bewirkt aufgrund der gesteigerten Werkstoffumlenkung und -verfestigung eine Reduktion der radialen Stoffflussgeschwindigkeit (Bild 41) sowie folglich höhere Werkzeugbeanspruchungen. Die längeren Fließwege sind darüber hinaus für die stärkere Geometrieverzerrung verantwortlich (Bild 44). Hinsichtlich des Verschleißverhaltens und der Texturmaßhaltigkeit sind daher flache Texturen zu empfehlen. Für die große Mehrheit texturierter Oberflächen werden Geometrien mit einer Tiefe bis maximal $10\ \mu\text{m}$ verwendet [20]. Aus diesem Grund sind die Herausforderungen, die sich aus höheren Texturen ergeben

(Bild 45), aufgrund der geringen Nachfrage nach solchen Strukturen als wenig kritisch einzustufen. In Abschnitt 8.2. erfolgt zur Ermittlung der Prozessgrenzen die Verschleißanalyse von Strukturen mit einer Höhe von bis zu 30 µm.

Eine Erhöhung des Flächendeckungsgrads bewirkt aufgrund der gestiegenen Fließbehinderung eine Reduktion der Stoffflussgeschwindigkeit (Bild 46). Dadurch können zwar Spannungen in den Werkzeugen verringert werden (Bild 47), die Texturgenauigkeit nimmt aber wegen der eng zusammenstehenden Strukturen ebenfalls ab. Wird der radiale Stofffluss im Bauteilboden durch geeignete Maßnahmen (Kapitel 1) reduziert, ist eine Erhöhung des Flächendeckungsgrads aufgrund der niedrigeren Werkzeugbelastungen positiv zu bewerten.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Forschungserkenntnisse zum Prozessverständnis

Parameter	Ausprägung	Stoffflussgeschwindigkeit			Werkzeugbeanspruchung			Texturgenauigkeit		
		1	2	4	1	2	4	1	2	4
Messposition										
Texturverrundungen	 ↑	⇒	⇒	↑	⇒	⇒	↓	⇒	↓	↑
Texturhöhe	 ↑	↓	↓	↓	↑	↑	⇒	⇒	↓	↓
Flächendeckungsgrad	 ↑	⇒	↓	↓	⇒	↓	↓	↓	↓	↓
Prozesskraft	 ↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Werkstofffestigkeit	 ↑	⇒	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑

Wirkung		Bewertung	
Anstieg ↑	Abnahme ↓	Positiv ■	Negativ ■

Prozesseitig

Im Rahmen der prozesseitigen Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass eine niedrige Prozesskraft aufgrund der höheren Restbodendicke die Stoffflussgeschwindigkeit reduziert (Bild 48). Positive Effekte werden darüber hinaus im Hinblick auf die Werkzeugbeanspruchung (Bild 50) und die Texturgenauigkeit (Bild 51) festgestellt. Ursächlich ist die reduzierte Stoffflussgeschwindigkeit bei niedrigeren Prozesskräften (Bild 52). Der flächige Kontakt zwischen dem Napfboden und dem texturierten Werkzeug

erfordert allerdings, in Abhängigkeit werkzeug- und werkstückseitiger Parameter, das Aufbringen einer kritischen Prozesskraft F_{krit} . Wird diese unterschritten, resultiert wegen der lokal variierenden Kontaktzustände ein inhomogenes Prägemuster (Bild 25 b). Für den untersuchten Referenzprozess liegt F_{krit} zur Herstellung des flächigen Kontakts bei 650 kN. Eine Prozesskraft von 600 kN bewirkt allerdings in Messposition 2 bereits eine Geometrieverlängerung um $43 \pm 8 \%$. Die Prozessgrenze der Texturverzerrung ist daher maßgeblich durch die notwendige Kraft zur Ausformung des Grundkörpers bestimmt.

Halbzeugseitig und Übertragbarkeit

Im Rahmen der Untersuchungen wurde die Übertragbarkeit des Wirkmechanismus der Stoffflussumlenkung, bestimmt durch die mittlere Verlängerung der Fließwege V_F auf weitere Materialklassen wie Edelstähle und Messingwerkstoffe nachgewiesen. Die Verwendung von Werkstoffen hoher Festigkeit in kombinierten Umformprozessen mit texturierten Werkzeugen wirkt sich reduzierend auf die Stoffflussgeschwindigkeit aus (Bild 53). Aufgrund der steigenden Anfangsfließspannung wird die Werkzeugbeanspruchung darüber hinaus negativ beeinflusst (Bild 55).

Der Wirkmechanismus, welcher bei einem Anstieg der Werkstofffestigkeit zu einer Erhöhung der Texturmaßhaltigkeit führt, ist durch das Verhältnis $k_{f,s}/k_{f,o}$ bestimmt. Die gesteigerte Kaltverfestigung wirkt bei großen Verhältnissen neben und hinter den Texturen als radiale Fließbehinderung. Der dadurch begünstigte tangentielle Stofffluss bewirkt die Füllung des Hohlraums hinter der Textur und verbessert somit die Texturmaßhaltigkeit. In Abhängigkeit der Anforderungen an das Entwicklungsvorhaben kann folglich die Werkzeugbeanspruchung durch die Umformung von Werkstoffen geringer Festigkeit reduziert, oder die Texturmaßhaltigkeit durch höherfeste Materialien verbessert werden. Die Auswahl des Werkstoffs hängt darüber hinaus allerdings stark von weiteren Faktoren bezüglich der Randbedingungen des Bauteileinsatzes ab [20].

7 Erarbeitung von Methoden zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen

In Abschnitt 5.3 wurden Herausforderungen und Formgebungsgrenzen des kombinierten Texturierens napfförmiger Bauteile dargelegt. Diese limitieren demnach die Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens. Das in Kapitel 6 erarbeitete Prozessverständnis bildet die Grundlage der Identifikation von Methoden zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen. Kapitel 8 zeigt darüber hinaus gesondert Möglichkeiten auf, die durch werkzeugseitigen Texturverschleiß induzierte Texturabflachung zu reduzieren. Der Fokus des Kapitels 7 liegt daher auf den Prozessgrenzen der Musterverzerrung und der Mehrfachprägung. Ziel ist es, Maßnahmen zu erarbeiten, die zur Erhöhung der Bauteilmaßhaltigkeit beitragen. Anhand der Analyse verschiedener Ansätze werden die zugrundeliegenden Wirkweisen identifiziert. Neben der Erforschung von Prozessmaßnahmen mittels numerischer Modelle werden alle ausgewählten Maßnahmen in experimentellen Umformversuchen umgesetzt und validiert. Das abschließende Teilziel des Kapitels ist die Ableitung von Auslegungshinweisen zur Erzielung eines verbesserten Umformprozesses mit maßhaltigen Oberflächentexturen. Dies erfordert zum einen eine Bewertung der Wirksamkeit der Maßnahmen. Zum anderen müssen Randbedingungen und Limitationen einer industriellen Umsetzbarkeit bei der Fertigung großer Stückzahlen berücksichtigt werden. Bild 58 zeigt die Übersicht der Teilziele sowie der angewandten Vorgehensweise.

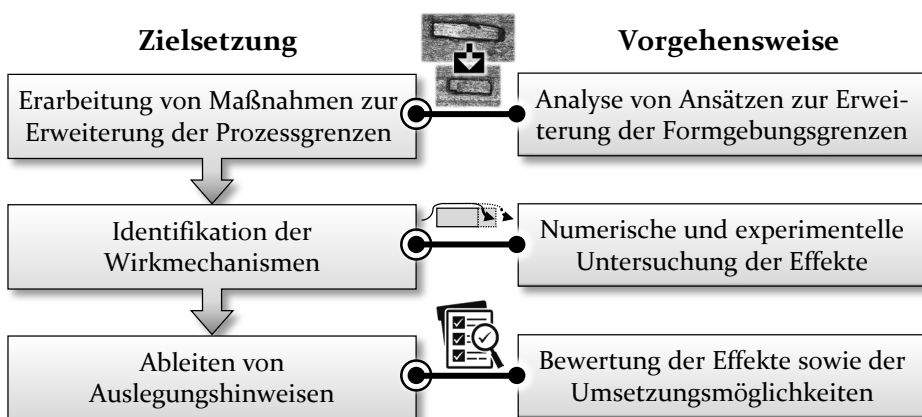


Bild 58: Zielsetzung und Vorgehensweise zur Erarbeitung von Methoden zur Erweiterung der Formgebungsgrenzen

7.1 Anpassung der Stempelgeometrie

In Abschnitt 5.3 wurde die Kontaktablösung zwischen Werkstück und texturiertem Prägezyylinder bei gleichzeitiger radialer Werkstoffverschiebung als Ursache für Mehrfachprägungen identifiziert. Dies motiviert die Erforschung von Maßnahmen, die zu einer homogenen Kontaktausbildung ohne zwischenzeitliche Ablösung des Napfbodens führen. Initial resultiert die inhomogene Kontaktausbildung aus der konvexen Form des Napfbodens nach dem Tiefzieh- und Abstreckgleitziehvorgang. In Bild 26 wurde nachgewiesen, dass die Schalenbildung auf in den Boden eingebrachte Biegespannungen zurückzuführen ist. Die partielle Kontaktierung der Schalenaußenseite mit dem Prägezyylinder sorgt für einen Rückbiegevorgang, ausgehend vom Napfbodenzenrum. Eine Möglichkeit, durch die die Bildung des Hohlraums zwischen Tiefziehstempel und Napfboden verhindert werden kann, liegt in der Erweiterung des Werkzeugsystems um einen im zylindrischen Matrizeinteil geführten Gegenhalter. Das Ziel der Integration eines Gegenhalters ist die Verstärkung der radialen Zugspannungen, die der Schalenbildung entgegen wirken [210]. In Tiefziehprozessen werden Gegenhalter bislang häufig zur Vermeidung risskritischer Blechausdünnung eingesetzt, indem durch eine konternde Druckbelastung Bereiche lokal hoher Spannungen entlastet werden [224]. Gegenhalter dienen allerdings auch als geometrische Beschränkungen und können im Tiefziehen der Schalenbildung im Bodenbereich entgegenwirken [209]. Die Nutzung eines kraftgesteuerten Gegenhalters erhöht allerdings die Ansprüche an die eingesetzte Umformpresse. Diese muss über ein Ziehkissen verfügen, welches entkoppelt vom Stößelhub angesteuert werden kann. Es gilt daher, Ansätze zu erarbeiten, die das Abheben des Werkstückbodens ohne Gegenhalterintegration auf einfach wirkenden Pressen unterbinden können. Die Referenzversuche erfolgten mit einem Tiefziehstempel, welcher eine plane Bodenfläche aufweist. Eine prozessangepasste Bodengeometrie birgt in diesem Kontext das Potenzial, der Kontaktablösung im Bauteilzentrum vorzubeugen. Die Form des Stempelbodens soll so ausgelegt werden, dass der Rückbiegevorgang, welcher für die Mehrfachprägungen verantwortlich ist, durch eine geometrische Limitierung vermieden wird. Aus diesem Grund wird in einem vollfaktoriellen Versuchsplan mithilfe numerischer Modelle die Wirksamkeit verschiedener Geometrien geprüft. Bild 59 zeigt die gewählten werkzeugseitigen Geometrieadaptationen. Geprüft werden Stempel mit einem planen Absatz, mit zwei Absätzen unterschiedlichen Durchmessers, sowie einer elliptischen Geometrie. Die Absatzhöhe h_a wird zwischen 1,0 und 1,2 mm variiert. Liegt eine prozessangepasste Stempelge-

ometrie und -höhe vor, kann die Bodenbiegung des Grundkörpers entgegen der Umformrichtung von der Bauteilmitte aus (Bild 25 b), durch die eingebrachte geometrische Limitierung des Tiefziehstempels, unterbunden werden. Aus der Stempelanpassung resultiert eine Adaption der Bauteilgeometrie. Dünnwandige Tiefziehbauteile werden allerdings häufig im Bodenbereich mit Vertiefungen ausgestattet, die als Zentrierung für die Montage oder die entsprechende Anwendung genutzt werden. Tassenstößel werden beispielsweise mit Einsenkungen zur Aufnahme des Ventilschafths versehen. Die angepassten Stempelgeometrien bringen solche Zentrierungen direkt während des Prägevorgangs in das Bauteil ein.

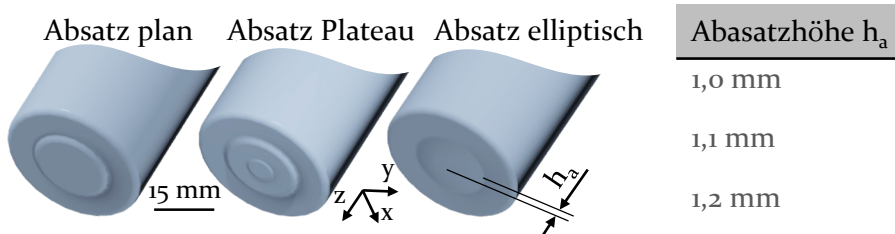


Bild 59: Stempelgeometrien zur Unterbindung der Mehrfachprägungen

Als Zielgröße wird entsprechend Abschnitt 5.3 der Weg der Werkstoffverschiebung s_v in x -Richtung zur Quantifizierung der Texturversetzung während der Kontaktablösung herangezogen. Wie in Bild 27 gezeigt, ist diese Zielgröße als Differenz der Werkstoffverschiebung bei Kontaktablösung und dem Zeitpunkt des Zweitkontakts definiert. Bild 60 a) zeigt die Ergebnisse des Versuchsplans anhand der Werkstoffverschiebung für die drei Stempelgeometrien mit je drei Absatzhöhen. Aufgrund der stark lokal variierenden Kontaktzustände wird die Untersuchung exemplarisch an Position 2 durchgeführt. An dieser Messstelle wurde im Referenzversuch eine hohe Verschiebung detektiert (Bild 27 b). Die Anpassung der Stempelgeometrie reduziert für alle analysierten Varianten signifikant den Weg der Verschiebung s_v . Für den Referenzversuch liegt diese bei $32,4 \mu\text{m}$ und wird im ungünstigsten Fall (Absatz elliptisch; Absatzhöhe $1,0 \text{ mm}$) auf $7,7 \mu\text{m}$ verringert. Dies kann im Allgemeinen auf die Reduktion der Kontaktablösung durch die geometrische Begrenzung der Bodenbiegung, welche aus der Erhöhung der Stempelbodenfläche resultiert, zurückgeführt werden. Wird der Hubbereich, zu dem eine Ablösung zwischen Werkstück und texturiertem Werkzeug vorliegt, verringert, dann nimmt folglich die Verschiebung der Texturen ab. Eine Anhebung der Absatzhöhe auf $1,1 \text{ mm}$ beziehungsweise $1,2 \text{ mm}$ bewirkt für die plane Absatzgeometrie eine weitere Reduktion und darüber hinaus sowohl für die Plateau- als auch Ellipsen-

geometrie eine vollständige Eliminierung der Werkstoffverschiebung während der Ablösung. Die Untersuchung der Kontaktverteilung in Bild 60 b) zeigt exemplarisch für den elliptischen Absatz mit einer Höhe von 1,1 mm, dass die partielle Ablösung verhindert wird.

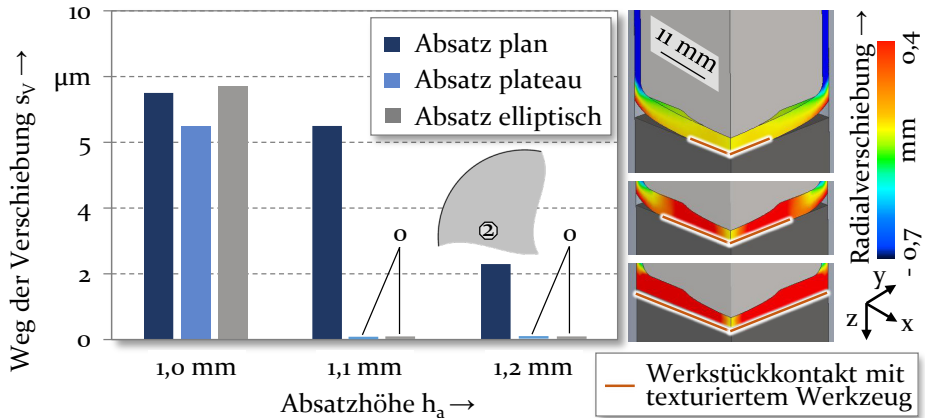


Bild 60: Werkstoffverschiebung in x-Richtung an Position 2 (a) sowie die Radialverschiebung und der Kontaktzustand bei elliptischer Stempelgeometrie (b)

Aufgrund des durchgängig bestehenden Werkstückkontakts mit dem texturierten Werkzeug kann die Werkstoffverschiebung bei Ablösung verhindert und somit die Prozessgrenze der Mehrfachprägungen durch partiell versetzte Texturmuster überwunden werden.

In diesem Kontext dürfen allerdings für eine ganzheitliche Bewertung der Anpassungsmaßnahme deren sekundäre Einflüsse nicht unberücksichtigt bleiben. Im Hinblick auf die zusätzliche Materialverdrängung, die aus der Adaptation der Stempelgeometrie resultiert, sind kleine Absatzhöhen anzustreben. Die negative Beeinflussung der werkstückseitigen Texturmaßhaltigkeit, durch eine gesteigerte Radialverschiebung (Bild 23), wird von größeren Absatzhöhen zudem gefördert. Die Forderung nach einem durchgängigen Werkstückkontakt motiviert daher in Anbetracht der sekundären Einflüsse die Nutzung einer Absatzhöhe $h_a = 1,1$ mm. Da die Werkzeugbelastungen bei dieser Höhe durch die Verwendung der elliptischen Geometrie im Vergleich zur Plateauvariante um bis zu 55 % reduziert werden, erfolgt die experimentelle Umsetzung anhand dieser Stempelgeometrie. Dadurch wird der im untersuchen Parameterraum beste Kompromiss aus homogener Kontaktausbildung, geringer Radialverschiebung und reduzierter Werkzeugbelastung gebildet. In Bild 61 ist die bauteilseitige Texturausformung in Abhängigkeit der der Geometrie der Stempelstirnfläche dar-

gestellt. Aus Abschnitt 5.3 geht hervor, dass die Texturen im Referenzversuch aus der ersten Prägung bei vollständigem Hub von 60,0 mm von der Zweitprägung überlagert werden. Daher wird für die experimentelle Wirksamkeitsprüfung der Maßnahme ein reduzierter Hub von 59,9 mm herangezogen. Dies ermöglicht die Analyse der Texturen aus Erst- und Zweitprägung, bevor diese durch den radialen Stofffluss ineinander übergehen. Entsprechend Bild 60 erfolgt die Untersuchung exemplarisch an Position 2.

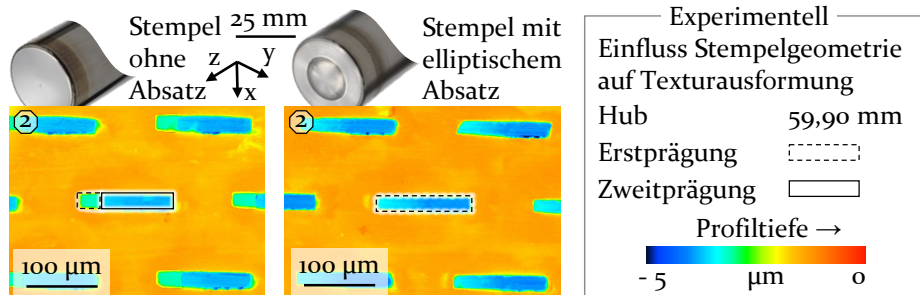


Bild 61: Bauteilseite Texturausformung in Abhängigkeit der Geometrie der Stempelplanfläche

Die Verwendung des Stempels aus dem Referenzprozess ohne Geometrie-anpassung führt zu einer sukzessiven Ausformung der Erst- und Zweitprägung. Aufgrund des geringeren Kontaktdrucks erreicht die Erstprägung nicht die Profiltiefe aus der Zweitprägung. Aus der Erstprägung resultiert eine Verlängerung der Textur um $31 \pm 3 \mu\text{m}$. Dies bestätigt der numerisch identifizierte Weg der Werkstoffverschiebung s_v in Position 2 (Bild 27 b). Der elliptische Absatz bewirkt im Gegensatz dazu die vollständige Unterbindung der Werkstoffverschiebung während einer möglichen Kontaktablösung. Anhand der zusammenhängenden Texturform ist anzunehmen, dass ausschließlich die Erstprägung vorliegt. Zu beachten ist allerdings die Texturverlängerung mit nach außen hin abnehmender Profiltiefe. Die Ursache der Verlängerung liegt in der Erhöhung der Radialverschiebung (Bild 60 b) durch die geometriebedingte Werkstoffverdrängung von der Bauteilmitte zum Bauteilrand hin. Anhand der geätzten Schlifffbilder in Bild 62 wird der schematische Stofffluss der elliptischen Stempelvariante im Vergleich zu einem flachen Stempelboden visualisiert. Der elliptische Absatz verursacht im Bodenbereich eine radiale Werkstoffverdrängung. Diese ist für Bauteile, die mit der planen Stempelvariante gefertigt wurden deutlich geringer. Numerisch werden radiale Werkstoffverschiebungen von 0,37 mm (elliptischer Absatz) und 0,13 mm detektiert (ohne Absatz).

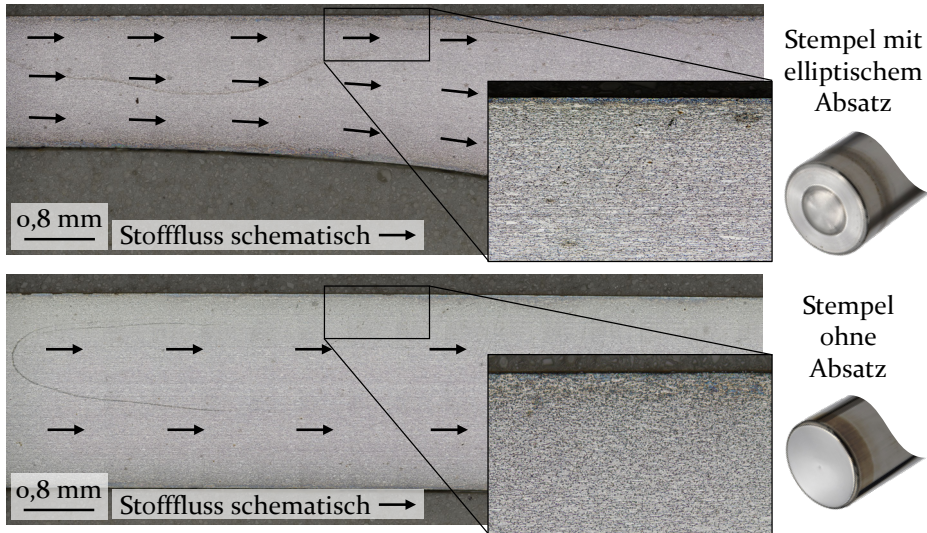


Bild 62: Schliffbilder und schematischer Stofffluss im Napfboden in Abhängigkeit der Stempelgeometrie

Der erhöhte Werkstofffluss bewirkt bei der elliptischen Stempelgeometrie die Verzerrung der bauteilseitigen Textur in Hauptstoffflussrichtung (Bild 52). Vergleichbar ist dieser Effekt mit der in Abschnitt 6.2 identifizierte Wirkweise einer Erhöhung der Prozesskraft. Die Texturlänge liegt für diese Stempelkonfiguration bei $132 \pm 4 \mu\text{m}$ und befindet sich daher auf vergleichbarem Niveau mit den Proben, die mit dem Stempel ohne Absatz gefertigt wurden. Wie in Abschnitt 5.3 dargelegt wurde, sorgt der Einsatz des planen Stempels für das Einbringen einer versetzten Erst- und Zweitprägung in die Bauteiloberfläche. Der radiale Stofffluss bewirkt mit fortlaufendem Hub das Füllen der Vertiefung der Erstprägung. Die dadurch hervorgerufene Faltenbildung ist in Bild 63 dargestellt.

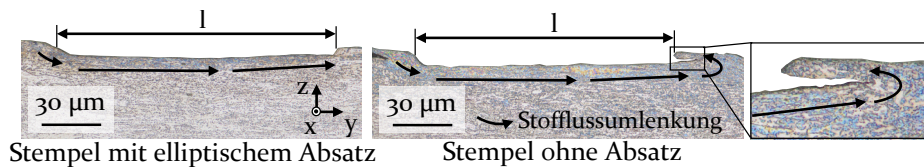


Bild 63: Schliffbilder und lokaler Stofffluss zur Texturausformung in Abhängigkeit der Stempelgeometrie

Aus den Untersuchungen geht zusammenfassend hervor, dass der Kontaktzustand durch eine Stempelgeometrieangepassung gezielt homogenisiert werden kann. Eine Verbesserung der Texturmaßhaltigkeit geht damit allerdings nicht einher.

7.2 Inverse Texturauslegung

In Tabelle 5 wurde die Musterverzerrung, die aus der Stoffflussumlenkung durch die werkzeugseitigen Texturen resultiert, als kritische Prozessgrenze eingestuft. Aufgrund der Superposition des lokalen Stoffflusses im Mikroprägen und des globalen Stoffflusses der Bodenstauchung, werden die bauteilseitigen Texturen in radialer Richtung verzerrt. Eine vollständige Unterbindung des globalen radialen Stoffflusses ist wegen der Prozesscharakteristika des Tiefziehens mit der in Bild 26 beschriebenen Schalenbildung nicht möglich. Die inverse Auslegung der werkzeugseitigen Texturen ist ein alternativer Ansatz, um dieser Prozessgrenze zu begegnen. Mittels numerischer Modelle soll der Werkstofffluss berücksichtigt werden und in iterativen Prozessen die Anpassung der geometrischen Feingestaltung der werkzeugseitigen Texturen ermöglichen. Durch diese inverse Kompensation soll die Verzerrung der Texturen reduziert und ein homogeneres Muster erzielt werden. In experimentellen Umformversuchen werden die numerischen Ergebnisse validiert. Die Vorgehensweise der inversen Texturauslegung ist in Bild 64 dargestellt.

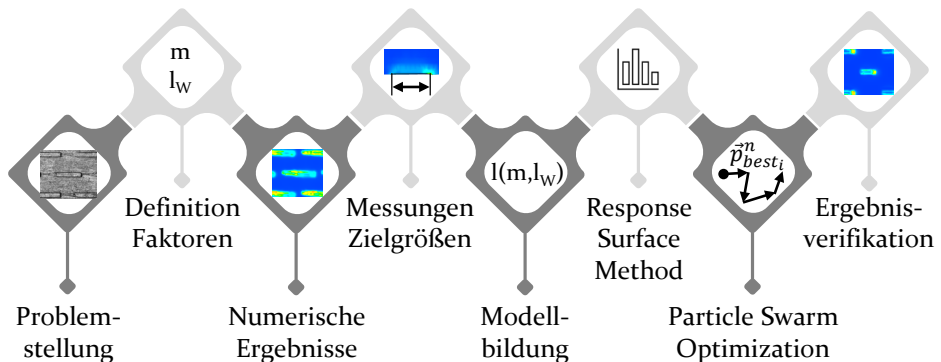


Bild 64: Vorgehensweise zur inversen Texturauslegung

Aus Abschnitt 5.3 kann abgeleitet werden, dass die werkzeugseitige Texturgeometrie in Verbindung mit der lokal vorherrschenden oberflächennahen radialen Materialverschiebung die bauteilseitige Texturausformung maßgeblich bestimmt. Der Nachweis zur Wirksamkeit der inversen Texturauslegung erfolgt daher anhand der beiden Faktoren der werkzeugseitigen Texturlänge sowie des Reibfaktors. Die gezielte Einstellung der Reibbedingungen ist in der Praxis mittels prozessangepassten Werkzeugoberflächen zu erreichen [221]. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Reibbedingungen durch die Variation der Mikroerodierparameter eingestellt. Ein vollfaktorierter numerischer Versuchsplan stellt die Eingangsdaten zur Modellerstellung mit der Response Surface Method bereit. Mit dieser Methode wird ein

Polynommodell zweiten Grades erstellt, das zur Ermittlung der geeigneten Parameterkombination zur Erreichung des Zielwerts dient. Darüber wird die Abhängigkeit der bauteilseitigen Texturlänge von der werkzeugseitigen Texturlänge l_w und dem Reibfaktor m beschrieben. Gelöst wird dieses stoffflussabhängige Modell mit einem Algorithmus der künstlichen Intelligenz (KI) aus der Bionik. Inspiriert wurde der angewandte Algorithmus von Tierschwärmen auf Nahrungssuche. Im sogenannten Partikelschwarmalgorithmus wird eine Vielzahl an Individuen generiert, die als Partikel bezeichnet werden [225]. Sie kommunizieren untereinander, um Informationen über Annäherungen an den Zielwert weiterzugeben [225]. Diese Informationen beeinflussen die anschließende Bewegung der Partikel im Suchraum [225]. Entsprechend der etablierten Vorgehensweise in der Partikelschwarmoptimierung wird die Bewegung einzelner Partikel im Suchraum des Modells durch den Geschwindigkeitsvektor \vec{v}_i^{n+1} (Gleichung 3) beschrieben [225]. In dessen Berechnung gehen das Trägheitsgewicht ω , die zufälligen Vektoren r_1 und r_2 mit gleichmäßiger Verteilung im Suchraum, sowie die Beschleunigungskoeffizienten c_1 und c_2 ein. Darüber hinaus beschreibt $\vec{p}_{best_i}^n$ die Koordinaten des bis zum Iterationsschritt i erreichten individuellen Bestwerts. Im Gegensatz dazu speichert $\vec{g}_{best_i}^n$ die Koordinaten des globalen Bestwerts aller Partikel des Schwarms.

$$\vec{v}_i^{n+1} = \omega \vec{v}_i^n + c_1 r_1 (\vec{p}_{best_i}^n - \vec{x}_i^n) + c_2 r_2 (\vec{g}_{best_i}^n - \vec{x}_i^n) \quad (3)$$

Die Partikelbewegungen im Suchraum zu Beginn der Iterationen und gegen Ende sind schematisch in Bild 65 dargestellt. In der Programmiersprache MATLAB von MathWorks erfolgt die Implementierung des Algorithmus.

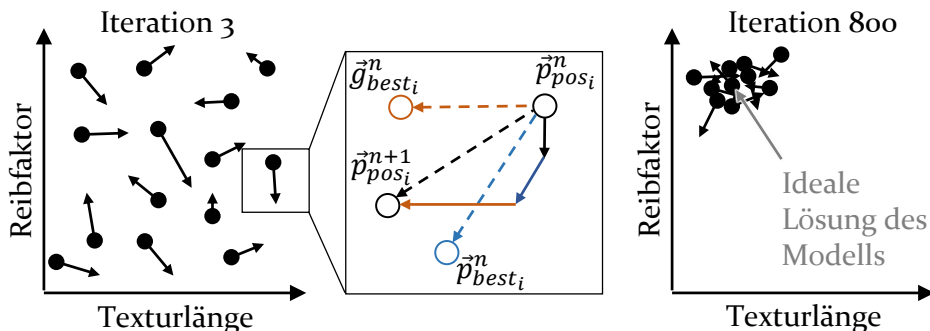


Bild 65: Schematische Funktionsweise der Partikelbewegung im Schwarmalgorithmus

Als Abbruchkriterium wird die Unterschreitung einer kritischen Änderung des globalen Bestwerts herangezogen. Die Lösung des Modells erfolgt unter diesen Bedingungen in unter 1000 Iterationen bei einer Berechnungszeit

von knapp fünf Sekunden je Texturbereich. Der Versuchsplan zur Generierung der Rohdaten umfasst die Variation der Texturlänge zwischen $20\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ sowie des Reibfaktors von $0,1$ bis $0,5$ auf je fünf Stufen. Das daraus erstellte Modell wird durch den Schwarmalgorithmus iterativ gelöst. Geliefert werden daraus angepasste Texturlängen und Reibfaktoren, in Abhängigkeit des lokal herrschenden Stoffflusses.

Exemplarisch wird die Wirksamkeit der Prozessmaßnahme im Folgenden anhand der Positionen 1, 2 und 3 untersucht. Die Gegenüberstellung der bauteilseitigen Texturlänge l im Referenzprozess und nach der inversen Vorkorrektur der werkzeugseitigen Texturlänge l_w ist in Bild 66 gezeigt.

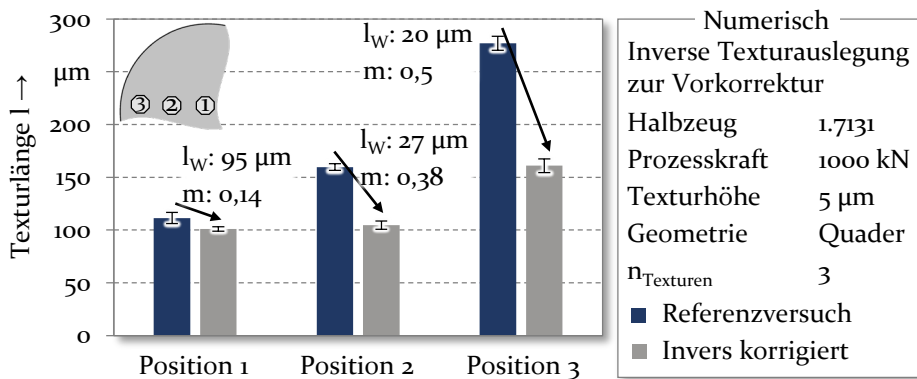


Bild 66: Texturlängen im numerischen Referenzprozess und nach der inversen Korrektur an den Messpositionen 1, 2 und 3

Im Vergleich zum Referenzprozess liefert der Algorithmus für alle Positionen eine Reduktion der Texturlänge und eine Erhöhung des Reibfaktors. Die inverse Vorkorrektur bewirkt in Position 1 eine Verkleinerung der Texturlänge l auf $101 \pm 2\ \mu\text{m}$ (Soll-Texturlänge $100\ \mu\text{m}$). Zu beachten ist allerdings, dass die Texturlänge im Referenzversuch mit $111 \pm 5\ \mu\text{m}$ nur geringfügig darüber liegt. Ausgeprägter ist die Verbesserung der Maßhaltigkeit für Position 2. Von einem Ausgangswert von $159 \pm 3\ \mu\text{m}$ nimmt die Texturlänge auf $104 \pm 4\ \mu\text{m}$ ab. Die Verkürzung der bauteilseitigen Texturlänge ist auf den Einfluss der werkzeugseitigen Texturlänge und des Reibfaktors auf den oberflächennahen Stofffluss zurückzuführen. Durch eine Verringerung der Texturlänge erfolgt eine Verkürzung der Werkstoffumlenkung um die Mikrotextrur und führt so zu einem früheren Einsetzen der Hohlraumfüllung hinter der Textur. Die Standardabweichungen der numerisch ermittelten Texturlänge ist auf die Herausforderung der detaillierten Abbildung kleinster Strukturen durch FEM zurückzuführen. Der Reibungsanstieg in der Wirkfuge zwischen Napf und texturiertem Werkzeug bewirkt außer-

dem eine Erhöhung der Reibschubspannungen. Diese wirken dem oberflächennahen radialen Stofffluss entgegen und erhöhen die Texturmaßhaltigkeit (Bild 37). Die Flankenwinkelentstehung der werkstückseitigen Texturen kann aufgrund der Prozesscharakteristika (Bild 24) nicht unterbunden werden. In Position 3 kann darüber hinaus nur eine minimale Texturlänge von $161 \pm 6 \mu\text{m}$ erzielt werden. Die gewählten Werte für l_w und m liegen allerdings bereits an den jeweiligen Grenzen und somit außerhalb des untersuchten Parameterraums. Die numerischen Ergebnisse werden anschließend durch experimentelle Untersuchungen plausibilisiert (Bild 67).

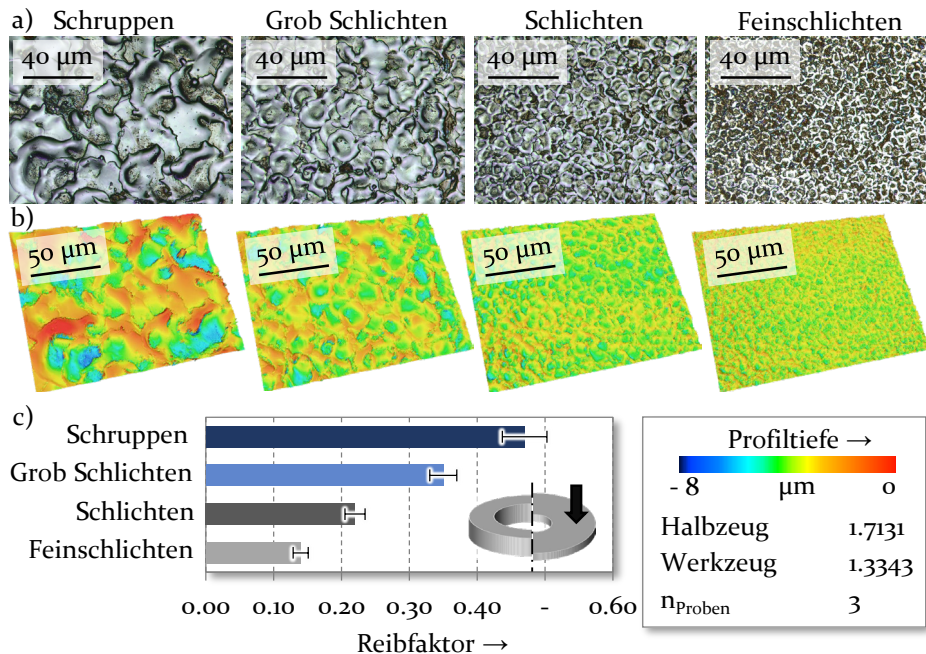


Bild 67: Oberflächenstruktur verschiedener Qualitäten des Mikroerodierens (a) sowie deren Topographie (b) und die resultierenden Reibfaktoren im Schichtstauchversuch (c)

Zunächst sind geeignete Werkzeugtopographien der Prägezyylinder zu ermitteln, die zu den numerisch ermittelten Reibfaktoren führen. Die Strategie zur Fertigung der texturierten Werkzeugoberfläche wird anhand der Qualitäten Schuppen, grob Schlichten, konventionelles Schlichten und Feinschlichten variiert. Durch die Anpassungen des Impulsstroms und der Erodiergeschwindigkeit können die in Bild 67 a) gezeigten Werkzeugoberflächen erzielt werden. Ein hoher Impulsstrom und eine große Erodiergeschwindigkeit bewirken das Zurückbleiben großer Schmelzaufwürfe auf der Oberfläche. Mit steigender Fertigungsqualität resultiert eine Musterverfeinerung sowie eine Verringerung der Höhe der Schmelzaufwürfe (Bild

67 b). Im Ringstauchversuch werden die zugehörigen Reibfaktoren in Anlehnung an [221] ermittelt (Bild 67 c). Zur Abbildung der numerisch ermittelten Reibfaktoren werden für die Validierung die Fertigungsstrategien Feinschlichten ($m = 0,14 \pm 0,01$), grob Schlichten ($m = 0,35 \pm 0,02$) und Schruppen ($m = 0,47 \pm 0,03$) ausgewählt. Im Vergleich zu den numerischen Reibfaktoren müssen somit Abweichungen von maximal 6 % für die Fertigungsqualitäten des Schruppens und des groben Schlichtens berücksichtigt werden. Die Ursache des Anstiegs der Reibung liegt in der höheren Rauheit der Werkzeugoberflächen. Dies bedingt die Verstärkung des mechanischen Verhakens der Rauheitsspitzen von Werkstück- und Werkzeugwerkstoff. Dieses Verhalten wird ebenfalls in Untersuchungen von CRISTINO ET AL. [226] in Ringstauchversuchen mit Werkzeugen verschiedener Oberflächenrauheiten bestätigt. Darüber hinaus wird die invers identifizierte Texturlänge durch Anpassung der im Mikroerodieren genutzten Zielgeometrie anhand des CAD Modells adaptiert.

Bild 68 zeigt die experimentellen Ergebnisse der inversen Texturvorkorrektur im Vergleich zur Referenzvarianten an den Positionen 1 – 3. Alle angepassten Werkzeugvarianten bewirken eine signifikante Reduktion der Texturlänge. Im Vergleich zur Ausgangsvariante wird die Texturlänge in Position zwei um 36 % auf $111 \pm 8 \mu\text{m}$ reduziert.

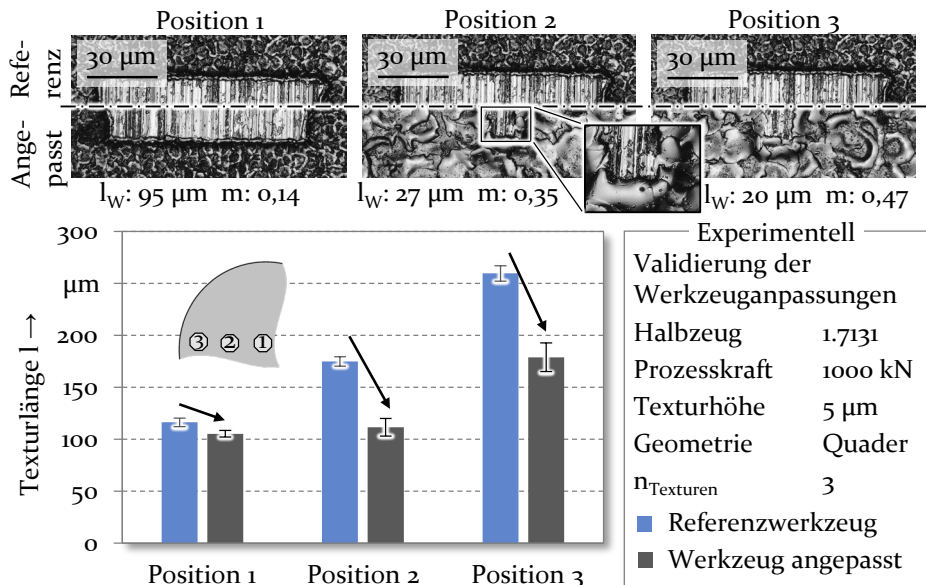


Bild 68: Texturlängen im experimentellen Referenzprozess und mit angepassten Werkzeugen an den Messpositionen 1, 2 und 3

Die Diskrepanz zwischen prognostizierter Texturlänge (Bild 66) und experimentell nachgewiesener Texturlänge (Bild 68) in den Positionen 2 und 3 ist mit den Abweichungen der herangezogenen Reibfaktoren zu erklären. In den Umformversuchen liegen die Reibfaktoren jeweils bei $m = 0,35$ statt $m = 0,38$ und $m = 0,47$ statt $m = 0,50$. Die durch Reibungserhöhung hervorgerufene Reduktion der Radialverschiebung wird daher von der Simulation überschätzt. Dennoch wird die Wirksamkeit des Ansatzes der inversen Texturanpassung durch die Versuche bestätigt. Durch die verringerte werkzeugseitige Texturlänge wird die Verzerrung, die aufgrund des radialen Stoffflusses entsteht, vorkorrigiert. In Verbindung mit der Hemmung des oberflächennahen Stoffflusses im Bereich des Prägezyinders kann die Maßhaltigkeit der Texturen daher signifikant gesteigert werden.

Im Rahmen der Untersuchung der inversen Texturauslegung wird folglich nachgewiesen, dass die Texturmaßhaltigkeit im kombinierten Mikroprägen durch gezielte Einstellung werkzeugseitiger Parameter erhöht werden kann. Aufgrund des lokal variierenden Stoffflusses, ist allerdings keine globale Vorkorrektur mit einheitlichen Parametern möglich. Aus diesem Grund können Algorithmen der KI zur Verarbeitung großer Datenmengen eingesetzt werden, die für jede Texturposition eine geeignete Parameterkombination ermitteln. Trotz der hohen Wirksamkeit der Maßnahme stellt die notwendige Individualisierung der Werkzeugoberfläche eine große Herausforderung in der Umsetzung der Maßnahme dar. Die Grenze der inversen Vorkorrektur liegt darüber hinaus in der Bereitstellung einer Werkzeugtopographie mit reibungserhöhender Wirkung. Je größer die gewünschte Reduktion des Stoffflusses, desto höher ist die Rauheit der Werkzeugoberfläche zu wählen. Diese überträgt sich im Umformprozess allerdings auch vom Werkzeug auf das fertige Bauteil. Mittels Tiefziehen hergestellte Bauteile besitzen üblicherweise Mittenrauwerte von $0,8 - 3,2 \mu\text{m}$. Die niedrigste Oberflächengüte liegt im untersuchten Parameterraum bei $R_a = 1,40 \mu\text{m}$, während die polierte Ausgangsoberfläche bei $R_a = 0,08 \mu\text{m}$ liegt. Reduktionen der Oberflächengüte der hergestellten Bauteile müssen daher bei der Anpassung der Werkzeugtopographie hingenommen werden.

7.3 Bewertung der Maßnahmen

Anhand verschiedener Maßnahmen wurde die Wirksamkeit werkzeugseitiger Anpassungen zur Erweiterung der Prozessgrenzen untersucht. Um die Eignung für den industriellen Einsatz abzuleiten, werden in Tabelle 8

die Maßnahmen hinsichtlich ihres Effekts, der Wirkweise sowie des Potenzial gegenübergestellt.

Tabelle 8: Zusammenfassende Bewertung der Maßnahmen zur Erweiterung der Prozessgrenzen

Maßnahme	Effekt	Grundlage	Potenzial	
Anpassung der Stempelgeometrie	0	Homogenisierung des Kontaktzustands im Prägen	Geringe Wirksamkeit; Veränderung der Zielgeometrie nötig	
Inverse Texturauslegung	++	Steigerung der Texturmaßhaltigkeit durch Vorkorrektur	Hohe Wirksamkeit; Übertragbarkeit auf weitere Verfahren möglich	
Stark Positiv	Positiv	Neutral	Negativ	Stark Negativ
++	+	0	-	--

Die Anpassung der Stempelgeometrie bewirkt zwar die Homogenisierung der Kontaktausbildung (Bild 60 b) und somit auch die Entstehung von versetzten Mehrfachprägungen (Bild 60 a). Kritisch zu bewerten ist allerdings die verstärkte Texturverzerrung (Bild 61) durch die gesteigerte radiale Werkstoffverschiebung. Darüber hinaus erfordert die analysierte Prozessmaßnahme eine Anpassung der Zielgeometrie. Limitiert durch den Einsatz der texturierten Komponenten, sind geometrische Anpassungen des Bauteils nur in geringem Umfang möglich, beziehungsweise nicht zulässig. Darüber hinaus bewirkt die stempelseitige Geometrieanpassung aufgrund der eingebrachten Konturunstetigkeit eine Erhöhung der Werkzeugbelastungen, wodurch die Standzeiten reduziert werden. Texturfehler wie eine Faltenbildung können allerdings wirksam durch die Stempelanpassung eliminiert werden (Bild 63).

Die untersuchte inverse Texturauslegung zeigt eine ausgeprägte Wirksamkeit hinsichtlich der Verbesserung der mikroskopischen Maßhaltigkeit. Grundlegend wurde nachgewiesen, dass die gewählte Vorgehensweise zur Vorkorrektur werkzeugseitiger Texturen geeignet ist, um die Texturlänge l an den Soll-Wert anzunähern (Bild 66). Limitiert wird diese Prozessmaßnahme durch den hohen Individualisierungsgrad, da jeder Texturbereich einer Abstimmung auf den lokal vorherrschenden Stofffluss bedarf. Dadurch wird ein großer Fertigungsaufwand mit hohen Stückkosten der

Werkzeuge notwendig. Die Obergrenze der mittels tailored surfaces erreichbaren Reibfaktoren schränkt die Maßnahme bei hohen Radialverschiebungen weiter ein (Bild 66). Darüber hinaus ist die Reduktion der bauteilseitigen Oberflächenqualität aufgrund der Anpassung der Werkzeugtopographie zu berücksichtigen. Die Erhöhung der Reibkräfte bewirkt außerdem eine Steigerung des Werkzeugverschleißes. In Tabelle 5 wurde die verschleißbedingte Texturabflachung als kritische Prozessgrenze identifiziert. Eine weitere Reibungserhöhung sollte daher in der umformtechnischen Mikrotexturierung vermieden werden.

8 Untersuchung des Einsatzverhaltens

Die Effizienz des analysierten Mikroprägeprozesses wird maßgeblich durch das Verschleißverhalten und folglich die Werkzeugstandzeit beeinflusst [227]. In konventionellen Blechumformverfahren ist Verschleiß in Werkzeugbereichen mit lokalen Spannungsspitzen zu finden [228]. Für Mikroprägeverfahren mit texturierten Werkzeugoberflächen liegt allerdings bislang kein breites Prozessverständnis hinsichtlich der Verschleißmechanismen vor. Bisherige Untersuchungen, die in Abschnitt 2.2.3 aufgezeigt werden, beschränken sich auf die Erforschung vergleichsweise großer Geometrien bei maximal 500 gefertigten Bauteilen.

Die in Abschnitt 5.3 abgeleiteten Formgebungsgrenzen legen dar, dass der Werkzeugverschleiß bei mikrotexturierten Werkzeugen ebenfalls zu berücksichtigen ist. Daraus motiviert wird im vorliegenden Kapitel das Ziel des Aufbaus eines Verständnisses über das Einsatzverhalten von Prägewerkzeugen mit mikrotexturierter Oberfläche verfolgt. Der in Abschnitt 5.1 vorgestellte Prozess ist aufgrund der langen Zykluszeit von ca. 30 Sekunden für die Untersuchung des Verschleißverhaltens bei hohen Stückzahlen ungeeignet. Daher wird ein abstrahierter Mikroprägeprozess auf einer Schnellläuferpresse mit kurzen Taktzeiten ausgelegt. Auftretende Verschleißerscheinungen werden anschließend identifiziert und im Hinblick auf deren Ursachen analysiert. Darüber hinaus gilt es, Maßnahmen zur Verschleißreduktion der mikrotexturierten Werkzeuge zu entwickeln. Neben der Prüfung titanhaltiger Beschichtungen wird der Einfluss der Stempelhärte auf den Verschleiß bewertet. Bild 69 zeigt die einzelnen Zielsetzungen sowie die daraus abgeleitete Vorgehensweise.

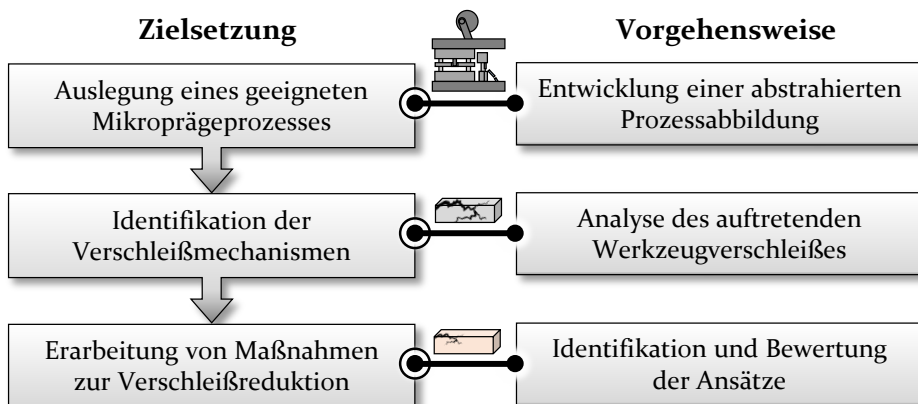


Bild 69: Zielsetzung und Vorgehensweise zur Untersuchung des Einsatzverhaltens

8.1 Abstrahierte Prozessabbildung

Eine zentrale Anforderungen an den Prozess zur Untersuchung des Einsatzverhaltens ist die Sicherstellung der Vergleichbarkeit mit dem Prozess aus Abschnitt 5.1. Neben der Verwendung identischer Werkzeug- und Werkstückwerkstoffe wird der Materialfluss anhand übereinstimmender Restblechdicken nach der Umformung angenähert. Da das Tief- und Abstreckgleitziehen lediglich einen geringen Einfluss auf die Kaltverfestigung im Tassenboden und somit auf die Werkzeugbelastung besitzt, fokussiert der Prozess zur Verschleißuntersuchung auf das Mikroprägen selbst. Der abstrahierte Prozess bildet deshalb das Eindringen der Werkzeugtexturen in das Werkstück sowie den radialen Materialfluss bei einer Blechdickenabnahme von 0,1 mm ab. In Anlehnung an [204] werden mit jeder Stempelvariante insgesamt 4.000 Hübe durchgeführt. Die Automatisierung des Prozesses erfolgt durch eine Schnellläuferpresse BSTA 50-95 der BRUDERER AG. Die Presse und deren periphere Einrichtungen sind schematisch in Bild 70 dargestellt.

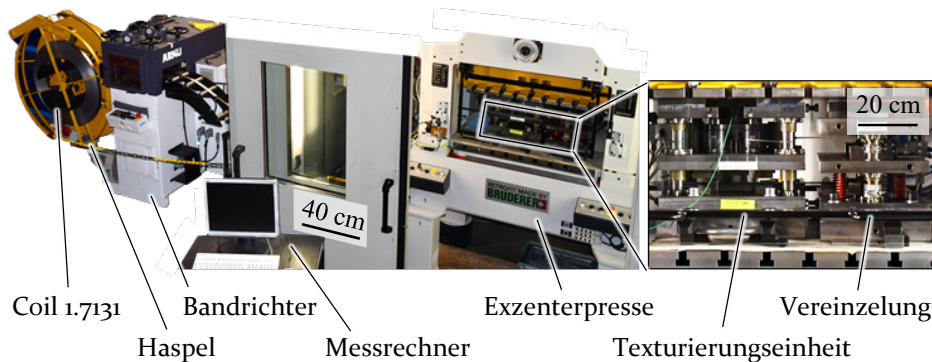


Bild 70: Schematischer Aufbau des Prozesses zur Texturierung ausgehend von Bandwerkstoff

Die Haspel 5000/120/ST-M der ARKU Maschinenbau GmbH nimmt das Coil mit einer Nennbreite von 30,0 mm des Werkstoffs 1.7131 auf. Nach der Abwicklung wird das Bandmaterial der Richtmaschine 500/120/19 der ARKU Maschinenbau GmbH zugeführt. Die bedingt durch die Aufwicklung als Coil eingebrachte plastische Deformation wird mittels wechselseitig angeordneten Plastifizierrollen ausgeglichen. Da der in den vorangegangenen Umformversuchen genutzte Werkstoff ebenfalls von gerichteten Coilabschnitten der gleichen Charge stammt, ist die Vorverfestigung der beiden Werkstoffe nach dem Richtvorgang vergleichbar. Die folgende Bandbeöleinheit ELS 4000/MDG-002 der Raziol Zibulla & Sohn GmbH bringt eine definierte Menge von $10 \pm 3 \text{ g/m}^2$ des Schmierstoffs Raziol CLF-

65E auf das Halbzeug auf. Durch die niedrige Viskosität des Schmierstoffs ist eine gleichmäßige Verteilung mittels Sprüheinheit möglich. Anschließend wird das Band den Werkzeugen der Exzenterpresse zugeführt. In der ersten Stufe erfolgt der Prägevorgang mit einem texturierten Stempel. Die zweite Stufe vereinzelt die Bauteile, sodass Bandabschnitte mit einer Länge von 20,0 mm resultieren. Bild 71 zeigt die Aktivteile der Prägestufe. Zur Aufnahme der Werkzeugteile wird ein Gestell mit drei über Säulen geführte Platten genutzt. Die Umformkraft wird über eine Werkzeugplatte von der Presse auf den Stempel übertragen. Gasdruckfedern mit einer Gesamtkraft von 130 kN bringen die Niederhalterkraft auf. Das Werkstück wird auf einen planen Bandunterlage geführt.

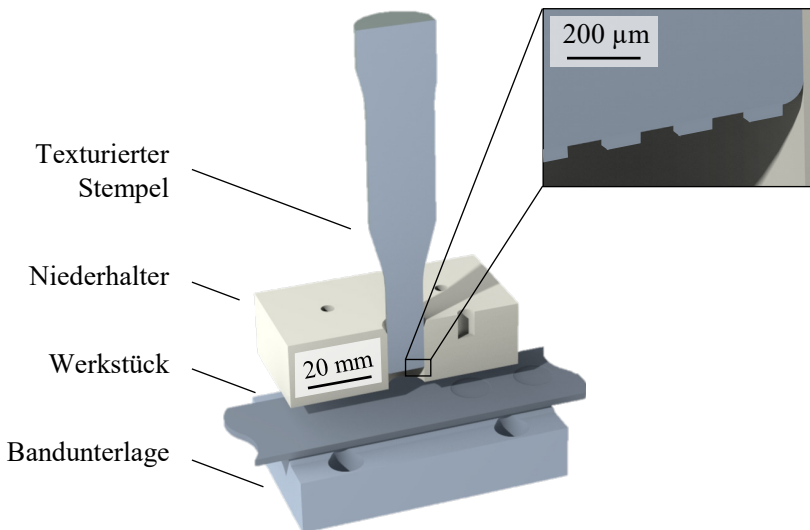


Bild 71: Werkzeugaufbau der Aktivteile zur Untersuchung des Einsatzverhaltens

Der Stempel wird mit ausgewählten Texturen aus Abschnitt 5.1 strukturiert. Aufgrund der breiten Anwendungsmöglichkeiten werden die Verschleißuntersuchungen an Quadertexturen durchgeführt. Hinsichtlich Abstand, Positionierung, Länge und Breite werden die Texturen identisch gestaltet. Im Gegensatz zu zylindrischen Texturen kann bei quaderförmigen Strukturen der Einfluss von nicht-rotationssymmetrischen Geometrien analysiert werden. Im Hinblick auf die Analyse eines anisotropen Verschleißverhaltens motiviert dies ebenfalls die Untersuchung von Quaderstrukturen. Während Mikrotexturen in geschmierten elasto-hydrodynamischen Kontakten oft schon in einer Tiefe von 10 µm oder weniger das vorteilhafte Einsatzverhalten zeigen, kann die Textur in hydrodynamischen Schmierkontakten in Abhängigkeit der Filmdicke größere Höhen erreichen [20]. Da in der Verschleißanalyse die Prozessgrenze bezüglich der

Texturhöhe am Werkzeug ermittelt werden soll, wird die Texturhöhe an der oberen Grenze des Einsatzbereiches gewählt. Es wird daher eine Referenzhöhe von 30 µm gewählt.

8.2 Analyse des Werkzeugverschleißes

Zur Untersuchung des Einsatzverhaltens der texturierten Werkzeuge wird zunächst das Ziel der Identifikation auftretender Verschleißmechanismen verfolgt. Dazu werden Stempel der Referenzhärte 60 HRC im ersten Schritt qualitativen Analysen vor der Umformung und nach einer definierten Anzahl von Hüben unterzogen. Obwohl Werkzeugoberflächen in der Umformtechnik für eine verlängerte Lebensdauer konventionell mittels Polieren oder Läppen bearbeitet werden [229], wird für die gewählte Untersuchungsstrategie eine unbearbeitete Werkzeugoberfläche genutzt, welche unmittelbar aus dem Mikroerodiervorgang resultiert. Dadurch wird sichergestellt, dass die Verschleißmechanismen der texturierten Werkzeugoberflächen ohne die Vermengung mit Wechselwirkungen aus der Oberflächennachbearbeitung identifiziert werden können. Es ist daher allerdings mit geringeren Werkzeugstandzeiten zu rechnen. Darüber hinaus wird die Texturhöhe für die Verschleißuntersuchungen bewusst auf 30 µm angehoben. Durch die steigenden Werkzeugbelastungen bei zunehmender Texturhöhe (Bild 43) können die grundlegenden Verschleißmechanismen mikrostrukturierter Werkzeugoberflächen bereits bei geringeren Hubzahlen identifiziert werden. Dieses Vorgehen verbessert die Effizienz der Werkstoff- und Maschinenausnutzung im Forschungsvorhaben. Aus diesem Grund werden für jeden Stempel, in Anlehnung an Verschleißuntersuchungen mit makroskopischen Funktionselementen [204], insgesamt 4000 Hübe durchgeführt. Die Versuche sind folglich als Schnittstelle zwischen den in Kapitel 1 durchgeführten Experimenten im Labormaßstab mit geringen Wiederholungen und industriell angestrebten Hubzahlen einzustufen. Um die auftretenden Verschleißstufen zu detektieren, erfolgt die Entnahme und Analyse der Stempel nach 250, 1000 und 4000 Hüben. Im Hinblick auf die Identifikation der grundlegenden Verschleißmechanismen mikrotexturierter Werkzeuge liegt der Fokus darüber hinaus nicht auf der Ermittlung des Einflusses verschiedener Halbzeugwerkstoffe, sondern auf einer werkzeugeitigen Faktorvariation der Wärmebehandlung, Beschichtung, Texturorientierung sowie der Eindringtiefe. Während diese Ergebnisse in Abschnitt 8.3 dargelegt werden, erfolgt in Abschnitt 8.2 zunächst die Analyse anhand der Referenzvariante, bei der als Halbzeug der Einsatzstahl 1.7131 und als Werkzeugwerkstoff der Schnellarbeitsstahl 1.3343 mit einer Härte von 60 HRC geprüft werden. Die Texturaufnahmen werden

mittels Laserscanningmikroskop durchgeführt und sind in Bild 72 dargestellt. Der aufgenommene Bereich befindet sich in der Mitte der Stempeloberfläche. Die Scans der weiteren Hubstufen werden an der gleichen Stelle aufgenommen, an der der erste Texturscan durchgeführt wurde, sodass ein direkter Vergleich der Verschleißentwicklung möglich wird.

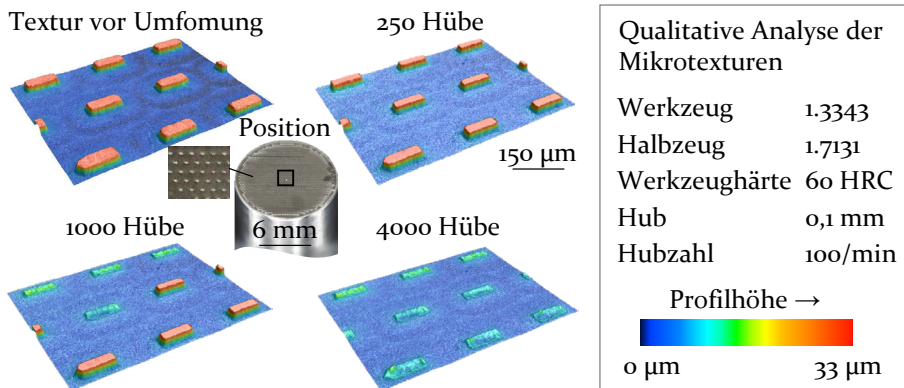


Bild 72: Qualitative Analyse der Texturen vor der Umformung sowie nach 250, 1000 und 4000 Hüben

Die qualitativen Ergebnisse zeigen, dass bereits nach 250 Hüben eine Abnahme der Texturbreite auftritt. Die Annahme für die Breitenabnahme ist, dass die hohen Kontaktspannungen zwischen Stempel und Band durch die gleitende Relativbewegung zu einer lokalen plastischen Verformung führen. Weitere Belastungszyklen führen zu einer Rissinitiierung und -ausbreitung. Dieser Prozess mündet in einem Abplatzen der Texturoberfläche. Nach Podgornik et al. [211] kann dieses Verschleißverhalten als niedrigzyklische Ermüdung eingestuft werden. Bei dieser Hubzahl ist noch kein Abscheren ganzer Texturen festzustellen. Dies ändert sich nach einer Gesamtzahl von 1.000 Hüben. Einige Texturelemente sind durch massive Ausbrüche stark in der Höhe verändert (Bild 72). Lediglich die Anbindezone der Elemente an der Grundfläche der Stempel ist noch intakt. Es bleibt eine stark zerklüftete Werkzeugoberfläche zurück, die sich noch deutlich vom Rest der Grundfläche abhebt. Es ist zu vermuten, dass die zyklischen Scherkräfte, die durch den Materialfluss beim Eindringen des Stempels in das Bandmaterial entstehen, für diese Geometrieänderung verantwortlich sind. Da andere Texturen im gleichen Bereich dagegen keine Veränderungen von 250 bis 1.000 Hüben zeigen, wird der Verschleißprozess als plötzlicher Sprödbbruch der Texturelemente von der Anbindezone angenommen. Dies ist ein Indiz für den Verschleißmechanismus der Rissausbreitung. Die Rissentstehung und -ausbreitung erfolgt

hauptsächlich unterhalb der Oberfläche [211]. Das Ergebnis ist daher ein sofortiges Versagen, das schwer vorherzusagen ist [211]. Nach 4.000 Hüben sind die geprüften Texturen im erfassten Mittelbereich des Stempels vollständig abgeschert (Bild 72). Die Geometrie jener Texturen, die bereits nach 1.000 Hüben von der Anbindungszone abgetrennt sind, behält die verbleibende Höhe und Geometrie bei 3000 weiteren Hüben bei. Dies deutet auf eine Verschleißfestigkeit der Texturen hin, wenn ein geringeres Seitenverhältnis von Höhe und Breite durch Verschleiß erreicht oder initial gewählt wird.

Die qualitative Analyse der Texturen muss für ein besseres Verständnis des detaillierten Verschleißverhaltens durch eine quantitative Untersuchung ergänzt werden. Zu diesem Zweck sind in Bild 73 die Texturmaße hinsichtlich Höhe, Breite und Länge für alle vier Hubstufen dargestellt. Im Rahmen der Untersuchung berücksichtigte Messwerte stammen von drei Stempeln mit drei gemessenen Texturen, welche im Mittelpunkt, entsprechend Bild 72, aufgenommen werden.

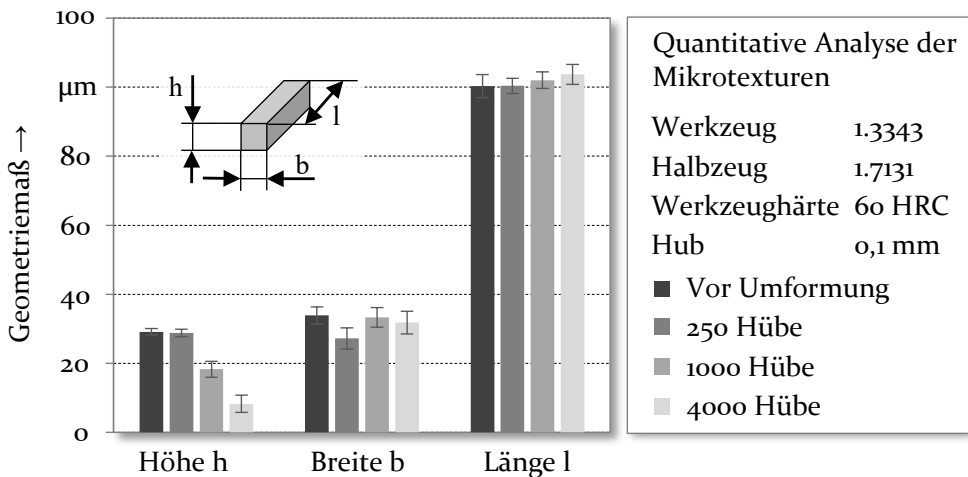


Bild 73: Quantitative Analyse der Geometrieabmaße der Texturen vor der Umformung sowie nach 250, 1000 und 4000 Hüben

Die Höhe der Texturen bleibt nach 250 Hüben auf einem vergleichbaren Niveau im Gegensatz zur erodierten Ausgangsvariante. Größere Höhenabnahmen werden erst nach 1000 und 4.000 Hüben festgestellt. Verglichen mit der Ausgangshöhe von $29,2 \pm 0,7 \mu\text{m}$ ist die Höhe nach 4.000 Hüben um durchschnittlich 71 % reduziert. Da eine Abscherung der gesamten Texturlemente erst nach 1.000 Hüben auftritt und eine konstante Höhe nach 250 Hüben beibehalten wird, ist der kritische Faktor nicht der inkremen-

telle abrasive Materialabtrag von der Texturoberfläche. Solange das Funktionselement nicht vollständig ausbricht, zeigt das Material eine hohe Verschleißfestigkeit in Bezug auf die Texturhöhe.

Die Texturbreite nimmt nach 250 Hübem zunächst ab. Dies bestätigt die aus den Oberflächenscans abgeleitete Vermutung, dass die hohen Kontaktspannungen an den Seitenflächen der Texturen zu Werkstoffausbrüchen führen. Die nachfolgenden Hübe bewirken eine leichte Zunahme der Breite (Bild 73). Dieses Phänomen wird durch das Stauchen der Texturen und damit durch eine Verbreiterung der Textur verursacht. Die gemessene Texturbreite liegt nach 4.000 Hübem nur 6 ± 1 % unter der Ausgangsbreite. Aufgrund der starken Texturstauchung ist dieses Verhalten allerdings nicht als Indiz für eine gute Verschleißbeständigkeit anzunehmen. Vergleichbares gilt für die Analyse der Texturlängen. Eine Zunahme ist auch bei den Längenwerten zu verzeichnen. Allerdings liegen die Werte für alle vier Hübe im gleichen Bereich der Standardabweichung. Zusammenfassend kann daher abgeleitet werden, dass die größten verschleißbedingten Veränderungen bei der Texturhöhe zu verzeichnen sind. Länge und Breite bleiben auf einem stabilen Niveau, auch nach 4000 Hübem. Diese beiden Werte sind allerdings zur Analyse der Verschleißbeständigkeit wenig aussagekräftig.

Die in den vorangegangenen Abschnitten untersuchten Texturen wurden in der Mitte des Stempels aufgenommen. Um den Einfluss der relativen Texturorientierung auf den bei der Umformung auftretenden Materialfluss zu ermitteln, bedarf es Analysen an weiteren Bereichen des Stempels. Bild 74 zeigt daher die Unterschiede im Verschleißverhalten für drei exemplarische Bereiche der Stempeloberfläche.

Die Mikroskopaufnahmen stammen jeweils aus den Randzonen, wo das Material höhere Fließgeschwindigkeiten erreicht als im zentralen Bereich. Der Unterschied im Materialfluss in Bezug auf den Abstand zur Stempelmitte wurde in einem ähnlichen Prozess des Querfließpressens in [204] gezeigt. Da die Texturen unabhängig von ihrer Position auf dem Stempel alle in die gleiche Richtung ausgerichtet sind, ergeben sich unterschiedliche Winkellorientierungen für den Materialfluss im äußeren Bereich. In Position 1 von Bild 74 ist die Längsseite der Texturen um 90° zum radialen Materialfluss ausgerichtet. Im Gegensatz dazu ist der Materialfluss in Position 2 in 45° -Richtung zur Textur und in Position 3 in 0° -Richtung ausgerichtet.

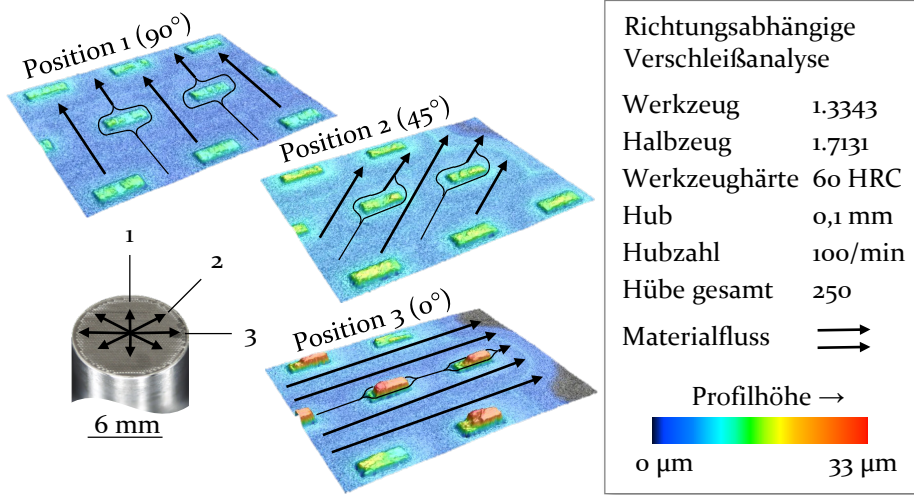


Bild 74: Qualitative Analyse der Texturen nach 250 an verschiedenen Positionen des Prägestempels

Texturen, die im 90°-Winkel ausgerichtet sind, sind nach 250 Hüben stark vom Verschleiß betroffen. Während die Länge und Breite der Textur erhalten bleibt, wird die Höhe reduziert. Ein ähnliches Verhalten ist bei Elementen festzustellen, die unter 45° ausgerichtet sind. Allerdings ist die Höhenabnahme in dieser Position geringer. Ähnlich wie bei den Verschleißergebnissen in der Mittelposition sind die zyklischen Werkzeugbelastungen aufgrund des Materialflusses für das Abplatzen und die Rissbildung der Texturen verantwortlich. Die Spannungsverteilung in Abhängigkeit der Texturausrichtung zur Hauptstoffflussrichtung (Positionen 1-3) sowie im Bauteilzentrum (Position 0) ist in Bild 75 gezeigt.

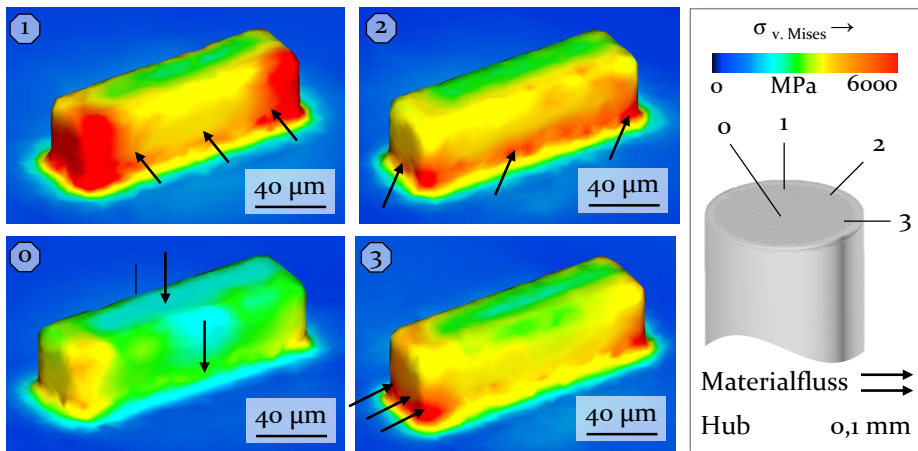


Bild 75: Spannungsverteilung der MikrotTexturen in Abhängigkeit des lokalen Stoffflusses

Aufgrund der Kerbwirkung im Übergangsbereich zwischen Grundkörper und Funktionselement sind die Risse zunächst an dieser Stelle zu erwarten. In diesen Bereichen werden auch die höchsten Schubspannungen τ detektiert. Diese liegen für Position 1 bei $\tau_{\max} = 1800$ MPa und für Position 3 32 % darunter. Die hohe Materialumlenkung in Position 1 und 2 um die Texturen wirkt sich daher negativ auf den Texturverschleiß aus. In Position 2 werden bei der geprüften Prägetiefe $17 \cdot 10^{-5}$ mm³ und in Position 1 $29 \cdot 10^{-5}$ mm³ Werkstoff umgelenkt. Diese Umlenkung resultiert in hohen Querkräften und folglich zunehmenden Schubspannungen. Signifikant geringere Spannungen und folglich weniger Ausbrüche resultieren dagegen in Position 3, wo die Materialumlenkung um bis zu 70 % geringer ist. Die der Materialflussrichtung zugewandte Seite der Textur ist im Allgemeinen stärker von Ausbrüchen betroffen, da in diesen Bereichen aufgrund der Materialumlenkung die größten Kontaktspannungen auftreten.

Um die qualitativ ausgewerteten Daten zu bestätigen, werden im folgenden Abschnitt die geometrischen Texturmaße in den vier Hubstufen ausgewertet. Die Analyse stützt sich ausschließlich auf die Texturhöhe, da in den vorangegangenen Untersuchungen die Haupteffekte des Verschleißes auf dieses Maß dargestellt wurden. Bild 76 zeigt die Entwicklung der Texturhöhe an den drei Positionen auf der Stempeloberfläche mit drei gemessenen Stempeln und je drei gescannten Texturen pro Position.

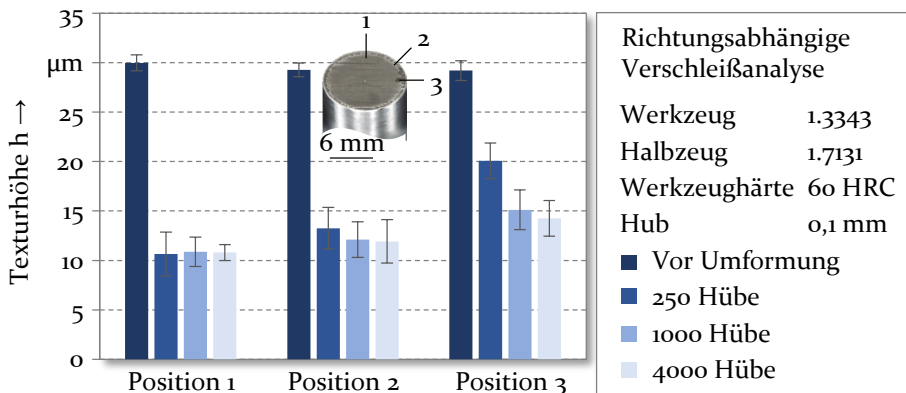


Bild 76: Quantitative Analyse der Texturen vor der Umformung sowie nach 250, 1000 und 4000 Hüben an verschiedenen Positionen des Prägestempels

Bei den Messpositionen 1 und 2 ist bereits nach 250 Hüben eine erhebliche Abnahme der Texturhöhe zu erkennen. Weitere Hübe führen nicht mehr zu einer kontinuierlichen Abnahme der Höhe. Dies ist ein Indiz dafür, dass bei der Resthöhe von $10,8 \pm 2,0$ µm an Position 1 und $12,0 \pm 1,6$ µm an Posi-

tion 2 die Resistenz gegen niedrigzyklische Ermüdung erreicht ist. Die Einlaufphase an Position 1 ist folglich bereits nach 250 Hübten abgeschlossen. Der degressive Verlauf des Verschleißbetrags ist ein Indiz für den Zustand der Inkubationszeit, in der meist kein oder äußerst wenig Verschleiß detektiert wird [230]. Ein progressiver Anstieg des Verschleißbetrags, der den Ausfall der Texturen ankündigt [230], ist allerdings auch nach 4.000 Hübten noch nicht zu detektieren. Die Inkubationszeit dauert also noch an, wobei deren Ende erst nach einer Vielzahl weiterer Hübe zu erwarten ist. Der messbare Verschleißbetrag ist während dieser Zeit nahezu konstant, da Prozesse wie die Rissbildung und das Risswachstum sowie mikrostrukturelle Veränderungen graduell und langsam ablaufen [230]. Die Dauer der Inkubationszeit hängt im Allgemeinen unter anderem von der chemischen Zusammensetzung, dem Wärmebehandlungszustand und dem Herstellungsverfahren des Werkzeugs sowie von der Belastung während des Umformprozesses ab. Deterministische Ansätze zur Lebensdauerabschätzung [231] und experimentelle Langzeitversuche [232] bieten in diesem Zusammenhang das Potential, die Dauer bis zu einem Gewaltbruch der Texturen zu ermitteln. Da Werkzeuge der Umformtechnik allerdings bereits bei einem Wachstum von Mikrorissen zu größeren Rissen ausgetauscht werden [231], berücksichtigt die vorliegende Verschleißanalyse ausschließlich den Bereich bis zur Inkubationsphase und nicht bis zum vollständigen Ausfall. In Position 3 ist ein schrittweises Verschleißverhalten der Texturoberfläche festzustellen. Es handelt sich um den degressiven Anstieg des Verschleißbetrags in der Einlaufphase. Die Texturhöhenabnahme scheint im Bereich von 4.000 Hübten in die Sättigung und damit in die Inkubationszeit zu laufen. Aufgrund der stützenden Wirkung der Texturlängsseite sowie des geringeren umgelenkten Stoffflussvolumens sind Texturen, die in Richtung des Materialflusses angeordnet sind, folglich weniger vom Verschleiß betroffen. Im Hinblick auf die Texturierung in großen Stückzahlen ist aufgrund des inhomogenen Verschleißverhaltens eine gezielte Auslegung der werkzeugseitigen Strukturhöhen und -Abmessungen durch die Anpassung an die lokal vorherrschenden Spannungszustände denkbar.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Verwendung nicht-rotations-symmetrischer Texturgeometrien auf Umformwerkzeugen für Prägevorgänge, bedingt durch die relativen Ausrichtungen zum Materialfluss, zu einem stark anisotropen Verschleißverhalten führt. In Abhängigkeit dieser Ausrichtung herrscht nach 4000 Hübten noch die Einlaufphase oder die Inkubationszeit vor. Die präzise Bestimmung und Abgrenzung der Bereiche unterschiedlichen Verschleißverhaltens bedarf weiterer Analysen der Stempeloberflächen.

Zur großflächigen Untersuchung der Stempeloberflächen werden daher Aufnahmen mit dem M8 ZOOM Stereomikroskop der Wild Heerbrugg AG erstellt. Die integrierte Mikroskopkamera DP23 der Olympus Europa SE & Co. KG erlaubt eine schnelle und hochauflösende Bilderfassung. Bild 77 a) zeigt die texturierte Stempeloberfläche vor der Umformung sowie nach 250 und 1.000 Hüben. Nach der Oberflächenstrukturierung mittels Mikroerodieren liegen zunächst unbeschädigte Texturen vor. In den Mikroskopaufnahmen schlägt sich dies in einem starken Kontrast aus Texturoberfläche und dem Boden der Anbindungszone nieder.

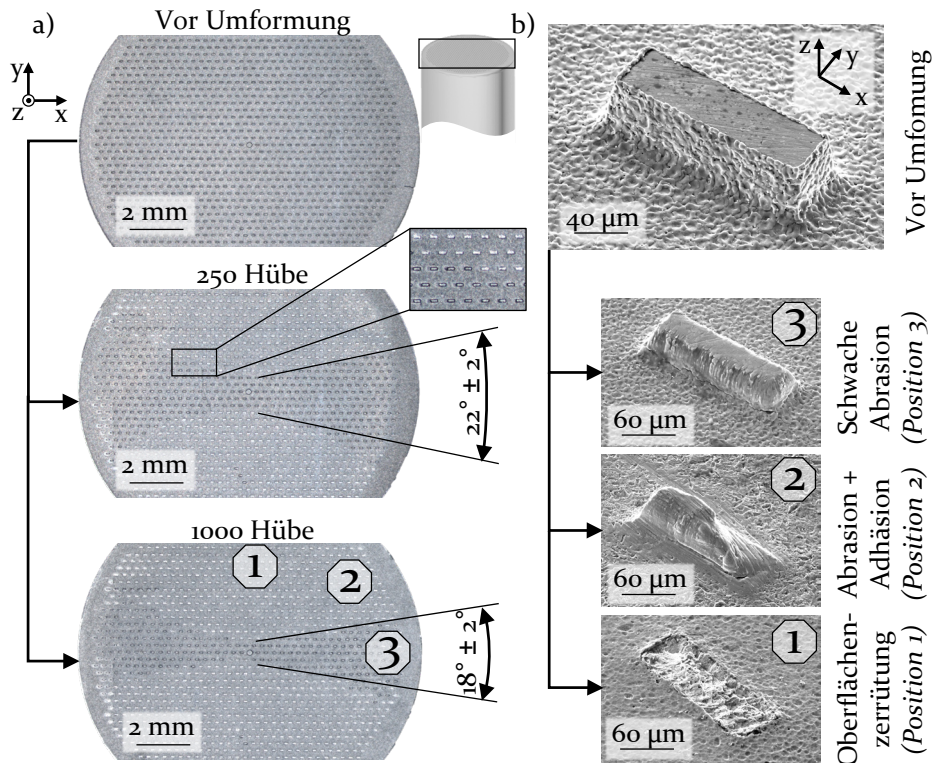


Bild 77: Mikroskopaufnahmen der texturierten Stempel a) sowie exemplarische REM Aufnahmen der Texturen und deren Verschleißmechanismen

Nach 250 Hüben nimmt der Kontrast auf der Mehrheit der Stempeloberfläche merklich ab. Bewirkt wird diese Kontrastreduktion durch die verschleißbedingte Veränderung der Texturoberfläche. Unveränderte Texturen sind um die Mittelachse in x-Richtung zu finden. Vom Mittelpunkt der Stempeloberfläche aus verläuft eine klare Grenze zwischen veränderten und unveränderten Texturen zum Stempelrand. Während die Grenze nach 250 Hüben in einem Winkel von $22^\circ \pm 2^\circ$ verläuft, nimmt der Winkel durch fortschreitenden Verschleiß um $4^\circ \pm 2^\circ$ ab. Dies verdeutlicht den stark

anisotropen Wirkmechanismus des Texturverschleißes an quaderförmiger Mikrostrukturen. Entscheidend für das Verschleißverhalten der Texturen ist das durch die Fließbehinderung der Texturen umzulenkende Werkstoffvolumen. Je größer die Fließbehinderung und dadurch das umzulenkende Werkstoffvolumen ist, desto stärker wirken Querkräfte und somit Schubspannungen auf die Werkzeugtexturen. Aufgrund der identischen Orientierung aller Texturen in Verbindung mit der radialen Hauptstoffflussrichtung resultiert das dargestellte inhomogene Verschleißverhalten. Darüber hinaus kann eine Abhängigkeit des Verschleißverhaltens von der Materialflussgeschwindigkeit identifiziert werden. Texturen in y -Richtung, die mit der langen Seite in 90° zum radialen Materialfluss angeordnet sind, werden vom Stempelmittelpunkt bis zum Stempelrand unterschiedlich stark durch Verschleiß verändert.

Einerseits sind nach 250 Hüben im Stempelmittelpunkt in y -Richtung fünf Reihen der Texturen unverändert erhalten. Andererseits sind alle außerhalb dieses Bereichs liegende Texturen in gleicher Richtung durch Verschleiß verändert. Bei dem vorliegenden Prägevorgang ist die Hauptstoffflussrichtung, wie bei vergleichbaren Prozessen [204], in radialer Richtung orientiert und die Fließgeschwindigkeit nimmt vom Zentrum nach außen hin zu. Aus der Literatur kann entnommen werden, dass die Fließgeschwindigkeit und somit auch die Radialverschiebung des Werkstoffs den Verschleiß entscheidend beeinflusst [219]. Bedingt durch die daraus resultierenden verlängerten Fließwege sind die Texturen nach außen hin größeren Oberflächenveränderungen ausgesetzt, als in der Stempelmitte. Darüber hinaus werden die auftretenden Verschleißmechanismen anhand von REM Aufnahmen (Bild 77 b) ermittelt und charakterisiert. Dieses Vorgehen stellt einen etablierten Ansatz in der Verschleißanalyse metallischer Bauteiloberflächen dar [233]. Ausgangstexturen vor der Umformung weisen an den Seitenflächen eine kraterförmige Oberfläche auf. Ursächlich hierfür sind die inkrementellen Entladungspulse im Herstellungsprozess des Mikroerodierens. Da die Elektrode an der Deckfläche der Texturen nicht im Eingriff ist, verbleibt diese Oberfläche im Ausgangszustand. Es bildet sich lediglich der charakteristische Schmelzaufwurf an der Kante zwischen Seitenfläche und Deckfläche. Wie im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigt, ist das Verschleißverhalten stark inhomogen und von der Orientierung der Textur abhängig. Daher werden zur Identifikation der Verschleißmechanismen REM Aufnahmen der Orientierungen in 0° , 45° und 90° untersucht. Texturen in 0° sind lediglich von schwach abrasivem Verschleiß betroffen. Der Partikelabtrag ist in der Anbindungszone wenig ausgeprägt und nimmt in Richtung der Deckfläche zu. Dieses Verhalten ist durch die Lokalisierung

von Spannungsspitzen in Werkzeugen an deren Kanten und engen Radien zu erklären [234]. Folglich wird der Abrasivverschleiß an Position 3 besonders an den Seitenflächen nahe der Kante zur Deckfläche detektiert.

Aufgrund der höheren Scherkräfte tritt an Position 2 bei einer Orientierung von 45° stark abrasiver Verschleiß auf. Der Materialfluss des Blechbands sorgt als Gegenkörper durch Mikrozerspanvorgänge und wiederholtes Ritzen [230] auf der Oberfläche des Grundkörpers für die Ablösung von Partikeln. Es ist zu erwarten, dass diese abgelösten Werkzeugpartikel aufgrund der hohen Härte Furchungverschleiß auf weiter außenliegenden Werkzeugoberfläche verursachen. Sie werden durch den radialen Materialfluss weiter transportiert. Der abrasive Verschleiß der dort liegenden Texturen wird dadurch ebenfalls beschleunigt. Darüber hinaus findet in direkter Umgebung der Anbindungszone eine Einglättung des Bodenbereichs statt. Ein Erklärungsansatz besteht in der starken Materialumlenkung, die zu höheren Kontaktdrücken und infolgedessen zu Mikroverschweißungen [230] der Kontaktpartner führen. Dabei entstehen durch plastische Deformation des Halbzeugwerkstoffs 1.7131 Mikrokontakte mit dem Werkzeugwerkstoff und daraus resultierend adhäsive Bindungen [230]. In Position 1, welche einer Texturorientierung von 90° zur Hauptstoffflussrichtung entspricht, ist Oberflächenzerrüttung der vorherrschende Verschleißmechanismus (Bild 77 b). Die zyklische Beanspruchung des Prägevorgangs in Verbindung mit der stark ausgeprägte Fließbehinderung an der langen Texturseite sorgt sukzessive für Rissbildung in der Anbindungszone. Darauf folgende Hübe resultieren in einem Risswachstum, das schließlich zur Abtrennung der gesamten Textur und somit zum Ausfall des Werkzeugs führt. Der Nachweis des auftretenden Abrasionsverschleißes sowie dessen zugrundeliegende Modellvorstellung wird in Bild 78 dargelegt. Die primäre Abrasion wird durch die hohen Druckspannungen hervorgerufen, die aus dem Werkstofffluss in radialer Richtung resultieren. Dadurch werden Mikrozerspanvorgänge des Grundkörpers infolge harter Rauheitsspitzen des Gegenkörpers ausgelöst. Die herausgelösten Abrasivpartikel verbinden sich anschließend wegen der durchbrochenen Oxidschichten adhäsiv mit der Werkstückoberfläche. Der weitere Stofffluss bewirkt das Furchen der harten Abrasivpartikel auf der Werkzeugoberfläche, was die Lebensdauer zudem reduziert. Dieses Verhalten wird anhand der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) des Werkstücks belegt. Auf den Werkstücken werden Werkzeugpartikel aus Wolfram nachgewiesen, die zu einer sekundären Abrasion führen.

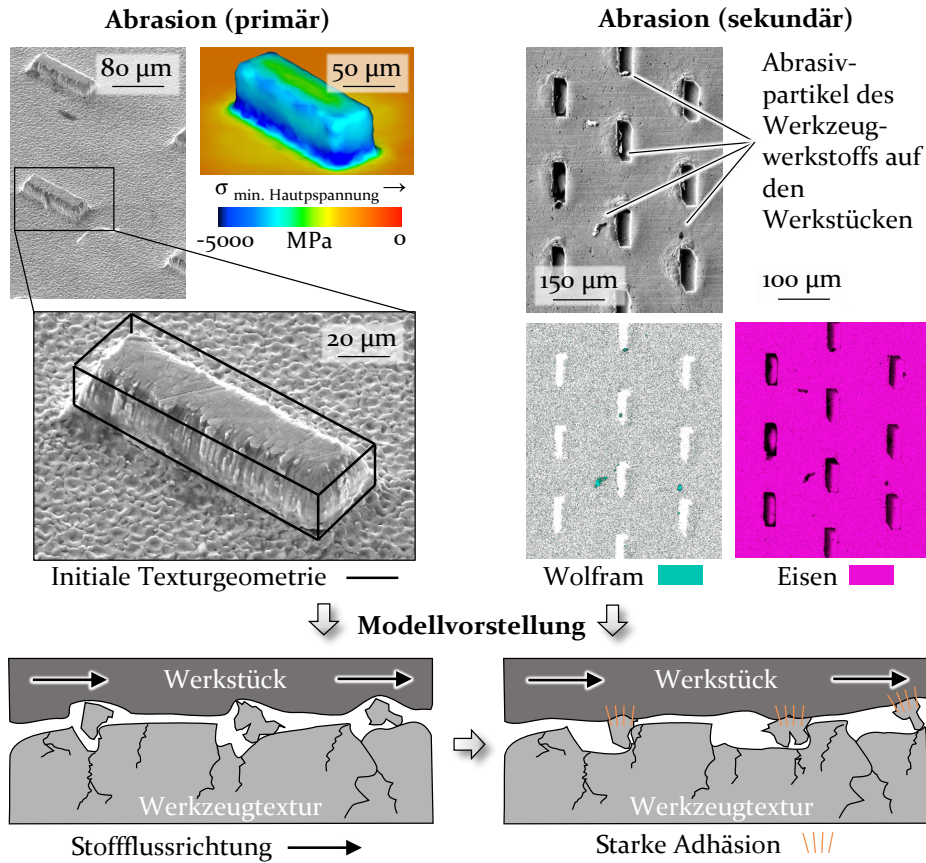


Bild 78: Verschleißmechanismen der primären und sekundären Abrasion

Der Verschleißmechanismus der Adhäsion tritt im untersuchten Prozess durch Mikroverschweißungen von Abrasivpartikeln des Werkzeugwerkstoffs an anderer Stelle auf der Werkzeuoberfläche auf (Bild 79). Anhand der EDX-Analyse wird nachgewiesen, dass die Adhäsionspartikel vorwiegend aus Wolfram und Silicium bestehen und an der dem Werkstofffluss zugewandten Texturseite angestaut werden. Es ist anzunehmen, dass der Eisenanteil von Texturausbrüchen durch hohe Normalkräfte und die großen Anziehungskräfte bereits auf der Bodenfläche des Werkzeugs adhäsiv verschweißt wird. Wolfram- und Siliciumkarbide werden dagegen in Stoffflussrichtung über die Werkzeuoberfläche transportiert, bis Kontakt mit einer Werkzeugtextur auftritt. Durch die Fließbehinderung der Textur wird die weitere Bewegung unterbunden und Mikroverschweißungen zwischen den Karbiden und der Texturoberfläche entstehen.

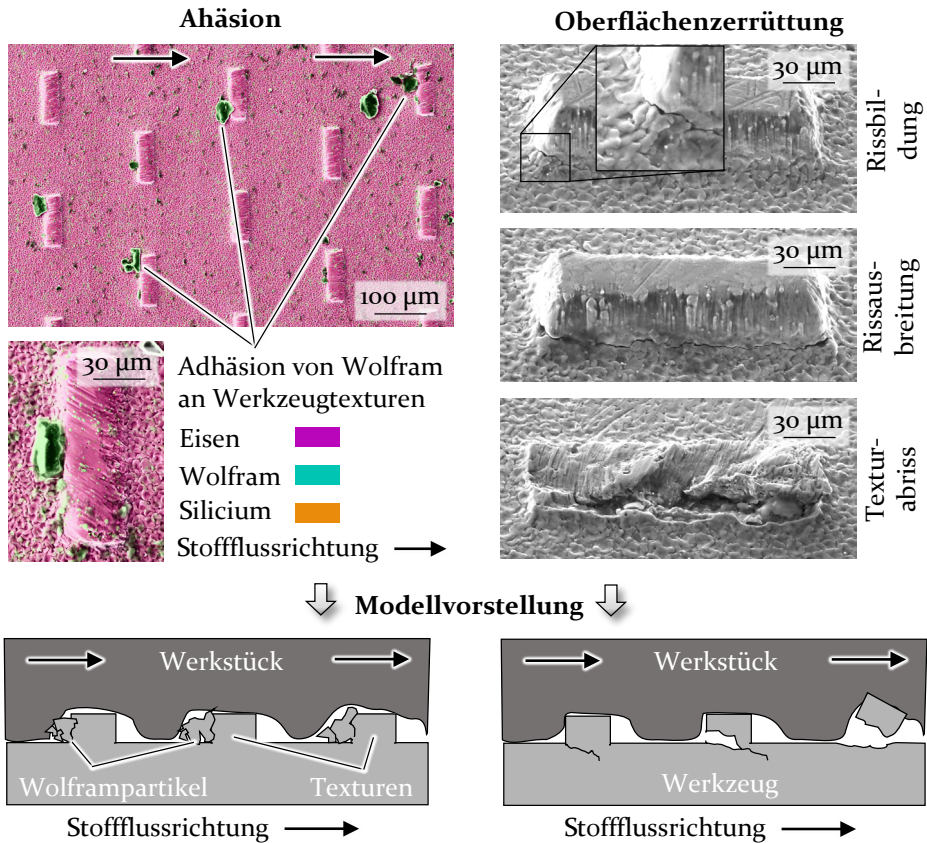


Bild 79: Verschleißmechanismen der Adhäsion und Oberflächenzerrüttung

Dieser Verschleißmechanismus tritt über die gesamte Stempeloberfläche auf, wobei die Intensität durch den Transport der Verschleißpartikel mit dem Stofffluss nach außen hin zunimmt. Im Gegensatz dazu ist der Mechanismus der Oberflächenzerrüttung auf Bereiche mit Texturen begrenzt, die eine hohe mittlere Verlängerung der Fließwege aufweisen. In Übereinstimmung mit der Spannungsanalyse der Werkzeugtexturen in Bild 75 erfolgt die Rissbildung initial im Eckbereich der Anbindungszone. Im weiteren Verlauf findet die Rissausbreitung entlang der Anbindungszone auf der gesamten Texturlänge statt. Im letzten Schritt wird die Textur durch die weitere zyklische Scherbelastung vollständig abgelöst.

Durch die Untersuchung der texturierten Werkzeugoberfläche konnten vier wesentliche Verschleißmechanismen identifiziert werden. Mikrotextrurierte Werkzeuge werden durch primäre beziehungsweise sekundäre Ab-

rasion sowie durch Adhäsion und Oberflächenzerrüttung in ihren Eigenschaften verändert. Anhand der auftretenden Verschleißausprägung wurden die zugrundeliegenden Ursachen abgeleitet und nachgewiesen. Eine Übersicht der Erkenntnisse ist in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Verschleißmechanismen mikrotexturierter Werkzeuge sowie deren Grundlage der Entstehung

Verschleißmechanismus	Verschleißart	Ausprägung	Grundlage
Abrasion (primär)	Gleiten	Ablösung von Partikeln an Seiten- und Deckfläche	Spannungsspitzen an Kanten und Radien
Abrasion (sekundär)	Furchung	Furchen und Ausbrüche an Texturen und Bodenfläche	Bewegung von Abrasivpartikeln durch Materialfluss
Adhäsion	Gleiten	Anstauung von Abrasivpartikeln an den Texturen	Stoffflussbehinderung durch Texturen
Oberflächen-zerrüttung	Gleiten	Delamination in der Texturanbindung	Rissbildung in Anbindungszone durch zyklische Scherkräfte

Primäre Abrasion wird bei mikrotexturierten Werkzeugen durch Spannungsspitzen an Kanten und Radien hervorgerufen. Dadurch werden Werkzeugpartikel an den Seiten- und Deckflächen mittels Mikrozerspanvorgängen am Grundkörper herausgelöst. Die Adhäsion dieser Partikel an den Werkstückwerkstoff bedingt die sekundäre Abrasion, die durch den Stofffluss und die dadurch induzierte Radialverschiebung entsteht. Mit der Adhäsion von Abrasivpartikeln an den Texturen wurde ein weiterer Verschleißmechanismus identifiziert und nachgewiesen. Darüber hinaus können zyklische Scherkräfte zu einer vollständigen Delamination der Texturanbindung führen.

8.3 Maßnahmen zur Erweiterung der Werkzeugstandmenge

Die Erkenntnisse zu auftretenden Verschleißmechanismen und deren Ursachen werden genutzt, um Maßnahmen zur Erweiterung der Werkzeugstandmenge zu entwickeln. Vor dem Hintergrund, dass 3-5 % der Produktkosten umformtechnisch hergestellter Bauteile auf die Kosten der Werkzeugfertigung zurückgeführt werden können [235], ist die Verlängerung der Lebensdauer essenziell. Das verfolgte Ziel ist aus diesem Grund die Erarbeitung von wirksamen Maßnahmen zur Reduktion des Texturverschleißes in Mikroprägeverfahren. Zur Erreichung des Ziels werden mögliche Ansätze identifiziert, experimentell umgesetzt und abschließend bewertet.

Etablierte Maßnahmen für konventionelle Umformwerkzeuge sind die Anpassung des Bearbeitungsverfahrens, Wärme- und thermochemische Behandlungen sowie das Aufbringen verschleißfester Oberflächenbeschichtungen [235]. Aus den Abschnitten 2.2 und 4.2 geht hervor, dass das Werkzeugherstellungsverfahren des Mikroerodierens aufgrund der Flexibilität und der Genauigkeit kaum durch alternative Prozesse ersetzt werden kann. Daher liegt der Fokus im Rahmen der Arbeit auf der Untersuchung der Eignung verschleißfester Beschichtungen sowie der Adaption der Wärmebehandlungsstrategie für mikrotexturierte Umformwerkzeuge.

Verschleißfeste Beschichtung

Für die Kaltumformung kommen häufig chemical vapor deposition (CVD) und physical vapor deposition (PVD) Beschichtungen zum Einsatz [192]. PVD Beschichtungen bieten für mikrotexturierte Werkzeuge einen entscheidenden Vorteil gegenüber dem CVD Verfahren. Die erzielbaren geringen Schichtdicken von 2-4 μm [236] verändern die Texturgeometrie nur äußerst geringfügig. Darüber hinaus sind die für CVD Verfahren genutzten Ausgangsstoffe meist hochgiftig und leicht entflammbar, während das Beschichtungsmaterial im PVD Prozess lediglich mit Hochleistungsstrom oder Lasern in den gasförmigen Zustand gebracht wird [237]. Aufgrund der hohen Druckbelastbarkeit sowie einer hohen Verschleißbeständigkeit [236] wird eine Titan-Aluminiumcarbonitrid Beschichtung der voestalpine eifeler Coating GmbH im PVD Verfahren auf den texturierten Prägestempeln abgeschieden. Diese temperaturbeständige Grundschicht wird mit einer stark reibungsreduzierenden Titan-Carbo-Nitrit Schicht abgeschlossen. Zur Bewertung der Wirksamkeit der Beschichtung werden die Verschleißversuche entsprechend Abschnitt 8.1 an $n=3$ Prägestempeln durchgeführt und den Ergebnissen unbeschichteter Werkzeuge gegenübergestellt. Als Evaluationskriterium wird die relative Höhenabnahme der Tex-

turen h_A herangezogen, die sich nach Gleichung 4 aus dem Unterschied der gemessenen Höhe der aktuellen Hubstufe h_n und der vorangegangenen Texturhöhe h_{n-1} ergibt.

$$h_A = \left(\frac{h_n}{h_{n-1}} - 1 \right) * 100 \quad (4)$$

In Abschnitt 8.2 wurde aufgezeigt, dass das Verschleißverhalten texturierter Werkzeugoberflächen stark materialfluss- und orientierungsabhängig ist. Um dies zu berücksichtigen, wird die Gegenüberstellung an je zehn aufgenommenen Texturen durchgeführt, die homogen über die Stempeloberfläche verteilt sind. Die relative Höhenabnahme beschichteter und unbeschichteter Mikrot Texturen ist in Bild 80 dargestellt.

Für beide Stempelvarianten wird ein vergleichbares Verschleißverhalten festgestellt. Besonders nach 1000 Hüben und 4000 Hüben unterscheidet sich die relative Höhenabnahme unter Berücksichtigung der Standardabweichung nur geringfügig. Die Höhenabnahme der beschichteten Stempel liegt nach 1000 Hüben im Vergleich zur vorangegangenen Messung bei $17,0 \pm 1,1 \%$, während die unbeschichtete Variante eine Reduktion von $18,4 \pm 1,5\%$ aufweist. Aus diesem Grund kann im Übergang aus Einlaufphase und Inkubationszeit kein Einfluss der Beschichtung festgestellt werden.

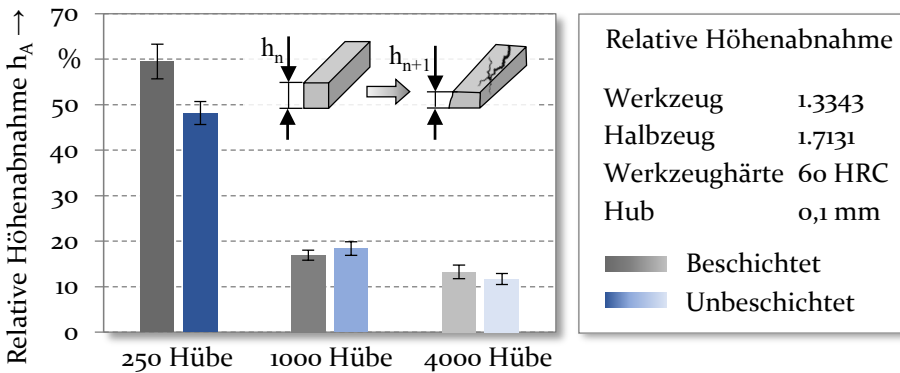


Bild 80: Relative Höhenabnahme beschichteter und unbeschichteter Mikrot Texturen nach 250, 1000 und 4000 Hüben

Der entscheidende Unterschied der beiden Varianten zeigt sich für die Messungen nach 250 Hüben. Zum einen ist die Reduktion, entsprechend den Ergebnissen der unbeschichteten Texturen, für beschichtete Werkzeuge mit $59,5 \pm 3,8 \%$ in der Einlaufphase stärker ausgeprägt als in den folgenden Hubstufen. Zum anderen liegt dieser Wert im Mittel $11,3 \%$ über

den Höhenabnahmen unbeschichteter Stempel. Die negative Beeinflussung des Verschleißverhaltens durch die Beschichtung ist auf eine Ablösung derselben von der Texturoberfläche zurückzuführen. Wie in Bild 81 dargestellt, kommt es bereits in der Einlaufphase zu einer Delamination der Titan-Aluminium-Nitrit und der Titan-Carbo-Nitrit Schicht. Es ist anzunehmen, dass die Ausdehnung eines Risses entlang der Grenzfläche zwischen der Beschichtung und dem Schnellarbeitsstahl 1.3343 für das Versagen der Schicht verantwortlich ist [238]. Zur Berücksichtigung der Schichtdicke sind die geometrischen Maße der mikroerodierten Texturen, die für eine Beschichtung vorgesehen sind, um diesen Wert vorkorrigiert. Eine vollständige Delamination der Beschichtung erklärt daher die Differenz der Höhenabnahme zwischen beschichteter und unbeschichteter Variante nach 250 Hüben. Delaminationsverhalten kann im Allgemeinen auf ungeeignete Oberflächen des Grundwerkstücks zurückgeführt werden [239]. Dem Verbleib dünner Oxidschichten nach dem Mikroerodieren wurde daher zum Beispiel durch einen Mikrostrahlvorgang entgegengewirkt. Rückstände von Schmierstoffen wurden in einer Reinigungsanlage entfernt. Untersuchungen von LING ET AL. [240] zeigen, dass die Rauheit des Substratwerkstoffs starken Einfluss auf die Phasenbildung und somit auch auf die Härte und das Verschleißverhalten besitzt.

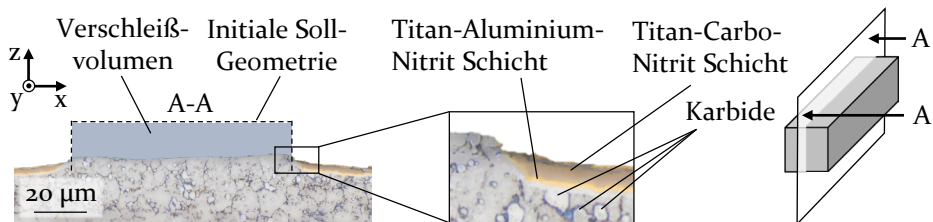


Bild 81: Metallographischer Längsschliff einer beschichteten Textur nach 250 Hüben

Resultierend aus der kraterförmigen Erodieroberfläche (Bild 77 b) ist die Verbundfestigkeit der Beschichtung auf den Texturen aus diesem Grund limitiert. Da Kanten und enge Radien die kritischen Bereiche von Beschichtungen sind [239], ist die Rissinitiierung an diesen Stellen der Texturen zu erwarten. Als Maßnahmen zur Reduktion der Delamination werden die Vergrößerung der Kantenradien sowie die Durchführung eines Mikropoliervorgangs der erodierten Oberfläche empfohlen. Mit dem Ziel, die grundlegende Eignung von Oberflächenbeschichtungen nachzuweisen, wurde darüber hinaus eine Referenzstruktur mit einem Durchmesser von 120 µm auf der Werkzeugoberfläche vorgesehen, die unkritisch hinsichtlich des Werkzeugverschleißes ist (Bild 82).

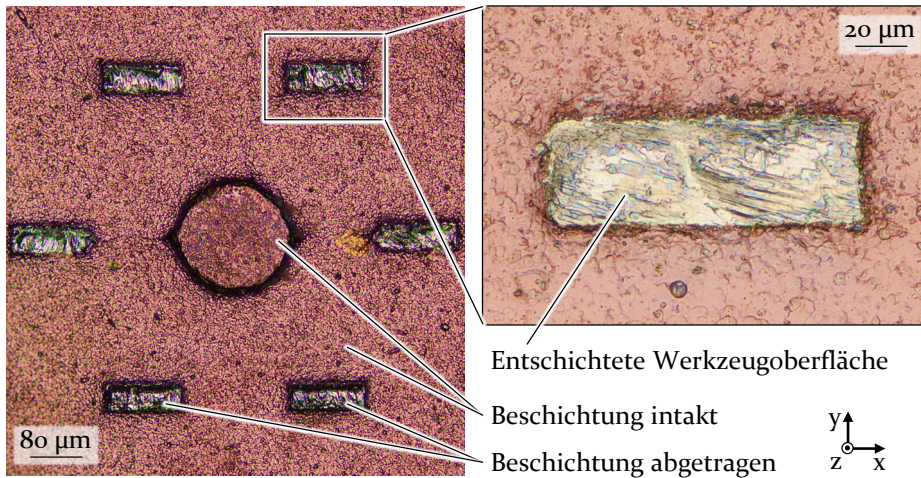


Bild 82: Mikroskopaufnahmen texturierter Werkzeuge mit Titanbeschichtung

Im Gegensatz zur Oberfläche der Quadertexturen ist die Titanbeschichtung im Bodenbereich sowie auf der vergrößerten Referenzstruktur intakt. Grundlegend wird daher bewiesen, dass PVD Beschichtungen eine gute Bindung mit den erodierten Oberflächen besitzen und somit positive Effekte wie eine Reibungsreduktion für mikrotexturierte Werkzeuge erzielen können.

Wärmebehandlung

Neben Faktoren wie der chemische Zusammensetzung, der Oberflächenbeschaffenheit und der Gefügeausbildung bestimmt die Härte den Verschleißwiderstand eines Werkstoffs [6]. Es wird daher geprüft, inwieweit die gezielte Einstellung der Stempelhärte dazu beiträgt, den Texturverschleiß im Mikroprägen zu reduzieren. Die gewählte Wärmebehandlungsstrategie besteht aus der Vorbehandlung durch Spannungsarmglühen, dem Härtevorgang selbst sowie der Fertigbearbeitung mittels dreimaligem Anlassen. Die finale Werkstoffhärte wird über die Temperatur- und Haltezeiteinstellungen gesteuert. Für Umformwerkzeuge wird die Nutzung des Schnellarbeitsstahls bei einer Härte zwischen 57 HRC und 63 HRC empfohlen [6]. Die Untersuchung wird deshalb anhand einer dreistufigen Variation des Faktors bei 57 HRC, 60 HRC und 63 HRC durchgeführt. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden je Stempel, wie in der Beschichtungsanalyse, zehn homogen verteilte Texturen für die Messungen herangezogen. Ein adäquates Signifikanzniveau wird in den experimentellen Versuchen durch die Prüfung von $n = 3$ Stempeln je Variante

erzielt. Bild 83 zeigt die relative Höhenabnahme h_A für die drei gewählten Härtevarianten nach 250, 1000 und 4000 Hübem.

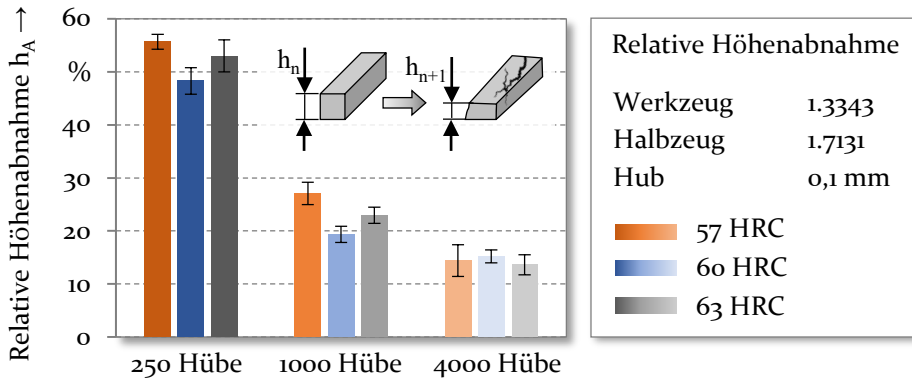


Bild 83: Relative Höhenabnahme der Mikrotextruren in Abhängigkeit der Härte nach 250, 1000 und 4000 Hübem

In der Einlaufphase des Texturverschleißes (0-1000 Hübem) liefert eine Härte von 60 HRC die geringste relative Höhenabnahme h_A . Die weichere und die härtere Stempelvariante führen zu stärkerem Materialverlust durch Verschleiß mit einer leichten Tendenz des auf 63 HRC gehärteten Werkstoffs für geringeren Verschleiß. Eine abschließende Aussage zu den Unterschieden zwischen 57 HRC und 63 HRC ist wegen der vorliegenden Standardabweichungen nicht möglich. Während der Inkubationszeit (1000-4000 Hübem) liegen alle drei geprüften Härtevarianten auf vergleichbarem Niveau. Die verringerte Höhenabnahme in der Einlaufphase für 60 HRC ist durch das Spannungsfeld aus Härte und E-Modul zu erklären. Eine hohe Härte bietet Schutz vor abrasivem Verschleiß, während ein geringer E-Modul einer Rissbildung entgegenwirkt [192]. Eine zu hohe Härte resultiert folglich in dem Verlust von Duktilität [192] und führt zu einer Ausbildung von Rissen. Eine Rissbildung ist gerade in der Anbindungszone der Texturen äußerst kritisch, das dies, wie in Bild 77 b) gezeigt, häufig zu einem vollständigen Abscheren des Elements führt. Auf Basis der Ergebnisse aus Bild 83 kann abschließend bestätigt werden, dass der Wirkmechanismus zur Wärmebehandlung klassischer Umformwerkzeuge auf mikrotextrurierte Prägwerkzeuge übertragen werden kann. Entsprechend dem jeweiligen Anwendungsfall ist daher in der Wärmebehandlungsstrategie ein Kompromiss aus Härte und Duktilität zu finden, um das Verschleißverhalten positiv zu beeinflussen.

Zusammenfassende Bewertung der Maßnahmen

Eine zusammenfassende Bewertung der Maßnahmen zur Verschleißreduktion mikrotexturierter Werkzeugoberflächen sowie deren Auswirkungen und Grundlagen wird in Tabelle 10 aufgezeigt. Darin sind neben den bereits diskutierten Ansätzen zur Beschichtung und Wärmebehandlung auch weitere Maßnahmen enthalten, die aus den Erkenntnissen des Abschnitts 8.2 abgeleitet werden können.

Tabelle 10: Bewertung der Maßnahmen zur Verschleißreduktion sowie deren Auswirkungen und Grundlagen

Maßnahme	Effekt	Auswirkung	Grundlage	
Reduktion der Stoffflussumlenkung	++	Reduktion von Abrasion und Adhäsion	Verringerung der Kontaktdrücke	
Verringerung der Materialverschiebung	+	Reduktion von abrasivem Verschleiß	Abnahme der Fließwege	
Aufbringen einer PVD Beschichtung	-	Verschleißerhöhung in der Einlaufphase	Starke Delamination der Beschichtung	
Anpassung der Wärmebehandlung	+	Verschleißreduktion besonders in der Einlaufphase	Kompromiss aus Härte und Duktilität einstellbar	
Stark Positiv	Positiv	Neutral	Negativ	Stark Negativ
++	+	0	-	--

Ein vielversprechendes Konzept zur Reduktion von abrasivem und adhäsivem Verschleiß stellt die Verringerung der Stoffflussumlenkung dar. Mittels Orientierung der kurzen Seite von nicht-rotationssymmetrischen Texturen in Richtung des Hauptstoffflusses der Umformung, ist eine Verringerung der Kontaktdrücke zu erzielen. Dies wirkt sich positiv auf das Verschleißverhalten aus. Der Wirkmechanismus ist durch die mittlere Stoffflussumlenkungsdistanz d_U zu beschreiben. In Bild 72 wurde die Reduktion der Spannungskonzentrationen der Texturen mit geringer Verlängerung der Fließwege nachgewiesen. Limitiert wird die Prozessmaßnahme jedoch durch spezifische Anwendungsfälle mikrotexturierter Oberflächen. Einige Einsatzgebiete fordern über die gesamte Bauteiloberfläche identisch orientierte Strukturen, was eine lokale Anpassung der Texturausrichtung ausschließt. Eine Verringerung der Materialverschiebung durch geometrische oder tribologische Anpassungen der Werkzeuge kann des Weiteren ge-

nutzt werden, um die Fließwege zu reduzieren und folglich abrasiven Verschleiß abschwächen. Die positive Wirkung der reduzierten Stoffflussgeschwindigkeit auf das Verschleißverhalten wurde in diesem Zusammenhang anhand der Mikroskopaufnahmen in Bild 74 a) belegt. Eine Verringerung der Materialverschiebung ist durch den gewählten Umformprozess begrenzt. Verfahren der Umformtechnik mit geringer Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück, wie das Streckziehen, sind aus verschleißtechnischer Sicht besser geeignet als solche mit hoher Materialverschiebung, wie Fließpressprozesse.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Vor dem Hintergrund einer steigenden Nachfrage nach Komponenten mit hoher Funktionsdichte fällt Bauteilen mit texturierten Oberflächen eine immer wichtigere Bedeutung zu. Dies erklärt auch die weite Verbreitung texturierter Produkte sowohl in Alltagsgegenständen als auch in hoch technisierten Systemen. Mit der Mikrostrukturierung von Gegenständen des täglichen Lebens zur Verbesserung der Haptik wie Rändelmuttern und der Integration von Mikropyramidenstrukturen in Solarzellen zur Erhöhung der Lichtabsorption seien an dieser Stelle nur zwei Beispiele genannt. Die Forderung nach einer hohen Fertigungspräzision grenzt verfügbare Herstellungsverfahren für mikrotexturierte Metallbauteile stark ein. Bislang kommen vornehmlich hinzufügende und abtragende Prozesse der Mikrobearbeitung zum Einsatz. Diese liefern zwar äußerst präzise Bauteilstrukturen mit einer hohen Wiederholgenauigkeit. Die oft lange Prozessdauer sowie hohe Herstellungskosten bringen etablierte Prozesse allerdings an ihre Grenzen. Die umformtechnische Bauteilherstellung bietet in diesem Zusammenhang die Möglichkeit, durch kurze Taktzeiten endkonturnahe Bauteile mit Oberflächentexturen, bei hoher Materialausnutzung, zu fertigen. Um das gesamte Potential der Umformtechnik auszuschöpfen sind einstufige Prozesse anzustreben, wobei eine Integration der Prägeoperation in die Herstellung des Bauteilgrundkörpers erfolgt. Hinsichtlich der industriellen Umsetzung solcher Prozesse besteht allerdings ein Mangel an Prozesswissen, der den Einsatz bislang verhindert. Im Rahmen der Arbeit wird daher das Ziel verfolgt, ein grundlegendes Prozessverständnis für die einstufige umformtechnische Herstellung dünnwandiger Bauteile mit mikrogeprägten Oberflächenstrukturen bereitzustellen. Als Referenzwerkstoff wird der Einsatzstahl 1.7131 eingesetzt. Die Grundlage der Untersuchung bildet die Prozessanalyse mit der Identifikation der bauteil- und prozessspezifischen Herausforderungen sowie der Ableitung der Formgebungsgrenzen. Darauf aufbauend gibt eine systematische Einflussanalyse Aufschluss über die Wirkmechanismen der Prozesskombination. Dieses Wissen wird genutzt, um Methoden zur Erweiterung der Prozessgrenzen zu entwickeln. Abschließend wird der Verschleiß und die Lebensdauer mikrotexturierter Werkzeugoberflächen erforscht.

In der initialen Prozessanalyse werden die Musterverzerrung durch Verlängerung der Textur in Hauptstoffflussrichtung, sowie die Texturabflachung aufgrund zunehmenden Werkzeugverschleißes, als entscheidende Prozessgrenzen identifiziert. Mehrfachprägungen und Bodenreißer werden in

diesem Zusammenhang als weniger kritisch eingestuft. Die daran anschließende systematische Einflussanalyse wird hinsichtlich der Zielgrößen der radialen Stoffflussgeschwindigkeit, der Werkzeugbeanspruchung sowie der Texturgenauigkeit durchgeführt. Grundlegend wird für mikrotexturierte Werkzeuge der Wirkmechanismus der Stoffflussumlenkung in Abhängigkeit der mittleren Verlängerung der Fließwege V_F sowie des mittleren Umlenkungswinkels α_U identifiziert. Ein positiver Einfluss einer niedrigen Texturhöhe auf die Werkzeugspannungen sowie die Maßhaltigkeit der bauteilseitigen Oberflächenstrukturen wird identifiziert. Der zugrundeliegende Mechanismus ist durch die höhenabhängige Werkstoffverfestigung bestimmt. Daneben wird die Stoffflussgeschwindigkeit als Einflussgröße auf das Prägeergebnis anhand der Variation der Prozesskraft analysiert. Die Annäherung an der Prozesskraft an einen minimal nötigen Wert F_{krit} zur vollflächigen Texturausformung bietet das Potential, die Werkzeugbeanspruchungen und die Texturgenauigkeit positiv zu beeinflussen. Darüber hinaus wird die Übertragbarkeit der Wirkweise der mittleren Verlängerung der Fließwege V_F für weitere Werkstoffklassen nachgewiesen. Grundlegend kann die Texturmaßhaltigkeit durch die Verwendung von Materialien hoher Festigkeit aufgrund der Zunahme des tangentialen Stoffflusses gesteigert werden. Zur Erweiterung der Prozessgrenze ist im Hinblick auf die Texturgenauigkeit eine inverse Vorkorrektur der Reibbedingungen sowie der Texturgeometrie unter Berücksichtigung des lokalen Stoffflusses wirksam. Im Werkzeugeinsatz werden Abrasion, Adhäsion und Oberflächenzerrüttung als primäre Verschleißmechanismen identifiziert. Die Lebensdauer mikrotexturierter Werkzeuge kann durch die Reduktion der Stoffflussumlenkung sowie durch eine angepasste Wärmebehandlung wirksam verlängert werden. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten zur Erweiterung des Spektrums herstellbarer Bauteilgeometrien die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Prozesse anderer Spannungszustände prüfen. Vielversprechend sind in diesem Zusammenhang Verfahren mit geringer Relativbewegung zwischen Werkstück und texturiertem Werkzeug. Aus industrieller Sicht ist außerdem die Untersuchung der Lebensdauer alternativer Werkzeugwerkstoffe wie zum Beispiel Hartmetalle relevant. Zudem ist die Analyse des Einsatzverhaltens von mittels Umformung gefertigter Texturbauteile notwendig. Neben der klassischen Reibungsreduktion ist vor diesem Hintergrund die Prüfung der Effekte für medizinische Geräte und elektronische Komponenten von großer Bedeutung.

10 Summary and Outlook

Given the growing demand for components with a high functional density, components with textured surfaces are becoming increasingly important. As a result, textured products are widely used both in everyday objects and in highly technical systems. The micro-structuring of day-to-day products to improve their haptics and the integration of micro-pyramidal structures in solar cells to increase their light absorption capability are just two examples. The demand for high manufacturing precision severely limits the available manufacturing processes for micro-textured metal components. Up to now, mainly additive and ablative techniques of micro-processing have been used. Although these provide high-precision component structures with a high degree of repeatability, the often long process cycle times and high manufacturing costs bring established processes to their limits. In this context, forming technology offers the possibility of producing near-net-shape components with surface textures and high material utilization in short cycle times. In order to exploit the full potential of forming technology, single-stage processes should be aimed for, whereby the coining operation is integrated into the production of the basic component body. However, there is a lack of process knowledge with regard to the industrial implementation of such processes, which has so far prevented their use. The aim of this work is therefore to provide a basic understanding of the process for the single-stage forming production of thin-walled components with micro-coined surface structures. The case-hardening steel 1.7131 is used as the reference material. The basis of the investigation is the process analysis with the identification of the component and process-specific challenges as well as the derivation of the forming limits. Based on this, a systematic influence analysis provides information on the mechanisms of action of the process combination. This knowledge is used to develop methods for extending the process limits. Finally, the lifetime and wear of micro-textured tool surfaces will be investigated.

In the preliminary process analysis, pattern distortion due to elongation of the texture in the direction of the main material flow and texture flattening due to increasing tool wear are identified as decisive process limits. Multiple coining and base tearing are classified as less critical in this context. The subsequent systematic influence analysis is carried out with regard to the target variables of radial material flow velocity, tool stress and texture accuracy. For micro-textured tools, the mechanism of action of the material flow deflection is identified as a function of the mean extension of the flow

paths V_F and the mean deflection angle α_U . A positive influence of a low texture height on the tool stresses and the dimensional accuracy of the component-side surface structures is identified. The underlying mechanism is determined by the height-dependent material hardening. In addition, the material flow rate is analyzed as an influencing variable on the coining result based on the variation of the process force. The approximation of the process force to a minimum required value F_{krit} for full-surface texture forming offers the potential to positively influence the tool stresses and the texture accuracy. In addition, the transferability of the effect of the mean extension of the flow paths V_F for other material classes is demonstrated. In general, the texture dimensional accuracy can be increased by using materials of high strength due to the increase in tangential material flow. To extend the process limit with regard to texture accuracy, an inverse pre-correction of the friction conditions and the texture geometry is effective, taking into account the local material flow. Abrasion, adhesion and surface fracturing are identified as the primary wear mechanisms in tool use. The lifetime of micro-textured tools can be effectively extended by reducing material flow deflection and by adapted heat treatment. Future research work should examine the transferability of the results to processes in other stress states in order to expand the spectrum of manufacturable component geometries. In this context, processes with low relative movement between the workpiece and the textured tool are very promising. From an industrial perspective, it is also relevant to investigate the service life of alternative tool materials such as hard metals. It is also necessary to analyze the application behavior of textured components produced by forming. In addition to classic friction reduction, testing the effects for medical devices and electronic components is of great importance in this context.

Literaturverzeichnis

- [1] Niemann, G.H.; Winter, B.-R.; Höhn, K.S.: Maschinenelemente 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen: Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, (2019)
- [2] Dimitrov, D.Z.; Du, C.-H.: Crystalline silicon solar cells with micro/nano texture. *Applied Surface Science*, 266(2013), 1-4
- [3] Tamil Alagan, N.; Zeman, P.; Hoier, P.; Beno, T.; Klement, U.: Investigation of micro-textured cutting tools used for face turning of alloy 718 with high-pressure cooling. *Journal of Manufacturing Processes*, 37(2019), 606-616
- [4] Coblas, D.G.; Fatu, A.; Maoui, A.; Hajjam, M.: Manufacturing textured surfaces: State of art and recent developments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 229(2014)1, 3-29
- [5] Thome, M.: Umformtechnische Herstellung funktionaler flächiger Mikrostrukturen in metallischen Werkstoffen. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2009
- [6] Dietrich, J.: Praxis der Umformtechnik - Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen, Wiesbaden: Springer Vieweg, (2013)
- [7] Tekkaya, A.E.; Allwood, J.M.; Bariani, P.F.; Bruschi, S.; Cao, J.; Gramlich, S.; Groche, P.; Hirt, G.; Ishikawa, T.; Löbke, C.; Lueg-Althoff, J.; Merklein, M.; Misiolek, W.Z.; Pietrzyk, M.; Shivpuri, R.; Yanagimoto, J.: Metal forming beyond shaping: Predicting and setting product properties. *CIRP Annals*, 64(2015)2, 629-653
- [8] Evans, C.J.; Bryan, J.B.: "Structured", "Textured", or "Engineered" Surfaces. *CIRP Annals*, 48(1999)2, 541-556
- [9] <https://www.igb.fraunhofer.de/en/research/functional-surfaces-and-materials.html>, (aufgerufen am 17.01.2023)
- [10] Hennecke, M.; Skrotzki, B.: Grundlagen des Maschinenbaus und ergänzende Fächer für Ingenieure. Springer Reference Technik: Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, (2022)
- [11] Patel, D.; Jain, V.K.; Ramkumar, J.: Micro texturing on metallic surfaces: State of the art. *Proceedings of the Institution of*

- Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering
Manufacture, 232(2016)6, 941-964
- [12] Vishnoi, M.; Kumar, P.; Murtaza, Q.: Surface texturing techniques to enhance tribological performance: A review. *Surfaces and Interfaces*, 27(2021)
- [13] Perrin, H.; Mertz, G.; Senoussaoui, N.; Borghini, L.; Klein, S.; Vaudemont, R.: Surface functionalization of thermoset composite for infrared hybrid welding. *Functional Composite Materials*, 2(2021)1, 1-15
- [14] Nie, Z.; Kumacheva, E.: Patterning Surfaces with Functional Polymers. *Nature Materials*, 7(2008), 277-290
- [15] Black, C.T.; Guarini, K.W.; Zhang, Y.; Kim, H.; Benedict, J.; Sikorski, E.; Babich, I.V.; Milkove, K.R.: High-Capacity, Self-Assembled Metal–Oxide–Semiconductor Decoupling Capacitors. *IEEE Electron Device Letters*, 25(2004)9, 622-624
- [16] De Zanet, A.; Casalegno, V.; Salvo, M.: Laser surface texturing of ceramics and ceramic composite materials - A review. *Ceramics International*, 47(2020)80, 7307-7320
- [17] Marx, B.; Marx, R.; Reisgen, U.; Wirtz, D.: Bone cement adhesion on ceramic surfaces- surface activation of retention surfaces of knee prostheses by atmospheric plasma versus thermal surface treatment. *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie*, 153(2015), 146-152
- [18] Ruprecht, R.; Gietzelt, T.; Müller, K.; Piötter, V.; Haußelt, J.: Injection molding of microstructured components from plastics, metals and ceramics. *Microsystem Technologies*, 8(2002)4-5, 351-358
- [19] Jiang, X.; Senin, N.; Scott, P.J.; Blateyron, F.: Feature-based characterisation of surface topography and its application. *CIRP Annals*, 70(2021)2, 681-702
- [20] Marian, M.; Almqvist, A.; Rosenkranz, A.; Fillon, M.: Numerical micro-texture optimization for lubricated contacts—A critical discussion. *Friction*, 10(2022)11, 1772-1809
- [21] Rosenkranz, A.; Szurdak, A.; Gachot, C.; Hirt, G.; Mücklich, F.: Friction reduction under mixed and full film EHL induced by hot

- micro-coined surface patterns. *Tribology International*, 95(2015), 290-297
- [22] Jiang, Z.; Zhao, J.; Xie, H.: *Microforming Technology: Theory, Simulation and Practice*, London: Academic Press, (2017)
- [23] Groche, P.; Köhler, M.: Development and Application of Functional Surfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(2006)1, 19-26
- [24] Ryk, G.; Etsion, I.: Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction. *Wear*, 261(2006)7-8, 792-796
- [25] Zhang, J.; Zhang, J.; Rosenkranz, A.; Suzuki, N.; Shamoto, E.: Frictional properties of surface textures fabricated on hardened steel by elliptical vibration diamond cutting. *Precision Engineering*, 59(2019), 66-72
- [26] Profito, F.J.; Vlădescu, S.-C.; Reddyhoff, T.; Dini, D.: Transient experimental and modelling studies of laser-textured micro-grooved surfaces with a focus on piston-ring cylinder liner contacts. *Tribology International*, 113(2017), 125-136
- [27] Costa, H.; Hutchings, I.M.: Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions. *Tribology International*, 40(2007)8, 1227-1238
- [28] Ball, P.: Egnineering Shark skin and other solutions. *Nature*, 400(1999), 507-509
- [29] Alihosseini, Y.; Targhi, M.Z.; Heyhat, M.M.; Ghorbani, N.: Effect of a micro heat sink geometric design on thermo-hydraulic performance: A review. *Applied Thermal Engineering*, 170(2020)4
- [30] Marmur, A.: Super-hydrophobicity fundamentals: implications to biofouling prevention. *Biofouling*, 22(2006)1-2, 107-15
- [31] Dall'Ava, L.; Hothi, H.; Henckel, J.; Di Laura, A.; Shearing, P.; Hart, A.: Comparative analysis of current 3D printed acetabular titanium implants. *3D Print Med*, 5(2019)1, 15
- [32] Hirai, Y.; Mayama, H.; Matuso, Y.; Shimomura, M.: Uphill water transport on a wettability-patterned surface: experimental and theoretical results. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(2017)18, 15814-15821

- [33] <https://www.lufthansa-technik.com/aeroshark>, (abgerufen am 28.02.2023)
- [34] Qin, Y.: *Micromanufacturing Engineering and Technology*, Waltham: Elsevier Reference Monographs, (2015)
- [35] Harikrishnan, S.; Dhass, A.D.; Ali, H.M.: *Thermal Performance of Nanofluids in Miniature Heat Sinks with Conduits. Fluid Mechanics and Its Applications*, Singapore: Springer, (2022)
- [36] Duangthongsuk, W.; Wongwises, S.: A comparison of the thermal and hydraulic performances between miniature pin fin heat sink and microchannel heat sink with zigzag flow channel together with using nanofluids. *Heat and Mass Transfer*, 54(2018)11, 3265-3274
- [37] Bhushan, B.; Nosonovsky, M.; Jung, Y.: *Nanotribology and Nanomechanics*, Berlin, Heidelberg: Springer, (2008)
- [38] Wang, L.; Guo, X.; Zhang, H.; Liu, Y.; Wang, Y.; Liu, K.; Liang, H.; Ming, W.: Recent Advances in Superhydrophobic and Antibacterial Coatings for Biomedical Materials. *Coatings*, 12(2022)10
- [39] Zhang, E.; Zhao, X.; Hu, J.; Wang, R.; Fu, S.; Qin, G.: Antibacterial metals and alloys for potential biomedical implants. *Bioact Mater*, 6(2021)8, 2569-2612
- [40] Murr, L.E.; Gaytan, S.M.; Martinez, E.; Medina, F.; Wicker, R.B.: Next generation orthopaedic implants by additive manufacturing using electron beam melting. *Int J Biomater*, 2012(2012), 245727
- [41] <https://www.bb Braun.de/de/products/b/plasmafit-hueftpfannensystem.html> (abgerufen am 01.03.2023)
- [42] Czichos, H.; Habig, K.-H.: *Tribologie-Handbuch*, in *Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*. (2015), Springer Vieweg: Wiesbaden
- [43] Johnson, K.L.: The contribution of micro nano-tribology to the interpretation of dry friction. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 214(2000)1, 11-22
- [44] Vakis, A.I.; Yastrebov, V.A.; Scheibert, J.; Nicola, L.; Dini, D.; Minfray, C.; Almqvist, A.; Paggi, M.; Lee, S.; Limbert, G.; Molinari, J.F.; Anciaux, G.; Aghababaei, R.; Echeverri Restrepo, S.; Papangelo, A.; Cammarata, A.; Nicolini, P.; Putignano, C.;

- Carbone, G.; Stupkiewicz, S.; Lengiewicz, J.; Costagliola, G.; Bosia, F.; Guarino, R.; Pugno, N.M.; Müser, M.H.; Ciavarella, M.:
Modeling and simulation in tribology across scales: An overview. *Tribology International*, 125(2018), 169-199
- [45] Marian, M.: Numerische Auslegung von Oberflächenmikrostrukturen für geschmiedete tribologische Kontakte. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2021
- [46] Striebeck, R.: Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager. *VDI-Forschungsheft*, 46(1903)7
- [47] Hsu, S.M.; Gates, R.S.: Boundary lubricating films: formation and lubrication mechanism. *Tribology International*, 38(2005)3, 305-312
- [48] Zhu, D.: Elastohydrodynamic Lubrication (EHL), in *Encyclopedia of Tribology*, Q.J. Wang und Y.W. Chung, Editors. (2013), Springer: Boston
- [49] Hamilton, D.B.; Walowit, J.A.; Allen, C.M.: A Theory of Lubrication by Microirregularities. *Journal of Basic Engineering*, 88(1966)1, 177-185
- [50] Anno, J.N.; Walowit, J.A.; Allen, C.M.: Load Support and Leakage from Microasperity-Lubricated Face Seals. *Journal of Tribology*, 91(1969)4, 726-731
- [51] E., W.: Surface finish in relation to cylinder liners. *Wear*, 109(1986)1-4, 351-366
- [52] Gangopadhyay, A.; McWatt, D.G.: The Effect of Novel Surface Textures on Tappet Shims on Valvetrain Friction and Wear. *International Joint Tribology Conference*, San Antonio: 2006
- [53] Weschta, M.: Untersuchungen zur Wirkungsweise von Mikrostrukturen in elastohydrodynamischen Gleit/Wälz-Kontakten. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017
- [54] Tay, B.Y.; Liu, L.; Loh, N.H.; Tor, S.B.; Murakoshi, Y.; Maeda, R.: Injection molding of 3D microstructures by μ PIM. *Microsystem Technologies*, 11(2005)2-3, 210-213

- [55] Müller, T.: Steigerung der Präzision im Mikro-Pulverspritzgießen. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2016
- [56] Tay, B.Y.; Liu, L.; Loh, N.H.; Tor, S.B.; Murakoshi, Y.; Maeda, R.: Surface roughness of microstructured component fabricated by μ MIM. *Materials Science and Engineering: A*, 396(2005)1-2, 311-319
- [57] Fu, G.; Loh, N.H.; Tor, S.B.; Tay, B.Y.; Murakoshi, Y.; Maeda, R.: Injection molding, debinding and sintering of 316L stainless steel microstructures. *Applied Physics A*, 81(2005)3, 495-500
- [58] Imgrund, P.; Rota, A.: Großes Anwendungspotenzial: Metallpulverspritzgießen im Mikromaßstab. *Kunststoffe*, 97, 2007
- [59] Dawari, C.K.; Haq, I.; Mönkkönen, K.; Suvanto, M.; Saarinen, J.J.: Reduced sliding friction on flat and microstructured metal injection molded (MIM) WC-Co hard metals with MoS₂ composite lubricants. *Tribology International*, 160(2021)
- [60] German, R.M.: Metal powder injection molding (MIM): Key trends and markets, in *Handbook of Metal Injection Molding*. (2019). 1-21
- [61] Baumeister, G.; Holstein, N.; Piötter, V.; Ruprecht, R.; Schanz, G.; Guttmann, M.; Winkler, F.; Häfele, A.: Herstellung metallischer Mikroteile unter Einsatz verlorener Kunststoffformen. *Nachrichten - Forschungszentrum Karlsruhe*, 2-3, 2002
- [62] Wöllmer, H.; Ruprecht, R.; Haußelt, J.: Präzisionsguss von Mikroteilen aus Metall. *Galvanotechnik*, 6, 1999
- [63] Cannon, A.H.; King, W.P.: Casting metal microstructures from a flexible and reusable mold. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(2009)9
- [64] Wöllmer, H.: Untersuchung zum Präzisionsgießen metallischer Mikroteile. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2000
- [65] Dumitru, G.; Romano, V.; Weber, H.P.; Haefke, H.; Gerbig, Y.; Pflüger, E.: Laser microstructuring of steel surfaces for tribological applications. *Applied Physics A*, 70(2000), 485-487
- [66] Prasad, N.; Syed, I.; Subbu, S.K.: Laser dimple texturing - applications, process, challenges and recent developments: a review. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 20(2019)2, 1-16

- [67] Klotzbach, U.; Washio, K.; Arnold, C.B.; Lang, V.; Roch, T.; Lasagni, A.F.: World record in high speed laser surface microstructuring of polymer and steel using direct laser interference patterning. *Laser-based Micro- and Nanoprocessing X*, 2016
- [68] Barcikowski, S.; Hahn, A.; Chichkov, B.N.: Nanoparticles as potential risk during femtosecond laser ablation. *Journal of Laser Applications*, 19(2007)2, 65-73
- [69] Oberstdörfer, G.: Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 74(2000), 1-8
- [70] Oberdörster, G.; Ferin, J.; Lehnert, B.E.: Correlation Between Particle Size, In Vivo Particle Persistence and Lung Injury. *Environmental Health Perspectives*, 102(1994), 173-179
- [71] Romano, L.: *Micro and Nano Fabrication by Metal Assisted Chemical Etching*, Basel: MDPI, (2021)
- [72] Suh, M.S.; Chae, Y.H.; Kim, S.S.; Hinoki, T.; Kohyama, A.: Effect of geometrical parameters in micro-grooved crosshatch pattern under lubricated sliding friction. *Tribology International*, 43(2010)8, 1508-1517
- [73] Cakir, O.; Temel, H.; Kiyak, M.: Chemical etching of Cu-ETP copper. *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163(2005), 275-279
- [74] Parreira, J.G.; Gallo, C.A.; Costa, H.L.: New advances on maskless electrochemical texturing (MECT) for tribological purposes. *Surface and Coatings Technology*, 212(2012), 1-13
- [75] Costa, H.; Hutchings, I.M.: Reciprocating lubricated sliding on textured steel surfaces. *Ciencia e Tecnologia dos Materiais*, 18(2006)1-2, 79-86
- [76] Pettersson, U.; Jacobson, S.: Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts. *Tribology International*, 36(2003)11, 857-864
- [77] Obikawa, T.; Kamio, A.; Takaoka, H.; Osada, A.: Micro-texture at the coated tool face for high performance cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(2011)12, 966-972

- [78] Bruzzone, A.A.G.; Costa, H.L.; Lonardo, P.M.; Lucca, D.A.: Advances in engineered surfaces for functional performance. *CIRP Annals*, 57(2008)2, 750-769
- [79] Lu, X.; Khonsari, M.M.: An experimental Investigation of Dimple Effect on the Stribeck Curve of Journal Bearings. *Tribology Letters*, 27(2007)2, 169-176
- [80] Costa, H.L.; Hutchings, I.M.: Development of a maskless electrochemical texturing method. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2009)8, 3869-3878
- [81] Ma, L.; Guan, D.; Wang, F.; Yuan, C.: Environmental Emissions from Chemical Etching Synthesis of Silicon Nanotube for Lithium Ion Battery Applications. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(2018)1
- [82] Wing, J.S.; Brender, J.D.; Sanderson, L.M.; Perrotta, D.M.; Beauchamp, R.A.: Acute health effects in a community after a release of hydrofluoric acid. *Archives of Environmental Health*, 46(1991), 155-160
- [83] Borgard, J.M.; Herbelet, F.; Gwinner, B.: Recycling hydrofluoric acid in the nuclear industry: The OverAzeotropic Flash process (OFAF). *Journal of Fluorine Chemistry*, 185(2016), 17-23
- [84] Dornfeld, D.; Min, S.; Takeuchi, Y.: Recent Advances in Mechanical Micromachining. *CIRP Annals*, 55(2006)2, 745-768
- [85] Masuzawa, T.: State of the Art of Micromachining. *CIRP Annals*, 49(2000)2, 473-488
- [86] Câmara, M.A.; Rubio, J.C.C.; Abrão, A.M.; Davim, J.P.: State of the Art on Micromilling of Materials, a Review. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(2012)8, 673-685
- [87] Brecher, C.; Klar, R.; Wenzel, C.: Development of a dynamic high precision miniature milling machine. *International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, Borovets, Bulgaria: 2007
- [88] Hesselbach, J.; Raatz, A.; Wrege, J.; Herrmann, H.; Weule, H.; Buchholz, C.; Tritschler, H.; Knoll, M.; Elsner, J.; Klocke, F.; Weck, M.; von Bodenhausen, J.; von Klitzing, A.: mikroPRO - Untersuchung zum internationalen Stand der Mikroproduktionstechnik. *wt Werkstattstechnik online*, 93(2003)3, 119-128

- [89] Brinksmeier, E.; Gläbe, R.; Riemer, O.; Twardy, S.: Potentials of precision machining processes for the manufacture of micro forming molds. *Microsystem Technologies*, 14(2008)12, 1983-1987
- [90] Klocke, F.; Bergs, T.; Veselovac, D.; Arntz, K.; Quito, F.J.; Kratz, S.: From macro world to micro word - Challenges for micro-mold manufacturing. *wt Werkstattstechnik online*, 97(2007), 842-846
- [91] Gietzelt, T.; Eichhorn, L.: Herstellung von Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis durch Mikrozerspanung Galvanotechnik, 98(2007)6, 1504-1513
- [92] DIN 8589-1 Fertigungsverfahren Spanen 2003
- [93] Klocke, F.; Feldhaus, B.; Mader, S.: Development of an incremental rolling process for the production of defined riblet surface structures. *Production Engineering*, 1(2007)3, 233-237
- [94] Brecher, C.; Schmitt, R.; Lange, S.; Koerfer, F.; Niehaus, F.; Widemann, R.: Großflächige Mikrostrukturierung*. *wt Werkstattstechnik online*, 96(2006)5, 276-280
- [95] Hesabi Hesari, A.; Moradi, H.; Movahhedy, M.R.: Modeling and active control of chatter vibrations of piezoelectric stacked machining arm in micro-turning process. *Meccanica*, 55(2020)9, 1707-1731
- [96] Kaenel, H.-M.: Wer prägte die ersten Münzen? *Forschung Frankfurt*, 30(2012), 83-86
- [97] DIN 8580:2022-12: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth-Verlag, 2022
- [98] Geiger, M.; Kleiner, M.; Eckstein, R.; Tiesler, N.; Engel, U.: Microforming. *Annals of the CIRP*, 50(2001)2, 445-462
- [99] Dietrich, J.; Tschätsch, H.: *Praxis der Umformtechnik - Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen*, Wiesbaden: Springer Vieweg, (2013)
- [100] DIN 8583-5:2003-09: Fertigungsverfahren Druckumformen - Teil 5: Eindrücken - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth-Verlag, 2003
- [101] Ike, H.; PLancak, M.: Coining process as means of controlling surface microgeometry. *Journal of Materials Processing Technology*, 80-81(1998), 101-107

- [102] Thome, M.: Umformtechnische Herstellung funktionaler flächiger Mikrostrukturen in metallischen Werkstoffen. Dissertation, 2009
- [103] Frey, P.: Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile. Dissertation, 2022
- [104] Frey, P.: Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2022
- [105] Thome, M.; Hirt, G.; Rattay, B.: Metal Flow and Die Filling in Coining of Micro Structures with and without Flash. *Advanced Materials Research*, 6-8(2005), 631-638
- [106] Merklein, M.; Stellin, T.; Engel, U.: Simulation of a Full Forward Extrusion Process from Metal Strip. 2011
- [107] Su, Q.; Xu, J.; Yu, H.; Shi, L.; Shan, D.; Guo, B.: Effect of Grain Size on Formability and Deformation Mechanism of High-Purity Aluminum during Micro-Embossing Process at Elevated Temperature. *Advanced Engineering Materials*, 21(2019)10
- [108] Wang, C.J.; Shan, D.B.; Zhou, J.; Guo, B.; Sun, L.N.: Size effects of the cavity dimension on the microforming ability during coining process. *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188(2007), 256-259
- [109] Wang, C.; Wang, C.; Xu, J.; Zhang, P.; Shan, D.; Guo, B.: Interactive effect of microstructure and cavity dimension on filling behavior in micro coining of pure nickel. *Sci Rep*, 6(2016), 23895
- [110] Keran, Z.; Math, M.; Skunca, M.; Barlat, F.: Coining as a microforming process. *AIP Conference Proceedings*, (2010), 403-408
- [111] B., R.: Untersuchung der Einflussgrößen auf die Formfüllung und die Werkzeugbelastung beim Prägen von Mikrokanalstrukturen in metallische Bleche, Universität des Saarlandes: In: Bley, H.; Hirt, G.; Weber, C.: *Schriftenreihe Produktionstechnik Bd. 27*, (2003)
- [112] Zahner, M.; Merklein, M.: Analysis of combined extrusion micro coining process to manufacture microstructured tappets. *Procedia Manufacturing*, 15(2018), 272-279

- [113] Uhlmann, E.; König, C.; Parsol, L.; Ziefle, A.: Coining of micro structures with an electromagnetically driven tool.5th International Conference on High Speed Forming, Dortmund: 2012
- [114] Schubert, A.; Hartwig, H.; Burkhardt, T.; Neugebauer, R.: Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit auf Sturkturausbildungsgrenzen und erforderlichen Energiebedarf beim Hochgeschwindigkeitsumformen metallischer Miniaturkomponenten mit Mikrostrukturen. Abschlussbericht zum DFG-Projekt NE 568/15-1, (2000)
- [115] Uhlmann, E.; König, C.: Potenziale von impuls magnetisch angetriebenen Werkzeugen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 11(2010), 997-1000
- [116] Neugebauer, R.; Schubert, A.: Influence of increased strain rate on flow strength and friction during microforming.7th International conference on technology of plasticity, 1, 2002
- [117] Neugebauer, R.; Schubert, A.; Burkhardt, T.: Wirkung höherer Umformgeschwindigkeiten auf die Strukturausbildung und Werkzeugbelastung beim Mikroumformen. Abschlussbericht des DFG Schwerpunktprogramms 1074, Verlagshaus Mainz, (2005), 261-276
- [118] Shimizu, T.; Kosuge, S.; Yang, M.: Grain size effect on transferability in micro-coining process assisted by ultrasonic vibration. Manufacturing Review, 2(2015)
- [119] Neugebauer, R.; Schubert, A.; Kadner, J.; Burkhardt, T.: High precision embossing of microparts. 6th International conference on technology of plasticity, (1999)
- [120] Chatterjee, R.; Mukhopadhyay, J.: A review of super plastic forming. 7th Internal conference of materials processing and characterization, (2017)
- [121] Gillner, A.; Hellrung, D.: Produktionstechnik zum Mikrostanzen und Mikroprägen metallischer Bauteile: BMBF-Verbundprojekt im Rahmenkonzept Produktion 2000. Kongreß für Mikrosysteme und Präzisionstechnik, (1998)
- [122] Zhao, K.: Micro hot coining of high strength metals using electric conductive heating. Dissertation, Rheinisch-westfälische technische Hochschule Aachen, 2013

- [123] Zhao, K.N.; Wietbrock, B.; Hirt, G.: Micro Warm Coining of Stainless Steel Sheets Using Electric Conductive Heating. *Key Engineering Materials*, 473(2011), 991-998
- [124] Qiao, X.G.; Gao, N.; Muktadir, Z.; Kraft, M.; Starink, M.J.: Fabrication of MEMS components using ultrafine-grained aluminium alloys. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20(2010)4
- [125] Vierzigmann, H.U.; Merklein, M.; Engel, U.: Friction Conditions in Sheet-Bulk Metal Forming. *Procedia Engineering*, 19(2011), 377-382
- [126] Ike, H.; Plancak, M.: Coining process as a means of controlling surface microgeometry. *Journal of Materials Processing Technology*, 80-81(1998), 101-107
- [127] Schrader, T.; Weschta, M.; Merklein, M.; Tremmel, S.; Engel, U.; Wartzack, S.: Tribological Aspects in Manufacturing Processes of Microstructured Components and their Tribological Behavior in Operation. *Advanced Materials Research*, 966-967(2014), 323-335
- [128] Zahner, M.; Merklein, M.: Analysis of combined extrusion micro coining process to manufacture microstructured tappets. *International Conference on Metal Forming*, Toyohashi, Japan: 2018
- [129] Ike, H.: Surface deformation vs. bulk plastic deformation - a key for microscopic control of surfaces in metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 138(2003)1-3, 250-255
- [130] Schubert, A.; Jahn, S.F.; Müller, B.: Microstructuring by a Combination of Micro Impact Extrusion and Shear Displacement Forming. *Key Engineering Materials*, 554-557(2013), 893-899
- [131] Buffa, G.; Fratini, L.; Micari, F.: The Relevance Of The Preform Design In Coining Processes Of Cupronickel Alloy. *AIP Conference Proceedings*, (2007), 1005-1010
- [132] Kim, G.-Y.; Koç, M.; Ni, J.: Experimental and Numerical Investigations on Microcoining of Stainless Steel 304. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 130(2008)4
- [133] Löffler, L.: *Untersuchungen zum Aufrauhen von Bandstahl*, Düsseldorf: Verlag Stahleisen, (1988)
- [134] Bünten, R.: *FEM-Modell zur Beschreibung von Oberflächenveränderungen, Aufrau- und Reibungsphänomene*

- im metallischen Kontakt. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1995
- [135] Pawelski, O.; Rasp, W.; Nettelbeck, H.-J.; Steinhoff, K.: Einfluß unterschiedlicher Arbeitswalzen - Aufrauverfahren auf die Oberflächenfeinstruktur beim Nachwalzen von Karosserieblechen. *Stahl und Eisen* 114, Nr. 6, 1994
- [136] Kainz, A.; Paesold, D.; Riha, G.; Krimpelstätter, K.; Zeman, K.: Finite element modelling of temper rolling with particular emphasis on roughness transfer. *ABAQUS Austria Users' Conference, Graz: 2005*
- [137] Bünten, R.; Kopp, R.; Steinhoff, K.; Rasp, W.; Pawelski, O.: Development of a FEM-model for the simulation of the transfer of surface structure in cold-rolling processes. *International Conference on Modelling of Metal Rolling Processes, (1996)*
- [138] Zabala, A.; Galdos, L.; Childs, C.; Llavori, I.; Aginagalde, A.; Mendiguren, J.; Saenz de Argandoña, E.: The Interaction between the Sheet/Tool Surface Texture and the Friction/Galling Behaviour on Aluminium Deep Drawing Operations. *Metals*, 11(2021)6
- [139] Sterzl, W.; Franzke, M.: Simulation des Bandwalzprozesses zur Herstellung profilierter Spezialoberflächen aus hochreinen Aluminium-Werkstoffen.19. Aachener Stahlkolloquium, Aachen: 2004
- [140] Kienzle, O.; Mietzner, K.: Atlas umgeformter metallischer Oberflächen, Berlin / Heidelberg / New York: Springer-Verlag, (1967)
- [141] Birkert, A.; Haage, S.; Straub, M.: Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, (2013)
- [142] Navarrete, Á.; Izquierdo, J.M.; López, M.; Celentano, D.; Walczak, M.; García-Herrera, C.; Pinto, H.C.: Simulation-assisted approach for determining wear-limited tool life in the coining process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111(2020)7-8, 2243-2257
- [143] Klocke, F.; Trauth, D.; Terhorst, M.; Mattfeld, P.: Wear Analysis of Tool Surfaces Structured by Machine Hammer Peening for Foil-Free Forming of Stainless Steel. *Advanced Materials Research*, 1018(2014), 317-324

- [144] Geiger, M.; Popp, U.; Engel, U.: Improved Tribological Behavior of Cold Forging Tool Surfaces by Excimer Laser Micro Texturing. *CIRP Annals*, 51(2002)1, 231-234
- [145] Terzi, M.; Wulfsberg, J.; Samm, K.; Ostendorf, A.: Experimentelle und simulatorische Untersuchungen zum laserunterstützten Massivumformen von metallischen Werkstoffen. Kolloquium Prozessskalierung, Bremen: 2005
- [146] Freiburg, D.: Hochvorschubfräsen zur Strukturierung von Werkzeugoberflächen für die Blechmassivumformung. Dissertation, 2018
- [147] Schrader, T.: Grundlegende Untersuchung zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2015
- [148] Barbier, C.; Thibaud, S.; Richard, F.; Picart, P.: Size effects on material behavior in microforming. *International Journal of Material Forming*, 2(2009)S1, 625-628
- [149] Vollertsen, F.; Biermann, D.; Hansen, H.N.; Jawahir, I.S.; Kuzman, K.: Size effects in manufacturing of metallic components. *CIRP Annals*, 58(2009)2, 566-587
- [150] Vollertsen, F.: Categories of size effects. *Production Engineering*, 2(2008)4, 377-383
- [151] Ma, X.; Lapovok, R.; Gu, C.; Molotnikov, A.; Estrin, Y.; Pereloma, E.V.; Davies, C.H.J.; Hodgson, P.D.: Deep drawing behaviour of ultrafine grained copper: modelling and experiment. *Journal of Materials Science*, 44(2009)14, 3807-3812
- [152] Engel, U.; Messner, A.; Tiesler, N.: Cold forging of microparts-effect of miniaturization on friction. *Proceedings of the 1st ESAFORM Conference on Materials Forming*, (1998), 77-80
- [153] Chan, W.L.; Fu, M.W.; Lu, J.; Liu, J.G.: Modeling of grain size effect on micro deformation behavior in micro-forming of pure copper. *Materials Science and Engineering: A*, 527(2010)24-25, 6638-6648
- [154] Lu, H.N.; Wei, D.B.; Jiang, Z.Y.; Liu, X.H.; Manabe, K.: Modelling of size effects in microforming process with consideration of grained heterogeneity. *Computational Materials Science*, 77(2013), 44-52

- [155] Xu, J.; Chen, X.; Zhong, W.; Wang, F.; Zhang, X.: An improved material point method for coining simulation. *International Journal of Mechanical Science*, 196(2021)
- [156] Kim, G.-Y.; Ni, J.; Koç, M.: Modeling of the Size Effects on the Behavior of Metals in Microscale Deformation Processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 129(2007)3, 470-476
- [157] Ostermann, F.: *Anwendungstechnologie Aluminium*, Berlin, Heidelberg: Springer, (2007)
- [158] Löffler, M.; Andreas, K.; Engel, U.; Schulte, R.; Groebel, D.; Krebs, E.; Freiburg, D.; Biermann, D.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Weikert, T.; Wartzack, S.; Tremmel, S.; Lucas, H.; Denkena, B.; Merklein, M.: Tribological measures for controlling material flow in sheet-bulk metal forming. *Production Engineering*, 10(2016)4-5, 459-470
- [159] <https://www.schmitz-metallographie.de/gefuge/1-7131-16mncr5-kerngefuege-nach-einfachhaertung/>
- [160] Georg Grimm Edelstahl GmbH: 1.7131 - Das Werkstoffdatenblatt. Wuppertal: 2023
- [161] Metalltechnologie, S.G.: Austenitischer Chrom-Nickel-Stahl 1.4301. Meckesheim: 2023
- [162] Metalltechnologie, S.G.: Werkzeugstahl, Kaltarbeitsstahl, Einsatzstahl 1.7131. Meckesheim: 2023
- [163] AG, T.: Werkstoffdatenblatt CW508L. Essen: 2020
- [164] Lange, K.: *Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, (1988)
- [165] Stöhr, T.: *Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor- Manganstählen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2013
- [166] Suttner, S.: *Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017

- [167] Pawelski, O.: Über das Stauchen von Hohlzylindern und seine Eignung zur Bestimmung der Formänderungsfestigkeit dünner Bleche. *Archiv für Eisenhüttenwesen*, 38(1967), 437-442
- [168] 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), 87-98
- [169] Abspoel, M.; Scholting, M.E.; Lansbergen, M.; M., N.B.: Accurate anisotropic material modelling using only tensile tests for hot and cold forming. *Journal of Physics: Conference Series*, 896(2017), 1-8
- [170] Barlat, F.; Lege, D.J.; Brem, J.C.: A six-component yield function for anisotropic materials. *International Journal of Plasticity*, 7(1991)7, 693-712
- [171] DIN EN ISO 6892-1:2020-06 2020
- [172] KG, M.G.G.C.: Datenblatt Werkstoff-Nr. 1.3343 (HSS). Wolfurt: 2023
- [173] Zahner, M.; Lentz, L.; Steinlein, F.; Merklein, M.: Investigation of Production Limits in Manufacturing Microstructured Surfaces Using Micro Coining. *Micromachines (Basel)*, 8(2017)11
- [174] KG, v.B.E.G.C.: Datenblatt S590 MicroClean Kapfenberg: 2023
- [175] Raziol Zibulla Sohn GmbH, R.Z.S.: Technisches Datenblatt Raziol CLF-65 E.Iserlohn: 2018
- [176] Raziol Zibulla Sohn GmbH, R.Z.S.: Sicherheitsdatenblatt Raziol CLF-65E.Iserlohn: 2006
- [177] Reck, M.; Merklein, M.: Investigation on tool properties for the production of components with micro textured surfaces. *International Deep-Drawing Research Group Conference*, (2022)
- [178] Gnanavel, C.; Saravanan, R.; Chandrasekaran, M.; Pugazhenthii, R.: Restructured review on Electrical Discharge Machining - A state of the art. *Materials Science and Engineering*, 183(2017), 1-13
- [179] Singh, A.K.; Mahajan, R.; Tiwari, A.; Kumar, D.; Ghadai, R.K.: Effect of dielectric on electrical discharge machining: A review. *Materials Science and Engineering*, 377(2018), 1-9
- [180] <https://www.sarix.com/de/sx-200-dual-pulsar-de/>, (abgerufen am 31.08.2023)

- [181] Koch, J.: Grundlegende Untersuchung zur Herstellung zyklisch symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2016
- [182] <https://www.zeiss.de/messtechnik/produkte/systeme/koordinatenmessgeraete/portalmessgeraete/micura.html>, (abgerufen am 01.09.2023)
- [183] DIN 25178-602: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 602: Merkmale von berührungslos messenden Geräten. 2011
- [184] Tekkaya, A.E.: A guide for validation of FE-simulations in bulk metal forming. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 30(2005), 113-136
- [185] Simufact Engineering GmbH, S.E.: Simufact.forming: The simulation solution for bulk sheet metal forming. Hamburg: 2023
- [186] Geißdörfer, S.: Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2010
- [187] Tekkaya, A.E.; Martins, P.A.F.: Accuracy, reliability and validity of finite element analysis in metal forming: a user's perspective. *Engineering Computations*, 26(2009)8, 1026-1055
- [188] Khurram, M.; Mufti, R.A.; Bhutta, M.U.; Afzal, N.; Abdullah, M.U.; Rahman, S.u.; Rehman, S.u.; Zahid, R.; Mahmood, K.; Ashfaq, M.; Umar, M.: Roller sliding in engine valve train: Effect of oil film thickness considering lubricant composition. *Tribology International*, 149(2020)
- [189] <https://www.fushunspecialsteel.com/16mncr5-1-7131-alloy-steel/> (abgerufen am 10.04.2023)
- [190] Orgeldinger, C.; Tremmel, S.: Understanding Friction in Cam-Tappet Contacts—An Application-Oriented Time-Dependent Simulation Approach Considering Surface Asperities and Edge Effects. *Lubricants*, 9(2021)11
- [191] Lange, K.; Kammerer, M.; Pöhlandt, K.; Schöck, J.: Fließpressen Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke: Springer Berlin, Heidelberg, (2008)

- [192] Klocke, F.; König, W.: *Fertigungsverfahren 4: Umformen*, Berlin Heidelberg New York: Springer, (2006)
- [193] Otto, M.: *Erweiterung der Umformgrenzen beim Tiefziehen und Kragenziehen durch Nachschieben von Werkstoff*. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2003
- [194] N., M.: *Kaltmassivumformen von Hohlbauteilen mit komplexen helixförmigen Innengeometrien*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2019
- [195] Tekkaya, A.E.; Khalifa, N.B.; Grzanic, G.; Hölker, R.: *Forming of Lightweight Metal Components: Need for New Technologies*. *Procedia Engineering*, 81(2014), 28-37
- [196] Pilz, F.: *Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2020
- [197] Serrano, J.R.; Novella, R.; Piqueras, P.: *Why the Development of Internal Combustion Engines Is Still Necessary to Fight against Global Climate Change from the Perspective of Transportation*. *Applied Sciences*, 9(2019)21
- [198] Reck, M.; Orgeldinger, C.; Tremmel, S.; Merklein, M.: *Investigation on micro-textured tappets from design and production to the application properties*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, (2022)
- [199] Gropper, D.; Wang, L.; Harvey, T.J.: *Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings*. *Tribology International*, 94(2016), 509-529
- [200] Gröbel, D.: *Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2019
- [201] Reck, M.; Merklein, M.: *Comparison of forming processes for micro textured cups*. *North American Manufacturing Reserach Conference*, 2023
- [202] Gröbel, D.; Koch, J.; Vierzigmann, H.U.; Engel, U.; Merklein, M.: *Investigations and Approaches on Material Flow of Non-uniform*

- Arranged Cavities in Sheet Bulk Metal Forming Processes. *Procedia Engineering*, 81(2014), 401-406
- [203] Groche, P.; Fritsche, D.; Tekkaya, E.A.; Allwood, J.M.; Hirt, G.; Neugebauer, R.: Incremental Bulk Metal Forming. *CIRP Annals*, 56(2007)2, 635-656
- [204] Henneberg, J.: Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2022
- [205] Ogawa, T.; Hirahara, A.; Yoshida, F.: Reduction of Springback by Bottoming and Ironing on High Strength Steel Sheet. *Steel Research International*, 81(2010)9, 845-848
- [206] Maradia, U.; Boccadoro, M.; Stirnimann, J.; Beltrami, I.; Kuster, F.; Wegener, K.: Die-sink EDM in Meso-Micro Machining. *Procedia CIRP*, 1(2012), 166-171
- [207] Hirt, G.; Rattay, B.: Coining of thin plates to produce micro channel structures, in *Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium*. (2002), Springer: Boston. 32-36
- [208] Böhm, E.: Beitrag zum niederhalterlosen, rotationssymmetrischen Tiefziehen verschiedener Warmbandqualitäten. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1987
- [209] Schneider, T.: Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblechen durch Verfahren der Blechmassivumformung. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2016
- [210] Kübert, M.: Niederhalterloses Tiefziehen kreiszylindrischer Näpfe aus Mittel- und Grobblech unter Berücksichtigung der Anwendung eines Gegenhalters. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1982
- [211] Podgornik, B.; Leskovšek, V.: Wear mechanisms and surface engineering of forming tools. *Materiali in tehnologije*, 49(2015)3, 313-324
- [212] (GCFG), G.C.F.G.: Studie "Festigkeit von Werkzeugstählen für die Kaltmassivumformung". Erlangen: 2015
- [213] Engel, U.: Strength vs Load - A general concept to estimate and to improve the reliability of tools in metal forming. *Proceedings of*

- the International Conference on Industrial Tools (ICIT), (1997), 43-50
- [214] Blumenauer, H.; Pusch, G.: Technische Bruchmechanik, Leipzig, Vol. 1. Auflage. (1982)
- [215] Kaupper, M.: Biegen von höherfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2012
- [216] Bariani, P.F.; Dal Negro, T.; Bruschi, S.: Testing and Modelling of Material Response to Deformation in Bulk Metal Forming. CIRP Annals, 53(2004)2, 573-595
- [217] Hauer, F.: Die elasto-plastische Einglättung rauher Oberflächen und ihr Einfluss auf die Reibung in der Umformtechnik. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2014
- [218] Zheng, J.-Y.; Fang, J.Y.C.; Fu, M.W.: Flow-induced folding in multi-scaled bulk forming of axisymmetric flanged parts and its prediction and avoidance. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 119(2022)9-10, 5863-5883
- [219] 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, 2570-2578
- [220] Bach, F.-W.; Kerber, K.: Prozesskette Präzisionsschmieden, Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, (2014)
- [221] Vierzigmann, H.U.: Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2016
- [222] Costa, H.L.; Schille, J.; Rosenkranz, A.: Tailored surface textures to increase friction—A review. Friction, 10(2022)9, 1285-1304
- [223] Shaw, M.C.: The role of friction in deformation processing. Wear, 6(1963)2, 140-158
- [224] Kimura, S.; Furushima, T.: New small-scale hydromechanical deep-drawing process using die-integrated active high-pressure generation system. International Journal of Material Forming, 16(2023)5

- [225] Gad, A.G.: Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications: A Systematic Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(2022)5, 2531-2561
- [226] Cristino, V.A.M.; Rosa, P.A.R.; Martins, P.A.F.: Revisiting the Calibration of Friction in Metal Cutting. *Tribology Transactions*, 55(2012)5, 652-664
- [227] Behrens, B.-A.; Bouguecha, A.; Vucetic, M.; Chugreev, A.; Rosenbusch, D.: Advanced finite element analysis of die wear in sheet-bulk metal forming processes. 2016
- [228] Tröber, P.; Demmel, P.; Hoffmann, H.; Golle, R.; Volk, W.: On the influence of Seebeck coefficients on adhesive tool wear during sheet metal processing. *CIRP Annals*, 66(2017)1, 293-296
- [229] Geiger, M.; Popp, U.; Engel, U.: Excimer Laser Micro Texturing of Cold Forging Tool Surfaces - Influence on Tool Life. *CIRP Annals*, 51(2002)1, 231-234
- [230] Sauer, B.: *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*, Berlin: Springer-Vieweg, (2018)
- [231] Meidert, M.: *Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2006
- [232] Killmann, M.; Merklein, M.: Fatigue testing of cold forging tools using elastomer compression. *CIRP Annals*, 72(2023)1, 241-244
- [233] Michael, J.R.; Kotula, P.G.; Prasad, S.V.: Electron Microscopy and Microanalysis for Wear Surface Characterization: Focused Ion-Beam, Electron Backscattered Diffraction and Transmission Electron Microscopy. *Advanced Analytical Methods in Tribology*, (2018), 3-28
- [234] Saanouni, K.; Behrens, B.-A.; Bouguecha, A.; Vucetic, M.; Chugreev, A.: Advanced Wear Simulation for Bulk Metal Forming Processes. *MATEC Web of Conferences*, 80(2016)
- [235] Trzepieciński, T.: Approaches for Preventing Tool Wear in Sheet Metal Forming Processes. *Machines*, 11(2023)6

- [236] Voestalpine eifeler Coating GmbH,: Variantic: Titan-Aluminiumcarbonitrid - die multifunktionale Mehrlagenschicht.Düsseldorf: 2022
- [237] Rockett, A.: The Materials Science of Semiconductors, Boston: Springer, (2008)
- [238] Thouless, M.D.: Cracking and delamination of coatings. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 9(1991)4, 2510-2515
- [239] <https://toolgrindcoat.com/a-clean-surface-is-critical-pvd-coatings-part-iii/>, (abgerufen am 15.09.2023)
- [240] Ling, C.L.; Yajid, M.A.; Tamin, M.N.; Kamarudin, M.; Taib, M.A.; Nosib, N.; Ali, W.F.: Effect of substrate roughness and PVD deposition temperatures on hardness and wear performance of AlCrN-coated WC-Co. Surface and Coatings Technology, 436(2022)

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Reck, M.; Merklein, M.: *Investigation on tool properties for the production of components with micro textured surfaces*. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – 41st International Deep Drawing Research Group Conference (2022)
- [P2] Reck, M.; Orgeldinger, C.; Tremmel, S.; Merklein, M.: *Investigation on micro textured tappets from design and production to the application properties*, *Journal of Materials Design and Applications*, 237(2022)12, S. 1–9
- [P3] Reck, M.; Merklein, M.: *Comparison of forming processes for micro textured cups*, *Manufacturing Letters*, 35(2023), S. 258–268
- [P4] Reck, M.; Merklein, M.: *Wear Analysis of Micro Textured Coining Tools*. In: XLI. Verformungskundliches Kolloquium (2023), S. 104–109
- [P5] Orgeldinger, C.; Reck, M.; Seynstahl, A.; Rosnitschek, T.; Merklein, M.; Tremmel, S.: *Process-integrated component micro texturing using micro coining for tribologically optimized contacts – Numerical design, manufacturing, DLC coating and experimental analysis*. *Lubricants*. (2024)

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] Schnappauf, T.: *Untersuchung der Fertigungsgrenzen bei der Herstellung mikrotexturierter Prägestempel*. Bachelorarbeit (2020), Erlangen
- [S2] Schmitt, F.: *Untersuchung der Fertigungsgrenzen bei der Herstellung mikrotexturierter Bauteile*. Masterarbeit (2021), Erlangen
- [S3] Dünigfelder, A.: *Auslegung eines kombinierten Tiefzieh-Abstreckgleitzieh-Mikropräge-Prozess für die Herstellung von Tassenstößeln*. Projektarbeit (2021), Erlangen
- [S4] Cauli, A.: *Numerical investigation on forming processes for the production of micro textured tappets*. Masterarbeit (2022), Erlangen
- [S5] Ruschig, A.: *Untersuchung des Verschleißverhaltens mikrotexturierter Werkzeugoberflächen*. Masterarbeit (2022), Erlangen
- [S6] Fuchs, C.: *Numerische Analyse eines Prozesses der Massivumformung zur Herstellung mikrotexturierter Bauteile*. Projektarbeit (2022), Erlangen
- [S7] Kümmerl, L.: *Experimentelle und numerische Untersuchung eines Prozesses der Blechmassivumformung zur Herstellung mikrotexturierter Bauteile*. Masterarbeit (2022), Erlangen
- [S8] Neumann, J.: *Auslegung eines kombinierten Tiefzieh Abstreckgleitzieh Mikroprägeprozesses für die Herstellung von Tassenstößeln*. Masterarbeit (2023), Erlangen
- [S9] Dämmig, C.: *Analyse eines kombinierten Umformprozesses zur Herstellung mikrotexturierter Bauteile*. Masterarbeit (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

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

Band 4: Karsten Schlüter

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

Band 5: Shir-Kuan Lin

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

Band 6: Rudolf Nuss

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

Band 7: Wolfgang Scholz

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

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

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

Band 9: Rainer Eisele

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

Band 10: Rolf Pfeiffer

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

Band 11: Herbert Fischer

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

Band 12: Gerhard Kleineidam

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

Band 13: Frank Vollertsen

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

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit 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 Oberflächmontage (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 Optikiagnostik 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-Hebbel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

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

Band 42: Armin Gropp

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

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biege winkelmessung 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 3-87525-082-8.

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 Programoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf

Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenvickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes

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

Band 69: Jürgen Kraus

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

Band 70: Norbert Neubauer

Adaptive Strahlführungen für CO₂-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 Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.
1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

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

Band 83: Otto Meedt

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

Band 84: Knuth Götz

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

Band 85: Ralf Luchs

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

Band 86: Frank Pöhlau

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

Band 87: Roland T. A. Kals

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

Band 88: Gerhard Luhn

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

Band 89: Axel Sprenger

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

Band 90: Hans-Jörg Pucher

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

Band 91: Horst Arnet

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

Band 92: Doris Schubart

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

Band 93: Adrianus L. P. Coremans

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

Band 94: Hans-Martin Biehler

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

Band 95: Wolfgang Becker

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

Band 96: Philipp Hein

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

Band 97: Gunter Beitinger

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

Band 98: Jürgen Knobloch

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

Band 99: Frank Breitenbach

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

Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel

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

Band 103: Stefan Bobbert

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

Band 104: Harald Rottbauer

Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige

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

Band 106: Thomas Menzel

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

Band 107: Thomas Stöckel

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

Band 108: Frank Pitter

Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli

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

Band 110: Burkhard Müller

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

Band 111: Jürgen Göhringer

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

Band 112: Robert Feuerstein

Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger

Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber

Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi

Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein

Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi

Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch

Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt

Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler

Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche

Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel

Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel

Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer

Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein

Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann

Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich

Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen

LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab.
2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab.
2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen

LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab.
2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern

FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab.
2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen

LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation

LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab.
2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten

FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab.
2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)

FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme

FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab.
2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur

LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.
2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter

FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab.
2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen

FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion

FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen

LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab.
2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten

LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab.
2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie

LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen

LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen

LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab.
2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung

LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab.
2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze

FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz

FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik

LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab.
2004. ISBN 3-87525-206-3.

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

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

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

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

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

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

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

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit 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 Schalungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

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

Band 182: Hans-Joachim Krauß

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

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten

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

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse

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

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge

LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen

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

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten

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

Band 188: Matthias Weber

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

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen

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

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen

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

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

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

Band 192: Massimo Tolazzi

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

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

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

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion

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

Band 195: Andreas Kunze

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

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

ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen

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

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsetzgerechten 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 Rührreibschweißen metallischer Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

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

Band 201: Andreas Blankl

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

Band 202: Andreas Schaller

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

Band 203: Claudius Schimpf

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

Band 204: Simon Dietrich

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

Band 205: Wolfgang Wolf

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

Band 206: Steffen Polster

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

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

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

Band 208: Uwe Vogt

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

Band 209: Till Laumann

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

Band 210: Alexander Diehl

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

Band 211: Detlev Staud

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

Band 212: Jens Ackermann

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

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

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

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

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

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

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

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

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

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

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

Band 246: Ulf-Hermann Quentim
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 Kühll
Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampfackelposition
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 Presshärtprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

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

Band 271: Matthäus Brela

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

Band 272: Michael Wieland

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

Band 273: René Schramm

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

Band 274: Michael Lechner

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

Band 275: Kolja Andreas

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

Band 276: Marcus Baum

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

Band 277: Thomas Schneider

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

Band 278: Jochen Merhof

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

Band 279: Fabian Zöller

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

Band 280: Christian Hezler

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

Band 281: Jochen Bönig

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

Band 282: Johannes Kohl

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

Band 283: Peter Bechtold

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

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner
Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja
Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel
Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand
Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im 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 Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

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

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

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

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

Band 331: Michael Scholz
Intralogs 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 Heißscrippprozesses
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 Geometriemodelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann

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

Band 353: Christof Küstner

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

Band 354: Tobias Gläfel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobiler Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

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

Band 356: Hannah Riedle

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

Band 357: Maximilian Landgraf

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

Band 358: Alireza Esfandiyari

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

Band 359: Christian Sand

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

Band 360: Ralf Merkl

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

Band 361: Thomas Reitberger

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

Band 362: Marius Christian

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

Band 363: Franziska Neubauer

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

Band 364: Eike Wolfram Schäffer

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied

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

Band 368: David Marco**Hochrein**

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axial-schub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen – KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf

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

Band 370: Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusabstandsmodierte 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

Widerstandselementenschweißen 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 Völk
Ein simulationsbasierter Ansatz**

zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen
KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile
LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme
KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen
FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten
FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren
FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte
KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik
FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung
LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau
LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehstücken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen
LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial
LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen
LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-583-4.

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

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

Band 409: Stefan Götz
Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement
KTmfk, xvii 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- einträchtigte Personen
FAPS, xxv, 203 Seiten, 57 Bilder, 25 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-697-8

Band 432: Benjamin Samuel Lutz

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

Band 433: Michael Jüttner

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

Band 434: Sebastian Wiesenmayer

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

Band 435: Clara-Maria Kuball

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

Band 436: Martin Roth

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

Band 437: Stephan Schirdewahn

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

Band 438: Andreas Rohrmoser

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

Band 439: Andreas Selmaier

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

Band 440: Thomas Kistner

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

Band 441: Fabian Dworschak

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

Band 442: Martin Killmann

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

Band 443: Ann-Kathrin Wiemann

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

Band 444: Andreas Jobst

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

Band 445: Martin Anton Kraus

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

Band 446: Moritz Späth

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

ISBN 978-3-96147-759-3.

Band 447: Benedikt Göddeke

Methode zur Auswahl eines alternativen Blechwerkstoffes für flexibel gewalzte und direkt warmumgeformte Karosseriestrukturbau- teile

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

ISBN 978-3-96147-762-3.

Band 448: Jan Hafenecker

Systematische Untersuchung zur Blechumformung von Hybridbau- teilen

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

ISBN 978-3-96147-764-7.

Band 449: Sven Wirsching

Numerische Optimierung von sekundären, geschmierten Punkt- und Ellipsenkontakten zur geziel- ten Auslegung von Rollenlagern KTmfk, xxv u. 206 Seiten, 70 Bilder, 16 Tab. 2024.

ISBN: 978-3-96147-766-1.

Band 450: Tobias Lechler

Der Digitale Zwilling im Ramp- down automatisierter Produkti- onssysteme

FAPS, xvii u. 152 Seiten, 83 Bilder, 4 Tab. 2024

ISBN: 978-3-96147-691-6.

Band 451: Eva Russwurm

Kombinierte Material- und Energieflussimulation gleich- strombasierter, automatisierter Produktionsanlagen

FAPS, xvi u. 165 Seiten, 67 Bilder, 13 Tab. 2024

ISBN: 978-3-96147-770-8.

Band 452: Janik Schaude

Untersuchungen zur rasterkraft- und konfokalmikroskopischen Charakterisierung nanometrologi- scher Referenzkörper

FMT, x u. 167 Seiten, 74 Bilder, 4 Tab. 2024

ISBN: 978-3-96147-776-0.

Band 453: Philipp Bräuer

Nahinfrarot-Laser-Strukturierung und nasschemische Metallisierung von Aluminiumoxid mittels Laser- Absorptionsschicht

FAPS, xx u. 152 Seiten, 55 Bilder, 19 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-780-7.

Band 454: Andreas Michael Müller

Definition and applications of the spatially discrete metrological de- scriptor framework for triangle mesh geometry data in 3D coordi- nate metrology

FMT, x u. 220 Seiten, 75 Bilder, 16 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-782-1.

Band 455: Sina Martin

Einstellung anisotroper Eigen- schaften dielektrischer Elastomer- systeme mittels eines selektiven Druckverfahrens

FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 76 Bilder, 6 Tab. 2024.

ISBN: 978-3-96147-789-0.

Band 456: Manuel Reck

Grundlegendes Prozessverständnis zur Herstellung von Bauteilen mit texturierten Oberflächen durch Mikroprägen in einem kombinier- ten Umformprozess

LFT, ix u. 170 Seiten, 83 Bilder, 10 Tab. 2025.

ISBN: 978-3-96147-798-2.

Abstract

Due to the increasing demand for components with high functional density, metallic components with textured surfaces are gaining in importance. Textured surfaces are often inspired by nature and can provide various functions such as reduced friction or adapted wettability.

Conventional manufacturing processes for such components can reach their limits due to long process times and high production costs. This thesis therefore investigates a combined forming process that combines the production of component bodies with the texturing of the surface in a resource-efficient process. The objective of the work is to develop a fundamental understanding of the process of forming thin-walled components with micro-coined structures in a single-stage process. The process analysis is based on the investigation of component- and process-specific challenges and the subsequent derivation of forming limits. A systematic influence analysis also provides information on the mechanisms of action of the process combination. Based on this, methods for extending the process limits are developed and presented. With regard to industrial use, the tool-side wear behavior in the production of large quantities is investigated. Application-oriented recommendations for combined texturing processes are derived from the findings.

Durch die steigende Nachfrage nach Bauteilen mit hoher Funktionsdichte gewinnen metallische Komponenten mit texturierter Oberfläche an Bedeutung. Texturierte Oberflächen sind häufig aus der Natur inspiriert und können verschiedene Funktionen wie eine reduzierte Reibung oder eine angepasste Benetzbarkeit bereitstellen.

Konventionelle Herstellungsverfahren solcher Bauteile geraten durch lange Prozesszeiten und hohe Fertigungskosten bisweilen an ihre Grenzen. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher ein kombiniertes Umformverfahren untersucht, das die Herstellung von Bauteilgrundkörpern mit der Texturierung der Oberfläche in einem ressourceneffizienten Prozess verbindet. Die Zielsetzung der Arbeit ist die Erarbeitung eines grundlegenden Prozessverständnisses der umformtechnischen Fertigung dünnwandiger Komponenten mit mikrogeprägten Strukturen in einem einstufigen Verfahren. Die Prozessanalyse erfolgt anhand der Untersuchung von bauteil- und prozessspezifischen Herausforderungen sowie der anschließenden Ableitung von Grenzen der Formgebung. Eine systematische Einflussanalyse zudem Aufschluss über die Wirkmechanismen der Prozesskombination. Darauf basierend werden Methoden zur Erweiterung der Prozessgrenzen erarbeitet und bereitgestellt. Im Hinblick auf den industriellen Einsatz wird das werkzeugseitige Verschleißverhalten in der Fertigung großer Stückzahlen untersucht. Aus den erzielten Erkenntnissen werden anwendungsnahe Empfehlungen für kombinierte Texturierungsprozesse abgeleitet.

ISBN 978-3-96147-798-2

