

FAU Studien aus dem Maschinenbau 308

Maria Löffler

Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme

Maria Löffler

Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch
maßgeschneiderte tribologische Systeme

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 308

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Maria Löffler

**Steuerung von Blechmassivumform-
prozessen durch maßgeschneiderte
tribologische Systeme**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT)

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Erlangen

FAU University Press

2018

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.

Bitte zitieren als

„Löffler, Maria. 2018. *Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 308. Erlangen: FAU University Press.

DOI: 10.25593/978-3-96147-134-8.“

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 den OPUS Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-133-1 (Druckausgabe)

eISBN: 978-3-96147-134-8 (Online-Ausgabe)

ISSN: 2625-9974

DOI: 10.25593/978-3-96147-134-8

**Steuerung von Blechmassivumformprozessen
durch maßgeschneiderte tribologische Systeme**

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

zur

Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Maria Löffler, M.Sc.
aus Sonneberg

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

Tag der mündlichen

Prüfung: 14.12.2017

Vorsitzender des

Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Prof. Dr.-Ing. habil. Kai Willner

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit wurden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereiches Transregio 73 (SFB/TR73) im Teilprojekt C1 „Konstitutives Reibgesetz zur Beschreibung und Optimierung von Tailored Surfaces“ erarbeitet.

Mein besonderer Dank gilt der Ordinaria des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein für die intensive wissenschaftliche Betreuung bei der Erstellung der Arbeit. Das entgegengebrachte Vertrauen während meiner Forschungsaktivitäten und der Leitung der Forschungsgruppe „Massivumformung“ hat meine persönliche Entwicklung und meinen Werdegang stets positiv beeinflusst.

Prof. Dr.-Ing. habil. Kai Willner danke ich für die Übernahme des Koreferats und die sehr gute Betreuung im Rahmen des Forschungsprojektes. Bei Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schlücker und Prof. Dr. sc. ETH Alexander Hasse möchte ich mich für Ihre Mitwirkung an meinem Promotionsverfahren als fachfremder Gutachter und Prüfungsvorsitzender bedanken.

Weiterhin gilt mein Dank den Kollegen am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie für die produktive Zusammenarbeit. Neben den Mitgliedern der Forschungsgruppen „Massivumformung“ und „Oberfläche und Tribologie“ gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ulf Engel für die vielen fachlichen Diskussionen und Anregungen zur vorliegenden Arbeit. Ebenso gilt mein Dank allen technischen Mitarbeitern, den Teams aus Sekretariat, Buchhaltung und Systemadministration.

Einen besonderen Dank richte ich an Frau Jennifer Tenner, Herrn Christoph Kiener, Herrn Reiner Stadter und Herrn Florian Pilz für die konstruktive und vertrauensvolle Zusammenarbeit. Ebenso danke ich den zahlreichen Studenten und Hilfwissenschaftlern, welche durch Ihre Arbeit zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Abschließend gilt mein besonderer Dank meiner Familie, die mich während meines bisherigen Lebensweges überaus unterstützt haben.

Gäufelden, im Januar 2018

Maria Löffler

Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	v
1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und Forschung	5
2.1	Blechmassivumformung	5
2.2	Beeinflussung des Stoffflusses	6
2.3	Ansätze zur Beeinflussung des tribologischen Systems	11
2.3.1	Schmierstoffseitige Ansätze.....	12
2.3.2	Werkstückseitige Ansätze	16
2.3.3	Werkzeugseitige Ansätze	20
2.4	Zusammenfassende Bewertung	24
3	Zielsetzung und Methodik	27
4	Angewandte Werkstoffe, Verfahren zur Oberflächenmodifikation sowie Mess- und Prüfverfahren	29
4.1	Angewandte Werkstoffe und Schmierstoffe.....	29
4.2	Angewandte Verfahren zur Oberflächenmodifikation.....	33
4.2.1	Platinenseitige Oberflächenmodifikation	33
4.2.2	Werkzeugseitige Oberflächenmodifikation	37
4.3	Charakterisierung der Oberflächeneigenschaften	40
4.4	Ermittlung des Reibverhaltens im Laborversuch.....	43
4.5	Ermittlung der Wirksamkeit im Verifizierungsversuch	48
4.5.1	Kombinierter Tiefziehstauchprozess	49
4.5.2	Fließpressprozess.....	50
5	Ermittlung von Anforderungen an tribologische Adaptionen	51
5.1	Prozessanalyse	51
5.2	Stoffflusssteuerung durch Adaption der tribologischen Bedingungen ..	54
6	Entwicklung von maßgeschneiderten tribologischen Systemen im Laborversuch	61
6.1	Reibungsbeeinflussung durch Schmierstoffsysteme	61

6.2	Reibungsbeeinflussung durch werkstückseitige Oberflächenmodifikationen	65
6.2.1	Abrasive Strahlen von Platinen.....	65
6.2.1.1	Charakterisierung abrasivgestrahlter Platinen	66
6.2.1.2	Reibverhalten abrasivgestrahlter Platinen	70
6.2.1.3	Ableitung und Verifizierung funktionaler Zusammenhänge	72
6.2.2	Mikroprägen von Platinen.....	85
6.2.2.1	Charakterisierung mikrogeprägter Platinen	85
6.2.2.2	Reibverhalten mikrogeprägter Platinen.....	92
6.2.2.3	Ableitung und Verifizierung funktionaler Zusammenhänge	96
6.3	Reibungsbeeinflussung durch werkzeugseitige Oberflächenmodifikationen	105
6.3.1	Hochvorschubfräsen von Werkzeugoberflächen	106
6.3.1.1	Charakterisierung hochvorschubgefräster Werkzeugoberflächen	106
6.3.1.2	Reibverhalten hochvorschubgefräster Werkzeugoberflächen	108
6.3.1.3	Ableitung und Verifizierung funktionaler Zusammenhänge	109
6.3.2	Beschichten von Werkzeugoberflächen	112
6.3.2.1	Charakterisierung beschichteter Werkzeugoberflächen	113
6.3.2.2	Reibverhalten beschichteter Werkzeugoberflächen	113
6.3.2.3	Ableitung und Verifizierung funktionaler Zusammenhänge	115
6.4	Reibungsbeeinflussung durch eine kombinierte Anwendung von werkzeug- und werkstückseitigen Modifikationen.....	116
6.4.1	Kombination von werkzeug- und werkstückseitigen reibungserhöhenden Oberflächenmodifikationen	117
6.4.2	Kombination von werkstück- und werkzeugseitigen reibungsreduzierenden Oberflächenmodifikationen	118
6.5	Zusammenfassende Bewertung werkzeug- und werkstückseitiger Oberflächenmodifikationen	120
7	Auswahl und Untersuchung der Wirksamkeit werkstück- und werkzeugseitiger Oberflächenmodifikationen im Verifizierungsversuch.....	123
7.1	Auswahl geeigneter Oberflächenmodifikationen.....	123
7.2	Einsatz und Bewertung der Wirksamkeit in Verifizierungsversuchen	126
8	Bewertung von maßgeschneiderten tribologischen Systemen für die Blechmassivumformung	133
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	137
10	Summary and outlook.....	141
	Literaturverzeichnis	145

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
a_e	mm	Eingriffsbreite Fräser
b	mm	Gratbahnbreite
d_{Fokus}	mm	Fokusbereich
d_s	mm	Strukturdurchmesser
f_z	mm	Zahnvorschub Fräser
h	mm	Höhe des Anschlags
h_{RS}	mm	Höhe der Randschicht
h_{MS}	mm	Höhe der Mittelschicht
h_s	μm	Strukturtiefe
h_z	mm	Zapfenhöhe
k_f	MPa	Fließspannung
k_{f0}	MPa	Anfangsfließspannung
m	-	Reibfaktor
m_{Boden}	-	Reibfaktor im Bereich des Bodens
$m_{\text{Verzahnung}}$	-	Reibfaktor im Bereich der Verzahnung
$\Delta m_{\text{Boden/Verzahnung}}$	-	Reibfaktorunterschied zwischen Boden und Verzahnung
n	1/min	Drehzahl Fräser
n_{Proben}	-	Probenanzahl
n_{ST}	-	Strukturanzahl
r_s	μm	Strukturradius
s	mm	Gratbahndicke
s_0	mm	Ausgangsblechdicke
s_1	mm	Blechdicke nach Umformung
s_G	mm	Gleitweg
v_{rel}	mm/s	Gleitgeschwindigkeit
A_1/A_0	%	Oberflächenvergrößerung
D_a	mm	Außendurchmesser
D_i	mm	Innendurchmesser
F_{GH}	kN	Gegenhalterkraft
F_K	kN	Klemmkraft
F_N	kN	Normalkraft
F_R	kN	Reibkraft
F_U	kN	Umformkraft

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

HWB	-	Halbwertsbreite
R_a	μm	Arithmetische Mittenrauheit
R_{pk}	μm	Reduzierte Spitzenhöhe
R_z	μm	Gemittelte Rautiefe
U_S	mm	Strukturumfang
V_S	mm^3	Strukturvolumen
α	$^\circ$	Anstellwinkel Fräser
α_{cl}	%	Geschlossener Leerflächenanteil
α_{clm}	%	Maximal geschlossener Leerflächenanteil
λ_s	μm	Kurzwelliger Profilfilter
λ_c	mm	Langwelliger Profilfilter
σ_N	MPa	Kontaktnormalspannung
φ	-	Umformgrad

1 Einleitung

Deutschland zählt im internationalen Vergleich zu den leistungsstärksten Volkswirtschaften. Im Jahr 2015 erwirtschaftete die Bundesrepublik ein Bruttoinlandsprodukt von 3.357 Milliarden Euro [1]. Damit ist Deutschland nach den USA, Japan und China die viertgrößte Volkswirtschaft weltweit. Der Industriesektor hat einen bedeutenden Anteil an dieser Stärke. Dieser erwirtschaftete 2015 einen Anteil von 22,8 % an der gesamten Bruttowertschöpfung und nimmt damit eine Führungsrolle im internationalen Vergleich ein [2]. Die wirtschaftliche Stärke in diesem Sektor ist auf die Innovationskraft zurückzuführen. Diese ist notwendig, um die Stärke auf Dauer zu halten und gleichzeitig ist sie eine Triebfeder für die Zukunftsfähigkeit der deutschen Industrie. Die Bedeutung der Innovationskraft für die deutsche Wirtschaft wird durch die Höhe der Ausgaben im Bereich Forschung und Entwicklung (FuE) bestätigt. Im Jahr 2015 betragen die Aufwendungen für FuE drei Prozent des Bruttoinlandsprodukts [3]. Somit zählt die Bundesrepublik laut einer Studie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung zu den fünf weltweit führenden Innovationsstandorten [3].

Bei einer näheren Analyse der deutschen Industriestruktur fällt die Automobilindustrie ins Auge. Im Jahr 2015 erwirtschaftete diese 450,9 Milliarden Euro und nimmt damit die Führungsrolle unter den verschiedenen Industriezweigen ein [2]. Neben der monetären Bedeutung prägt die Automobilindustrie einige Regionen deutschlandweit in ihrer Wirtschaftsstruktur [4]. Dieser Industriezweig ist beispielsweise einer der größten Arbeitgeber, was Beschäftigungszahlen von 774.900 Menschen im Jahr 2014 bestätigen [5]. Aufgrund der großen sozialen und monetären Bedeutung dieses Industriesektors sind gerade in der Automobilindustrie eine hohe Innovationskraft und damit einhergehend hohe Investitionen im Bereich Forschung und Entwicklung von entscheidender Bedeutung für deren Zukunftsfähigkeit. Der bereits vorhandene Stellenwert von FuE wird durch Zahlen des Verbands der Automobilindustrie bestätigt. Im Jahr 2014 wurden beispielsweise 17,6 Milliarden Euro für Forschung und Entwicklung aufgewandt. Zusätzlich beschäftigten sich deutschlandweit 93.000 Arbeitnehmer mit Innovationsfragen in diesem Bereich [5]. Trotz dieses bereits hohen Stellenwerts steht die Automobilindustrie im Hinblick auf neue Innovationen verstärkt unter Druck [6]. Begründet ist dies durch immer neue und wachsende Herausforderungen, beispielsweise im Hinblick auf ökonomische und ökologische Aspekte.

Eine wesentliche Herausforderung, welche aus der Politik und von Seite der Verbraucher gestellt wird, ist die Reduktion des CO₂ Ausstoßes. Dies ist einerseits motiviert durch gesetzliche Restriktionen. Andererseits kommt es zu einem stetigen Anstieg des Umweltbewusstseins der Verbraucher. Beispielsweise muss die Automobilindustrie bis zum Jahr 2020 die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Fahrzeuge auf einen Wert von unter 95 Gramm pro Kilometer senken [7]. Um der Anforderung gerecht zu werden, existieren verschiedene Wege. Eine Möglichkeit besteht in der Entwicklung alternativer Antriebe unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Leichtbaugedankens. Um diesem Gedanken, vor allem bei der Fertigung von Funktionsbauteilen, gerecht zu werden, bedarf es einer gesteigerten Funktionsintegration bei einer gleichzeitig zunehmenden geometrischen Bauteilkomplexität. Zur wirtschaftlichen Fertigung derartiger Komponenten sind zudem verkürzte Prozessketten und eine hohe Material- und Energieeffizienz notwendig. Ein derartiges Anforderungsprofil lässt konventionelle Fertigungsverfahren aus dem Bereich der Blech- und Massivumformung an ihre Grenzen stoßen. Es besteht die Möglichkeit, die Grenzen beider Verfahren durch eine kombinierte Anwendung zu erweitern. Diese Verfahren werden der Prozessklasse der Blechmassivumformung, welche als Anwendung von Massivumformoperationen auf Blechhalbzeuge definiert ist, zugeordnet [8]. Die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung ist somit eine Möglichkeit, hochintegrierte und komplexe Funktionsbauteile unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen Anforderungen und Leichtbauaspekten zu fertigen. Die Verfahrenskombination birgt jedoch neue Herausforderungen. Während der Umformung treten lokal unterschiedliche Beanspruchungen auf. Diese Variation beeinflusst wiederum den Stofffluss und resultiert in einer reduzierten Bauteilgenauigkeit vor allem im Bereich der hochbeanspruchten Funktionselemente. Derartige Prozessgrenzen motivieren die Notwendigkeit zur Erforschung von Methoden zur Stoffflusssteuerung in der Blechmassivumformung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden globale Stoffflusssteuerungsmethoden über eine lokale Einstellung der tribologischen Bedingungen erforscht und im Hinblick auf ihre Wirksamkeit für die Blechmassivumformung verifiziert. Auf Basis numerisch definierter Anforderungen werden werkzeug- und werkstückseitige Oberflächenmodifikationen im Labormaßstab analysiert. Die Modifikationen zielen auf eine Reibungserhöhung und eine Reibungsreduzierung ab. Ziel ist die Identifikation der tribologischen Wirkmechanismen, um die Modifikationsverfahren unabhängig vom untersuchten Parameterraum für die Blechmassivumformung nutzbar

zu machen. Die identifizierten Wirkmechanismen werden genutzt, um geeignete Oberflächenmodifikationen für eine Stoffflusssteuerung zweier Blechmassivumformprozesse auszuwählen. Neben der Verifizierung der Wirksamkeit zielen diese Untersuchungen auf eine übergeordnete Bewertung der untersuchten tribologischen Systeme für eine Anwendung in der Blechmassivumformung ab.

2 Stand der Technik und Forschung

Die vorliegende Arbeit zielt auf die Erforschung von Methoden zur globalen Steuerung des Stoffflusses durch maßgeschneiderte tribologische Systeme in der Blechmassivumformung ab. Der folgende Stand der Technik und Forschung gibt einen Überblick über vorhandene Ansätze zur Stoffflusssteuerung bei konventionellen Verfahren der Blech- und Massivumformung. Neben prozesseitigen und werkstückseitigen Ansätzen wird auf im Einsatz befindliche tribologische Methoden eingegangen. Die abschließende Bewertung der vorhandenen Forschungsergebnisse leitet die Forschungsschwerpunkte der vorliegenden Arbeit ab.

2.1 Blechmassivumformung

Die Fertigungstechnologie wird heutzutage konfrontiert durch zunehmende ökonomische und ökologische Anforderungen [9] sowie Forderungen nach gesteigerter Funktionsintegration [10], der Fertigung von endkonturnahen Bauteilen [11] und die Berücksichtigung von Leichtbauaspekten [12]. Eine Möglichkeit, diesen Anforderungen gerecht zu werden, besteht beispielsweise in der Herstellung von eng tolerierten Bauteilen mit hoch beanspruchten Funktionselementen. Konventionelle Fertigungsverfahren der Blech- und Massivumformung stoßen bei der Fertigung dieser geometrisch komplizierten Bauteile, welche durch eine spezifische Blechdickenänderung gekennzeichnet sind, an ihre Grenzen [13]. Bei den Verfahren der Blechumformung ist dies durch den vorwiegend ebenen Formänderungszustand bedingt [14]. In der Massivumformung bestehen Grenzen aufgrund des Deformationsverhaltens, welches bei den konventionellen Verfahren durch große räumliche Wandstärken- und Querschnittsänderungen gekennzeichnet ist [15]. Durch eine Kombination beider Umformklassen im Rahmen der Blechmassivumformung werden die Vorzüge und Gestaltungsmöglichkeiten beider Klassen nutzbar gemacht und die Fertigung von derartigen Bauteilen ermöglicht. Die Blechmassivumformung ist nach Merklein et. al [8] definiert als die Anwendung von Massivumformoperationen auf Blechhalbzeuge mit einem beabsichtigten dreidimensionalen Stofffluss, häufig in Kombination mit einer Blechumformoperation. Ziel der Blechmassivumformung ist die Herstellung von Bauteilen mit Funktionselementen senkrecht zur Blechebene, deren Abmessungen im Bereich der Ausgangsblechdicke liegen [16]. Die Ausgangsblechdicke der eingesetzten Halbzeuge variiert zwischen 1 mm und 5 mm [8]. Eine Klassifizierung der anwendbaren Massivumformverfahren auf Blechhalbzeuge werden

beispielsweise durch Merklein et. al [16] und Mori [17] gegeben. Auf dem Forschungsgebiet der Blechmassivumformung wurden in den letzten Jahren zahlreiche Arbeiten vorgestellt, was die Bedeutung dieser Verfahrensklasse aufzeigt. Durch Wang [18] wurde die Herstellung zapfenförmiger Funktionselemente durch eine Verfahrenskombination von Tiefziehen und Stauchen vorgestellt. Mori [19] erforschte die Fertigung von Tailored Blanks, welche für die Herstellung von Rechtecknäpfen genutzt werden. In [20] wird näher auf die Herstellung von napfförmigen Bauteilen mit einem hohlen zapfenförmigen Funktionselement eingegangen.

Neben den zahlreichen Vorteilen birgt die Anwendung von Blechmassivumformoperationen Herausforderungen, beispielsweise im Hinblick auf die anzuwendende Werkzeugtechnik [21]. Eine weitere Herausforderung, die es zu bewältigen gilt, ist die reduzierte Geometriegenauigkeit der umgeformten Bauteile. Diese ist bedingt durch lokal und zeitlich variierende Belastungskollektive [8], welche aufgrund des lokalen Aufdickens des Blechhalbzeugs bei der Fertigung der Funktionselemente auftreten [22]. Es kommt zu einer Interaktion von Bereichen mit hohen und niedrigen Spannungswerten, was den Stofffluss während der Umformung beeinflusst [22]. In [23] wurde der Stofffluss für verschiedene Blechmassivumformverfahren analysiert. In [24] wurde gezeigt, dass bei einer Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Fließpressen ein dominanter Materialfluss in den Flansch- und Bodenbereich vorliegt. Dies resultiert in einer reduzierten Formfüllung der Funktionselemente. In [25] wurde dieser Zusammenhang für eine Verfahrenskombination aus Tiefziehen und Stauchen nachgewiesen. Der vorliegende unkontrollierte Stofffluss motiviert die Notwendigkeit zur Anwendung von Methoden zur Stoffflusssteuerung in der Blechmassivumformung. Da die Blechmassivumformung eine neue Verfahrensklasse darstellt, existieren keine Methoden speziell für diese Verfahrensklasse. Aufgrund dessen ist zu überprüfen, welche Ansätze konventioneller Blech- und Massivumformverfahren für die Blechmassivumformung nutzbar sind. Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über vorhandene Methoden gegeben.

2.2 Beeinflussung des Stoffflusses

Die Anwendung von Methoden zur Steuerung des Stoffflusses ist bei den konventionellen Verfahren der Blech- und Massivumformung ein wichtiger Aspekt. In der Blechumformung wird der Stofffluss beispielsweise über den Platinenzuschnitt, werkzeugseitige Ziehsticks und einen steuerbaren Niederhalter beeinflusst [26]. Die Anpassung der Werkzeugkontur und der

kinematischen Randbedingungen der Umformmaschine sind Möglichkeiten aus dem Bereich der Massivumformung [27]. In beiden Verfahrensklassen finden zusätzlich Modifikationen des tribologischen Systems Anwendung. Die folgenden Abschnitte gehen auf vorhandene Methoden für die jeweiligen Verfahrensklassen ein.

Stoffflussbeeinflussung in der Blechumformung

Durch Verfahren der Blechumformung werden großflächige Ziehteile mit relativ geringen Ziehtiefen, unregelmäßigen Formen und zahlreichen Formelementen gefertigt [28]. Während der Umformung treten häufig Tiefzieh- und Streckziehanteile in Kombination auf [29]. Da das Streckziehen zu einem vollständigen Verhindern des Materialnachlaufs führt und das Tiefziehen durch ein freies Nachfließen des Werkstoffs im Werkzeug gekennzeichnet ist, ist eine Steuerung des Materialflusses notwendig [29]. Zur Realisierung existieren werkstück-, werkzeug- und prozessseitige Stellhebel, auf welche im Folgenden näher eingegangen wird.

Ein werkstückseitiger Stellhebel ist die Adaption des Platinenzuschnitts. Durch eine örtliche Vergrößerung der Platinen werden eine Erhöhung der Umform- und Reibkräfte zwischen Werkzeug und Platine und damit eine Hemmung des Materialflusses erreicht [26]. Eine Reduzierung der Platinengröße führt zu einer Stoffflussbegünstigung. Zur Identifikation geeigneter Zuschnitte wurde beispielsweise in [30] ein Berechnungsprogramm auf der Basis des erweiterten Radialschnittverfahrens für rechteckige Ziehteilgeometrien entwickelt. Es konnte nachgewiesen werden, dass durch die Anwendung dieser Berechnungsmethode eine geringere Blechdickenabnahme im Eckbereich der Ziehteilzarge und damit ein verbesserter Stofffluss erzielbar sind [30]. Des Weiteren wurde in [31] gezeigt, dass eine numerische Auslegung der Platinengeometrie genutzt werden kann, um ein verbessertes Umformergebnis für rechteckige Ziehteile zu erreichen.

Neben der Modifikation der Platinengeometrie ist ein weiterer werkstückseitiger Ansatz die Verwendung von maßgeschneiderten Halbzeugen, sogenannten Tailored Blanks. Tailored Blanks werden in Tailor heat treated blanks, Tailor welded blanks, Patchwork blanks und Tailor rolled blanks unterteilt [32]. Tailor heat treated blanks sind gekennzeichnet durch lokal variierende mechanische Eigenschaften, vor allem in Hinblick auf die Festigkeit [32]. Dies resultiert aus einer lokalen Wärmebehandlung der Ausgangsplatine. Durch die Interaktion von verfestigten und entfestigten Bereichen während der Umformung wird der Materialfluss beeinflusst [32]. Für einen verbesserten Materialfluss ist das geometrische Layout der lokalen Wärmebehandlung von entscheidender Bedeutung [33]. Tailor welded

blanks sind Halbzeuge, welche aus mindestens zwei einzelnen Platinen fügetechnisch hergestellt werden. Die Platinen können bezüglich Blechdicke, Oberflächenbeschichtung und Materialeigenschaften variieren. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Werkstoffe miteinander zu verbinden. Patchwork blanks werden ebenfalls aus mehreren Platinen fügetechnisch hergestellt. Im Gegensatz zu den Tailor welded blanks wird bei dieser Art das Halbzeug an hochbeanspruchten Bereichen durch ein weiteres Blech verstärkt. Durch die Kombination mehrerer Werkstoffe werden in der Platine lokal variierende mechanische Eigenschaften eingestellt, welche zur Steuerung des Stoffflusses nutzbar sind. Tailor rolled blanks sind umformtechnisch hergestellte Platinen mit lokal abweichenden Blechdicken, welche kontinuierliche Blechdickensprünge aufweisen. Die so erzeugten abweichenden geometrischen und mechanischen Eigenschaften der Platine können ebenfalls zur Stoffflusssteuerung genutzt werden. In [32] wird ein Überblick über die Forschungsaktivitäten gegeben.

Neben werkstückseitigen Ansätzen existieren werkzeugseitige Methoden zur Stoffflusssteuerung. Ein Ansatz besteht in der Verwendung von Ziehstäben bzw. Ziehsicken. Mit Hilfe von Ziehstäben wird der Materialeinzug an gering beanspruchten Ziehteilseiten während des Ziehvorgangs durch eine mehrmalige Umlenkung der Platine gebremst. Dies führt zu einem weitgehend gleichmäßigen Flanscheinzug. Die Bremskraft von Ziehsicken setzt sich aus dem Biegekraftanteil, bedingt durch das mehrmalige Biegen und Rückbiegen um die Radien der Ziehsicke und der Gegennut, und dem Reibkraftanteil zusammen [34]. Einfluss auf diese beiden Kraftkomponenten nehmen der Ziehstabradius, die Ziehstabhöhe und die Anordnung im Werkzeug [35]. In [34] wird beschrieben, dass diese geometrischen Kenngrößen des Ziehstabs einen signifikanten Einfluss auf die Materialflusssteuerung nehmen. Des Weiteren wurde in numerischen Ansätzen untersucht, wie sich die Ziehstabgeometrie auf die Umformung des Materials und damit den Stofffluss auswirkt [36].

Ein prozessseitiger Ansatz zur Steuerung des Stoffflusses ist die Anpassung der Niederhalterkraft bzw. des verwendeten Niederhaltersystems. In [37] wurde gezeigt, dass durch die Niederhalterkraft und die Art ihrer Aufbringung, die Spannungs- und Dehnungszustände, die Dehnpfade und damit der Materialfluss im Blech beeinflussbar sind. Zur Einstellung der Niederhalterkraft gibt es verschiedene Ansätze. Durch einen segmentierten Niederhalter ist die Kraft beispielsweise während des Umformvorgangs lokal einstellbar und damit der Materialfluss lokal steuerbar [38]. Elend [35] wies nach, dass durch einen aktiv elastischen Niederhalter eine lokale Beeinflussung des Werkstoffflusses erzielbar ist. In [39] wird beschrieben,

dass durch eine wegabhängige Steuerung der Niederhalterkraft mit Hilfe von Gasdruckfedern das Grenzziehverhältnis gesteigert werden kann. Eine weitere Methode zur Materialflusssteuerung über das Niederhaltersystem besteht in der Verwendung pulsierender Niederhalter, welche Schwingungen über abströmendes Öl erzeugen [38].

Ein übergreifender Ansatz ist die Adaption des tribologischen Systems. Zahlreiche Untersuchungen weisen nach, dass eine Stoffflusssteuerung sowohl über eine Modifikation des Schmierstoffs als auch der Werkzeug- und Werkstückoberfläche möglich ist. Auf diesen übergreifenden Ansatz wird in Abschnitt 2.3 eingegangen.

Stoffflussbeeinflussung in der Massivumformung

In der Massivumformung werden neben tribologischen Ansätzen werkzeug- und prozesseitige Ansätze zur Steuerung des Materialflusses genutzt. Über werkstückseitige Stellhebel sind keine Untersuchungen bekannt. Die werkzeugseitigen Adaptionen sind auf geometrische Modifikationen der Werkzeugkomponenten beschränkt. Eine Möglichkeit zur Steuerung des Stoffflusses über werkzeugseitige Ansätze besteht in der Verwendung von Gratbahnen. Diese finden vor allem bei Schmiedeverfahren Anwendung. Beim Gesenkschmieden wird überschüssiges Material zur Verbesserung der Formfüllung genutzt. Dieses Material fließt zwischen den beiden formgebenden Gesenken über die Gratbahn ab. Über die Modifikation der Gratbahngeometrie ist eine gezielte Stoffflusssteuerung möglich [38]. Relevante Größen zur Beeinflussung des Materialflusses sind die Gratbahndicke s und die Gratbahnbreite b [40]. Es existieren verschiedene Ansätze zur Kalkulation beider Geometrieparameter. Neuberger [41] kalkulierte in einem empirischen Ansatz die beiden Geometrieparameter b und s über das Gewicht der geschmiedeten Bauteile. Klawitter untersuchte [42] den Einfluss unterschiedlicher Werte für b und s in Abhängigkeit des untersuchten Gratbahnbereichs, um über eine Reduzierung der erforderlichen Kräfte die Formfüllung zu erhöhen. Neuere Ansätze beschreiben die Verwendung von variabel steuerbaren Gratbahnen. Durch Langner [43] wurde durch die Verwendung einer aktiv gesteuerten Gratbahn mit einer über den Prozess zurückweichenden geometrischen Sperre des Stoffflusses eine Formfüllungssteigerung von circa 17 % im Vergleich zu starren Gratbahnen realisiert. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass mit geringeren Ansteuerungskräften für die hydraulischen Zylinder eine zusätzliche Steigerung der Formfüllung erzielbar ist [43]. Ein weiterer Ansatz zur Steuerung des Materialflusses über geometrische Werkzeugaspekte besteht in der Modifikation der Geometrie der Aktivelemente, wie Matrize oder

Stempel. In [44] wurde beispielsweise der Einfluss der Stempelgeometrie auf die Ausformung der Ecken beim Querfließpressen von Bündeln mit eckigen Querschnitten untersucht. Die Stempelgeometrie beeinflusst hierbei den Stofffluss. Flachstempel sind gegenüber spitzen, kugelförmigen oder konisch zulaufenden Stempeln zu bevorzugen. In [45] wurde für das Vorwärtsfließpressen von schrägverzahnten Zahnrädern nachgewiesen, dass über eine Modifikation des Matrizeneinlaufs eine gezielte Steuerung des Stoffflusses möglich ist. Der Schultereinlaufwinkel hat dabei einen signifikanten Einfluss [46]. Der Einfluss des Schulterwinkels beim Hohlvorwärtsfließpressen von geradverzahnten Stirnrädern wurde durch Jütte [47] näher analysiert. Ein Schulterwinkel von 15° trägt zur Minimierung der Umformkraft und damit zur positiven Beeinflussung des Stoffflusses bei.

Des Weiteren finden prozessseitige Ansätze Anwendung, wie beispielsweise die Stoffflusssteuerung über eine lokal und zeitlich veränderliche Temperaturführung während der Umformung. Durch eine kombinierte Anwendung von Kalt- und Halbwarmumformoperationen werden die positiven Eigenschaften beider Verfahren genutzt und somit eine Steuerung des Stoffflusses ermöglicht. In [48] wurde die sequentielle Anwendung einer Warm- und Kaltumformoperation für massivumgeformte Bauteile untersucht. Neben der sequentiellen Anwendung ist die Integration von Kalt- und Warmumformoperationen in einem Umformschritt bei der Herstellung eines zylindrischen Bauteils mit umlaufendem Flansch in [49] analysiert worden. Eine lokale Erwärmung des späteren Flanschbereichs ermöglicht die Umformung des Funktionselements in einem Umformschritt. Die Kaltumformung der restlichen Bauteile führt zur gezielten Nutzung dieser prozessspezifischen Vorteile. Die Temperatur wurde in [49] als signifikante Einflussgröße auf den Stofffluss identifiziert. In [27] wurde zusätzlich gezeigt, dass durch eine zeitlich und örtlich veränderliche Temperaturführung mittels einer thermisch differenziellen Prozessführung der Stofffluss beeinflussbar ist und Bauteile mit einer Eigenschaftsgradierung herstellbar sind.

Analog zu den Verfahren der Blechumformung gibt es in der Massivumformung zahlreiche Forschungsaktivitäten zur Steuerung des Stoffflusses über tribologische Ansätze. Auf diese wird in Abschnitt 2.3 eingegangen.

Bewertung der Anwendbarkeit konventioneller Ansätze in der Blechmassivumformung

Bei den Verfahren der Blechmassivumformung treten Bedingungen aus der Blech- und Massivumformung auf. Somit sind die in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Methoden im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit

zu prüfen. Da Aspekte wie Ressourcenschonung, Energiesparaspekte und die Fertigung endkonturnaher Bauteile wichtige Punkte in der Blechmassivumformung sind, sind Stoffflusssteuerungsmethoden, wie die Temperaturführung oder die Verwendung von Gratbahnen aus dem Bereich der Massivumformung als nicht geeignet zu bewerten. In einigen Forschungsvorhaben wurden bereits weitere konventionelle Ansätze bewertet. In [50] wurde die Wirksamkeit von werkzeugseitigen geometrischen Fließbehinderungen überprüft. Dies ist angelehnt an die in der Blechumformung verwendeten Ziehsicken. Durch diesen Ansatz konnte eine Verbesserung der Formfüllung von fließgepressten Funktionselementen um circa 6 % erreicht werden. Der untersuchte Ansatz ist für eine seriennahe Anwendung als nicht zielführend zu bewerten. Dies liegt darin begründet, dass die auftretenden Werkzeugbeanspruchungen in der Blechmassivumformung wesentlich höher sind als bei Verfahren der Blechumformung. Derartige geometrische Modifikationen am Werkzeug könnten somit zu einem frühzeitigen Ausfall der Werkzeuge führen. Ein weiterer Ansatz aus der Blechumformung, der untersucht wurde, ist die Adaption des Platinenzuschnitts. Beispielsweise kann durch einen iterativen Algorithmus zur Formoptimierung auf Basis der Mesh-Moving Methode geeignete Platinenzuschnitte ausgelegt werden [51]. Durch Landkammer konnte diese Methode zur inversen Auslegung eines vereinfachten Blechmassivumformprozesses genutzt werden [52]. In [53] wurde die Wirksamkeit für einen Fließpressprozess nachgewiesen. Dieser Ansatz ist im Hinblick auf eine seriennahe Anwendung mit Nachteilen verbunden. Komplexe Platinenzuschnitte erfordern eine integrierte Laserschneidanlage in der Fertigungslinie, was mit einem erhöhten Kostenaufwand verbunden ist. Somit werden in Fertigungslinien Platinen mit einfachen linearen Schnittkanten eingesetzt. Die Stoffflusssteuerung über die Modifikation des tribologischen Systems ist ein weiterer Ansatz, der Bestandteil der Forschung ist [54]. Da dieser Ansatz in der Blech- und Massivumformung bereits Anwendung findet, ist das Wissen aus beiden Bereichen für die Blechmassivumformung nutzbar, was ein entscheidender Vorteil ist. Aufgrund der Vorteile wird dieser Ansatz in der vorliegenden Arbeit erforscht. In den folgenden Abschnitten wird auf den Stand der Forschung bezüglich der Nutzung modifizierter tribologischer Systeme in der Blech- und Massivumformung eingegangen.

2.3 Ansätze zur Beeinflussung des tribologischen Systems

Das tribologische System, kurz Tribosystem, setzt sich aus dem Wirkflächenpaar, dem Zwischenstoff und dem Umgebungsmedium zusammen

[55]. Die Funktion eines Tribosystems wird über die Wirkflächen, welche als die Werkzeug- und Werkstückoberfläche definiert sind, realisiert. Der Zwischenstoff, welcher der zwischen Werkstück- und Werkzeugoberfläche befindliche Schmierstoff ist, dient der Trennung des Wirkflächenpaars und der Reduzierung von Reibung und Verschleiß [55]. Über die drei Komponenten des Tribosystems „Werkzeug, Werkstück und Schmierstoff“, sind eine Beeinflussung der Reibung und damit eine Steuerung des Stoffflusses möglich. Auf den Stand der Forschung zur Adaption der Reibung durch eine Modifikation der drei Komponenten in der Blech- und Massivumformung wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

2.3.1 Schmierstoffseitige Ansätze

Schmierstoffe werden in der Blech- und Massivumformung zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß angewendet. Sie unterbinden den direkten Kontakt zwischen Werkstück- und Werkzeugoberfläche [55]. Aufgrund der unterschiedlichen tribologischen Beanspruchungskollektive, beispielsweise im Hinblick auf Kontaktnormalspannung und Oberflächenvergrößerung, bei den Verfahren der Blech- und Massivumformung finden unterschiedliche Schmierstoffsysteme Anwendung, auf welche im Folgenden eingegangen wird.

Schmierstoffe in der Blechumformung

In der Blechumformung treten in der Wirkfuge vergleichsweise geringe Kontaktnormalspannungen und Oberflächenvergrößerungen in Kombination mit hohen Relativgeschwindigkeiten auf [9]. Aufgrund der niedrigen Werte für die Oberflächenvergrößerung bedarf es keiner zusätzlichen Trenn- und Trägerschicht zwischen Schmierstoff und Platinenoberfläche. Die Schmierstoffe werden direkt auf die Platinenoberfläche appliziert. Als Schmierstoffe werden im Allgemeinen Flüssig- und Festschmierstoffe verwendet. Als Flüssigschmierstoffe werden Mineralöle, Fettöle, Fette, Seifen oder Emulsionen eingesetzt. Als Festschmierstoffe finden wasserlösliche oder wasserfreie Trockenschmierstoffe, sogenannte Hotmelts, Anwendung.

Die Reibbedingungen von Flüssigschmierstoffen hängen stark von der chemischen Zusammensetzung und den daraus resultierenden Schmierstoff-eigenschaften ab. Die tribologischen Eigenschaften von Mineralölen werden von der Länge der chemischen Ketten sowie deren Verzweigungsgrad bestimmt. Mit zunehmender Kettenlänge steigen Viskosität, Flammpunkt und Siedepunkt [56]. Neben der chemischen Zusammensetzung hat

die Additivierung der Schmierstoffe einen großen Einfluss auf die tribologischen Eigenschaften, da diese die Trennwirkung zwischen Werkstück- und Werkzeugoberfläche verbessert. In der Blechumformung nehmen Extreme Pressure Additive, kurz EP, die bedeutendste Rolle ein [57]. EP-Additive sind beispielsweise öllösliche Verbindungen, welche Chlor, Schwefel, Phosphor oder Blei enthalten [58]. Der Wirkmechanismus von Additiven beruht darauf, dass diese bei erhöhten Temperaturen mit der Metalloberfläche reagieren und eine Schutzschicht bilden. Diese trägt zur Vermeidung eines direkten metallischen Kontakts des Wirkflächenpaars bei [57]. Neben Flüssigschmierstoffen kommen verstärkt Festschmierstoffen zur Anwendung. Diese zeichnen sich im Vergleich zu Flüssigschmierstoffen durch eine verbesserte Umformbarkeit, reduzierte Schmierstoffmengen [9] und eine hohe Temperatur- und Druckbeständigkeit aus. In [59] wurde die verbesserte Umformbarkeit durch die Verwendung von Festschmierstoffen gegenüber Flüssigschmierstoffen bei der Umformung von Aluminium nachgewiesen. [60] zeigt, dass durch die Verwendung von Trockenschmierstoffen eine Vergrößerung der Ziehverhältnisse für rechteckige Ziehteile aus Aluminium möglich ist. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde eine Anhäufung der Trockenschmierstoffe im Werkzeug detektiert, was als negativ zu bewerten ist. Sobotka [61] wies in Streifenziehversuchen nach, dass durch die Verwendung von Hotmelts die Bildung von Kaltverschweißungen reduziert wird. In [62] und [9] wird ein Überblick über die beschriebenen Schmierstoffsysteme und mögliche Anwendungsfelder sowie über aktuelle Trends zur Entwicklung umweltfreundlicher Schmierstoffe gegeben.

Schmierstoffe in der Massivumformung

Die Untersuchungen in der Blechmassivumformung werden ohne von außen wirkenden Temperatureinfluss durchgeführt, weswegen in diesem Kapitel lediglich auf Schmierstoffe für die Kaltmassivumformung eingegangen wird. Ausgewählte Beispiele zu Forschungsaktivitäten bezüglich Schmierstoffe für die Warmumformung sind in [63] zu finden. In der Kaltmassivumformung finden wie in der Blechumformung flüssige, pastöse und feste Schmierstoffe Anwendung. Flüssige Schmierstoffe sind Öle, wie beispielsweise Fließpressöle. Die Öle dienen neben der Schmierung und Kühlung von Prozessen dem Korrosionsschutz der Rohlinge. Wie in der Blechumformung werden die Schmierstoffeigenschaften und die tribologischen Eigenschaften durch die Eigenschaften des Öls und dessen Additivierung bestimmt. Als Additive werden polare Wirkstoffe und EP-Additive verwendet [64]. Der Einfluss der Additivierung und Viskosität wurde in

[65] für verschiedene Flüssigschmierstoffe für einen Walzprozess untersucht. In [66] konnte des Weiteren nachgewiesen werden, dass die Werkzeuggeometrie Einfluss auf die tribologischen Eigenschaften der Schmierstoffe, vor allem im Hinblick auf die Einlaufverhältnisse, nimmt. Neben den Flüssigschmierstoffen werden in der Kaltmassivumformung Festschmierstoffe eingesetzt. Die bedeutendsten Gruppen sind nach [67] wasserlösliche, reaktive Alkaliseifen; MoS₂ basierte, wässrige Dispersionen und Polymerbeschichtungen. Unter Alkaliseifen sind wasserlösliche Umsetzungsprodukte von Fettsäuren mit Metallhydroxiden oder Aminen zu verstehen. Neben rein wasserlöslichen Seifen werden auch Mischungen mit Festschmierstoff eingesetzt. Bei MoS₂ basierten Dispersionen wird pulverförmiges MoS₂ in die Oberfläche eingetrommelt oder die Werkstücke in MoS₂ getaucht. Polymere Trockenfilme sind dünne organische Beschichtungen, welche synthetisch hergestellt sind und extrem langkettige Verbindungen aufweisen. Da die Verfahren der Massivumformung durch vergleichsweise hohe Kontaktnormalspannungen und Oberflächenvergrößerungen gekennzeichnet sind, reicht in den meisten Fällen die Druckbeständigkeit und Trennfähigkeit der genannten Schmierstoffe nicht aus, um die Werkstück- und Werkzeugoberfläche zu trennen [68]. Aufgrund dessen werden die Werkstücke einer Oberflächenbehandlung zur Applikation einer Trenn- und Trägerschicht bzw. einer Konversionsschicht unterzogen. Konversionsschichten sind kristalline, physikalisch und/oder chemisch mit dem Grundwerkstoff verwachsene Salzsichten von Metallphosphaten oder -oxalaten, die einer Verankerung des Schmierstoffs auf der Werkstückoberfläche gewährleisten [68]. Am verbreitetsten in der Kaltmassivumformung ist die Zinkphosphatschicht, welche durch Singer [69] patentiert wurde. Diese bildet aufgrund ihrer Porosität einen geeigneten Haftgrund für die Schmierstoffe. Durch die Zinkphosphatschicht wird eine gezielte Oberflächentopographie eingestellt. Die resultierenden Rauheitstäler dienen während der Umformung als Schmiertaschen. In [70] wird ein Überblick über die in der Kaltmassivumformung angewandte Schmierstoffsysteme und die Applikation von Konversionsschichten für Stahl und Aluminiumlegierungen gegeben. Aufgrund von gesetzlichen Restriktionen, wie beispielsweise der europäischen Chemikalienverordnung REACH, ist die umformende Industrie dazu angehalten, neuartige Schmierstoffsysteme einzusetzen [9]. Ein wesentlicher Trend ist der Verzicht auf die Zinkphosphatierung, welche schwermetallhaltige Stoffe enthält. Es existieren zwei Ansätze zur Substituierung von Konversionsschichten. Einerseits werden alternative Systeme entwickelt. Andererseits werden die Halbzeug- und Werkzeugoberflächen konditioniert, sodass diese als Schmiermittelträgermedium agieren. In [9] werden neue Beschichtungssysteme, wie das

elektrolytisches Phosphatieren oder mikroporöse Beschichtungen vorgestellt. Durch Groche [71] wurde in Tribometerversuchen nachgewiesen, dass Einschichtschmierstoffe auf Basis von MoS₂, Salzwachs und Polymeren eine vergleichbare Leistungsfähigkeit wie Systeme mit Konversionsschicht aufweisen. In [72] zeigen Untersuchungen, dass eine umweltfreundlichere Zinkkalziumphosphatierung als Konversionsschicht wie eine Zinkphosphatierung agiert und zu niedrigen Reibbedingungen führt. Für eine Trockenbeschichtung wurde in [73] ein verbessertes tribologisches Verhalten im Vergleich zur Zinkphosphatierung detektiert. Trockenbeschichtungen sind aus einer Schicht mit einem wasserlöslichen Alkalisalz und einer Schmierstoffschicht zusammengesetzt. Auf Ansätze zur Halbzeugkonditionierung wird beispielsweise in [74] eingegangen. Durch Köhler wird in [75] das Potential von gestrahlten Halbzeugoberflächen und mittels elektrochemischen Oberflächenabtragen adaptierte Oberflächen aufgezeigt. In [73] wurde gezeigt, dass gestrahlte Halbzeugoberflächen weniger zu Kaltverschweißungen neigen als zinkphosphatierte Oberflächen. Untersuchungen von Rupp [76] zeigten des Weiteren, dass Hartstoffschichten am Werkzeug die Trennfunktion der Konversionsschicht übernehmen können. Da diese Ansätze einer werkzeug- bzw. werkstückseitigen Oberflächenmodifikation entsprechen, wird in den Abschnitten 2.3.2 und 2.3.3 näher auf diese Ansätze eingegangen.

Bewertung vorhandener Schmierstoffsysteme für die Blechmassivumformung

Bei den Verfahren der Blechmassivumformung treten lokal und zeitlich variierende tribologische Beanspruchungen auf. Die Beanspruchungen nehmen Werte aus dem Bereich der Blech- und der Massivumformung an. Da keine speziell für die Blechmassivumformung entwickelten Schmierstoffsysteme existieren, gilt es zu überprüfen, ob konventionelle Systeme unter diesen Bedingungen anwendbar sind. Eine weitere Anforderung an Schmierstoffe für die Blechmassivumformung ist die lokale Adaption der tribologischen Bedingungen [54]. Schmierstoffe in der Blech- und Massivumformung werden konventionell global aufgetragen. Für die Massivumformung sind keine Ansätze über eine lokale Applikation der Schmierstoffe bekannt. In der Blechumformung existieren vereinzelt Untersuchungen. Durch Müllerschön [29] wurde analysiert, ob der Stofffluss beim Tiefziehen nicht-axialsymmetrischer Blechformteile durch die lokale Variation des verwendeten Schmierstoffs und/oder der Schmierstoffmenge pro Fläche beeinflussbar ist. Durch den Einsatz mehrerer Schmierstoffe pro Platine konnte keine Verbesserung des Stoffflusses nachgewiesen werden. Die Verwendung unterschiedlicher Schmierstoffmengen auf der Platine wurde

als zielführend zur Stoffflussbeeinflussung bewertet. Somit existieren prinzipiell Ansätze für eine lokale Applikation von Schmierstoffen, jedoch gilt es zu prüfen, ob der Ansatz als zielführend für die Blechmassivumformung zu bewerten ist.

2.3.2 Werkstückseitige Ansätze

Neben den Schmierstoffen hat die Oberflächengestalt des Werkstücks einen signifikanten Einfluss auf die Reibung. Da bei den Verfahren der Blech- und Massivumformung die Form des eingesetzten Halbzeugs und die tribologischen Beanspruchungskollektive variieren, weicht der Stand der Forschung in diesem Bereich voneinander ab. Im Folgenden wird dieser für beide Verfahrensklassen aufbereitet.

Werkstückseitige Oberflächenmodifikation in der Blechumformung

In der Blechumformung werden zur Realisierung der Umformung niedrige Reibbedingungen benötigt. Die Erzeugung einer niedrigen Reibung unter der Annahme, dass eine glatte Werkzeugoberfläche vorliegt, ist nur möglich, wenn die Werkstückoberfläche ein bestimmtes Maß an Schmierstoffaufnahmevermögen besitzt. Dies wird über werkstückseitige Oberflächenmodifikationen, welche global auf die Halbzeugoberfläche appliziert werden, realisiert. Das Strukturieren der Platinenoberfläche erfolgt im Walzwerk durch Nachwalzen oder Dressieren. Hierbei wird eine auf die Walzenoberfläche aufgebrachte Textur auf das Blech übertragen. Diese Oberflächen werden nach [77] als gestaltete Oberflächen, sogenannte *engineered surfaces* bezeichnet, da die angepassten Oberflächeneigenschaften eine spezielle Funktion erfüllen. Prinzipiell wird bei diesen funktionalen Blechoberflächen zwischen Oberflächen mit tribologisch isotropen und anisotropen Verhalten unterschieden [26]. Unter Strukturen mit tribologisch anisotropen Verhalten werden geschliffene Oberflächen, sogenannte *Mill Finish* Strukturen, verstanden [78]. Diese werden in den meisten Fällen bei Aluminiumwerkstoffen eingesetzt. In [79] ist der Einfluss dieser Oberflächenstruktur auf das Umformergebnis von Aluminiumlegierungen näher untersucht. Bei Strukturen mit tribologischen isotropen Verhalten wird nach stochastischen, deterministischen und pseudo-stochastischen Strukturformen unterschieden. Stochastische Strukturen sind gekennzeichnet durch eine statistische Verteilung geometrisch unterschiedlicher Gestaltmerkmale. Darunter werden beispielsweise das *Shot Blast Texturing*, kurz *SBT*, das *Electrical Discharge Texturing*, kurz *EDT*, und *PreTex* Strukturen verstanden. Beim *SBT* wird die Walzentextur durch einen Strahlprozess mit kantigen Strahlmitteln erzeugt [80]. Durch einen

Erodierprozess wird die Walzentextur zur Erzeugung von EDT Strukturen hergestellt [81]. Für Pretex Strukturen wird die Walze im Topochrom-Verfahren elektrolytisch verchromt [82]. Neben diesen stochastischen Strukturen existieren deterministische Strukturen. Diese sind gekennzeichnet durch eine definierte Anordnung geometrisch identischer, voneinander isolierter Gestaltmerkmale und werden mittels Laser Texturing, kurz LT, erzeugt. Hierbei wird die Walzenstruktur durch Laserstrahlung hergestellt [83]. Pseudostochastische Strukturen sind definiert angeordnete Gestaltmerkmale, die nicht voneinander isoliert sind. Electron Beam Texturing, kurz EBT, ist eine Art von pseudostochastischen Strukturen. Hierbei wird die Walzenoberfläche durch einen Elektronenstrahl aufgeschmolzen [84]. Die Analyse der tribologischen Eigenschaften, vor allem von EDT Strukturen, ist Bestandteil zahlreicher Untersuchungen. In [78] konnte gezeigt werden, dass durch EDT Strukturen höhere Spitzenzahlen und geringerer Rauheiten einhergehend mit einer erhöhten Reproduzierbarkeit im Vergleich zu SBT erzielbar sind. Der Herstellungsprozess und die Oberflächeneigenschaften von EDT Strukturen sowie die Vorteile gegenüber SBT wurden in [85] untersucht. Zhou [86] untersuchte numerisch und experimentell den Einfluss der EDT Struktur auf die Reibung in Abhängigkeit des Kontaktdrucks und Gleitwegs für Aluminiumlegierungen. Dabei traten bei Kontaktdrücken größer 62 MPa reibungsreduzierende Effekte und bei Werten kleiner 62 MPa reibungserhöhende Effekte auf. In [87] wurde der tribologische Einfluss von EDT Strukturen im Vergleich zu Mill Finish Strukturen untersucht. Neben den konventionellen im Walzwerk aufgebrauchten Strukturen gibt es Weiterentwicklungen, welche zu verbesserten tribologischen Eigenschaften führen sollen. In [88] wurden deterministisch-stochastische Oberflächen analysiert. Die deterministischen Anteile dienen dem Aufbau eines hydrostatischen Drucks zur Reibungsreduzierung. Durch überlagerte stochastische Kanäle wird der Schmierstoff auf der Oberfläche verteilt, was die Bildung von Kaltverschweißungen verhindert. In Streifenziehversuchen konnte eine Reduzierung der Reibung im Vergleich zu rein stochastischen bzw. rein deterministischen Strukturen identifiziert werden.

Neben der Herstellung und Klassifizierung von Strukturen ist die Identifikation der Wirkweise von Oberflächenstrukturen ein weiteres Forschungsfeld. Ein Hilfsmittel zur Ableitung von Wirkzusammenhängen zwischen Oberflächenstruktur und Reibeigenschaften ist die Oberflächencharakterisierung. Pfestorf [89] analysierte die Reibeigenschaften verschiedener konventioneller Strukturen im Stauch-Dreh-Versuch in Abhängigkeit der Prozessparameter, wie beispielsweise der Flächenpressung. Hierbei lag der

Fokus auf der Identifizierung und Entwicklung funktionaler 3D- Oberflächengrößen zur Beschreibung der tribologischen Eigenschaften unterschiedlicher Strukturen. Durch Geiger wurden beispielsweise Möglichkeiten zur 3D- Oberflächencharakterisierung von Feinblechen in [90] vorgestellt. Durch Schmöckel wurde die Entwicklung der Topographie während der Umformung numerisch untersucht [91]. Ein weiterer Ansatz zur Identifikation von Wirkmechanismen sind numerische Untersuchungen. Durch die Simulation der Oberflächeneinglättung und eine Oberflächencharakterisierung vor und nach der Umformung werden angepasste Geometrien entwickelt. Es konnte beispielsweise gezeigt werden, dass geschlossene Schmiertaschen bei Oberflächen mit Rpk -Werten von unter $1\ \mu\text{m}$ gebildet werden [92]. In [93] war die Zielsetzung, auf Basis des tribologischen Verhaltens verschiedener Oberflächenstrukturen ein Verfahren zur dreidimensionalen Beschreibung der Blechoberfläche zu entwickeln. Es existieren verschiedene Erklärungsansätze zur Wirkweise von werkstückseitigen Strukturen bzw. Schmiertaschen. Hierbei sind die Mechanismen „Mikroplastische hydrostatische Schmierung MPHSL“ und „Mikroplastische hydrodynamische Schmierung MPHDL“ zu nennen. Bech et al. [94] untersuchte diese Mechanismen im Streifenziehversuch unter Verwendung von Glaswerkzeugen und entwickelte ein mathematisches Modell zur Quantifizierung der beiden Mechanismen. Durch Shimizu et al. wurden der Mechanismus der Mikroplastischen hydrodynamischen Schmierung in Streifenziehversuchen näher erforscht [95]. In [96] wurden beide Mechanismen in Abhängigkeit unterschiedlicher Strukturgeometrien experimentell in Streifenziehversuchen analysiert. Des Weiteren zeigten Shimizu et al., dass die Strukturgeometrie und die Prozessbedingungen die beiden Mechanismen „Mikroplastische hydrostatische Schmierung“ und „Mikroplastische hydrodynamische Schmierung“ beeinflussen [97]. Dieses Wissen über die Ausbildung von hydrostatischen und hydrodynamischen Drücken bei Mischreibungszuständen ist notwendig, um die Oberflächen gezielt im Hinblick auf eine Reibungsreduzierung zu verbessern.

Werkstückseitige Oberflächenmodifikation in der Massivumformung

In der Blechumformung ist die Anwendung von modifizierten Werkstückoberflächen zur Beeinflussung der Reibung seit Jahrzehnten Stand der Technik. Bei den Verfahren der Massivumformung finden teilweise strukturierte Halbzeuge Anwendung. Jedoch gibt es zahlreiche Herausforderungen. Dies ist bedingt durch vergleichsweise höhere tribologische Beanspruchungen und die Anwendung von mehrstufigen Prozessen. Vordefiniert aufgebrauchte Strukturen werden durch die Prozessbedingungen in der

initiiierenden Prozessphase eingelätet und verlieren ihre tribologische Wirksamkeit. Es existieren Ansätze, um durch eine Oberflächenmodifikation am Halbzeug die Schmierstoffträgerschichten, wie beispielsweise die Zinkphosphatschicht, zu ersetzen. Dieser Ansatz zielt auf eine Reibungsreduzierung im Prozess ab. Analog zur Blechumformung wird bei diesen Strukturen zwischen stochastischen und deterministischen Strukturformen unterschieden. Als stochastische Strukturen kommen Beizstrukturen und gestrahlte Rohlinge zum Einsatz [98]. Gerade bei Umformprozessen mit hohen Umformgraden ist die aufgerauhte Oberfläche zur Speicherung von Schmierstoff geeignet. In [99] wurden salzbeschichtete, gebeizte und gestrahlte Oberflächen im Vergleich zu zinkphosphatierten Oberflächen untersucht. In Laborversuchen und Produktionsversuchen konnte nachgewiesen werden, dass gestrahlte Oberflächen zum Speichern von Schmierstoff geeignet sind. Aufbauend auf diesen Untersuchungen wurden gestrahlte Oberflächen in mehrstufigen Umformprozessen eingesetzt. Für zweistufige Prozesse konnte eine Reibungsreduzierung nachgewiesen werden [75]. Neben stochastischen Strukturen sind deterministischen Strukturen Gegenstand der Forschung. In [75] wurde die reibungsreduzierende Wirkung von deterministischen Strukturen, welche mittels elektrochemischen Abtragens erzeugt wurden, für einen mehrstufigen Prozess nachgewiesen. In [100] wurde ein Werkzeugsystem zum Rundkneten entwickelt, welches deterministische Strukturen im durchlaufenden Prozess auf Stangenmaterial aufprägt. Durch Shimizu [97] wurde in Stauch- und Abstreckversuchen der Einfluss von mittels Prägen erzeugten deterministischen Strukturen untersucht. Hierbei konnte nachgewiesen werden, dass steile Flankenwinkel ein höheres Potenzial zum Aufbau eines hydrostatischen Drucks und damit zur Reibungsreduzierung besitzen. Balendra [101] untersuchte in Ringstauchversuchen den Einfluss des Flächendeckungsgrads und der Strukturtiefe. Für einen Flächendeckungsgrad von 40 % und einer Strukturtiefe von 25 μm konnte eine signifikante Reduzierung der Reibung detektiert werden. Die tribologische Wirkweise deterministischer Strukturen beim Stauchen wurde in [102] näher untersucht. Neben den stochastischen und deterministischen Strukturen wurde durch Steinhoff [103] eine Kombination aus beiden Strukturarten untersucht. Diese bereits für die Verfahren der Blechumformung beschriebene Oberflächenstruktur besitzt ebenfalls Anwendungsrelevanz im Hinblick auf eine Reibungsreduzierung in der Massivumformung.

Bewertung werkstückseitiger Oberflächenmodifikationen für die Blechmassivumformung

Konventionelle Oberflächenmodifikationen werden sowohl in der Blech- als auch Massivumformung global auf die Halbzeugoberfläche appliziert und dienen einer Reibungsreduzierung. Bei den Verfahren der Blechmassivumformung ist eine lokale Adaption der tribologischen Bedingungen notwendig [54]. Gleichzeitig sind neben reibungsreduzierenden Methoden reibungserhöhende Oberflächenmodifikationen zur Stoffflusssteuerung notwendig [54]. Somit besteht einerseits Forschungsbedarf bezüglich der Anwendbarkeit konventioneller Oberflächenmodifikationen. Andererseits gilt es, die vorhandenen Ansätze für die Blechmassivumformung zu bewerten, die Erkenntnisse zu nutzen und diese weiterzuentwickeln.

2.3.3 Werkzeugseitige Ansätze

Konventionell erfolgt die Fertigung von Werkzeugen der Blech- und Massivumformung durch eine geeignete Verfahrensabfolge von Hart- und Endbearbeitungsverfahren [104]. Die resultierende geometrische Oberflächenbeschaffenheit wird maßgeblich durch die angewendeten Bearbeitungsverfahren und -parameter sowie der Abfolge der Verfahren festgelegt [105]. Sowohl in der Blech- als auch Massivumformung werden als Hartbearbeitungsverfahren zur Geometrieerzeugung Schleifen, Erodieren oder Fräsen eingesetzt. Als Feinbearbeitungsverfahren werden in der Regel Polieren oder Läppen angewendet. Diese Endbearbeitungsverfahren werden genutzt, um möglichst geringe Profiltiefen zur Reibungs- und Verschleißreduzierung zu erzielen. Sowohl in der Blech- als auch Massivumformung existieren zahlreiche Ansätze zur weiterführenden Modifikation der Oberflächen mit dem Ziel einer zusätzlichen Reibungs- und Verschleißreduzierung. Da die chemische Zusammensetzung der Oberfläche und die topographischen Oberflächeneigenschaften einen signifikanten Einfluss auf das Einsatzverhalten der Oberfläche haben [106], stehen tribologische Dünnschichten und Oberflächenstrukturen im Hinblick auf eine Beeinflussung der tribologischen Eigenschaften im Fokus der Forschung. Beschichtungen werden sowohl in der Blech- als auch Massivumformung eingesetzt, weswegen auf diese übergeordnet eingegangen wird. Auf die Modifikationen in Form von Oberflächenstrukturen wird nachfolgend eingegangen, da diese in Abhängigkeit der Verfahrensklasse variieren.

Beschichtungen von Werkzeugoberflächen werden sowohl in der Blech- als auch Massivumformung durch chemische Abscheidung aus der Gasphase, kurz CVD-Verfahren, oder physikalische Abscheidung aus der Gasphase,

kurz PVD-Verfahren, appliziert [107]. In der Umformtechnik werden überwiegend keramische Hartstoffschichten und Kohlenstoffschichten eingesetzt. Keramische Hartstoffschichten sind gekennzeichnet durch eine hohe Härte, was zu einer guten Verschleißbeständigkeit führt [108]. Als keramische Hartstoffschichten werden Titannitrid TiN [109], Titancarbid TiC [38], Titancarbonitrid TiCN [110], Titanaluminiumnitrid TiAlN [111], Aluminiumtitancarbonitrid AlTiCN und Chromnitrid CrN [38] eingesetzt. In den meisten Fällen dienen Beschichtungen als Abrasivverschleißschutz. Es existieren allerdings auch Untersuchungen, die den Einfluss von Beschichtungen auf die Reibung analysieren. Für ein mehrlagiges Schichtsystem mit einer Deckschicht aus Chromnitrid CrN und einer nanostrukturierten Oberfläche wurde in [112] eine Reibungsreduzierung im Labor- und Realversuch nachgewiesen. In Napf-Rückwärts-Fließpress-Versuchen wurde für diese Kombination die Umformkraft um 10 % reduziert. Durch Andreas [113] wurde in Laborversuchen zur Abbildung der tribologischen Bedingungen beim Fließpressen eine Zunahme der Reibung durch die Verwendung einer TiN Beschichtung identifiziert. Neben Hartstoffschichten werden amorphe Kohlenstoffschichten, wie beispielsweise a-C:H oder ta-C Schichten, eingesetzt. Derartige Beschichtungen weisen eine zu Hartstoffschichten vergleichbare Härte [114] und Verschleißfestigkeit auf, sodass diese ebenfalls als Verschleißschutzschichten nutzbar sind. Auch bei amorphen Kohlenstoffschichten gibt es erste Untersuchungen bezüglich der Nutzung zur Reibungsbeeinflussung. In [115] wurde in Pin-on-Disc-Test nachgewiesen, dass durch eine Veränderung der Abscheideparameter von metallmodifizierten a-C:H Schichten eine Reibungsreduzierung möglich ist.

Insgesamt ist festzuhalten, dass Beschichtungen in der Umformtechnik vorrangig als Verschleißschutzschichten Anwendung finden. In ersten Ansätzen wurde bereits nachgewiesen, dass diese zur Reibungsbeeinflussung nutzbar sind. Allerdings fokussieren zahlreiche Untersuchungen auf die Kombination der Beschichtung mit einer Oberflächenstrukturierung, sodass der Reibungseinfluss von Beschichtungen noch nicht tiefergehend untersucht wurde. Aufgrund des vorhandenen Potentials einer Reibungsreduzierung über die Verwendung von Beschichtungen gibt es an dieser Stelle Forschungsbedarf.

Werkzeugseitige Oberflächenmodifikation in der Blechumformung

Neben der Beeinflussung des tribologischen Einsatzverhaltens über eine Beschichtung existieren Ansätze zur Reibungsbeeinflussung durch eine Adaption der topographischen Eigenschaften. In der Blechumformung werden im Allgemeinen reduzierte Reibbedingungen angestrebt, um die

Lebensdauer der Werkzeuge zu erhöhen. Zur Realisierung einer niedrigen Reibung gibt es zwei Ansätze. Einerseits können Strukturen auf die endbearbeitete Werkzeugoberfläche aufgebracht werden. Andererseits kann das Endbearbeitungsverfahren angepasst werden. Neudecker [116] untersuchte den Reibungseinfluss einer Excimerlaserbearbeitung von keramischen Werkzeugoberflächen. Es wurden deterministische Oberflächenstrukturen mit unterschiedlichen Tiefen, Flächendeckungsgraden und Strukturformen untersucht. Eine Reibungsreduzierung wurde für vergleichsweise tiefere und große Strukturen im Streifenziehversuch identifiziert und im Näpfchenversuch bestätigt. In [117] wurden weitere deterministische Strukturen, welche auf endbearbeitete Oberflächen appliziert wurden, untersucht. Analysiert wurde der Einfluss unterschiedlicher Geometrien, Tiefen und Flächendeckungsgrade der Strukturen. Durch die Strukturierung von geschliffenen Oberflächen wurde eine Reduzierung der Reibung vor allem bei niedrigen Flächenpressungen erzielt. Neben der Applikation von Strukturen auf die endbearbeitete Werkzeugoberfläche kann das Endbearbeitungsverfahren zur Beeinflussung der Oberflächentopographie angepasst werden. Dies ist vorteilhaft, da es zu keiner Prozesskettenverlängerung bei der Werkzeugherstellung führt. Twardy [118] untersuchte den Einfluss einer Mikrofräsbearbeitung auf die tribologischen Eigenschaften von Mikrotiefziehwerkzeugen. In Streifenziehversuchen konnte eine Reibungsreduzierung von bis zu 33 % im Vergleich zu polierten Oberflächen nachgewiesen werden. In [119] wurde in Pin-on-Disc Test gezeigt, dass mikrogefräste Strukturen im Vergleich zu unmodifizierten Oberflächen zu einer Reduzierung der Reibung geeignet sind. Brinksmeier et al. stellten des Weiteren Zusammenhänge zwischen der Fräsbearbeitung, den Oberflächeneigenschaften und dem tribologischen Eigenschaften her [120]. Neben der Mikrofräsbearbeitung ist das maschinelle Oberflächenhämmern ein Endbearbeitungsverfahren. Dieses Verfahren führt zu einer Kaltverfestigung und zunehmenden oberflächennahen Druckeigenstressungen im Vergleich zu polierten Referenzoberflächen, welche sich positiv auf die Werkzeuglebensdauer auswirken. In [121] wird der Einfluss dieses Verfahrens in Abhängigkeit der Prozessparameter beim Tiefziehen untersucht. In Streifenziehversuchen konnte gezeigt werden, dass durch diese Oberflächenmodifikation eine Reibungsreduzierung von bis zu 58 % erreichbar ist. In numerischen Untersuchungen konnte des Weiteren nachgewiesen werden, dass die Oberflächenstrukturierung eine Schmieraschenwirkung hat. Dies führt zu einem erhöhten hydrostatischen Druck in den Schmieraschen, was in einer reduzierten Reibung im Vergleich zu konventionellen Oberflächen resultiert. Die positiven Reibeigenschaften wurden durch industrielle Feldversuche bestätigt. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass durch

eine Modifikation der Topographie der Werkzeugoberfläche eine Beeinflussung der Reibung möglich ist. In der Blechumformung ist eine Reibungsreduzierung gewünscht, sodass zum aktuellen Zeitpunkt keine Oberflächenstrukturierungsmethoden zur Reibungserhöhung gezielt entwickelt und analysiert werden.

Werkzeugseitige Oberflächenmodifikation in der Massivumformung

Analog zu den Verfahren der Blechumformung gibt es in der Massivumformung Ansätze zur Modifikation der Topographie von Werkzeugoberflächen, um die Reibung zu reduzieren. In der Massivumformung werden hauptsächlich Verfahren zur Applikation von deterministischen Oberflächenstrukturen untersucht. Die Strukturen dienen als Schmiertaschen, welche die Aufnahmefähigkeit der Oberfläche für den Schmierstoff erhöhen. Popp [122] untersuchte den Einfluss deterministischer Oberflächenstrukturen, welche mittels Excimerlaserstrahlung erzeugt wurden. Analysiert wurde der Einfluss von Strukturgröße, Strukturform, Strukturordnung und Flächendeckungsgraden. In asymmetrischen Flachstauchversuchen konnte gezeigt werden, dass mit zunehmenden Flächendeckungsgraden und abnehmenden Tiefen der Strukturen eine Reibungsreduzierung erzielbar ist. In [123] wurde zusätzlich eine Verbesserung der Lebensdauer von mittels Excimerlaserbearbeitung strukturierten Oberflächen identifiziert. Wagner [124] untersuchte den Einfluss laserstrukturierter Oberflächen auf die Reibung. In Double-Cup-Extrusion Tests wurde eine Abnahme der Reibung von strukturierten Matrizen vor allem bei niedrigen Umformgeschwindigkeiten identifiziert. Zusätzlich konnte in [125] eine Verbesserung der Lebensdauer der Werkzeuge durch eine Laserstrukturierung nachgewiesen werden. Neben der Applikation von deterministischen Strukturen mittels Laser wurde in [126] der Einfluss einer geänderten Endbearbeitungsstrategie zur Erzeugung von Oberflächenstrukturen analysiert. Verglichen wurden Glatt-/Festwalzprozesse, Festklopfen und ein Serienfinish. Unter Massivumformbedingungen konnte durch eine Modifikation des Endbearbeitungsverfahrens in Gleitschlauchversuchen keine Verbesserung der Reibung erreicht werden. Insgesamt ist festzuhalten, dass aktuell wenige Ansätze zur gezielten Oberflächenmodifikation in der Massivumformung existieren. Erste Untersuchungen zeigten bereits das Potenzial zur Reibungsbeeinflussung, jedoch werden lediglich reibungsreduzierende Maßnahmen untersucht.

Bewertung werkzeugseitiger Oberflächenmodifikationen für die Blechmassivumformung

Analog zu den werkstückseitigen Oberflächenmodifikationen werden konventionelle Oberflächenmodifikationen in der Blech- und Massivumformung global auf die Werkzeugoberfläche mit dem Ziel einer Reibungsreduzierung aufgebracht. Auf Basis der Anforderungen in der Blechmassivumformung gibt es Forschungsbedarf zur Entwicklung von Methoden, welche lokal applizierbar sind und welche neben einer Reibungsreduzierung auch für eine Reibungserhöhung nutzbar sind. Hierbei gilt es, das vorhandene Wissen aus der Blech- und Massivumformung zu nutzen und weiterzuentwickeln.

2.4 Zusammenfassende Bewertung

Die Blechmassivumformung ist definiert als die Anwendung von Massivumformoperationen auf Blechhalbzeuge mit dem Ziel Funktionselemente senkrecht zur Blechebene herzustellen. Diese Verfahrensklasse hat die Erweiterung bestehender Verfahrensgrenzen von konventionellen Blech- und Massivumformverfahren, vor allem im Hinblick auf die Fertigung von Bauteilen mit hoher Funktionsintegration, zum Ziel. Ein weiterer wesentlicher Aspekt, den es umzusetzen gilt, ist die Verkürzung der Prozessketten einhergehend mit einer zunehmenden Material- und Energieeffizienz. Diese Prozessanforderungen und das kombinierte Auftreten von Belastungskollektiven der Blech- und Massivumformung führen zu zahlreichen Herausforderungen. Eine wesentliche besteht in der nicht vollständigen Formfüllung der Funktionselemente bedingt durch einen unkontrollierten Stofffluss, welchen es zu steuern gilt. Daraus abgeleitet gibt es in der Blechmassivumformung Forschungsbedarf bezüglich der Anwendbarkeit konventioneller Methoden zur Steuerung des Stoffflusses, welche in Abschnitt 2.2 beschrieben wurden. Sämtliche beschriebenen Methoden sind theoretisch zur Erweiterung der Prozessgrenzen geeignet. Aufgrund prozesseitiger Restriktionen sind Methoden, wie die Anwendung von Gratbahnen und modifizierter Niederhalterssystemen nicht in der Blechmassivumformung anwendbar. Auch eine veränderte Temperaturführung kann unter der Voraussetzung, dass in der Blechmassivumformung die Umformung ohne von außen wirkende Wärmezufuhr durchgeführt wird, nicht angewendet werden. Die übrigen Methoden sind in Bild 1 hinsichtlich des Potenzials zur Prozesskettenverkürzung und ihrer Material- und Energieeffizienz bewertet.

Maßgeschneiderte tribologische Systeme bieten für beide aufgelisteten Bewertungsfaktoren ein Potenzial zur positiven Prozessbeeinflussung. Des Weiteren ist dieser Ansatz sowohl in der Blech- als auch Massivumformung etabliert, sodass das Wissen aus den Verfahrensklassen nutzbar gemacht wird und auf die Verfahren der Blechmassivumformung übertragen werden kann. Aus den konventionellen Verfahren sind bereits zahlreiche Beispiele zur Wirksamkeit modifizierter tribologischer Systeme bekannt. Prinzipiell besteht die Möglichkeit die Reibung über eine Modifikation des Schmierstoffs, der Werkstück- und/oder der Werkzeugoberfläche anzupassen. Alle drei Ansätze werden sowohl in der Blech- als auch Massivumformung eingesetzt. Jedoch weichen die Anforderungen der Blechmassivumformung von denen der konventionellen Verfahren ab. Zur Realisierung einer Stoffflusssteuerung sind lokal angepasste tribologische Bedingungen, reibungserhöhende und reibungsreduzierende Maßnahmen notwendig [54].

	Prozesskettenlänge	Material- und Energieeffizienz
Platinenzuschnitt (werkstückseitig)	↑	↑
Tailored Blanks (werkstückseitig)	↑	↓
Ziehsicken (werkzeugseitig)	○	↓
Maßgeschneiderte tribologische Systeme (werkstück- und werkzeugseitig)	○ / ↓	↑

↑ Erhöhung ↓ Reduzierung ○ Keine Beeinflussung

Bild 1: Bewertung konventioneller Maßnahmen zur Stoffflusssteuerung

Sowohl in der Blech- als auch in der Massivumformung werden Modifikationen des tribologischen Systems in den meisten Fällen zur Reibungsreduzierung genutzt und global appliziert. Somit besteht an dieser Stelle Forschungsbedarf. Neben der Auswahl und Analyse der Wirksamkeit vorhandener reibungsreduzierender Maßnahmen sind Methoden zur Reibungserhöhung zu identifizieren und zu untersuchen. Um ein möglichst breites Portfolio an Möglichkeiten bereitzustellen, werden im Rahmen der

vorliegenden Arbeit je eine reibungserhöhende und reibungsreduzierende Maßnahme über die Adaption der Werkstück- und der Werkzeuoberfläche untersucht. Schmierstoffseitige Ansätze werden nicht weiter analysiert, da eine lokale Applikation verschiedener Schmierstoffe nicht umsetzbar ist [29]. Als Werkstücke werden in der Blechmassivumformung Blechhalbzeuge, deren Oberflächen im Walzwerk strukturiert werden, eingesetzt. Diese Anpassung dient einer Reibungsreduzierung. Um die Blechoberfläche für die Blechmassivumformung lokal anzupassen, besteht Forschungsbedarf bezüglich einer lokalen Modifikation der vorhandenen Struktur zur weiteren Reibungsreduzierung und zur Reibungserhöhung. Für die Blech- und Massivumformung konnte durch eine überlagerte Anwendung stochastischer und deterministischer Strukturen ein hohes Potenzial zur Reibungsreduzierung nachgewiesen werden [103]. Dieser Ansatz kann für die Blechmassivumformung aufgegriffen werden, muss jedoch bezüglich der Anwendbarkeit untersucht werden. Zur Reibungserhöhung konnte in [75] gezeigt werden, dass reibungserhöhende Abrasivstrahlprozesse für die Verfahren der Massivumformung geeignet sind. Auch hier gilt es, die Übertragbarkeit auf die Blechmassivumformung zu erforschen. Werkzeugoberflächen werden konventionell mit einer geeigneten Verfahrenskombination aus Hart- und Endbearbeitungsverfahren gefertigt. Häufig werden die Oberflächen zusätzlich mit einer Hartstoffschicht als Verschleißschutzschicht versehen. Zur Reibungsreduzierung gibt es zahlreiche Ansätze, verschiedene Strukturen auf die endbearbeitete Oberfläche zu applizieren. Dies geht einher mit einem zusätzlichen Prozessschritt und damit einer Prozesskettenverlängerung. Zur Verkürzung der Prozesskette besteht Forschungsbedarf bezüglich der Nutzung der Verschleißschutzschicht als reibungsreduzierende Maßnahme. Untersuchungen zu reibungserhöhenden Maßnahmen existieren nach aktuellem Stand weder für die Blech-, noch für die Massivumformung. Somit sind Maßnahmen zu erforschen, die für eine Reibungserhöhung geeignet sind. Um dem Gedanken der Prozesskettenverkürzung gerecht zu werden, besteht das Potenzial konventionelle Hart- und Endbearbeitungsverfahren zu modifizieren, um diese zur Reibungsbeeinflussung zu nutzen. Für eine zielgerichtete Nutzung der lokalen Modifikationen der Oberflächen bedarf es eines grundlegenden Verständnisses der tribologischen Wirkmechanismen. Hierfür sind funktionale Zusammenhänge zwischen den tribologisch relevanten Oberflächeneigenschaften und der resultierenden Reibung unter Blechmassivumformbedingungen abzuleiten. Um basierend auf diesen Ergebnissen die Wirkmechanismen abzuleiten, werden numerische und experimentelle Ansätze zur Verifizierung benötigt.

3 Zielsetzung und Methodik

Die zunehmenden Anforderungen an Funktionsbauteile, wie beispielsweise nach erhöhter Bauteilkomplexität, Funktionsintegration und Material- und Energieeffizienz führen dazu, dass konventionelle Verfahren der Blech- und Massivumformung an ihre Grenzen stoßen. Ein Lösungsansatz zur Erweiterung der Verfahrensgrenzen besteht in der Kombination klassischer Verfahren zur Nutzung der jeweiligen Vorteile im Rahmen der Blechmassivumformung. Jedoch birgt die kombinierte Anwendung wiederum Herausforderungen. Beispielsweise führen die zeitlich und örtlich variierenden Spannungszustände zu einem unkontrollierten Stofffluss, was zu einer reduzierten Formfüllung der Funktionselemente führt. Die damit reduzierte Bauteilgenauigkeit beeinflusst das Einsatzverhalten der umgeformten Komponenten nachteilig und motiviert die Notwendigkeit zur Entwicklung von Methoden zur Stoffflusssteuerung. Auf Basis dieser Anforderung verfolgt die vorliegende Arbeit die übergeordnete Zielsetzung einer globalen Stoffflusssteuerung durch eine lokale Anpassung des tribologischen Systems. Um dies zu realisieren, sind geeignete maßgeschneiderte tribologische Systeme für eine Anwendung in der Blechmassivumformung zu identifizieren. In einem weiteren Schritt sind die Wirkmechanismen dieser zu ermitteln, um den Stofffluss zielgerichtet zu steuern. Auf Basis der vorgestellten Zielsetzung wurde das Vorgehen in Bild 2, welches in einen Analyse- und einen Syntheseteil gegliedert ist, gewählt. Im Analyseteil gilt es, Anforderungen für die Modifikationen des tribologischen Systems abzuleiten. Hierfür werden die tribologischen Beanspruchungskollektive zweier Blechmassivumformprozesse untersucht. Auf Basis dieser werden lokale Modifikationen der Reibung abgeleitet und die Wirksamkeit im Rahmen einer numerischen Stoffflussanalyse verifiziert. Die ermittelten Anforderungen werden genutzt, um Methoden für die experimentellen Untersuchungen auszuwählen. Zur Analyse eines möglichst breiten Feldes werden sowohl werkzeug- als auch werkstückseitige Modifikationen untersucht. Der zweite Aspekt des Analyseteils fokussiert auf die Identifikation der tribologischen Wirkzusammenhänge der ausgewählten Methoden. Dies ist notwendig, um die Ergebnisse unabhängig von dem im Rahmen der Arbeit untersuchten Parameterraum für die Blechmassivumformung nutzbar zu machen. Die Identifikation der tribologischen Wirkmechanismen erfolgt in einem kombinierten Ansatz aus experimentellen und numerischen Untersuchungen. Zunächst werden für sämtliche Methoden auf

Basis der adaptierten Randzoneneigenschaften mögliche tribologisch relevante Eigenschaften identifiziert. Diese werden durch eine Anpassung der Prozessparameter in einem bestimmten Parameterraum modifiziert. Experimentell wird im Zapfenpress- und Ringstauchversuch anschließend die Relevanz der jeweiligen Randzoneneigenschaft im Hinblick auf eine Reibungsbeeinflussung ermittelt.

Analyse

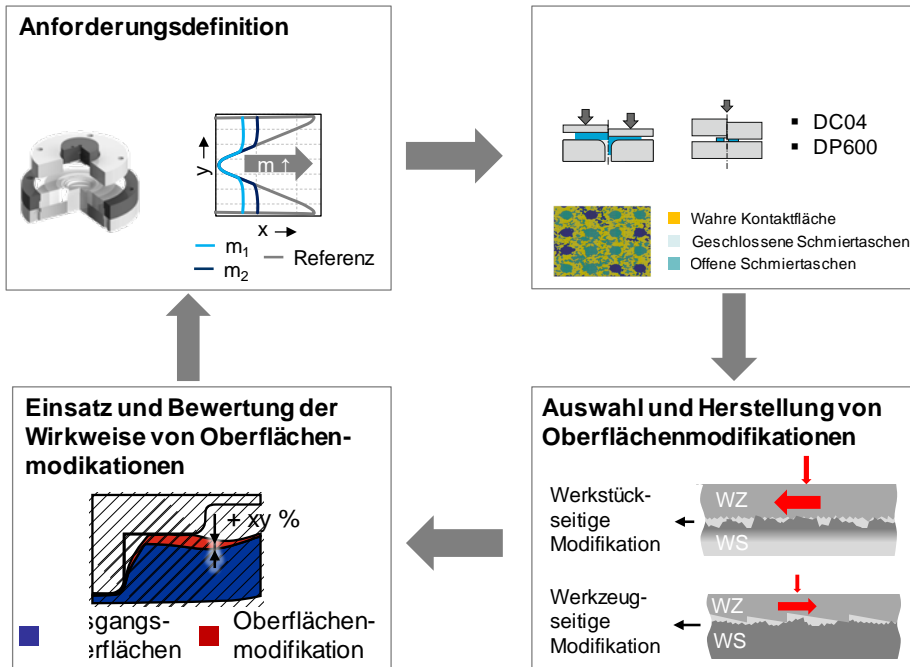


Bild 2: Vorgehen im Rahmen der vorliegenden Arbeit

Zur Absicherung der Übertragbarkeit werden die Versuche mit den beiden Werkstoffen DC04 und DP600 durchgeführt. Auf Basis der Ergebnisse der Laborversuche werden funktionale Zusammenhänge abgeleitet. Diese funktionalen Zusammenhänge gilt es, anschließend in numerischen Untersuchungen zu bestätigen und experimentell zu verifizieren. Die Ergebnisse des Analyseteils werden genutzt, um geeignete Oberflächenmodifikationen auszuwählen. Diese werden in den beiden ausgewählten Blechmassivumformprozessen eingesetzt und im Hinblick auf ihre Wirksamkeit zur Verbesserung der Bauteilgenauigkeit verifiziert. Abschließend werden die untersuchten tribologischen Systeme bezüglich des Erfüllungsgrads der definierten Anforderungen bewertet.

4 Angewandte Werkstoffe, Verfahren zur Oberflächenmodifikation sowie Mess- und Prüfverfahren

Im folgenden Kapitel werden die in der Arbeit verwendeten Werkzeug- und Platinenwerkstoffe sowie die eingesetzten Schmierstoffe beschrieben. Des Weiteren werden die genutzten Verfahren zur Oberflächenmodifikation mit den jeweiligen Prozessparametern vorgestellt. Die zur Charakterisierung der tribologisch relevanten Oberflächeneigenschaften notwendigen Messverfahren und Auswertemethoden werden zusätzlich erläutert. Ein weiterer Bestandteil dieses Kapitels ist die Vorstellung der Laborversuche zur Charakterisierung des tribologischen Einsatzverhaltens der modifizierten Proben. Abschließend werden die zur Verifizierung der Wirksamkeit genutzten Blechmassivumformprozesse erläutert.

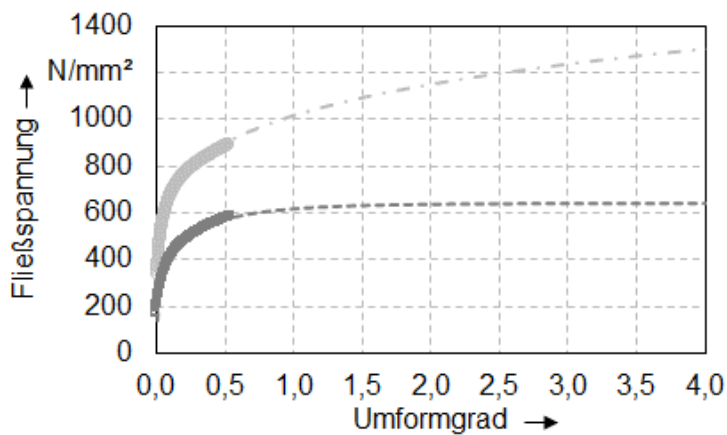
4.1 Angewandte Werkstoffe und Schmierstoffe

Werkstückwerkstoffe

Für die Untersuchungen wurden der kaltgewalzte, niedriglegierte Tiefziehstahl DCo4 mit einem ferritischem Gefüge [127] und der Dualphasenstahl DP600 eingesetzt. Dualphasenstähle sind untereutektoide Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt zwischen 0,02% und 0,1% [128]. Das Gefüge besteht aus einer Ferrit-Matrix, in die Martensitinseln an den Korngrenzen eingelagert sind. Beide Werkstoffe haben eine Nennblechdicke von $s_0 = 2,00$ mm. Durch die beiden Werkstoffe werden unterschiedlichen Anforderungen an die Umformung gestellt und eine Komplexitätssteigerung beispielsweise im Hinblick auf das Gefüge abgebildet. Zur allgemeinen Beschreibung des Fließverhaltens und als Eingangsparameter für die numerischen Untersuchungen wurden die Werkstoffdaten charakterisiert. Hierfür wurden bei Raumtemperatur Druckfließkurven mit Hilfe von Schichtstauchversuchen aufgenommen. Beim Schichtstauchversuch wird auf Basis von DIN 50106 [129] ein Prüfkörper aus übereinandergestapelten Werkstoffronen zwischen zwei ebenen Stauchbahnen gestaucht. Die Versuchsdurchführung erfolgt in Anlehnung an [130]. Zur Dehnungsmessung wurde ein optisches Dehnungsmesssystem vom Typ Aramis der Firma GOM verwendet. Die Versuche wurden auf einer Universalprüfmaschine vom Typ FS-300 der Firma walter+bai durchgeführt. Die experimentelle Auswertung der Versuche für DCo4 erfolgte bis zu einem Umformgrad von $\phi = 0,54$.

4 Angewandte Werkstoffe, Verfahren zur Oberflächenmodifikation sowie Mess- und Prüfverfahren

Der Kurvenverlauf wurde mittels der Fließkurvenapproximation nach Hockett-Sherby [131] bis zum Wert $\phi = 4$ extrapoliert. Für DP600 wurde die Fließkurve bis zu einem Umformgrad von $\phi = 0,56$ aufgenommen. Die Extrapolation erfolgte nach Swift [132] bis zu einem Umformgrad von $\phi = 4$. Die Werkstoffe variieren im Festigkeitsniveau. Die Anfangsfließspannung von DCo4 liegt bei $169 \pm 0,5 \text{ N/mm}^2$. DP600 weist einen Wert von circa 360 N/mm^2 auf. Der um den Faktor zwei höhere Wert verdeutlicht die Steigerung der Anforderungen an den Umformprozess, welche durch den Dualphasenstahl erreicht werden soll. Bild 3 zeigt die Fließkurven für DCo4 und DP600.



Schichtstauchversuch		
(in Anlehnung an DIN 50106)		
V_{Traverse}		5 mm/min
n_{Proben}		3
Höhe/Durchmesser _{Proben}		14 mm/10 mm
Material ($s_0 = 2 \text{ mm}$) Extrapolation		
DCO4	○	----- (Hockett-Sherby)
DP600	○	- - - - (Swift)

Bild 3: Fließkurven DCo4 und DP600

Die Oberflächen beider Werkstoffe sind durch eine EDT Struktur gekennzeichnet, Bild 4. Allerdings gibt es Unterschiede bezüglich der Ausgangsrauheit. Der arithmetische Mittenrauwert R_a für DCo4 liegt bei

$1,32 \pm 0,29 \mu\text{m}$. Bei DP600 nimmt die arithmetische Mittenrauheit einen Wert von $0,77 \pm 0,05 \mu\text{m}$ an.

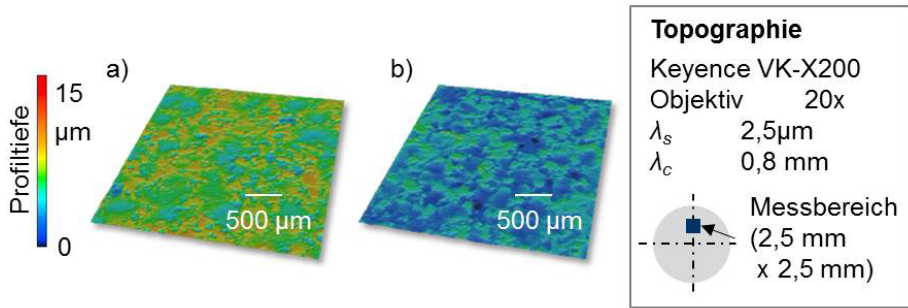


Bild 4: Topographien der Ausgangsoberflächen für a) DC04 und b) DP600

Werkzeugwerkstoff

Als Werkzeugwerkstoff wurde der pulvermetallurgisch hergestellte Schnellarbeitsstahl 1.3344 verwendet. Die chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 1 aufgeführt. Vorteile von pulvermetallurgisch hergestellten Werkzeugstählen sind eine hohe Zähigkeit in Kombination mit einer hohen Härte, was wiederum eine hohe Verschleißfestigkeit zur Folge hat [134].

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung 1.3344 [133]

Werkstoff	C in %	Cr in %	Mo in %	W in %	Co in %	V in %
1.3344 (ASP2023)	1,28	4,10	5,00	6,40	-	3,10

Die für die Untersuchungen genutzten Werkzeuge wurden auf eine Rockwell Härte von $60 \pm 1 \text{ HRC}$ gehärtet. Für sämtliche Untersuchungen, welche nicht auf die Modifikation der Werkzeugoberfläche abzielen, wurden geläppte Werkzeugoberflächen mit einer arithmetischen Mittenrauheit R_a von $0,26 \pm 0,02 \mu\text{m}$ verwendet.

Schmierstoffe

In Abschnitt 2.3.1 wurden konventionelle Schmier-systeme aus der Blech- und Massivumformung vorgestellt. In der Blechmassivumformung treten tribologische Beanspruchungen aus beiden Verfahrensklassen auf. Aktuell existieren jedoch für derartige Beanspruchungen keine eigens entwickelten

Schmierstoffsysteme. Aufgrund dessen ist die Anwendbarkeit konventioneller Systeme zu überprüfen. In der vorliegenden Arbeit werden aus dem Bereich der Blechumformung das Tiefziehöhl KTL N 16 der Firma Zeller+Gmelin und das Hotmelt Iloform PN 951 HM der Firma Castrol untersucht. KTL N 16 ist ein mineralölhaltiges Zieh- und Stanzöl, welches phosphor- und schwefelhaltige Additive enthält [135]. Ausgewählte Schmierstoffeigenschaften sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Ausgewählte Schmierstoffeigenschaften

Schmierstoff	Hersteller	Basis	Dichte bei 20°C in g/cm ³	Viskosität in mm ² /s
KTL N 16	Fuchs	Mineralöl	0,90	160 ¹⁾
Iloform PN 951 HM	Castrol	Native und synthetische Ester	0,87	20 ²⁾
Gardolube L 6176	Chemetal	Seifenbasis	0,50	-
Gardomer L 6261	Chemetal	Polymerbasis	0,99	-
Beruforge 150 DL	Bechem	Wachsbasiert	1,02	-

¹⁾ Viskosität bei 40°C nach DIN 51 562 ²⁾ Viskosität bei 60°C nach DIN 51 562

Das Tiefziehöhl erfüllt die Anforderungen des VDA Pflichtenhefts und wird häufig in der Automobilindustrie eingesetzt. PN 951 HM ist ein Hotmelt auf Basis nativer und synthetischer Ester [136]. Diese Art Schmierstoff wird direkt im Walzwerk appliziert. Neben der Schmierfunktion dient es dem Korrosionsschutz. Aus dem Bereich der Massivumformung wird eine Kombination aus einer Zinkphosphatschicht mit einem Seifenschmierstoff respektive einem Polymerschmierstoff untersucht. Als Zinkphosphatschicht wird das System Gardobond Z3100/10 der Firma Chemetal eingesetzt [137]. Die Konversionsschicht wird mittels Tauchen appliziert und hat ein Flächengewicht von 5 – 10 g/m². Die Seife Gardolube L 6176 der Firma Chemetal wird beim Fließpressen und Abstreckgleitziehen von phosphatiertem Material verwendet [138]. Der Polymerschmierstoff Gardomer L 6261 der

Firma Chemetall ist für Massivumformoperationen mit hohen Umformgraden geeignet [139]. Um den ökologischen Trends gerecht zu werden, wurden zusätzlich Schmierstoffe aus der Massivumformung ohne Verwendung einer Zinkphosphatschicht untersucht. Es wurde einerseits der Polymerschmierstoff Gardomer L 6261 direkt auf das Blech appliziert. Durch den direkten Vergleich dieser Versuche mit den Untersuchungen mit Zinkphosphatschicht kann der Einfluss der Konversionsschicht ermittelt werden. Andererseits wurde der wassermischbare, wachshaltige Schmierstoff Beruforge 150 DL der Firma Bechem untersucht [140]. Dies ist ein Zieh-schmiermittel, welches beim Ziehen von Stangen, Profilen, Rohren und Drähten auf phosphatfreien Oberflächen eingesetzt wird.

4.2 Angewandte Verfahren zur Oberflächenmodifikation

Die Modifikation der tribologischen Bedingungen wird durch eine Anpassung der charakteristischen Eigenschaften von Werkzeug- und Werkstückoberfläche erzielt [118]. Zu den charakteristischen Eigenschaften zählen Makro- und Mikrogeometrie, Härte, Werkstoffeigenschaften, Eigenspannungen und Lastspannungen [141]. Nach [142] werden diese Eigenschaften als Randzoneneigenschaften bezeichnet. Die Anpassung dieser Eigenschaften durch Verfahren zur Oberflächenmodifikation entspricht einer mechanischen Oberflächenfunktionalisierung, dem sogenannten Surface Engineering [143]. Zur Einstellung anforderungsgerechter tribologischer Bedingungen ist das Wissen über den Einfluss der modifizierten Randzoneneigenschaften auf die Reibung von entscheidender Bedeutung, da diese wesentlich zur Erfüllung der Funktion beitragen [144]. Somit sind die aus den verschiedenen Verfahren resultierenden tribologisch relevanten Oberflächeneigenschaften zu identifizieren, deren Einfluss auf die Reibung zu ermitteln und tribologische Wirkmechanismen abzuleiten. Die folgenden Abschnitte führen die für die Arbeit ausgewählten Verfahren zur mechanischen Oberflächenfunktionalisierung und die verwendeten Prozessparameter, welche zur gezielten Beeinflussung der Randzoneneigenschaften genutzt wurden, auf.

4.2.1 Platinenseitige Oberflächenmodifikation

Eine Möglichkeit, die Reibung über eine Oberflächenfunktionalisierung anzupassen, besteht in der Modifikation der Platinenoberfläche. Der Vorteil einer werkstückseitigen Adaption ist die vollumfängliche Nutzung der Wirksamkeit, da keine Verschleißaspekte zu berücksichtigen sind. Als

nachteilig ist die Verlängerung der Prozesskette zu bewerten, da jede Werkstückoberfläche vor dem Einsatz modifiziert werden muss. Zur Reibungsbeeinflussung werden im Rahmen der Arbeit zwei Ansätze untersucht. Einerseits wird das Abrasivstrahlen mit dem Ziel einer Reibungserhöhung analysiert. Das prinzipielle Potenzial zur Reibungserhöhung wurde in [145] nachgewiesen. Andererseits steht die Analyse eines Mikroprägeprozesses zur Erzeugung deterministischer Strukturen bzw. Schmieraschen im Fokus der Forschungsarbeit. Deren prinzipielle Wirksamkeit im Hinblick auf eine Reibungsreduzierung wurde in [146] aufgezeigt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist das Ziel über die Überprüfung der reinen Wirksamkeit hinauszugehen und die tribologischen Wirkmechanismen zu identifizieren. Dies ermöglicht eine allgemeingültige Verwendung der Methoden in der Blechmassivumformung unabhängig vom untersuchten Parameterraum.

Strahlprozesse

In der vorliegenden Arbeit werden sowohl Kugel- als auch Abrasivstrahlprozesse verwendet. Das Kugelstrahlen wird lediglich im Rahmen von Verifizierungsversuchen eingesetzt. Bei diesem Strahlverfahren handelt es sich um ein verfestigendes Strahlen. Als Strahlgut wird ein keramisches Kugelstrahlgut mit einem mittleren Körnungsdurchmesser von $250 \pm 425 \mu\text{m}$ verwendet. Als Strahlendruck wurde 3 bar gewählt. Das Abrasivstrahlen wird eingesetzt, um die Rauheit von Werkstückoberflächen zu erhöhen [147]. Eine kostengünstige und effiziente Durchführung bei einer gleichzeitig guten Einstellbarkeit des gewünschten Rauheitsprofils ist als vorteilhaft bei diesem Verfahren zu bewerten [148]. Ein Nachteil ist die Gefahr von im Werkstück steckenbleibenden Strahlmittelkörnern und daraus resultierende Verunreinigungen [149]. Als Strahlgut wird ein kantiges Strahlmittel mit einer höheren Härte als das zu bearbeitende Werkstück verwendet. Beim Auftreffen der Körner auf die Oberfläche wird kinetische Energie abgegeben, was zu einer plastischen Verformung, einer Verfestigung und einem Oberflächenabtrag führt. Somit werden durch das Abrasivstrahlen die Oberflächenrauheit [148] und die oberflächennahe Verfestigung [150] als tribologisch relevante Randzoneneigenschaften verändert. Die Ausprägung der Oberflächeneigenschaften wird durch die Strahlparameter Strahlmittel, Strahlendruck, Strahlwinkel, Strahlzeit und Strahlabstand bestimmt. Da die Untersuchung im Rahmen der Arbeit nicht auf die Analyse des Strahlprozesses, sondern auf die resultierenden Oberflächeneigenschaften und deren Wirkung auf die Reibung abzielen, werden lediglich ausgewählte Strahlparameter untersucht. Hierbei werden Strahlparameter gewählt, die zu einer signifikanten Beeinflussung von Oberflächenrauheit

und -verfestigung führen. Es wurden der Strahlmitteldurchmesser und der Strahldruck gewählt. Mit zunehmender Korngröße ist ein signifikanter Rauheitsanstieg [151] und Verfestigungsanstieg [148] zu erwarten. Analog gilt dies für den Strahldruck [151]. Als Strahlmittel wurde ein harter und spröder weißer Elektrokorund ausgewählt [148]. Aufgrund der hohen Härte werden das Verrunden der Strahlmittelkanten und eine damit verbundene reduzierte Strahlwirkung vermieden. Als Strahlmittel wurde eine feine Körnung mit einem gemittelten Strahlmitteldurchmesser von $85 \pm 35 \mu\text{m}$, ein mittlerer Strahlmitteldurchmesser mit $303 \pm 105 \mu\text{m}$ und ein grober Strahlmitteldurchmesser mit $718 \pm 246 \mu\text{m}$ verwendet. Für den Strahldruck wurden die Werte 1, 3 und 4 bar gewählt. Für kleinere Werte ist keine signifikante Beeinflussung der Oberflächeneigenschaften zu erwarten. Bei Werten über 4 bar kann es zu einem Brechen des Strahlmittels beim Auftreffen auf die Oberfläche kommen. Der Einfluss der sechs Ausprägungen wird in einem vollfaktoriellen Versuchsplan untersucht.

Für die Strahlversuche wurde die Injektorstrahlanlage Micro Peenmatic 770S der Firma iepco verwendet. Die Strahlpistole vom Typ EF 3 verfügt über eine Hartmetallstrahldüse HSD 5/10 mit einem Düsendurchmesser von 5 mm [152]. Die Prozessführung erfolgt manuell. Als Abstand zwischen Strahldüse und Werkstückoberfläche wurden 40 mm eingestellt. Der Strahlwinkel wurde auf 90° festgelegt. Zur Festlegung der Strahlzeit, bei der eine größtmögliche Änderung der Oberflächeneigenschaften vorliegt, wurden Vorversuche durchgeführt. Dafür wurden kreisförmige Proben mit einem Durchmesser von 20 mm bei einem mittleren Druck von 3 bar und einem mittleren Körnungsdurchmesser von $303 \pm 105 \mu\text{m}$ gestrahlt, Bild 5. Zur Bewertung der Rauheitszunahme wurde die reduzierte Spitzenhöhe *Rpk* analysiert. Der *Rpk*-Wert ist ein Maß für die Ausgeprägtheit der Rauheitsspitzen im Rauheitsprofil und damit eine geeignete Größe, um die Aufrauhung zu beschreiben. Bis zu einer Strahlzeit von 15 s gibt es die Tendenz zu einer Rauheitszunahme. Für DCo4 ist ab 20 s eine Abnahme zu erkennen. Für DP600 sinkt diese ab 25. Somit ist davon auszugehen, dass bei beiden Werkstoffen bei einer Strahlzeit von 15 s eine sehr hohe Rauheit erreicht ist. Bei längeren Strahlzeiten kommt es bei beiden Werkstoffen zu einem erneuten Abtrag der Rauheitsspitzen. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde eine Strahldauer von 15 s für die weiteren Untersuchungen gewählt.

4 Angewandte Werkstoffe, Verfahren zur Oberflächenmodifikation sowie Mess- und Prüfverfahren

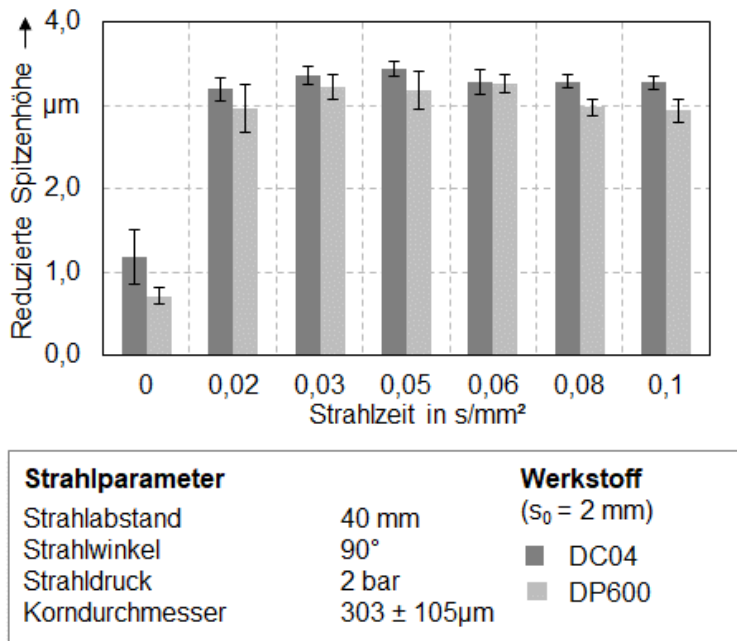


Bild 5: Zeitabhängige Rauheitsentwicklung abrasivgestrahlter Werkstückoberflächen

Mikroprägen

Das Umformverfahren Prägen zählt nach DIN 8583 zu den Druckumformverfahren und ist der Untergruppe des Gesenkformens zuzuordnen [153]. Durch Prägen wird die Topographie des Werkstücks modifiziert, um funktionale oder dekorative Oberflächeneigenschaften zu erzeugen [154]. In der vorliegenden Arbeit wird das Mikroprägen zur Herstellung deterministischer Schmiertaschen auf der Werkstückoberfläche genutzt. Durch das Prägen werden die Randzoneneigenschaften Topographie und Verfestigung beeinflusst. Die Ausprägung der beiden Randzoneneigenschaften ist von den geometrischen Eigenschaften der Schmiertaschen abhängig. Nach [122] zählen zu den geometrischen Eigenschaften die laterale und vertikale Strukturform bzw. Strukturgröße, der Flächendeckungsgrad und die Anordnung quer bzw. längs zur Relativbewegung. In der vorliegenden Arbeit wurden ausgewählte Geometrieparameter untersucht, um Verfestigung und Topographie in einem bestimmten Parameterraum zu beeinflussen. Als Geometrieparameter wurden die vertikale Strukturgröße respektive die Schmiertaschentiefe, die laterale Strukturgröße respektive der Schmiertasdurchmesser und der Flächendeckungsgrad gewählt. Für die drei

Parameter wurden je drei Faktorstufen untersucht. Die Einflüsse der unterschiedlichen Parameter wurden in einem vollfaktoriellen Versuchsplan analysiert. Die Wertegrenzen für Schmiertaschendurchmesser und Flächendeckungsgrad resultieren aus den Fertigungsgrenzen bei der Herstellung der Mikroprägestempel. Die Stempel wurden mittels Funkenerosion mit der 3D-Mikroerodieranlage SX-200-HPM der Firma Sarix hergestellt. Die fertigungstechnischen Grenzen sind durch den Elektrodendurchmesser beim Erodieren definiert. Um einen ausreichenden Durchmesser, welcher durch den Abstand zweier benachbarter Prägepins definiert ist, zu gewährleisten, sind ein Schmiertaschendurchmesser von 100 µm kombiniert mit einem Flächendeckungsgrad von 15 % die am sinnvollsten zu wählenden Grenzen. Ausgehend von der unteren Grenze von 100 µm für den Schmiertaschendurchmesser wurden zusätzlich 300 µm und 500 µm gewählt. Als Strukturform wurden zylindrische Schmiertaschen ohne Einlaufwinkel gewählt, um Fertigungsrestriktionen zu reduzieren. Beim Flächendeckungsgrad wurden neben der Grenze 15 % 10 % und 5 % untersucht. Die dritte zu variierende Größe ist die Schmiertaschentiefe. Dieser Wert orientiert sich an der Gesamthöhe des Rauheitsprofils R_t . Diese Rauheitskenngröße ist definiert als der Abstand zwischen der höchsten Spitze und dem tiefsten Tal. Für den Platinenwerkstoff DCo_4 nimmt R_t einen Wert von $11,18 \pm 1,09$ µm an. Auf Basis der Gesamthöhe wurde ein Wert von 10 µm, welcher im Bereich der Profilhöhe liegt, gewählt. Zusätzlich wurden ein kleinerer Wert von 5 µm und ein höherer Wert von 15 µm als Strukturtiefe für die Schmiertaschen gewählt.

4.2.2 Werkzeugseitige Oberflächenmodifikation

Eine weitere Möglichkeit, die Reibung lokal über ein Surface Engineering anzupassen, ist die Modifikation der Werkzeugoberfläche. Als Vorteil ist der geringere Fertigungsaufwand zu bewerten, da über eine Modifikation des Endbearbeitungsverfahrens die Oberflächenfunktionalisierung möglich ist. Des Weiteren bedarf es lediglich einer einmaligen Anpassung der Werkzeugaktivfläche vor dem Werkzeugeinsatz. Ein Nachteil der werkzeugseitigen Oberflächenfunktionalisierung ist die reduzierte Wirksamkeit über die Einsatzdauer, bedingt durch Verschleißerscheinungen. Im Rahmen der Arbeit werden zwei Verfahren im Hinblick auf eine Reibungsbeflussung und die tribologischen Wirkmechanismen untersucht. Zur Reibungserhöhung wird das Fräsen mit Hochvorschubfräsern untersucht. Das reibungserhöhende Potential wurde in [155] aufgezeigt. Die Verwendung von chrombasierten Hartstoffschichten dient einer Reibungsreduzierung, was in [156] nachgewiesen wurde. Auch für die werkzeugseitigen

Oberflächenmodifikationen werden in der vorliegenden Arbeit die tribologischen Wirkzusammenhänge abgeleitet.

Fräsen mit Hochvorschubfräsern

Das Fräsen ist nach DIN 8580 den trennenden Umformverfahren und der Gruppe des Spanes mit geometrisch bestimmter Schneide zuzuordnen [157]. Als vorteilhaft beim Hochvorschubfräsen ist zu bewerten, dass der aufwändige Polierschritt als Endbearbeitungsschritt ersetzt wird und die resultierende Oberflächenstruktur im Sinne einer Oberflächenfunktionalisierung nutzbar ist. Die Erforschung des Prozesses und die Untersuchung der numerischen Modellierung des Fräsprozesses [158] erfolgt durch das Institut für Spanende Fertigung der Technischen Universität Dortmund. Die untersuchten Proben wurden dem LFT zur Verfügung gestellt. Der Unterschied bei der Verwendung von Hochvorschubfräsern gegenüber konventionellen Fräswerkzeugen besteht in der Möglichkeit zur Realisierung hoher Vorschübe bei geringen axialen und radialen Zustellungen [159]. Diese Kombination führt zu einer spezifischen Oberflächentopographie. Teile der Oberfläche bleiben unbearbeitet, was zu einer hohen Oberflächenrauheit führt [160]. Der Fräsprozess wurde auf einem 5-Achs HSC Präzisionszentrum vom Typ HSC 75 der Firma DMG MORI am Institut für Spanende Fertigung durchgeführt. Die Geometrie des Fräasers und die Verwendung verschiedener Fräsparameter, wie beispielsweise Anstellwinkel, Zahnvorschub oder radiale Eingriffsbreite beeinflusst die resultierende Oberflächentopographie [161]. In [162] wird auf Topographieunterschiede bei der Variation ausgewählter Parameter eingegangen.

Im Rahmen der Untersuchungen wird der Prozess genutzt, um den tribologisch relevanten Wirkmechanismus hochvorschubgefräster Oberflächen zu ermitteln. Die Oberflächenrauheit wird als tribologisch relevante Randzoneneigenschaft modifiziert. Um den Einfluss dieser auf die Reibung zu analysieren, wurden unterschiedliche Topographien über eine Variation des Anstellwinkels α des Fräasers hergestellt. Als Werte für α wurden 0° , $1,5^\circ$ und 3° gewählt. Zahnvorschub f_z , Drehzahl n , Eingriffsbreite a_e und Fräsergeometrie wurden konstant gehalten. Des Weiteren wurden die Strukturen radial in Probengleitrichtung gefräst, um die aus der Struktur resultierende Anisotropie zu reduzieren. Die verwendeten Fräsparameter sind in Bild 6 veranschaulicht.

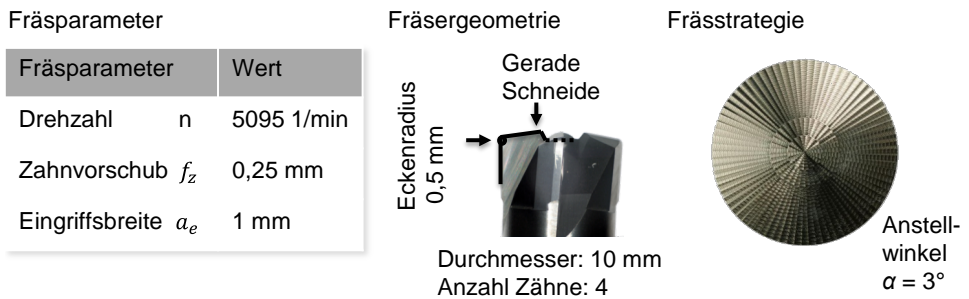


Bild 6: Parameter Hochvorschubfräsen

Chrombasierte Hartstoffschichten

Eine weitere werkzeugseitige Möglichkeit, die Reibung über eine Oberflächenfunktionalisierung anzupassen, ist die Verwendung von keramischen PVD Schichten. Durch physikalische Gasphasenabscheidung, kurz PVD, sind die tribologischen Eigenschaften aufgrund einer Vielzahl vorhandener Beschichtungswerkstoffe gezielt modifizierbar [163]. Besonders mittels Magnetronsputtering abgeschiedene nitridische und carbo-nitridische chrombasierte Schichtsysteme sind in der Umformtechnik weit verbreitet [164]. Chrombasierte Schichtsysteme werden eingesetzt, da Chrom den unedlen Metallen zugeordnet wird, aber aufgrund der leichten Passivierbarkeit Eigenschaften von Edelmetallen besitzt [165]. Daraus resultiert, dass unter atmosphärischen Bedingungen auf Chrom stabile, festhaftende, korrosionsbeständige und gasdurchlässige Cr_2O_3 Schichten, die bis zu einer Temperatur von 1000°C zunderbeständig sind, ausgebildet werden [166]. Um die Schichteigenschaften und damit die tribologischen Eigenschaften zu verbessern, werden zusätzliche Elemente, wie Aluminium oder Kohlenstoff, hinzugefügt [156]. Der Einfluss der Elementzusammensetzung wurde in [159] analysiert. Des Weiteren beeinflusst der Beschichtungsprozess die Oberflächenrauheit, da durch die Beschichtung die Rauheit der Ausgangsoberfläche nicht reproduziert wird und es beispielsweise zur Bildung von Droplets kommt. Der tribologische Einfluss der Oberflächenrauheit wurde in [167] näher analysiert. Somit sind die chemische Zusammensetzung und die Oberflächenrauheit als tribologisch relevante Randzoneneigenschaften zu bewerten. Um den Einfluss der chemischen Zusammensetzung der Beschichtungen zu untersuchen, wurden CrAlN-, CrAlCN- und CrAlC-Beschichtungen analysiert, Tabelle 3. Diese Beschichtungen variieren im Kohlenstoffanteil. Höhere Kohlenstoffanteile sollten zu einer Reibungsabnahme führen [168]. Um den Einfluss der Oberflächenrauheit zu

untersuchen, wurden zusätzlich die beschichteten Werkzeugoberflächen im polierten und unpolierten Zustand untersucht.

Tabelle 3: Schichtzusammensetzung

Beschichtung	Cr in At.%	Al in at.%	C in at.%	N in at.%
CrAlN	15,02	32,95	-	52,03
CrAlCN	11,90	22,55	19,91	45,64
CrAlC	52,57	16,12	31,32	-

Die Erforschung des Beschichtungsprozesses, die Herstellung der Beschichtungen und die Charakterisierung der Schichteigenschaften erfolgten durch den Lehrstuhl für Werkstofftechnologie der Technischen Universität Dortmund. Die beschichteten Werkzeugoberflächen wurden dem LFT zur Verfügung gestellt. Die Beschichtungen wurden in einer Magnetronspalter-Anlage vom Typ CC800/9SinOx ML in reaktiven PVD-Prozessen auf den Substratwerkstoff abgeschieden. Dazu wurden zwei segmentierte AlCr₂₄-Targets mit einer Kathodenleistung von 3000 W verwendet, wobei der Grundkörper des Targets aus Aluminium (Reinheit 99,5 %) und 24 Cr-Stopfen mit einem Durchmesser von 15 mm (Reinheit 99,9 %) besteht. Die Targets besitzen ein Flächenverhältnis von 60/40 (Al/Cr), um die Schichtabscheidung der CrAl-Schichten in der kubischen Gefügestruktur zu gewährleisten [169]. Zur Synthese des jeweiligen Schichtsystems wurden die Arbeitsgase Argon und Krypton und die Reaktivgase Stickstoff sowie ein Gemisch aus Stickstoff/Acetylen in die Beschichtungskammer eingeleitet. Zur Verdichtung der Schichtmorphologie und damit zur Härtesteigerung der Schichten wurde am Manipulationssystem, auf welchem die Werkzeuge positioniert wurden, eine negative Bias-Spannung von -100 V angelegt.

4.3 Charakterisierung der Oberflächeneigenschaften

Die in Abschnitt 4.2 beschriebenen Verfahren zur Oberflächenfunktionalisierung beeinflussen die Randzoneneigenschaften. Diese nehmen wiederum Einfluss auf die tribologischen Eigenschaften. Zur Ableitung der tribologischen Wirkmechanismen, welche für eine anforderungsgerechte Nutzung tribologischer Systeme notwendig sind, sind die tribologisch relevanten Randzoneneigenschaften zu charakterisieren. Bei der Bestimmung relevanter Eigenschaften ist zwischen Randzoneneigenschaften der

Platinen und des Werkzeugs zu unterscheiden. Dies ist dadurch begründet, dass es während der Umformung im Inneren des weicheren Reibpartners respektive der Platine zu einer Scherung kommt [55]. Somit sind werkstückseitig neben den topographischen Eigenschaften auch die randnahe Eigenschaften, wie beispielsweise die Verfestigung, zu charakterisieren. Da es werkzeugseitig aufgrund der Werkzeugauslegung zu keiner Scherung im Inneren kommt, werden lediglich topographische Eigenschaften analysiert. Somit werden Methoden zur Charakterisierung von Topographie und oberflächennaher Verfestigung benötigt.

Topographie

Für die optische Analyse topographischer Eigenschaften wurde das konfokale Laserscanning Messmikroskop VK-X 200 der Firma Keyence genutzt. Konfokalmikroskopie ermöglicht eine flächenhafte und berührungslose Analyse der Oberflächentopografie [170]. Bei diesem Mikroskop werden eine Weißlicht- und eine Laserlichtquelle verwendet, wodurch hochauflösende Farbbilder mit Tiefenschärfe über den gesamten Bildbereich erreicht werden. Zur Topographieanalyse wurde ein Objektiv mit 20facher Vergrößerung eingesetzt, um möglichst großflächige Aufnahmen der Oberflächen bei ertragbaren Messzeiten durchzuführen. Für die Ableitung von Oberflächenkenngrößen aus optischen Messungen ist nach [89] eine Messfeldgröße von mindestens 6 mm^2 notwendig. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, wurde für sämtliche Aufnahmen eine Größe von $2,5 \text{ mm} \times 2,5 \text{ mm}$ gewählt. Die optische Oberflächencharakterisierung ist gut geeignet, um zerklüftete Topographien aufzunehmen. Für sehr glatte Oberflächen, wie sie bei den beschichteten Oberflächen vorliegen, wurden im Rahmen der Arbeit taktile Messungen verwendet. Diese sind nicht für zerklüftete Oberflächen geeignet, da die Tastspitze des Messtasters die Topographie nicht auflösen kann. Die taktilen Messungen wurden mit einem Perthometer der Firma Mahr durchgeführt. Zur Ermittlung des Linienprofils wird der Messtaster über die Oberfläche geführt.

Die Ableitung des Rauheitsprofils aus dem optisch oder taktil gemessenen Primärprofil erfolgt über den Filter Grenzwellenlänge λ_c und den kurzwelligen Profilfilter λ_s . Die Grenzwellenlänge ist die bestimmende Größe für die Grenze zwischen Welligkeit und Rauheit. Der kurzwellige Profilfilter definiert den Übergang der Rauheit zu noch kürzeren Wellenlängen. Die beiden Filter werden auf Basis des arithmetischen Mittenrauwerts R_a der ungefilterten Oberfläche ausgewählt. Die in Tabelle 4 aufgeführten Werte wurden im Rahmen der Arbeit in Abhängigkeit des jeweiligen R_a -Wertes zur Auswertung der Messungen herangezogen.

4 Angewandte Werkstoffe, Verfahren zur Oberflächenmodifikation sowie Mess- und Prüfverfahren

Tabelle 4: Angewandte Filter für die Rauheitsauswertung nach [171]

Ra in μm	Grenzwellenlänge λ_c	Kurzwelliger Profilfilter λ_s
$> 0,1 \dots 2$	0,8 mm	2,5 μm
$> 2 \dots 10$	2,5 mm	8,0 mm

Zur quantitativen Bewertung der aus den Modifikationsverfahren resultierenden Topographieeigenschaften werden aus den taktilen und optischen Messungen verschiedene Rauheitskenngrößen ausgewertet. Zur generellen Bewertung des Rauheitsprofils werden die beiden Standardkenngrößen Ra und Rz verwendet. Der arithmetische Mittenrauwert Ra mittelt einzelne Profilspitzen und -täler aus dem Rauheitsprofil. Die gemittelte Rautiefe Rz ist der Mittelwert der Absolutwerte der Höhen der fünf höchsten Profilkuppen und der Absolutwerte der Tiefen der fünf tiefsten Profiltäler [38]. Neben den konventionellen Kenngrößen wird über die Abbott-Kurve eine weitere Kenngröße abgeleitet. Um vor allem die durch das Abrasivstrahlen und Hochvorschubfräsen zunehmende Rauheit zu bewerten, wird die reduzierten Spitzenhöhe Rpk ermittelt. Der Rpk -Wert ist ein Maß für die Ausprägtheit der Rauheitsspitzen im Rauheitsprofil. Neben diesen flächigen Kennwerten werden dreidimensionale Kenngrößen des mechanisch-rheologischen Modells ermittelt [172]. Dies ist vor allem für die Bewertung mikrogeprägter Schmieraschen wichtig. Hierbei wurde der geschlossene Leerflächenanteil α_{cl} und der Maximalwert des geschlossenen Leerflächenanteils α_{clm} ausgewertet. Über den geschlossenen Leerflächenanteil wird die Anzahl statischer Schmieraschen bewertet. Das Maximum der geschlossenen Leerflächenanteile α_{clm} ist der Maximalwert an statischen Schmieraschen auf der Oberfläche. In statischen Schmieraschen wird der Schmierstoff gespeichert und es kommt zu keinem Abfließen des Schmierstoffs. Dies wirkt positiv auf eine Reibungsreduzierung.

Verfestigung

Für die platinenseitigen Oberflächenmodifikationen ist die Bestimmung der randnahen Verfestigung von Bedeutung. Im Rahmen der Arbeit werden zwei Wege zur Messung dieser gewählt. Eine Möglichkeit besteht in der Messung der Mikrohärtigkeit im Schliff. Die Mikrohärtigkeitsmessungen nach Vickers [173] wurden mit dem Mikrohärtprüfgerät Fischerscope HM2000 durchgeführt. Die zu messenden Proben wurden geteilt, eingebettet, geschliffen und abschließend poliert. Für die Mikrohärtigkeitsmessungen der abrasivgestrahlten Proben wurde eine Prüfkraft von 50 mN verwendet.

Das Messfeld weist eine Größe von 0,3 mm x 0,3 mm auf. Bei den Mikrohärtemessungen der mikrogeprägten Schmiertaschen wurde eine Prüfkraft von 20 mN eingestellt. Die kleinere Prüfkraft ist dadurch begründet, dass zur Erfassung der Schmiertaschen mit einem Durchmesser von 100 µm mehr Messpunkte notwendig sind. Da die Abstände der Messpunkte und damit deren Gesamtanzahl von der Prüfkraft abhängen, wurden für beide Oberflächenmodifikationen unterschiedliche Prüfkraften gewählt. Das Messfeld bei den mikrogeprägten Proben wurde in Abhängigkeit der Schmiertaschengröße gewählt. Für die Untersuchungen im Rahmen der Arbeit ist die Messung direkt am Probenrand notwendig, um die randnahe Verfestigung zu erfassen. Da es bei der Präparation der Schiffe zu einer Verrundung des Probenrands aufgrund des Härteunterschieds zwischen Probe und Einbettmaterial kommt, wurden zusätzlich röntgenographische Messungen durchgeführt. Die Halbwertsbreite der Röntgeninterferenzlinie ist ein Maß für die Verzerrtheit des Kristallgitters. Je größer die Halbwertsbreite ist, desto stärker ist die Gitterverzerrung und desto größer ist die randnahe Verfestigung. Die Halbwertsbreite wird bei kugelgestrahlten Oberflächen oft als Maß für die Verfestigung herangezogen [174]. Für die Quantifizierung der Halbwertsbreite wird das Diffraktometer Stress Analyzer XRD 3003 der Firma Seifert genutzt. Die Messungen werden mit einer Chromröntgenröhre und einem Fokusdurchmesser von 2 mm durchgeführt.

4.4 Ermittlung des Reibverhaltens im Laborversuch

Zur Ermittlung des Reibverhaltens der maßgeschneiderten Oberflächen wurden die Laborversuche Ringstauch- und Zapfenpressversuch eingesetzt. Die Auslegung der Versuche unter Berücksichtigung der Bedingungen in der Blechmassivumformung erfolgte in [145]. Sämtliche untersuchten tribologischen Systeme wurden mit beiden Versuchen analysiert, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu bewerten.

Ringstauchversuch

Der Ringstauchversuch nach Mahle und Cockroft [175] ist ein weit verbreiteter Laborversuch in der Umformtechnik. Durch Cristino et al. wurde beispielsweise der Einfluss von Oberflächenrauheit und Materialfestigkeit auf die Reibung [176] analysiert. Lawanwong zeigte den Einfluss von Beschichtungen auf die Reibung mit Hilfe des Ringstauchversuchs [177]. In [178] wurde die Sensitivität von Kalibrierkurven auf eine Änderung der Probengeometrie untersucht. [179] beschreibt den Ringstauchversuch in Hinblick

auf die Prozesscharakteristika, wie beispielsweise Oberflächenvergrößerung und Relativgeschwindigkeit. [180] gibt zusammenfassend einen Überblick über vorhandene Forschungsaktivitäten, welche auf den Ringstauchversuch fokussieren. Durch den Ringstauchversuch können Reibzahlen, für den Gültigkeitsbereich der Blechumformung, und Reibfaktoren, für den Bereich der Massivumformung, ermittelt werden. Da in der Blechmassivumformung Kontaktnormalspannungen aus dem Bereich der Massivumformung vorliegen, wurden in der vorliegenden Arbeit Reibfaktoren auf Basis des Reibfaktormodells bestimmt. Bild 7 veranschaulicht Versuchsaufbau, Versuchsprinzip und Probengeometrie.

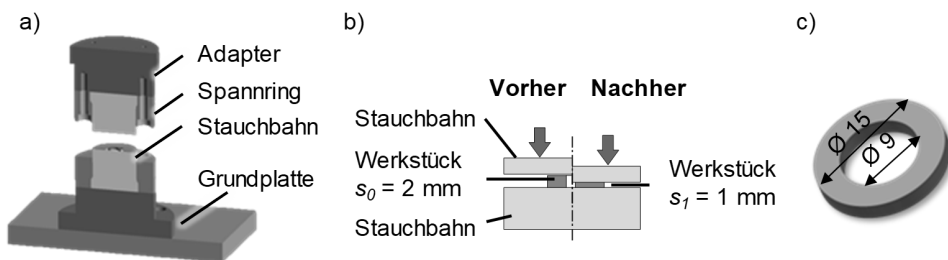


Bild 7: Ringstauchversuch a) Versuchsaufbau, b) Versuchsprinzip und c) Probengeometrie nach [183]

Beim Ringstauchversuch wird eine kreisringförmige Probe mit einem Außendurchmesser D_a , einem Innendurchmesser D_i und einer Ausgangsblechdicke s_o zwischen zwei ebenen Stauchbahnen auf eine definierte Höhe gestaucht. Das klassische Geometrieverhältnis von $D_a:D_i:s_o$ liegt bei 6:3:2 [38]. Die Ausgangsblechdicke ist mit $s_o = 2 \text{ mm}$ vordefiniert. Um Herstellung und Vermessung der Proben zu erleichtern, wurde in [181] das konventionelle Verhältnis 6:3:2 auf 15:9:2 angepasst. Die Probe wird während der Umformung um 50 % auf eine Restblechdicke $s_1 = 1 \text{ mm}$ gestaucht. Zur Realisierung der exakten Stauchhöhe wurde ein Anschlag verwendet. Der Reibfaktor wird über den resultierenden Innendurchmesser ermittelt. Hohe Reibung während der Umformung führt zu einem kleineren Innendurchmesser respektive niedrigeren Reibfaktoren. Eine direkte Bestimmung des Reibfaktors aus dem Ringstauchversuch ist nicht möglich. Aufgrund dessen findet das Prinzip der numerischen Identifikation Anwendung. Hierzu wurde ein Simulationsmodell des Ringstauchversuchs in der Simulationssoftware simufact.forming in der Version 12.0.1 aufgebaut. Für Reibfaktoren zwischen 0,03 und 0,5 wurden die Innendurchmesser bestimmt und durch Interpolation der Datenpunkte eine Kalibrierkurve

abgeleitet. Durch einen Abgleich der experimentell gemessenen Innendurchmesser und der Kalibrierkurve werden die Reibfaktoren abgeleitet. Bild 8 zeigt exemplarisch die simulierten Werte für DCo4. Zusätzlich sind die Funktionen, welche zur Ableitung der Reibfaktoren genutzt wurden, für beide Werkstoffe dargestellt, für beide Werkstoffe dargestellt.

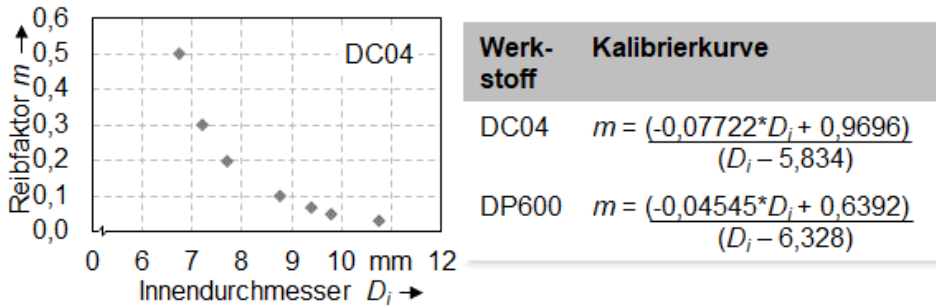


Bild 8: Abgeleitete Kalibrierkurven Ringstauchversuch

Um die Vorhersagegenauigkeit der Simulation zu bewerten, wurde diese validiert, Bild 9.

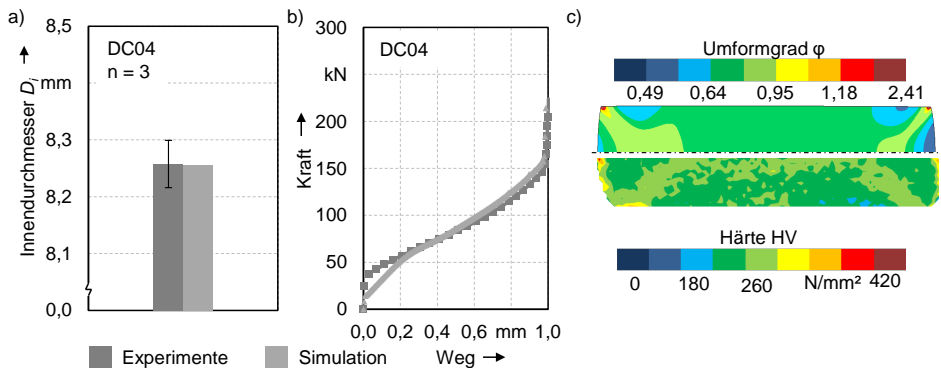


Bild 9: Gegenüberstellung a) Geometrie, b) Kraft-Weg-Verläufe und c) Kaltverfestigung von Experiment und Simulation

Für die Validierung wurde das experimentelle Ergebnis einer Probe aus DCo4, welche ohne Verwendung von Oberflächenmodifikationen umgeformt wurde, genutzt. Es wurde Geometrie, Kaltverfestigung und die Kraft-Weg-Verlauf von Simulation und Experiment gegenübergestellt. Für alle drei Methoden zeigen Simulation und Experiment eine gute Übereinstimmung. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Simulation und die

abgeleitete Kalibrierkurve geeignet sind, um die Reibfaktoren für die experimentellen Ergebnisse zu bestimmen. Die experimentelle Durchführung des Ringstauchversuchs wurde auf der Tiefziehpresse TSP100So der Firma Lasco mit einer Maximalkraft von 1000 kN durchgeführt. Für die Versuche wurde eine Umformgeschwindigkeit von 10 mm/s gewählt. Die Innendurchmesser der umgeformten Proben wurden mit dem Koordinatenmessgerät PMM 654 der Firma Leitz gemessen. Die Antastunsicherheit liegt nach ISO 10 360-20 bei 0,6 μm .

Zapfenpressversuch

Der Zapfenpressversuch nach Burgdorf [182] ist eine Kombination aus Stauchen und Vollvorwärtsfließpressen. Bei diesem Versuch wird ein zapfenförmiges Element aus der Blechebene einer kreisförmigen Probe ausgeformt. Die Umformbedingungen liegen nah an denen, die bei den Verfahren der Blechmassivumformung vorliegen. Somit ist dieser Versuch gut für die Abbildung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung geeignet. Die Adaption von Werkzeug- und Probengeometrie an die Bedingungen der Blechmassivumformung erfolgte in [145]. In Bild 10 sind Aufbau und Prinzip des Versuchs dargestellt.

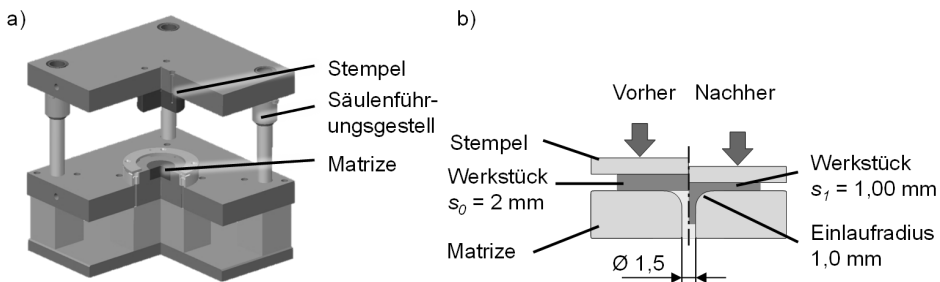


Bild 10: Zapfenpressversuch a) Versuchsaufbau und b) Versuchsprinzip

Als Ausgangsdurchmesser der Probe wurden 20 mm bei einer Ausgangsblechdicke s_0 von 2 mm gewählt. Bei hoher Reibung sind höhere Zapfenhöhen zu erwarten. Eine direkte Bestimmung des Reibfaktors ist auch beim Zapfenpressversuch nicht möglich.

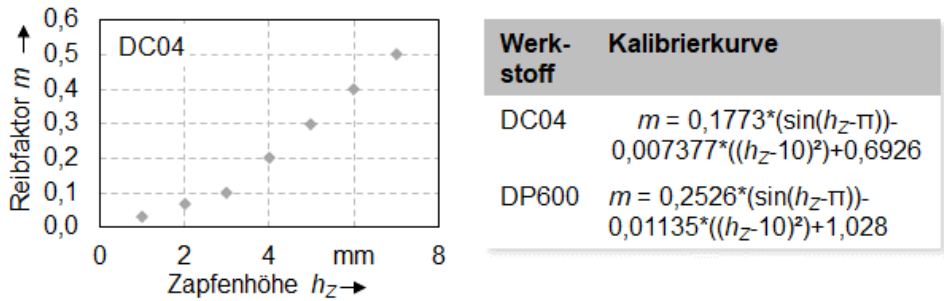


Bild 11: Abgeleitete Kalibrierkurven Zapfenpressversuch

Bei der Ableitung der Reibfaktoren wurde analog zum Ringstauchversuch vorgegangen. Bild 11 zeigt exemplarisch die für DC04 simulierten Werte und die Funktionen zur Ermittlung der Reibfaktoren für beide Werkstoffe. Auch für diesen Versuch wurde die Simulation analog zum Ringstauchversuch validiert, Bild 12 dargestellt. Für diesen Versuch kann anhand der Validierung davon ausgegangen werden, dass die Kalibrierkurven zur Ermittlung der Reibfaktoren einsetzbar sind.

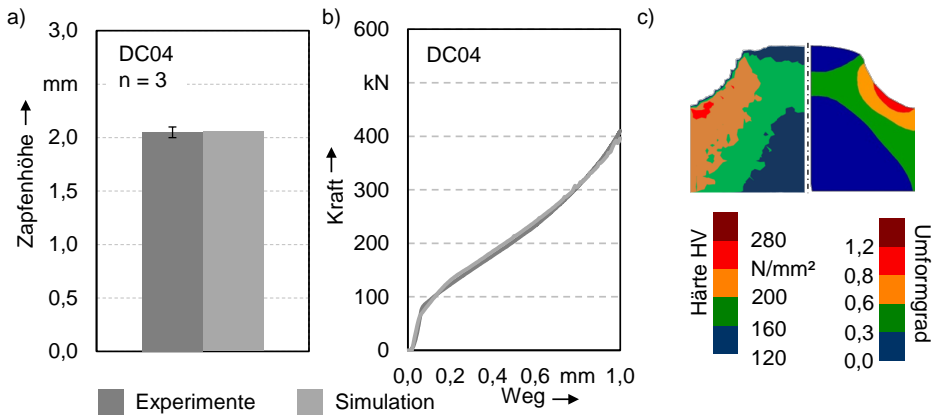


Bild 12: Gegenüberstellung a) Geometrie, b) Kraft-Weg-Verläufe und c) Kaltverfestigung von Experiment und Simulation

Die Durchführung der Experimente ist ebenfalls analog zum Ringstauchversuch. Die Zapfenhöhen, welche sich aus der Höhe des Zapfens und der Restblechdicke zusammensetzen, wurden mit einer Bügelmessschraube der Firma Mahr gemessen.

Vergleichende Bewertung der Laborversuche

Sämtliche hier untersuchten tribologischen Systeme werden mit beiden Laborversuchen untersucht. Dies soll die Übertragbarkeit der Ergebnisse gewährleisten. Es gilt allerdings bei der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen, dass die beiden Versuche in den tribologischen Beanspruchungen voneinander abweichen. In Tabelle 5 sind die numerisch ermittelten Maximalwerte der jeweiligen tribologischen Beanspruchungen für einen Reibfaktor von 0,1 aufgeführt.

Da die Reibung sehr sensitiv auf Änderungen des tribologischen Beanspruchungskollektivs reagiert, werden die ermittelten Reibfaktoren voneinander abweichen. In [183] wurde exemplarisch der Ringstauch- und Zapfenpressversuch gegenübergestellt. Der Ringstauchversuch führt unter gleichen Bedingungen zu höheren Reibfaktoren. Dies resultiert aus dem abweichenden Beanspruchungskollektiv. Der Unterschied in den Reibfaktoren wurde auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit festgestellt. Somit werden die beiden Versuche lediglich genutzt, um eine qualitative Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Tabelle 5: Tribologische Beanspruchungen (Numerisch, DC04, $s_0 = 2 \text{ mm}$, $m = 0,1$)

Laborversuch	σ_N in MPa	Gleitweg s_G in mm	Oberflächenvergrößerung A_i/A_0 in %
Ringstauchversuch	980	1,89	86
Zapfenpressversuch	1210	1,93	40

4.5 Ermittlung der Wirksamkeit im Verifizierungsversuch

Zur Verifizierung der Wirksamkeit der maßgeschneiderten tribologischen Systeme werden Blechmassivumformprozesse, welche im Rahmen des Sonderforschungsbereichs Transregio 73 entwickelt wurden, verwendet. Beide Versuche werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

4.5.1 Kombinerter Tiefziehstauchprozess

Durch die Kombination einer Tiefzieh- und Stauchoperation wird ein napfförmiges Bauteil mit einer Außenverzahnung, bestehend aus 80 Zähnen, hergestellt, Bild 13 a). Der Werkzeugaufbau besteht aus einem Ziehring, einem Stauchstempel, einer Stauchplatte und einem Ziehstempel, Bild 13 b).

Zu Beginn der Umformung wird ein Werkstück mit einem Außendurchmesser von 100 mm und einer Ausgangsblechdicke $s_0 = 2$ mm auf dem Ziehstempel positioniert und mit einer Kraft von $F_K = 400$ kN durch den Stauchstempel geklemmt. In einem ersten Schritt wird durch eine Verfahrbewegung des Ziehrings über den Ziehstempel ein napfförmiger Grundkörper ausgeformt. Sobald der Ziehring auf der Stauchplatte aufsetzt beginnt die Stauchoperation. Ab diesem Zeitpunkt wird die komplette Umformkraft F_U über den Stauchstempel eingeleitet, der Napf wird angestaucht, und es kommt zu einem Materialfluss in die Kavitäten des Ziehrings. Um die Vergleichbarkeit der umgeformten Bauteile zu gewährleisten, wird der Prozess weggeregelt gesteuert. Als resultierende Napfhöhe wurde ein Wert von 9 mm gewählt. Die Prozessauslegung erfolgte mit polierten Werkzeugoberflächen, EDT Platinenoberflächen und dem Schmierstoff Beruforge 150 DL. Prozess und Auslegung sind in [184] näher erläutert.

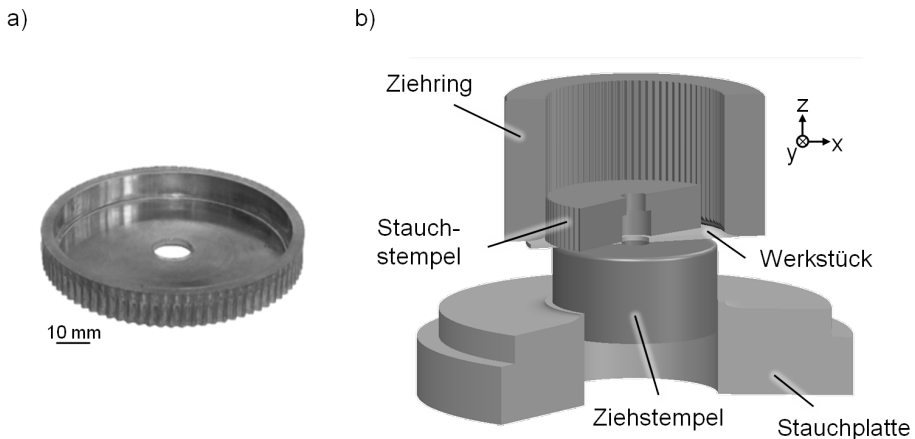


Bild 13: a) Bauteil kombinerter Tiefziehstauchprozess und b) Werkzeugaufbau nach [158]

Für die Untersuchung des Einflusses lokal variierender Reibfaktoren wurde ein Simulationsmodell verwendet, welches in [184] vorgestellt und validiert wurde. Die numerischen Untersuchungen wurden ebenfalls mit der Soft-

ware simufact.forming durchgeführt. Aufgrund der Symmetrieeigenschaften des Bauteils und um die Rechenzeit zu verkürzen, wurde lediglich ein $4,5^\circ$ -Segment des Bauteils simuliert. Dies entspricht zwei benachbarten Funktionselementhälften.

4.5.2 Fließpressprozess

Neben dem kombinierten Prozess wird ein Fließpressprozess zur Herstellung eines Funktionsbauteils mit geometrisch ungleichartigen Funktionselementen analysiert, Bild 14 a). Der Werkzeugaufbau besteht aus einer vorgespannten Matrize, einem Gegenhalter, einem Niederhalter und einem Stempel, Bild 14 b). Als Halbzeug wird eine Blechrunde mit einem Durchmesser von 120 mm und einer Ausgangsblechdicke s_0 von 2 mm auf der Matrize positioniert. In der Matrize sind alternierend Funktionselemente mit einer Verzahnungs- und Mitnehmergeometrie angeordnet. Das Volumen der beiden Elementtypen ist identisch. Das Blech wird durch den Niederhalter mit einer Kraft F_K von 360 kN geklemmt. Um ein Aufwölben der Rode zu vermeiden, wird ein Gegenhalter mit einer Gegenhalterkraft F_{GH} von 40 kN eingesetzt. Während der Umformung fährt der Stempel 1,7 mm in negative z-Richtung und formt die Funktionselemente aus. Die Prozessauslegung erfolgte ebenfalls mit polierten Werkzeugoberflächen, EDT Platinenoberflächen und dem Schmierstoff Beruforge 150 DL. Der Prozess wird in [185] näher erläutert. Um den Einfluss abweichender Reibbedingungen zu untersuchen, wurde der Prozess numerisch mit simufact.forming analysiert. Aufgrund der Symmetrieeigenschaften wurde ein 10° Segment des Bauteils simuliert. Dies entspricht einem Verzahnungs- und einem Mitnehmerfunktionselement.

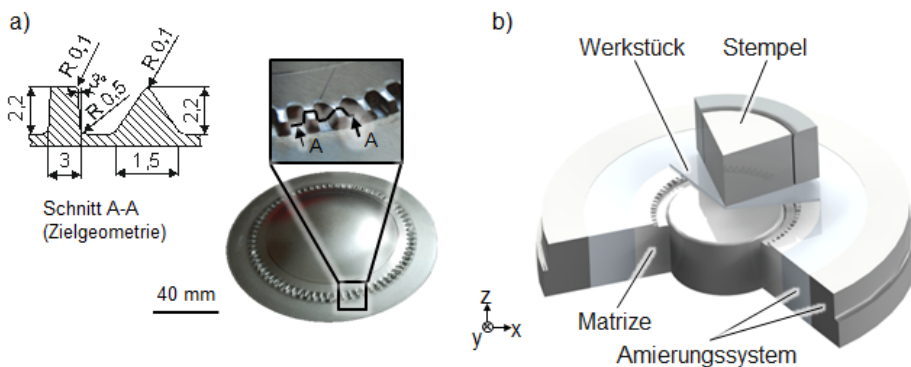


Bild 14: a) Bauteil Fließpressprozess und b) Werkzeugaufbau nach [158]

5 Ermittlung von Anforderungen an tribologische Adaptionen

In diesem Kapitel werden die Herausforderungen bezüglich des Stoffflusses für die in Abschnitt 4.5 vorgestellten Prozesse und die daraus resultierenden Prozessgrenzen vorgestellt. Auf Basis der vorherrschenden tribologischen Beanspruchungen werden Ansätze zur Adaption des tribologischen Systems abgeleitet. Durch eine numerische Studie wird die Wirksamkeit dieser bewertet und Anforderungen an eine lokale Einstellung des tribologischen Systems zur globalen Stoffflusssteuerung definiert.

5.1 Prozessanalyse

In [54] wurde für einen kombinierten Tiefziehfließpressprozess gezeigt, dass während der Umformung ein unkontrollierter Stofffluss vorliegt. Resultat dessen ist eine nicht vollständige Formfüllung der Funktionselemente. In numerischen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass durch eine lokale Anpassung der Reibfaktoren eine positive Beeinflussung der Formfüllung möglich ist. Dieser Ansatz wird im Folgenden für die in Abschnitt 4.5 vorgestellten Prozesse weiterverfolgt. Um die Ursachen des unkontrollierten Stoffflusses zu identifizieren, werden die tribologischen Beanspruchungen analysiert. Zur Identifizierung relevanter Beanspruchungsgrößen in der Blechmassivumformung sind geeignete Größen aus der Blech- und Massivumformung auszuwählen. In der Blechumformung beeinflussen Kontaktnormalspannung σ_N und Gleitgeschwindigkeit v_{rel} die tribologischen Bedingungen [186]. Kontaktdruck σ_N , Oberflächenvergrößerung A_i/A_o , Gleitgeschwindigkeit v_{rel} und Gleitweg s_G sind relevante Größen in der Massivumformung [75]. Da die Blechmassivumformung Bedingungen aus beiden Umformklassen vereint, wurden sämtliche aufgezählten tribologischen Beanspruchungsgrößen analysiert. In den nachfolgenden Bildern sind die jeweiligen tribologischen Beanspruchungen dargestellt. Die Werte entsprechen den numerisch ermittelten Maximalwerten bei einem Reibfaktor von $m = 0,1$. Bild 15 zeigt die Werte der tribologischen Beanspruchungen für den kombinierten Prozess. Prinzipiell sind zwei Zonen mit einem abweichenden tribologischen Beanspruchungskollektiv erkennbar. Innerhalb dieser Zonen sind die Beanspruchungen ähnlich.

5 Ermittlung von Anforderungen an tribologische Adaptionen

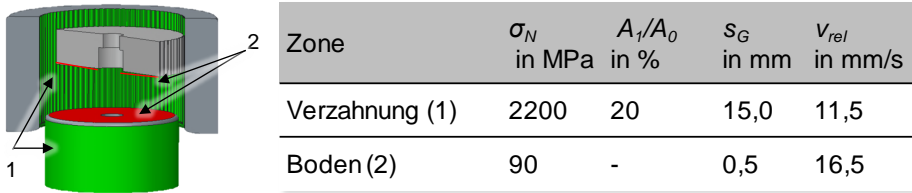


Bild 15: Maximalwerte für tribologische Beanspruchungen (numerisch) kombinierter Tiefziehstauchprozess (DCo4, $s_o = 2$ mm, $F_U = 1000$ kN, $F_K = 400$ kN, $m = 0,1$) nach [156]

Im Bereich der Verzahnung werden die Funktionselemente ausgeformt. Dadurch treten vergleichsweise hohe Kontaktnormalspannungen auf. Beim kombinierten Tiefziehstauchprozess nimmt die Kontaktnormalspannung Werte von bis zu 2200 MPa an. In der Zone des Bauteilbodens liegt lediglich einen Maximalwert von 90 MPa vor. Derselbe Zusammenhang ist für die Oberflächenvergrößerung identifizierbar. Dies ist ebenfalls bedingt durch die Ausformung der Funktionselemente. Beim Fließpressprozess ist auch ein signifikanter Unterschied zwischen zwei Bauteilzonen erkennbar, Bild 16.

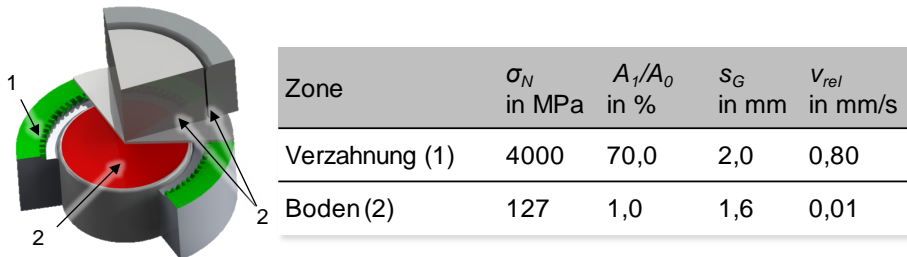


Bild 16: Maximalwerte für tribologische Beanspruchungen (numerisch) Fließpressprozess (DCo4, $s_o = 2,00$ mm, $F_K = 360$ kN, $F_{GH} = 40$ kN, Hub 1,7 mm, $m = 0,1$) nach [156]

Der Unterschied in den tribologischen Beanspruchungen zwischen den beiden Zonen beeinflusst den Stofffluss. Vor allem durch die vergleichsweise hohen Kontaktnormalspannungen und Oberflächenvergrößerungen im Verzahnungsbereich kommt es während der Umformung zu einem Stofffluss vom Verzahnungsbereich in den Bodenbereich. Dies führt zu einer nicht vollständigen Formfüllung der Funktionselemente. In Bild 17 ist dies für ein $4,5^\circ$ Segment der Funktionselemente im kombinierten Prozess gezeigt.

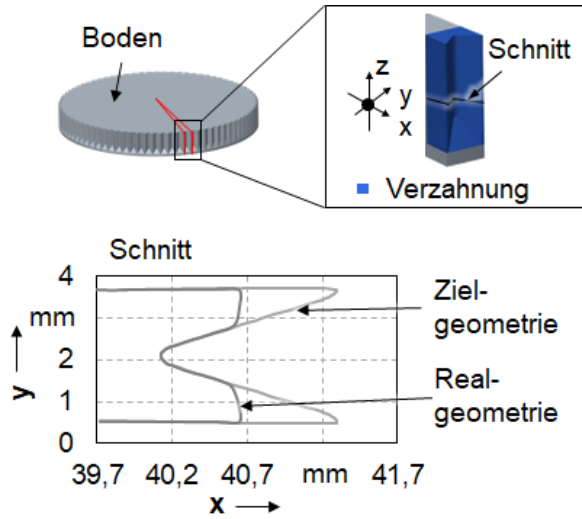


Bild 17: Prozessgrenze kombinierter Tiefziehstauchprozess

Beim Fließpressprozess liegt ebenso eine nicht vollständige Formfüllung der Funktionselemente vor. Dies ist in Bild 18 exemplarisch für das Mitnehmerelement dargestellt.

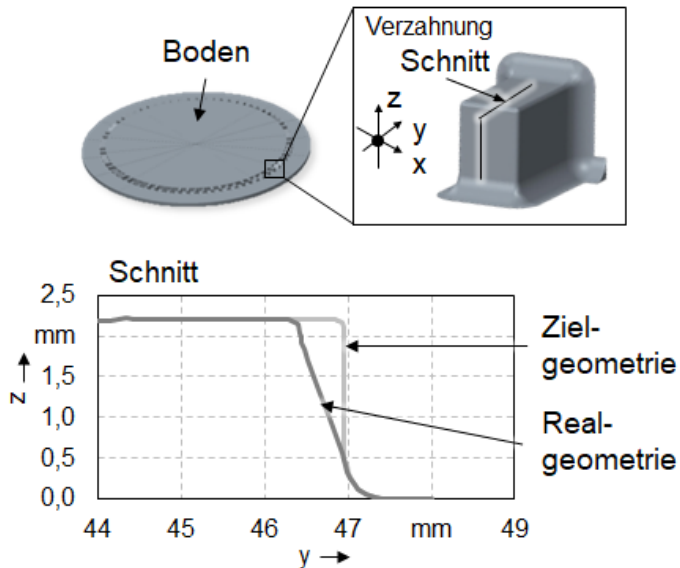


Bild 18: Prozessgrenze Fließpressprozess für ein Mitnehmerelement

Diese Prozessgrenze beeinflusst das Einsatzverhalten der Bauteile negativ. Somit gilt es zu untersuchen, wie der Stofffluss über eine Modifikation der tribologischen Bedingungen steuerbar ist. Auf Basis der tribologischen Beanspruchungen ist eine geeignete Modifikation der Reibfaktoren auszuwählen, um den Prozessgrenzen beider Prozesse entgegen zu wirken. Für eine Erhöhung der Formfüllung ist der Stofffluss im Bereich der Verzahnung zu begünstigen. Dies wirkt einem Abfließen aus diesem Bereich entgegen. Im Bauteilboden ist der Stofffluss zu hemmen. Prinzipiell gilt, dass eine hohe Reibung den Stofffluss behindert und eine niedrige Reibung diesen begünstigt. Auf Basis dieses Zusammenhangs sollten ein vergleichsweise niedriger Reibfaktor im Bereich der Funktionselemente und ein hoher Reibfaktor im Bauteilboden zu einer positiven Beeinflussung des Stoffflusses führen. Zur zielgerichteten Einstellung der Reibfaktorverhältnisse wurde eine numerische Machbarkeitsanalyse durchgeführt.

5.2 Stoffflusssteuerung durch Adaption der tribologischen Bedingungen

Mit Hilfe einer numerischen Machbarkeitsanalyse können Anforderungen an das tribologische System abgeleitet werden. Für die numerischen Analysen wurden die FE Modelle der in Abschnitt 4.5 vorgestellten Prozesse genutzt. Die Analyse lokal variierender tribologischer Systeme erfolgt über eine lokale Einstellung unterschiedlicher Reibfaktoren. Eine Zielgröße ist die Erweiterung der in Abschnitt 4.5 vorgestellten geometrischen Prozessgrenzen, um das Einsatzverhalten der Bauteile positiv zu beeinflussen. Eine weitere Zielgröße besteht in der Begrenzung der Umformkräfte, da hohe Kräfte zu hohen Werkzeugbeanspruchungen und damit einem frühzeitigen Werkzeugversagen führen können.

Wie im vorhergehenden Abschnitt erwähnt, sind im Bereich der Verzahnung niedrige und im Bereich des Bodens hohe Reibfaktoren einzustellen. Es gilt allerdings die Frage zu klären, wie die Reibfaktoren zu wählen sind, um ein optimales Ergebnis in Hinblick auf Formfüllung und Umformkräfte zu erreichen. Hierfür wurden zwei Ansätze verfolgt. Einerseits wurde untersucht, welchen Einfluss der Unterschied bzw. der Gradient zwischen den Reibfaktoren im Bereich der Verzahnung und im Bodenbereich $\Delta m_{\text{Boden/Verzahnung}}$ hat. Der Reibfaktorunterschied wird in Gleichung 1 definiert.

$$\Delta m_{\text{Boden/Verzahnung}} = m_{\text{Boden}} - m_{\text{Verzahnung}} \quad (1)$$

Andererseits wurde analysiert, welchen Einfluss der Reibfaktor im Verzahnungsbereich $m_{\text{Verzahnung}}$ hat. Bild 19 zeigt den abgeleiteten Versuchsplan. Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde die Machbarkeitsanalyse für beide Blechmassivumformprozesse durchgeführt.

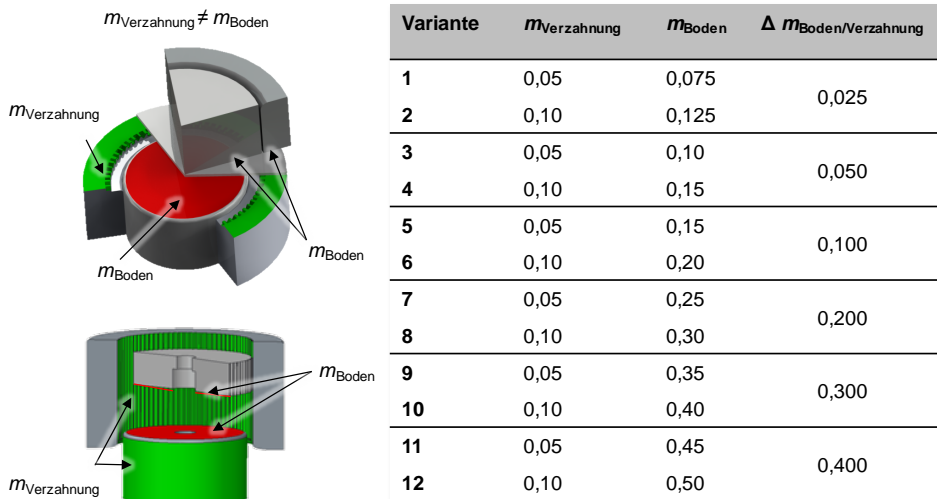


Bild 19: Versuchsplan der numerischen Machbarkeitsanalyse

Es wurden insgesamt sechs verschiedene Reibfaktorunterschiede $\Delta m_{\text{Boden/Verzahnung}}$ mit Werten zwischen 0,025 und 0,4 untersucht. Der kleinste analysierte Reibfaktor hat einen Wert von 0,05. Dieser Wert konnte in Laborversuchen als untere Grenze identifiziert werden. Der größte Wert ist 0,5. Dieser Wert wurde gewählt, um eine möglichst große Bandbreite an Gradienten zu untersuchen, und stellt lediglich eine fiktive obere Grenze dar. Für alle sechs Ausprägungen wurden je zwei Niveaus untersucht. Um dies zu realisieren, wurde zur Erzeugung desselben Reibfaktorunterschiedes für $m_{\text{Verzahnung}}$ 0,05 oder 0,1 gewählt.

Analyse des Funktionsbereichs

Zur Bewertung der Wirksamkeit der verschiedenen Reibfaktor Anpassungen wird die Ausformung der Funktionselemente analysiert. Bild 20 zeigt die Auswertebereiche. Für die Auswertung wurde das Materialvolumen in den gezeigten Bereichen mit Hilfe der CAD Software Creo Parametric 2.0 bestimmt. Zur Ableitung der prozentualen Formfüllung wurde das ermittelte Volumen mit dem Zielvolumen ins Verhältnis gesetzt.

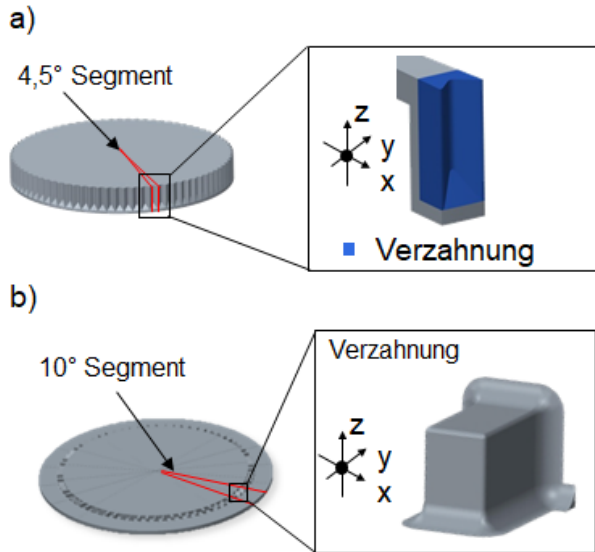


Bild 20: Auswertebereich a) kombiniertes Tiefziehstauchprozess und b) Fließpressprozess

Bild 21 zeigt die Ergebnisse der prozentualen Formfüllungen. Für den Fließpressprozess in Bild 21 b) ist lediglich das Rechteckelement respektive Mitnehmerelement gezeigt, da dies sensibler auf eine Änderung der Reibung reagiert.

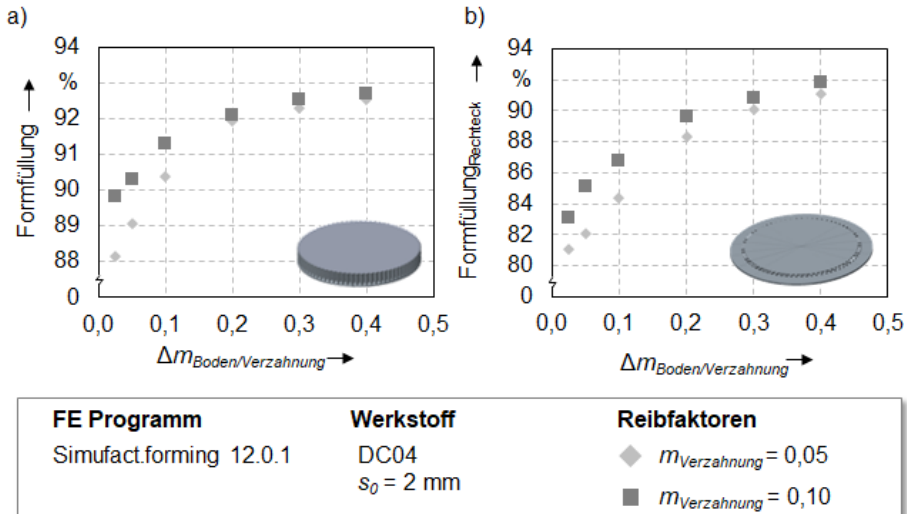


Bild 21: Formfüllung Funktionselemente a) kombiniertes Tiefziehstauchprozess und b) Fließpressprozess

Die Formfüllung des Dreieckselements nimmt bereits Werte von über 90 % an. Bei beiden Prozessen steigt die Formfüllung mit zunehmenden Gradienten $\Delta m_{\text{Boden/Verzahnung}}$. Für den kombinierten Tiefziehstauchprozess in Bild 21 a) liegt die Formfüllung bei einem Reibfaktorunterschied von 0,025 für $m_{\text{Verzahnung}} = 0,05$ bei 88,17 %. Für einen Gradienten von 0,1 steigt diese auf einen Wert von 90,39 %. Bei einem Gradienten von 0,4 weisen die Funktionselemente einen Formfüllungswert von 92,71 % auf. Durch die Steigerung des Gradienten von 0,025 auf 0,400 ist somit eine Zunahme der Formfüllung um circa 5 % realisierbar. Für das Niveau $m_{\text{Verzahnung}} = 0,1$ ist eine Steigerung um circa 3 % realisierbar. Für den Fließpressprozess in Bild 21 b) steigt die Formfüllung über die gesamte Bandbreite der Gradienten um circa 10 % für $m_{\text{Verzahnung}} = 0,1$ und um circa 12 % für $m_{\text{Verzahnung}} = 0,05$. Somit ist durch eine lokale Anpassung der Reibfaktoren beim Fließpressprozess eine stärkere Beeinflussung der Formfüllung realisierbar als beim kombinierten Prozess. Eine mögliche Ursache für die Unterschiede kann in der Elementform liegen. Ein rechteckförmiges Element scheint sensitiver auf eine Reibungsänderung zu reagieren als ein Verzahnungselement, welches eine dreiecksförmige Geometrie aufweist. Dies wird zusätzlich durch die Ergebnisse der numerischen Analyse des Fließpressprozesses bestätigt, da für das rechteckförmige Element auch hier eine vergleichsweise geringere Steigerung der Formfüllung bei einer Anpassung der tribologischen Bedingungen identifiziert wurde. Prinzipiell zeigen die Ergebnisse, dass zur Steigerung der Formfüllung ein möglichst hoher Reibfaktorunterschied zwischen Boden- und Verzahnungsbereich zu wählen ist. Des Weiteren beeinflusst das Niveau Einfluss die Formfüllung. Je höher der Reibfaktor im Bereich der Verzahnung ist, desto höher ist die Formfüllung. Allerdings nimmt mit einem steigenden Reibfaktorunterschied der Einfluss des Reibfaktors im Verzahnungsbereich ab. Des Weiteren ist über die gesamte Bandbreite eine höhere Steigerung der Formfüllung durch das niedrigere Niveau $m_{\text{Verzahnung}} = 0,05$ erreichbar.

Analyse des Bauteilbodens

Um den Materialfluss in den Boden der umgeformten Komponenten zu bewerten, wurde als weitere geometrische Prozessgrenze der Materialüberschuss in diesem Bereich analysiert, Bild 22. Je höher der Reibfaktorunterschied zwischen den beiden Zonen ist, desto niedriger ist der Materialüberschuss. Dies deutet auf einen gehemmten Materialfluss in den Bodenbereich hin und bestätigen die Ergebnisse in Bild 21. Bei einer höheren Formfüllung der Funktionselemente wird mehr Materialvolumen im Verzahnungsbereich gehalten, wodurch weniger Material in den Bauteilboden abfließt. Beim kombinierten Prozess wird bei einem Gradienten von 0,4 der

Materialüberschuss auf circa 0,1 % reduziert. Somit wird der Materialfluss in den Boden nahezu komplett unterbunden.

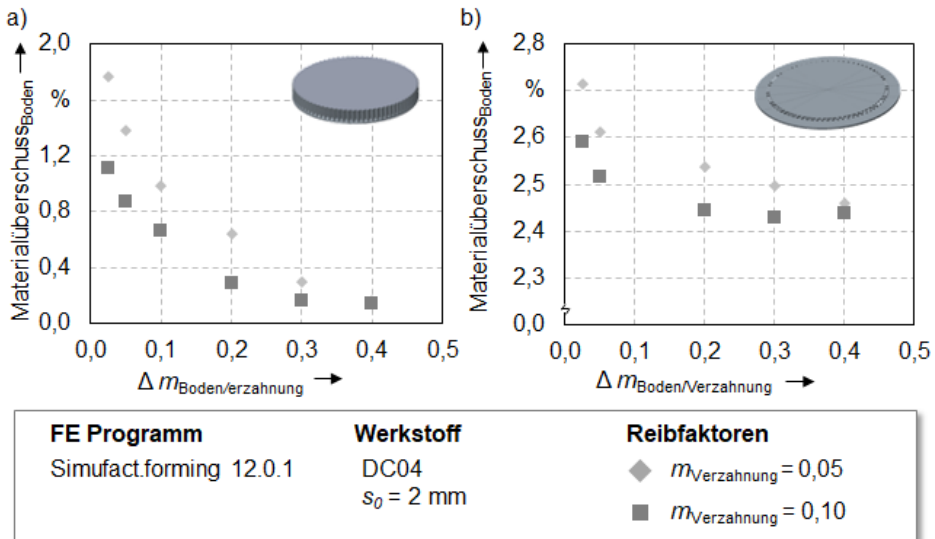


Bild 22: Materialüberschuss Boden für a) kombinierter Tiefziehstauchprozess und b) Fließpressprozess

Beim Fließpressprozess wird der Überschuss bei einem Reibfaktorunterschied von 0,4 auf circa 2 % reduziert. Der höhere Wert für den Materialüberschuss beim Fließpressprozess ist durch den Werkzeugaufbau bedingt, da beim Fließpressprozess kein geschlossenes Gesenk vorliegt. Insgesamt ist festzuhalten, dass zur Erweiterung dieser Prozessgrenze ein möglichst hoher Reibfaktorunterschied zwischen den beiden Zonen zu wählen ist.

Analyse der benötigten Umformkräfte

Die Analyse der Umformkräfte zeigt, dass mit zunehmendem Reibfaktorunterschied die Umformkraft steigt, Bild 23. Der Kraftanstieg wirkt sich direkt auf die wirkenden Spannungen aus, was wiederum die Werkzeugbeanspruchbarkeit negativ beeinflusst. Dies ist über den Anstieg der Reibfaktoren im Bauteilboden und den dadurch erhöhten Fließwiderstand erklärbar. Für das Niveau $m_{\text{Verzahnung}} = 0,1$ steigt die Umformkraft für den Fließpressprozess über den untersuchten Bereich um 45 %. Beim Niveau $m_{\text{Verzahnung}} = 0,05$ liegt ein Anstieg von 64 % über die gesamte Bandbreite der Gradienten vor. Beim kombinierten Prozess liegt für $m_{\text{Verzahnung}} = 0,05$

ein Anstieg von 14 % vor. Bei $m_{\text{Verzahnung}} = 0,1$ kommt es zu einem Kraftanstieg von 10 %. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der Reibfaktor im Verzahnungsbereich entscheidend ist. Ein niedriger Wert in diesem Bereich führt tendenziell zu geringeren Umformkräften. Dies ist positiv im Hinblick auf die Werkzeugbeanspruchungen zu bewerten.

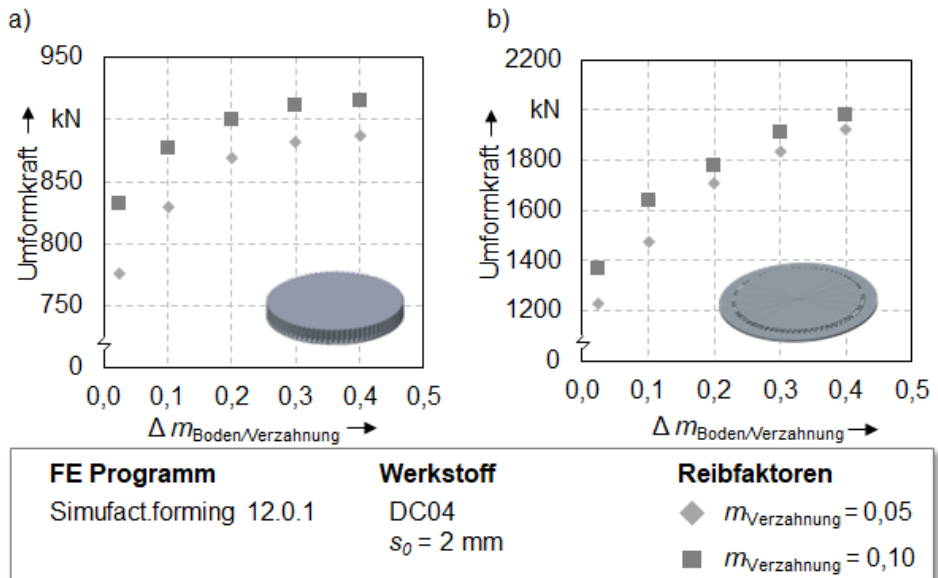


Bild 23: Umformkraft für a) kombinierter Tiefziehstauchprozess und b) Fließpressprozess

Zusammenfassende Bewertung

Aus den Ergebnissen der numerischen Machbarkeitsanalyse ist ableitbar, dass eine lokale Anpassung der tribologischen Bedingungen zur Steuerung des Stoffflusses in der Blechmassivumformung geeignet ist. Für beide Blechmassivumformprozesse wurden die gleichen Tendenzen identifiziert, was auf eine Übertragbarkeit der Ergebnisse schließen lässt. Zur Ableitung von Empfehlungen bezüglich der Modifikation des tribologischen Systems fasst Bild 24 die wesentlichen Einflüsse zusammen. Ein möglichst großer Unterschied zwischen den Reibfaktoren im Verzahnungsbereich $m_{\text{Verzahnung}}$ und im Bodenbereich m_{Boden} nimmt einen signifikanten Einfluss auf die geometrischen Prozessgrenzen. Durch eine Vergrößerung von $\Delta m_{\text{Boden/Verzahnung}}$ wird die Formfüllung der Funktionselemente positiv beeinflusst und damit einhergehend der Materialüberschuss im Boden reduziert. Eine Verringerung des Reibfaktors im Verzahnungsbereich und damit eine Senkung des Reibfaktorniveaus wirken sich negativ auf die beiden geometrischen

Prozessgrenzen aus. Im Hinblick auf die Formfüllung ist somit ein hoher Reibfaktorunterschied, bei einem gleichzeitig hohen Reibfaktor im Verzahnungsbereich zu wählen. Die Analyse der Umformkräfte zeigt, dass ein Anstieg des Reibfaktorunterschieds zu einem Anstieg der Umformkräfte führt. Eine Verringerung der Umformkräfte ist unabhängig vom Reibfaktorunterschied durch eine Reduzierung von $m_{\text{Verzahnung}}$ möglich. Ein Kompromiss zur Erweiterung der geometrischen Prozessgrenzen bei gleichzeitig niedrigen Umformkräften ist die Kombination aus einem hohen Reibfaktorunterschied $\Delta m_{\text{Boden/Verzahnung}}$ und niedrigen Reibfaktoren im Verzahnungsbereich $m_{\text{Verzahnung}}$. Auf Basis dieser Anforderung bedarf es Maßnahmen, um die Reibung lokal zu erhöhen bzw. zu reduzieren.

	Geometrische Prozessgrenzen		Umformkraft
	Formfüllung Funktionsbereich	Materialüberschuss Bauteilboden	
$\Delta m_{\text{Boden/Verzahnung}} \uparrow$	↑↑	↑↑	↓↓
$m_{\text{Verzahnung}} \downarrow$	↓	↓	↑↑

↑ positiv ↑↑ stark positiv ↓ negativ ↓↓ stark negativ

Bild 24: Bewertungsmatrix

6 Entwicklung von maßgeschneiderten tribologischen Systemen im Laborversuch

Auf Basis der Ergebnisse in Kapitel 5 werden lokal einstellbare Maßnahmen zur Erhöhung und zur Reduzierung der Reibung benötigt. Da eine lokale Variation der Reibung über die Verwendung unterschiedlicher Schmierstoffe nicht realisierbar ist, wird zunächst ein geeigneter Schmierstoff ausgewählt. Dieser wurde für sämtliche weiteren Untersuchungen genutzt. Zur Umsetzung von lokal variierenden Reibbedingungen wurden werkstück- und werkzeugseitige Oberflächenmodifikationen untersucht. Hierfür werden die tribologisch relevanten Oberflächeneigenschaften und die Reibung im Laborversuch ermittelt. Durch das Ableiten von funktionalen Zusammenhängen zwischen diesen Eigenschaften werden die tribologischen Wirkmechanismen identifiziert. Anhand von numerischen und experimentellen Untersuchungen werden diese abschließend verifiziert.

6.1 Reibungsbeeinflussung durch Schmierstoffsysteme

Im Rahmen der Arbeit werden unterschiedliche Oberflächenmodifikationen mit dem Ziel einer Reibungsbeeinflussung untersucht. Zur Umsetzung der Analysen gilt es zunächst, einen geeigneten Schmierstoff auszuwählen. Als geeignet wird ein Schmierstoff bewertet, wenn er während der Umformung einen tragfähigen Schmierfilm im Werkzeug-Werkstück-Kontakt bildet. Dadurch werden beispielsweise Verschleiß und Werkzeugbeanspruchungen reduziert. Zur Bewertung der Tragfähigkeit des Schmierfilms wurden die Reibung im Laborversuch ermittelt und die Oberflächen nach der Umformung optisch charakterisiert. Niedrige Reibfaktoren und hohe Oberflächenrauheiten nach der Umformung sind als positiv zu bewerten. Untersucht wurden die in Abschnitt 4.1 aufgeführten konventionellen Schmierstoffe aus der Blech- und Massivumformung. Für sämtliche Schmierstoffe wurden Ringstauch- und Zapfenpressversuche mit dem Werkstoff DCo₄ durchgeführt. In Stichversuchen konnte die Übertragbarkeit auf den Werkstoff DP600 nachgewiesen werden. Als Schmierstoffmenge wurde 10 g/m² verwendet. Diese Menge wurde in Vorversuchen ermittelt. Ab diesem Wert laufen die Reibfaktoren in eine Sättigung, sodass davon auszugehen ist, dass die Schmierstoffmenge ausreichend ist, um einen tragfähigen Schmierfilm zu bilden.

Schmierstoffe aus der Blechumformung

Bild 25 stellt die Ergebnisse des Zapfenpress- und Ringstauchversuchs für die Schmierstoffe aus der Blechumformung dar. Die Tendenzen sind in beiden Laborversuchen identisch. Das Tiefziehöl KTL N 16 weist im Zapfenpressversuch mit $0,119 \pm 0,002$ einen höheren Reibfaktor auf als das Hotmelt PN 951 HM mit einem Reibfaktor von $0,083 \pm 0,001$. Eine mögliche Ursache für den Unterschied ist die Konsistenz der Schmierstoffe. Das Tiefziehöl wird bei hohen Flächenpressungen schneller aus der Wirkfuge herausgedrückt als das wachshaltige Hotmelt. Dies führt zu einem direkten Kontakt von Werkstück und Werkzeug, was zu einer verstärkten Interaktion der Rauheitsspitzen und damit zu höheren Reibfaktoren führt.

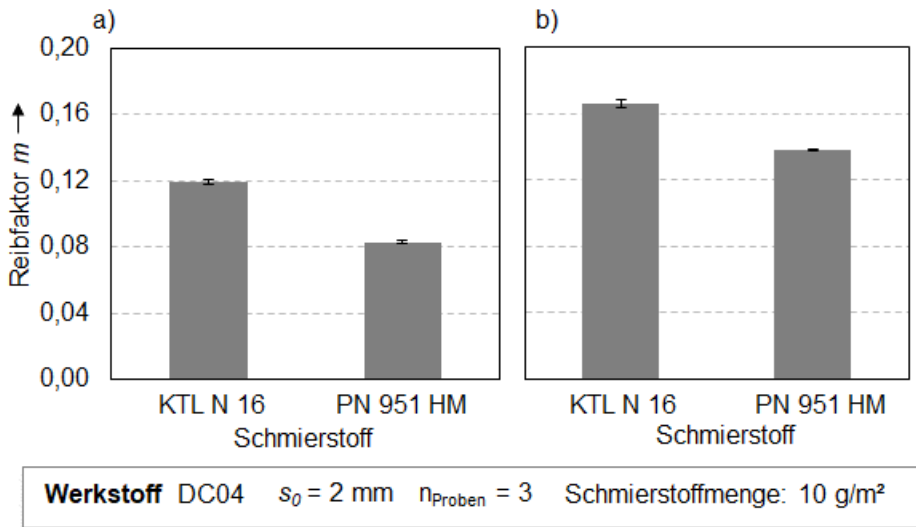


Bild 25: Ergebnisse der Laborversuche a) Zapfenpress- und b) Ringstauchversuch

Bild 26 zeigt die Topographie und ausgewählte Rauheitswerte von umgeformten Zapfenpressproben. Die Verwendung des Schmierstoffs KTL N 16 führt zu einer höheren Oberflächeneinglättung. Eine höhere Einglättung liegt vor, wenn die Werkstück- und Werkzeugoberfläche verstärkt miteinander in Kontakt treten. Dies bestätigt die aufgestellte Hypothese, dass das Öl bei hohen Flächenpressungen schneller aus der Wirkfuge herausgedrückt wird, die Trennwirkung zwischen Werkstück- und Werkzeugoberfläche reduziert ist und somit die Reibung ansteigt.

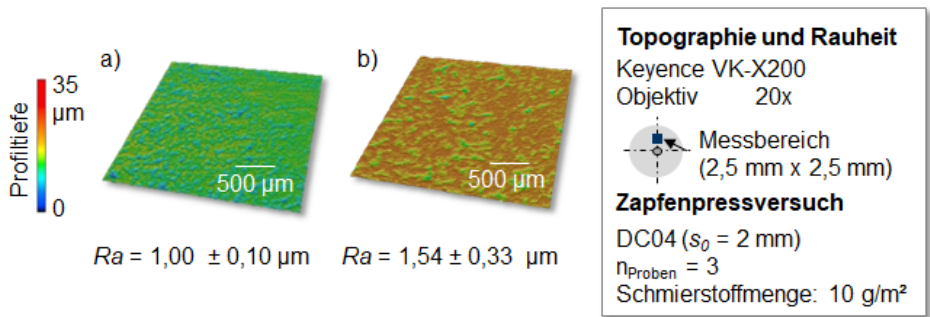


Bild 26: Topographienaufnahmen von mit a) KTL N 16 und b) PN 951 HM umgeformten Zapfenpressproben

Schmierstoffe aus der Massivumformung

Bild 27 zeigt die Ergebnisse der beiden Laborversuche für die Systeme aus der Massivumformung. Im Zapfenpressversuch ist zu sehen, dass die Zinkphosphatschicht beim Vergleich von 1 und 2 keinen Mehrwert im Hinblick auf die Bildung einer tragfähigen Schmierschicht hat.

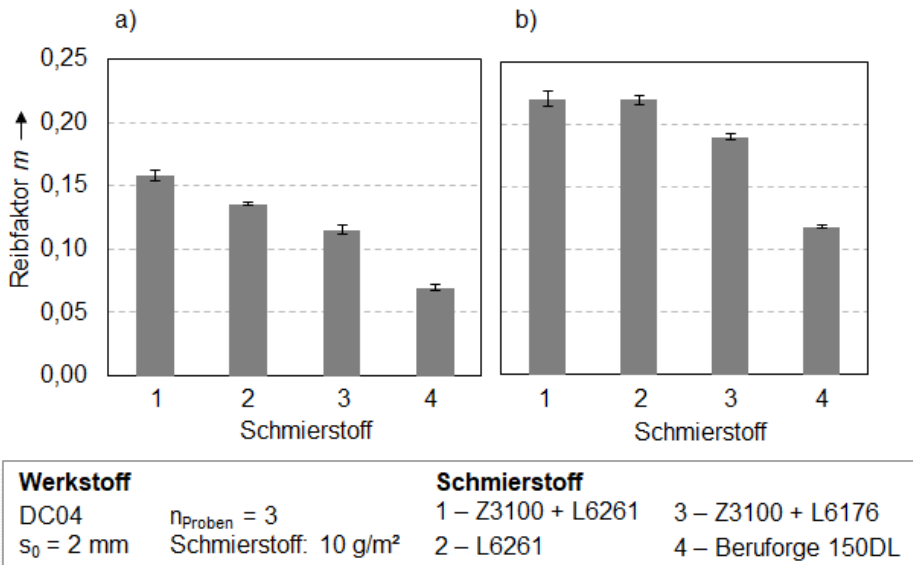


Bild 27: Ergebnisse der Laborversuche a) Zapfenpress- und b) Ringstauchversuch

Der Reibfaktor mit Zinkphosphatschicht nimmt einen Wert von $m = 0,16 \pm 0,004$ an. Ohne die Konversionsschicht liegt der mittlere Reibfaktor bei 0,13. Dies deutet darauf hin, dass in der Blechmassivumformung unter Laborbedingungen keine Schmierstoffträgerschicht benötigt wird.

Die reaktive Alkalseife L6176 weist mit $m = 0,12 \pm 0,004$ einen niedrigeren Reibfaktor auf als der Polymerschmierstoff. Durch den Einsatz von Beruforge 150DL wird die Reibung weiter signifikant reduziert, auf $m = 0,07$. Dies kann über die Schmierstoffeigenschaften erklärt werden. Die im Beruforge 150DL enthaltenen Wachspartikel zeichnen sich durch eine hohe Druckbeständigkeit aus, was dazu führt, dass der Schmierstoff in der Wirkfuge gehalten wird und die Wirkflächen voneinander getrennt werden. Neben den Reibfaktoren wurden zur Untersuchung der Oberflächeneinglättung die Topographien nach der Umformung analysiert, Bild 28.

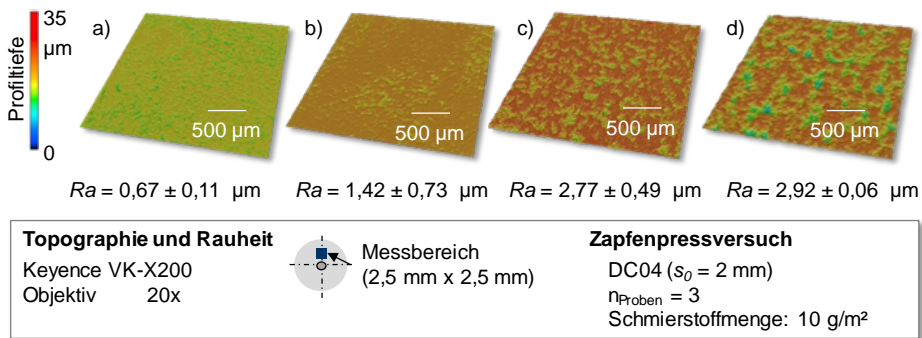


Bild 28: Topographieaufnahmen von mit a) Z3100 + L6261, b) L6261, c) Z3100 + L6176 und d) Beruforge 150DL umgeformten Zapfenpressproben

Die größte Einglättung respektive niedrigste Rauheit nach der Umformung weist die Probe mit dem Schmierstoff Z3100 + L6261, welche auch zur höchsten Reibung führt, auf. Dies deutet darauf hin, dass es zu einer verstärkten Interaktion von Werkstück- und Werkzeugoberfläche kommt. Die niedrigste Einglättung respektive höchste Rauheit weist die Probe mit Beruforge 150DL auf. R_a liegt bei $2,92 \pm 0,06$ µm. Dies ist der Schmierstoff mit dem niedrigsten Reibfaktor. Die beiden anderen Schmierstoffe liegen zwischen diesen und bestätigen die Ergebnisse der Laborversuche. Je höher die Reibung ist, desto höher ist die Einglättung.

Insgesamt ist festzuhalten, dass bei den untersuchten Schmierstoffen aus Blech- und Massivumformung der Schmierstoff Beruforge 150DL zum niedrigsten Reibfaktor bei gleichzeitig geringer Oberflächeneinglättung geführt hat. Dies deutet darauf hin, dass dieser Schmierstoff einen tragfähigen Schmierfilm ausbildet und Werkstück- und Werkzeugoberfläche während der Umformung voneinander trennt. Somit werden Werkzeugbeanspruchungen und Verschleiß niedrig gehalten. Auf Basis dieser Ergebnisse wird

der Schmierstoff Beruforge 150DL als Referenzschmierstoff für sämtliche Untersuchungen eingesetzt.

6.2 Reibungsbeeinflussung durch werkstückseitige Oberflächenmodifikationen

Basierend auf den Ergebnissen der numerischen Machbarkeitsanalyse in Abschnitt 5 werden Methoden zur lokalen Erhöhung und Reduzierung der Reibung benötigt. Prinzipiell ist eine lokale Anpassung der tribologischen Bedingungen über eine Modifikation der Werkstück- oder Werkzeugoberfläche möglich. Im folgenden Abschnitt wird jeweils eine Möglichkeit zur Erhöhung und zur Reduzierung der Reibung über die Modifikation der Platinenoberfläche analysiert. Ziel ist die Identifikation der tribologischen Wirkmechanismen, um die jeweiligen Maßnahmen zielgerichtet für die Blechmassivumformung einzusetzen. Die Untersuchungen wurden für sämtliche Oberflächenmodifikationen mit den Laborversuchen Zapfenpress- und Ringstauchversuch und den Werkstoffen DCo4 und DP600 durchgeführt. Aufgrund der Vergleichbarkeit der Ergebnisse sind an einigen Stellen nur ausgewählte Ergebnisse dargestellt.

6.2.1 Abrasivstrahlen von Platinen

Das in Abschnitt 4.2.1 beschriebene Abrasivstrahlen ist eine Möglichkeit, die Reibung durch eine Anpassung der Platinenoberfläche zu beeinflussen [145]. Zum verbesserten Verständnis der tribologischen Wirkmechanismen sind die tribologisch relevanten Randzoneneigenschaften zu analysieren. Im Falle des platinenseitigen Abrasivstrahlens sind Rauheit und oberflächennahe Verfestigung von Bedeutung. Um den Einfluss dieser beiden Randzoneneigenschaften auf die Reibung zu analysieren, wurde der Strahlprozess genutzt. Durch das Verwenden unterschiedlicher Strahlrücke und Strahlmitteldurchmesser sollte ein breites Spektrum an abweichenden Randzoneneigenschaften eingestellt werden. Die untersuchten Parameter sind in Abschnitt 4.2.1 genannt. Bild 29 zeigt zusätzlich REM Aufnahmen der verwendeten Strahlmittel, um die Korngrößenunterschiede zu verdeutlichen. In den folgenden Abschnitten werden die tribologisch relevanten Oberflächeneigenschaften analysiert, die Reibeigenschaften im Laborversuch untersucht und Korrelationen zwischen den Größen abgeleitet. Auf Basis der Korrelationen werden tribologische Wirkmechanismen identifiziert, welche abschließend durch numerische und experimentelle Untersuchungen verifiziert werden.

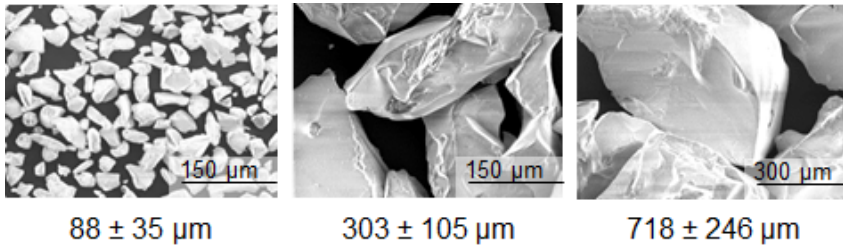


Bild 29: REM Aufnahmen der Strahlmittel

6.2.1.1 Charakterisierung abrasivgestrahlter Platinen

Durch den Aufprall der einzelnen Strahlmittelkörner auf die Werkstückoberfläche wird kinetische Energie an die Platinenoberfläche abgegeben. Aus dieser Energieübertragung und -umwandlung resultieren eine Oberflächenstrukturänderung und eine Änderung der mechanischen Eigenschaften der Randzone [148]. Beim Abrasivstrahlen wird die Oberflächenstruktur durch kantige Strahlmittel aufgeraut und eine oberflächennahe Verfestigung eingebracht.

Topographie

Bild 30 zeigt ausgewählte Topographieaufnahmen gestrahlter DCo4 Platinen, um topographische Charakteristika unterschiedlich gestrahlter Oberflächen zu verdeutlichen.

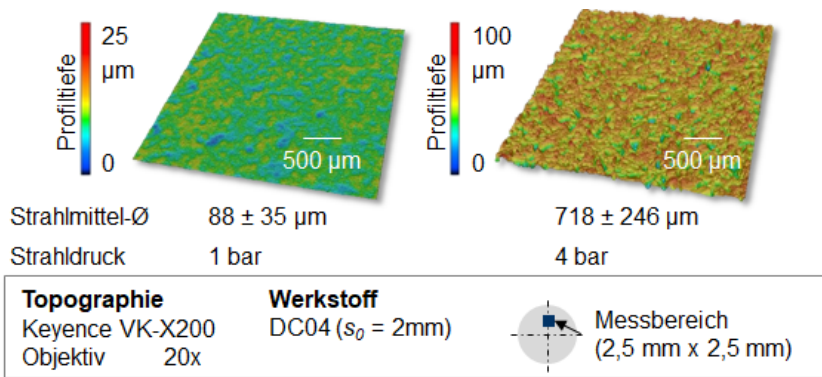


Bild 30: Topographieaufnahmen gestrahlter Platinenoberflächen nach [187]

Prinzipiell gilt, dass der durch das Strahlen erzeugte Rauheitsanstieg zu einem Anstieg der Reibung führt, da es zu einem verstärkten Verhaken der Rauheitsspitzen von Werkstück- und Werkzeugoberfläche kommt.

Um den Einfluss von Strahlmitteldurchmesser und Strahldruck zu quantifizieren, wurden die gemittelte Rautiefe R_z und die reduzierte Spitzenhöhe R_{pk} analysiert. Bild 31 zeigt, dass die gemittelte Rautiefe R_z für die Werkstoffe DCo₄ und DP600 ähnliche Tendenzen bezüglich der Rauheitsentwicklung aufweist.

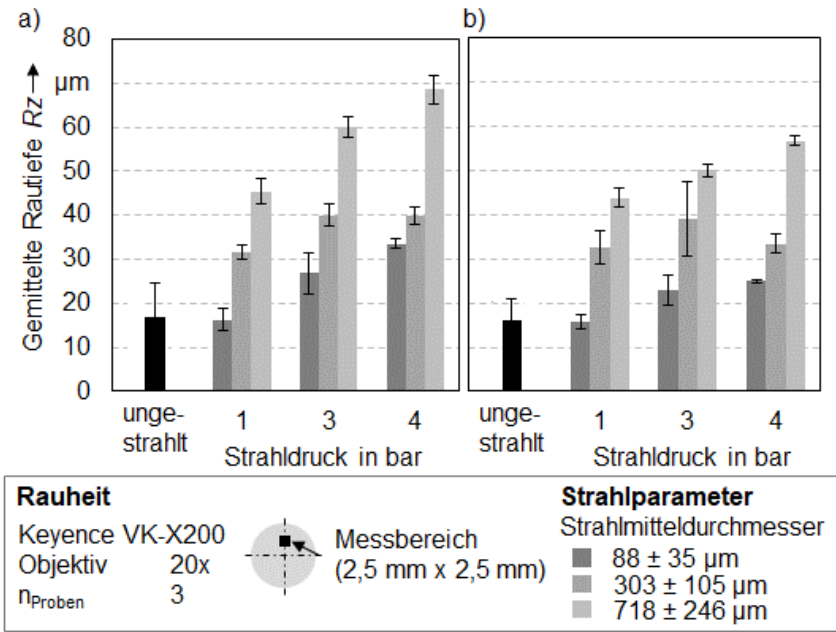


Bild 31: Gemittelte Rautiefe in Abhängigkeit von Strahlmitteldurchmesser und -druck für a) DCo₄ und b) DP600

Prinzipiell ist bei DP600 aufgrund der höheren Festigkeit und der niedrigeren Ausgangsrauheit jedoch eine geringere Zunahme der Rauheit zu erkennen. Die Werte für R_z zeigen, dass mit zunehmenden Strahlmitteldurchmesser und Strahldruck die Rauheit der Oberflächen zunimmt. Für einen Strahlmitteldurchmesser von $88 \pm 35 \mu\text{m}$ steigt die Rauheit für DCo₄ mit zunehmendem Strahl Druck um circa 100 %. Für den mittleren Strahlmitteldurchmesser kommt es über die untersuchte Bandbreite verschiedener Strahl drücke zu einer Rauheitssteigerung von 27 %. Beim größten Strahlmitteldurchmesser liegt diese prozentuale Steigerung bei 51%. Der Einfluss des Strahlmitteldurchmessers bei gleichbleibendem Strahl Druck ist deutlich signifikanter. Bei einem Strahl Druck von 3 bar steigt R_z vom kleinsten bis zum größten Strahlmitteldurchmesser um circa 125 % für DCo₄. Ähnliche Werte liegen für die beiden anderen Strahlmitteldurchmesser vor.

Da es beim Abrasivstrahlen aufgrund der kantigen Körner zu einem Oberflächenabtrag kommt, ist besonders der Spitzenbereich im Rauheitsprofil interessant. Die reduzierte Spitzenhöhe Rpk ist eine geeignete Rauheitskenngröße, um die Ausprägtheit der Rauheitsspitzen zu bewerten. Rpk bestätigt die Analyse von Rz , Bild 32.

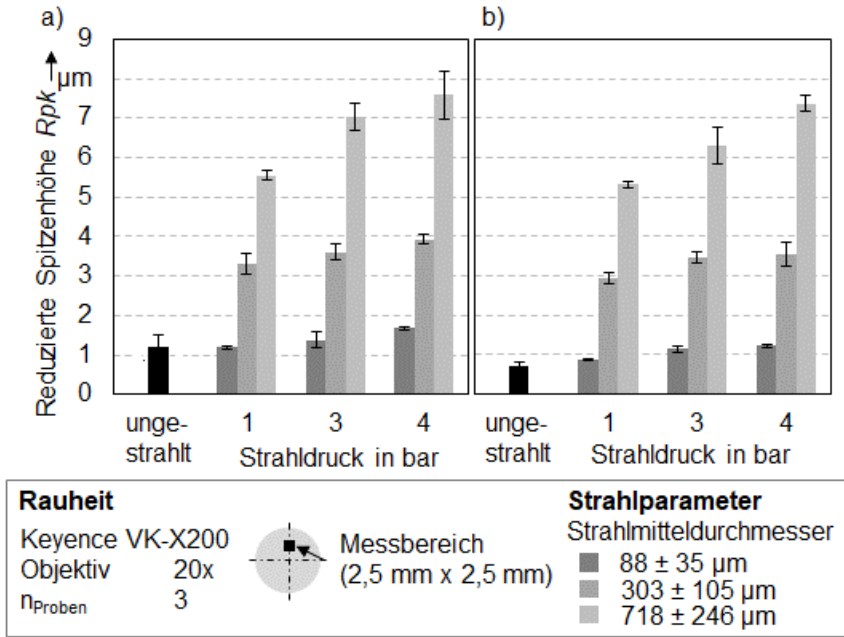


Bild 32: Reduzierte Spitzenhöhe in Abhängigkeit von Strahldurchmesser und -druck für a) DCo4 und b) DP600

Die signifikanteren Unterschiede zwischen den einzelnen Parametern und die reduzierten Standardabweichungen im Vergleich zu Rz verdeutlichen die Eignung dieser Rauheitskenngröße zur Beschreibung gestrahlter Platinenoberflächen. Mit zunehmenden Strahldruck und Strahlmitteldurchmesser ist der Spitzenbereich des Rauheitsprofils stärker ausgeprägt. Dies ist dadurch begründet, dass mehr Energie zum Materialabtrag eingebracht wird. Für eine Korngröße von $88 \pm 35 \mu\text{m}$ nimmt Rpk von 1 bis 4 bar um 40 % zu. Bei der größten Korngröße liegt eine Steigerung um 37 % vor. Der Einfluss eines variierenden Strahlmitteldurchmessers ist deutlich signifikanter. Bei einem Strahldruck von 1 bar nimmt Rpk über die gesamte Bandbreite der untersuchten Korngrößen um 370 % zu. Für 3 bar liegt die prozentuale Zunahme bei 410 %. Für 4 bar ist eine leicht niedrigere Zunahme von 350% zu verzeichnen. Eine Ursache für die Abnahme der

Rauheitssteigerung mit zunehmendem Strahlmitteldurchmesser kann sein, dass es bei einem hohen Strahldruck zu einem Brechen des Strahlguts beim Auftreffen auf die Oberfläche kommt, was die Aufrauung reduziert.

Verfestigung

Neben der Topographie kommt es durch die Energieübertragung beim Aufprall der Körner zu einer oberflächennahen Verfestigung. Die randnahe Verfestigung kann als Fließbehinderung auf den Werkstoff wirken, was wiederum die Reibschubspannung und damit die Reibung beeinflusst. Diese Randzoneneigenschaft wurde über Härtemessungen und Messungen der Halbwertsbreite von Röntgeninterferenzlinien erfasst. Bild 33 zeigt Ergebnisse der Mikrohärtmessungen an Platinen aus DCo4.

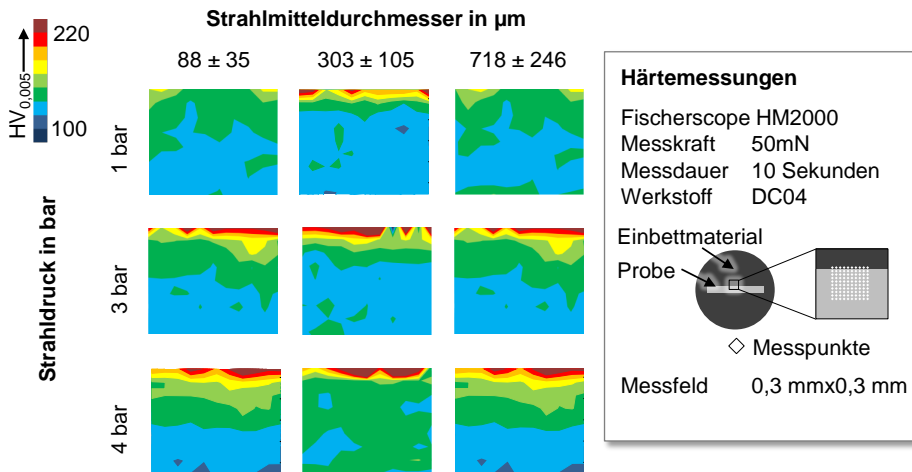


Bild 33: Härtemessungen gestrahlter Platinenoberflächen für DCo4

Im randnahen Bereich ist eine Tendenz zu veränderten Härtewerten mit zunehmenden Strahlmitteldurchmessern und Strahldrücken erkennbar. Neben einer Zunahme der Härtewerte nimmt die Tiefe der Verfestigung zu. Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, kommt es bei der Mikrohärtmessung im Schliff zu Problemen bei randnahen Messungen. Aufgrund dessen wurde zusätzlich die Halbwertsbreite der Röntgeninterferenzlinie als qualitatives Maß zur Beschreibung der Verfestigung genutzt. Mit zunehmendem Strahldruck steigt die Verfestigung bei beiden Werkstoffen an, Bild 34. Für den mittleren Strahlmitteldurchmesser $303 \pm 105 \mu\text{m}$ steigt die Verfestigung von $1,33 \pm 0,01$ über $1,42 \pm 0,01$ bis hin zu $1,46 \pm 0,01$ mit zunehmenden Strahldruck. Die prozentualen Zunahmen für den kleinen und

groben Strahlmitteldurchmesser liegen bei 8 % und 12 %. Der Einfluss des Strahlmitteldurchmessers weist keine eindeutige Tendenz auf.

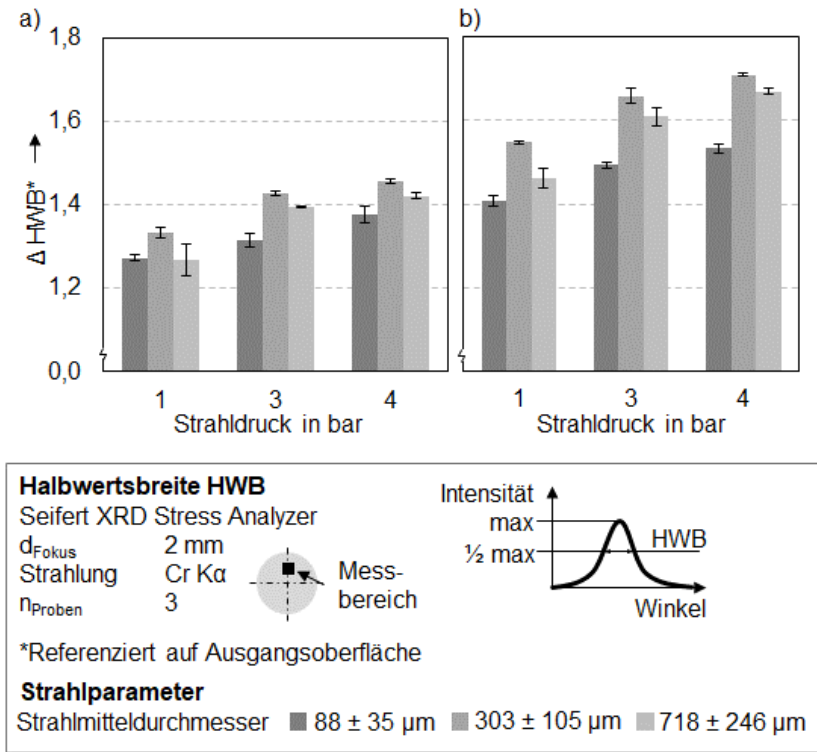


Bild 34: Verfestigung in Abhängigkeit von Strahldurchmesser und -druck für a) DCo4 und b) DP600

Für sämtliche Strahlrücke ist eine Zunahme der Verfestigung vom kleinsten zum mittleren Durchmesser erkennbar. Die Verfestigung nimmt dann vom mittleren zum groben Durchmesser ab. Erklärbar ist dieser Effekt über den zunehmenden Materialabtrag mit steigender Korngröße. Je größer der Materialabtrag beim Strahlen ist, desto weniger Energie wird in die Verfestigung gesteckt, was zu einer niedrigeren Zunahme der Verfestigung führt.

6.2.1.2 Reibverhalten abrasivgestrahlter Platinen

Zur Identifikation der tribologischen Wirkmechanismen abrasivgestrahlter Platinen wurden die Reibeigenschaften im Zapfenpress- und Ringstauchversuch ermittelt. Bild 35 zeigt die Ergebnisse des Zapfenpressversuchs für DCo4 und DP600.

6.2 Reibungsbeeinflussung durch werkstückseitige Oberflächenmodifikationen

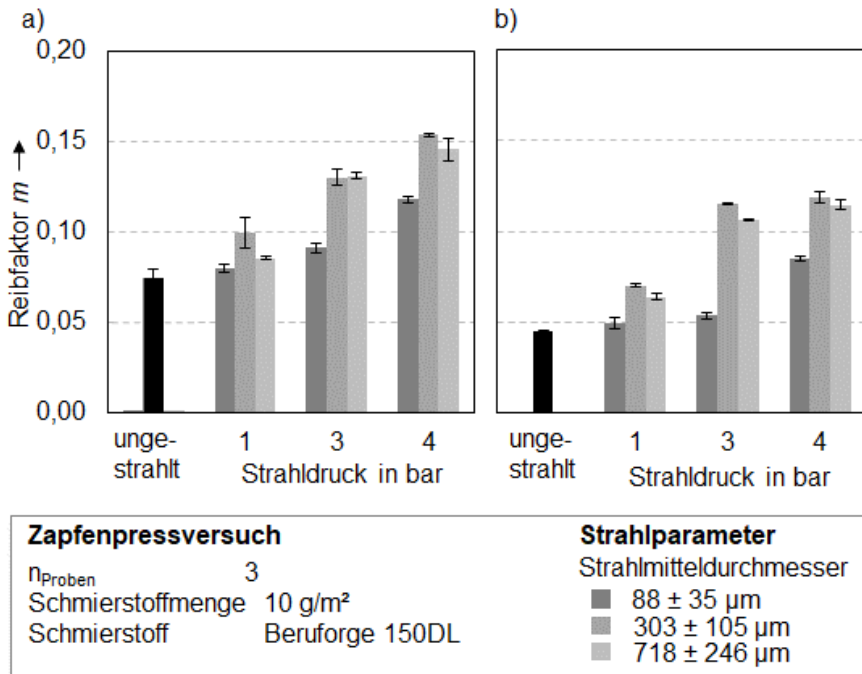


Bild 35: Reibfaktoren im Zapfenpressversuch für die Werkstoffe a) DCo4 und b) DP600

DP600 weist niedrigere Reibfaktoren auf als DCo4. Dies kann in der höheren Werkstofffestigkeit begründet liegen, da es zu einer geringeren Einglätung der Oberfläche und damit einer verringerten Wirkung der Randzoneigenschaften auf den Stofffluss kommt. Die untersuchten Platinen führen im Vergleich zu ungestrahlten Referenz für beide Werkstoffe zu einer Erhöhung der Reibung. Somit ist bestätigt, dass Abrasivstrahlen zur Reibungserhöhung und damit Stoffflusshemmung geeignet ist. Des Weiteren ist ein Zusammenhang zwischen den resultierenden Reibfaktoren und den Strahlparametern erkennbar. Wird der Einfluss des Strahlendrucks analysiert, zeigt sich, dass mit steigendem Strahlendruck die Reibung zunimmt. Für eine Korngröße von $88 \pm 35 \mu\text{m}$ liegt bei einem Druck von 1 bar für DCo4 ein Reibfaktor von $m = 0,08 \pm 0,002$ vor. Für einen Strahlendruck von 3 bar steigt der Reibfaktor auf $m = 0,09 \pm 0,002$. Bei 4 bar kann ein Reibfaktor von $m = 0,12 \pm 0,002$ gemessen werden. Insgesamt liegen für die drei Strahlmitteldurchmesser prozentuale Zunahmen von 50 %, 55 % und 70 % bei einem Anstieg des Strahlendrucks vor. Bei der Analyse des Einflusses des Strahlmitteldurchmessers ist lediglich vom feinen zum mittleren Durchmesser ein Anstieg der Reibung erkennbar. Vom mittleren zum groben

Korndurchmesser nimmt die Reibung erneut ab. Die Ergebnisse konnten durch den Ringstauchversuch bestätigt werden, Bild 36.

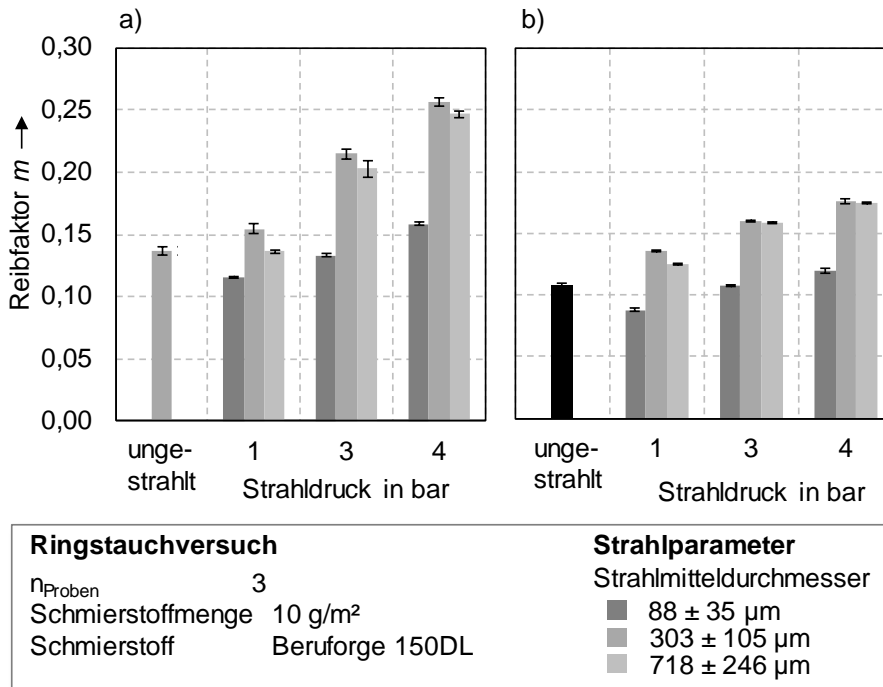


Bild 36: Reibfaktoren im Ringstauchversuch für die Werkstoffe a) DCo4 und b) DP600

Der Reibfaktor steigt bei gleichbleibender Korngröße mit zunehmendem Druck. Bei gleichbleibendem Druck nimmt der Reibfaktor zunächst zu und sinkt anschließend beim Übergang vom mittleren zum groben Strahlmitteldurchmesser ab.

6.2.1.3 Ableitung und Verifizierung funktionaler Zusammenhänge

Auf Basis der ermittelten Randzonen- und Reibeigenschaften werden funktionale Zusammenhänge zwischen diesen Eigenschaften abgeleitet. Darüber soll der Einfluss der verschiedenen Randzoneneigenschaften auf die Reibung und damit die tribologischen Wirkmechanismus abrasivgestrahlter Platinenoberflächen ermittelt werden.

Hypothesen zur tribologischen Wirkweise abrasivgestrahlter Platinen

Zur Ableitung der funktionalen Zusammenhänge werden die Randzonen- und Reibeigenschaften miteinander korreliert. Die Korrelationen von Rauheit respektive Verfestigung und Reibung werden für beide Laborversuche und beide Werkstoffe aufgestellt. Bild 37 zeigt die Korrelationen zwischen Reibfaktor und reduzierter Spitzenhöhe für sämtliche Werkstoffe und Laborversuche.

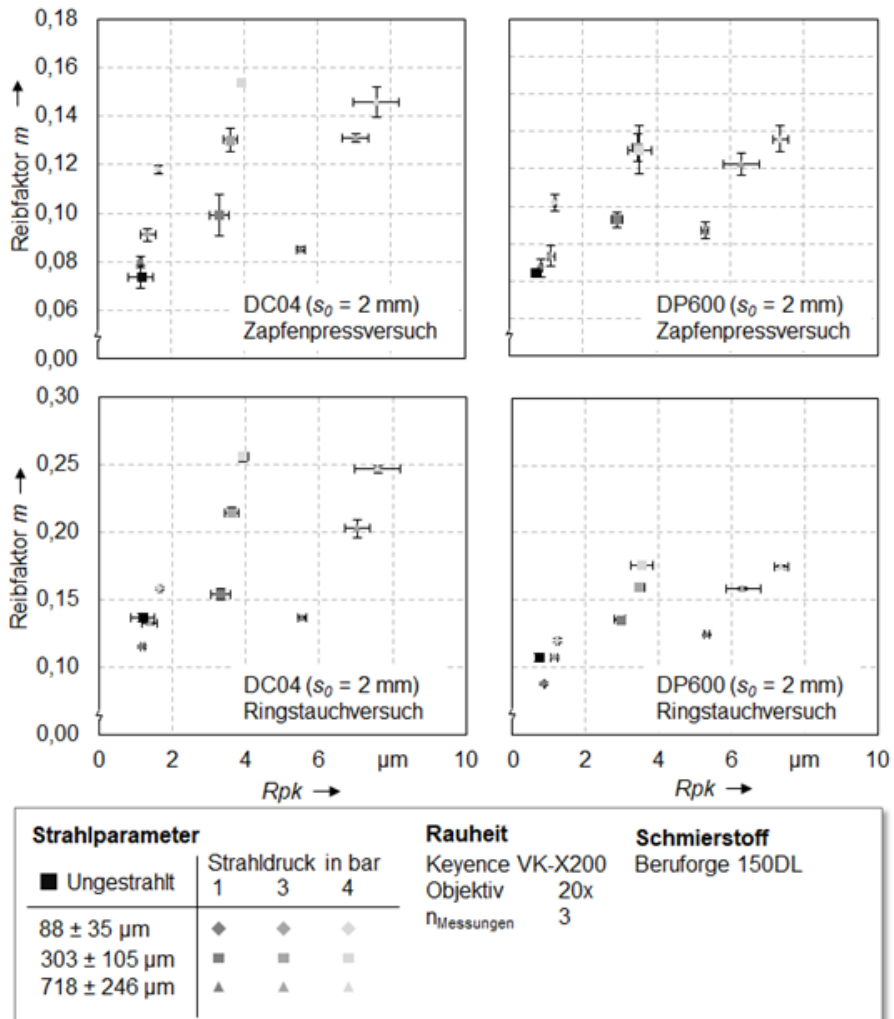


Bild 37: Korrelation von Rauheit und Reibfaktoren aus dem Ringstauch- und Zapfenpressversuch für die Werkstoffe DC04 und DP600

Für die vier Korrelationen ist ein Trend zu steigenden Reibfaktoren mit zunehmender Rauheit zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass die zunehmende Ausprägung des Spitzenbereichs im Rauheitsprofil zu einer Hemmung des Materialflusses führt. Erklärbar ist dies durch ein verstärktes Verhaken der Rauheitsspitzen von Platinen- und Werkzeugoberfläche. Allerdings ist der Zusammenhang, vor allem für eine Zunahme des Strahlmitteldurchmessers, nicht signifikant. Trotz einer Zunahme des Rpk -Wertes nimmt die Reibung im Übergang vom mittleren zum groben Strahlmitteldurchmesser ab. Wird dies beispielsweise für den Werkstoff DCo_4 und die Ergebnisse des Zapfenpressversuchs analysiert, dann liegt für die mittlere Korngröße bei einem Druck von 1 bar ein Rpk -Wert von $3,31 \pm 0,27 \mu m$ vor. Für die größte Korngröße nimmt dieser eine Ausprägung von $5,55 \pm 0,12 \mu m$ an. Somit steigt die Rauheit. Der Reibfaktor sinkt allerdings von $0,099 \pm 0,009$ auf $0,085 \pm 0,001$. Für 3 bar und 4 bar ist ein ähnlicher Zusammenhang erkennbar. Bei 3 bar nimmt die Rauheit vom mittleren zum groben Durchmesser um 95 % zu und die Reibung bleibt annähernd konstant. Für 4 bar liegt für den identischen Wertebereich eine Rauheitszunahme von 93 % und gleichzeitig eine Reibungsabnahme um 5 % vor. Somit ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Rauheit und Reibung erkennbar. Diese Annahme wird durch die Auswertung der restlichen Korrelationen bestätigt. Unabhängig von Werkstoff und Laborversuch liegt kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Reibung und Rauheit vor. Vor allem im Übergang vom mittleren zum groben Strahlmitteldurchmesser nimmt bei sämtlichen Versuchen der Rpk -Wert zu und der Reibfaktor ab. Aufgrund der Bestätigung des Ergebnisses für mehrere Werkstoffe und Laborversuche kann davon ausgegangen werden, dass die Rauheit nicht den größten Einfluss auf die Reibung hat.

Zusätzlich zur Rauheit wurde die Verfestigungszunahme mit den Reibfaktoren für beide Werkstoffe und Laborversuche korreliert, Bild 38. Für diese Korrelation ist für beide Werkstoffe und Laborversuche ein deutlicheres Ergebnis zu erkennen. Es liegt ein nahezu linearer Trend vor. Mit zunehmender Verfestigung steigt die Reibung an. Dies deutet auf eine Stoffflusshemmung durch die Verfestigung hin. Die Stoffflusshemmung führt beispielsweise im Zapfenpressversuch zu einer Hemmung des radialen Stoffflusses und damit zu höheren Zapfen respektive Reibfaktoren. Wird beispielsweise der Zapfenpressversuch und der Werkstoff $DP600$ analysiert, dann kommt es bei einem Strahl Druck von 3 bar vom feinen zum mittleren Durchmesser zu einer Zunahme der Verfestigung von 11 %. Beim Übergang zum groben Durchmesser liegt eine Abnahme der Verfestigung

6.2 Reibungsbeeinflussung durch werkstückseitige Oberflächenmodifikationen

um circa 3 % vor. Erklärbar ist dieser Effekt über den zunehmenden Materialabtrag mit steigender Korngröße. Je größer der Materialabtrag beim Strahlen ist, desto weniger Energie wird in die Verfestigung gesteckt, was zu einer niedrigeren Zunahme der Verfestigung führt. Dieser Zusammenhang ist ebenfalls für die Reibung erkennbar. Der Reibfaktor steigt zunächst vom feinen zum mittleren Körnungsdurchmesser an.

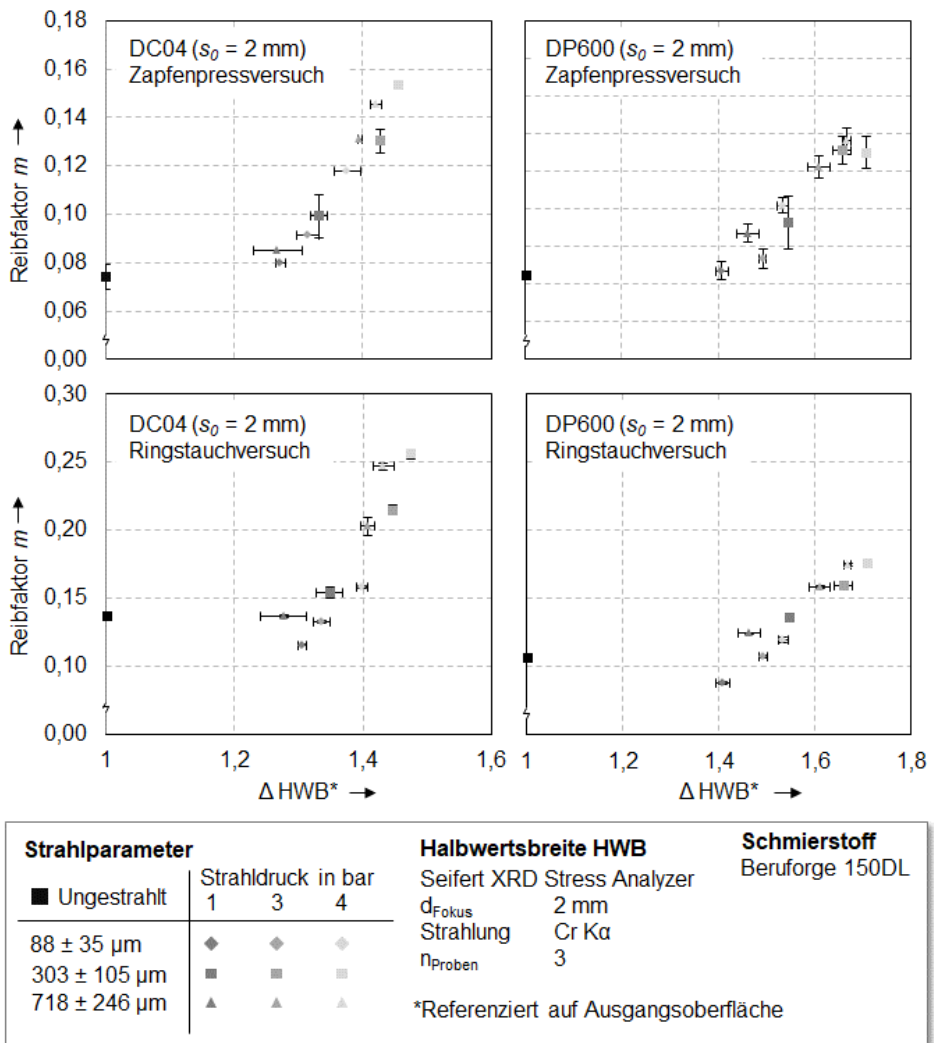


Bild 38: Korrelation von Verfestigungszunahme und Reibfaktoren aus dem Ringstauch- und Zapfenpressversuch für die Werkstoffe DC04 und DP600

Beim Übergang vom mittleren zum groben Strahlmitteldurchmesser nimmt diese um 8 % ab. Somit liegen für die Verfestigungs- und Reibungsentwicklung über die unterschiedlichen Strahlmitteldurchmesser die gleichen Tendenzen vor. Dies ist ebenfalls für den Werkstoff DCo₄ und die Ergebnisse des Ringstauchversuchs erkennbar. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass ein Trend zu höheren Reibfaktoren mit einer zunehmenden Rauheit und Oberflächenverfestigung vorliegt. Der Einfluss der Verfestigung als tribologischer Wirkmechanismus scheint signifikanter zu sein, weswegen dieser mit Hilfe von numerischen Untersuchungen näher untersucht wird.

Numerische Verifizierung zur Ableitung von Modellvorstellungen

Für die numerische Untersuchung des Einflusses einer verfestigten Randzone wurde das FE Modell des Zapfenpressversuchs genutzt, Bild 39. Jedoch wurde die Modellierung des Werkstücks angepasst, sodass eine verfestigte Randzone vereinfacht abgebildet werden kann. Für das Werkstück wurde ein Randschichtmodell mit einem dreigeteilten Werkstück verwendet, Bild 39.

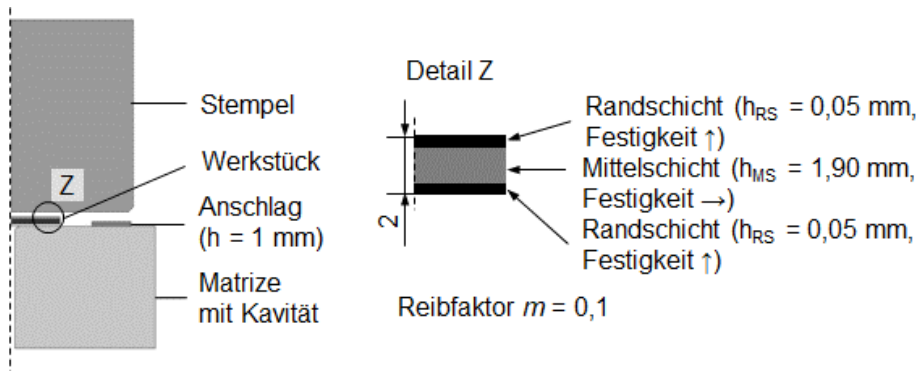


Bild 39: FE Modellierung des Zapfenpressversuchs mit dreigeteiltem Werkstück

Das Werkstück besteht aus einer oberen Randschicht, einer unteren Randschicht und einer Mittelschicht. Als Randschichthöhe h_{RS} wurde ein Wert von 0,05 mm festgelegt. Dieser Wert wurde als maximaler Tiefeneinfluss des Abrasivstrahlens mit Hilfe von Härtemessungen identifiziert. Die beiden Randschichten haften über Kontaktbedingungen an der Mittelschicht und sind als deformierbare Werkzeuge definiert. Netzgröße und Eigenschaften wurde für die drei Werkstückbereiche identisch gewählt. Als Reibfaktor wurde ein Wert von 0,1 eingestellt. Zur Überprüfung der Abbildungsgenauigkeit des Randschichtmodells wurde dieses Modell mit dem

ursprünglichen Modell des Zapfenpressversuchs verglichen. Durch die dreigeteilte Modellierung des Werkstücks und die damit verbundene Verwendung von Haftbedingungen entstehen keine Abweichungen im Hinblick auf die Zielgrößen, wie beispielsweise Werkstückgeometrie, Spannungsverläufe und Fließgeschwindigkeiten. Somit kann davon ausgegangen werden, dass das Modell für die geplanten Untersuchungen nutzbar ist.

Um eine randnahe Verfestigung abzubilden, werden den Randschichten im Vergleich zur Mittelschicht abweichende Eigenschaften im Hinblick auf die Verfestigung zugewiesen. Aufgrund der Modellierung besteht beim Randschichtmodell ein unsteter Übergang zwischen den unterschiedlichen Eigenschaften. Dieser unstete Übergang ist eine starke Abstraktion gegenüber den realen Bedingungen. Zur Abbildung einer erhöhten Verfestigung in den Randschichten werden für die beiden Randschichten und die Mittelschicht zwei unterschiedliche Fließkurven verwendet. Für die angepasste Fließkurve der Randschichten k_{f_2} wird die Anfangsfließspannung der Fließkurve der Mittelschicht k_{f_1} angepasst, Bild 40. Dies modelliert vereinfacht einen späteren Fließbeginn der Randschicht bedingt durch die Verfestigung mittels Strahlen in diesem Bereich.

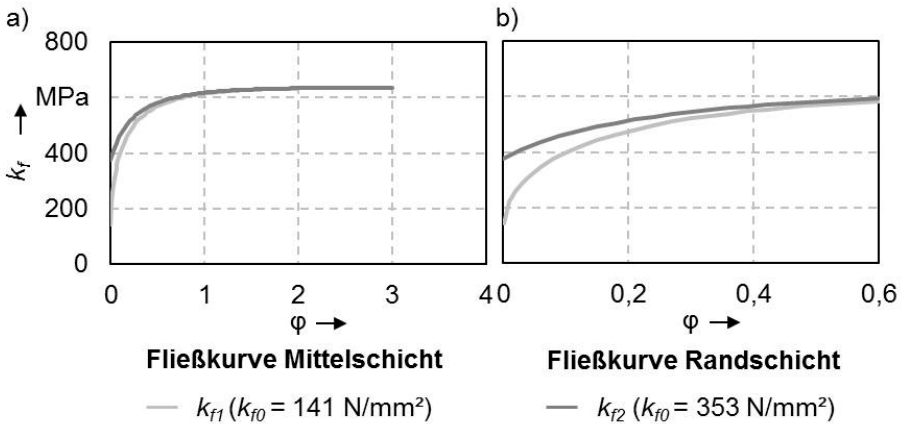


Bild 40: a) Komplette Approximation und b) Detailansicht von k_{f_1} und k_{f_2}

Als Fließkurve der Randschichten k_{f_2} wurde die Fließkurve der Mittelschicht k_{f_1} zwischen einem Umformgrad von $\phi = 0,08$ und $\phi = 3,0$ genutzt. Die Fließkurve der Randschicht weist somit eine um den Faktor 2,5 höhere Anfangsfließspannung auf als die Fließkurve der Mittelschicht. Dieser hohe Faktor ist ein Extremfall im Hinblick auf die randnahe Verfestigung beim

dreigeteilten Werkstück ($h_{RS} = 0,05$) mit einer Simulation ohne Randschichtmodell ($h_{RS} = 0,00$). Als Fließkurve wurde dem Werkstück ohne Randschichten die Fließkurve k_{fi} zugeordnet, was den unverfestigten Fall abbilden soll. Die Auswertung der Fließgeschwindigkeit in x-Richtung zeigt für die Auswerteposition in der Mitte des Flansches, dass verfestigte Randzonen zu einer nahezu konstanten Reduzierung der Fließgeschwindigkeit um circa 3,5 % über die gesamte Höhe des Flansches führen, Bild 43 b).

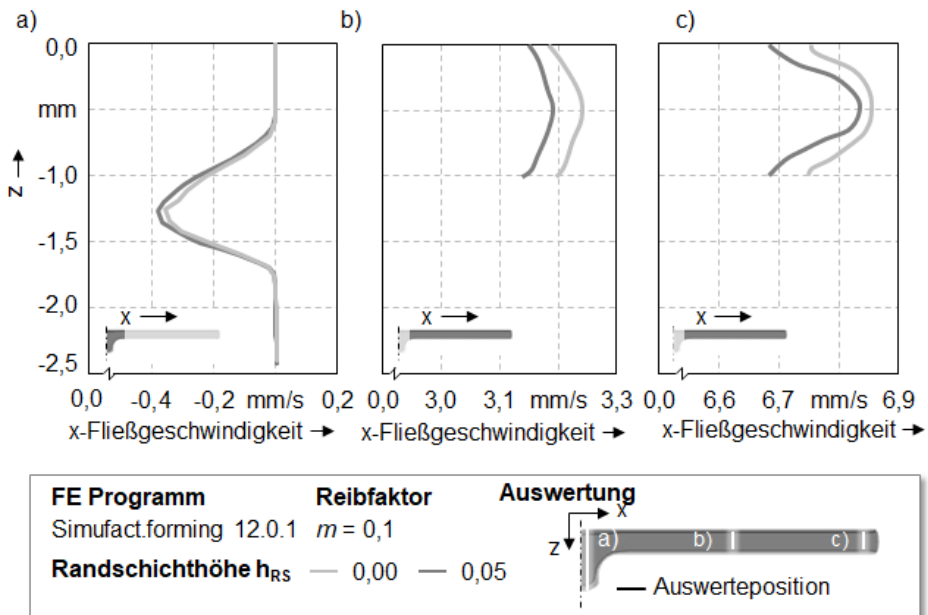


Bild 43: Verlauf der Fließgeschwindigkeit in x-Richtung in den Bauteilbereichen a) Zapfen, b) Mitte und c) Rand des Flansches

Im Randbereich des Flansches führt die verfestigte Randschicht ebenfalls zu einer Reduzierung der Fließgeschwindigkeiten in x-Richtung, Bild 43 c). Im Mittenbereich eilt das Material in beiden Fällen stärker voraus als im Randbereich, sodass ein Geschwindigkeitsgradient über die Höhe des Flansches vorliegt. Dies kann dadurch begründet werden, dass das Material in der Mitte frei in x-Richtung fließen kann. Das Material am Rand wird durch den Kontakt zwischen Werkzeug- und Werkstückoberfläche gehemmt. Werden die beiden Simulationen im Hinblick auf den Geschwindigkeitsgradienten über die Bauteilhöhe bewertet, dann ist ein deutlicher Unterschied zu erkennen. Während es beim unverfestigten Bauteil zu einem Gradienten von circa 1,5 % kommt, liegt für das Randschichtmodell

ein Gradient von 3,9 % über die Höhe vor. Es resultiert somit ein verstärktes Ausbauchen der Probe durch die verfestigte Randschicht, was auf eine verstärkte Hemmung des Stoffflusses in x-Richtung durch die verfestigten Randzonen hindeutet. Dieser Effekt ist vom Stauchen für eine Reibungserhöhung bekannt. Im Bereich des Zapfens liegen in x-Richtung für das Bauteil mit der verfestigten Randschicht betragsmäßig höhere Geschwindigkeiten vor, Bild 43 a). Insgesamt kann daraus geschlussfolgert werden, dass durch die Verfestigung der Randzone der radiale Stofffluss in x-Richtung gehemmt wird und das Material verstärkt in die Kavität der Matrize fließt, was auch durch die höheren Fließgeschwindigkeiten in diesem Bereich bestätigt wird.

Die Auswertung der Fließgeschwindigkeiten in z-Richtung bestätigt die Annahme, dass durch die Verfestigung der Randzone und der damit verbundenen Hemmung des Stoffflusses in x-Richtung mehr Material in den Zapfen fließt, Bild 44.

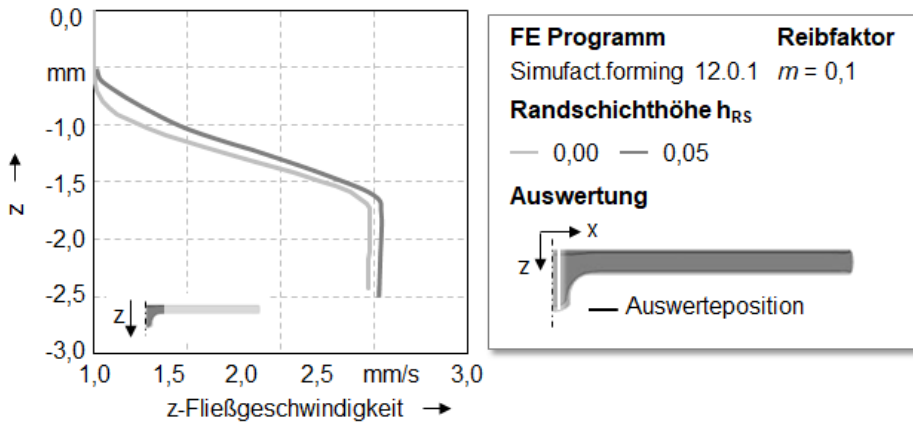


Bild 44: Verlauf der Fließgeschwindigkeit in z-Richtung im Bereich des Zapfens

Ähnlich zur Fließgeschwindigkeit kommt es in der Bauteilmitte zu einer Reduzierung der Spannungen in x-Richtung durch die randnahe Verfestigung, Bild 45 b). In diesem Bereich sinkt der Spannungswert konstant um circa 10 % über die Höhe des Flansches. Im Randbereich des Flansches kommt es zu einer Veränderung des Spannungsgradienten über die Bauteilhöhe, Bild 45 c). Die verfestigte Randzone führt zu einer maximalen Spannungsänderung von 32 % über die Höhe. Bei der Bauteilmodellierung ohne Randzone liegt dieser Wert bei 23 %. Dieses Ergebnis ist ähnlich zur Auswertung der Fließgeschwindigkeiten und deutet darauf hin, dass die verfestigte Randschicht den Stofffluss im Kontaktbereich Werkstück-

Werkzeug stärker hemmt, was wiederum zu einem verstärkten Vorseilen der Mittelschicht in x-Richtung führt. Diese Hemmung des Stoffflusses im Flansch in x-Richtung führt dazu, dass mehr Material in die Kavität fließt und höhere Zapfen ausgeformt werden, was durch höhere Druckspannungen in x-Richtung für das Randschichtmodell in Bild 45 a) bestätigt wird.

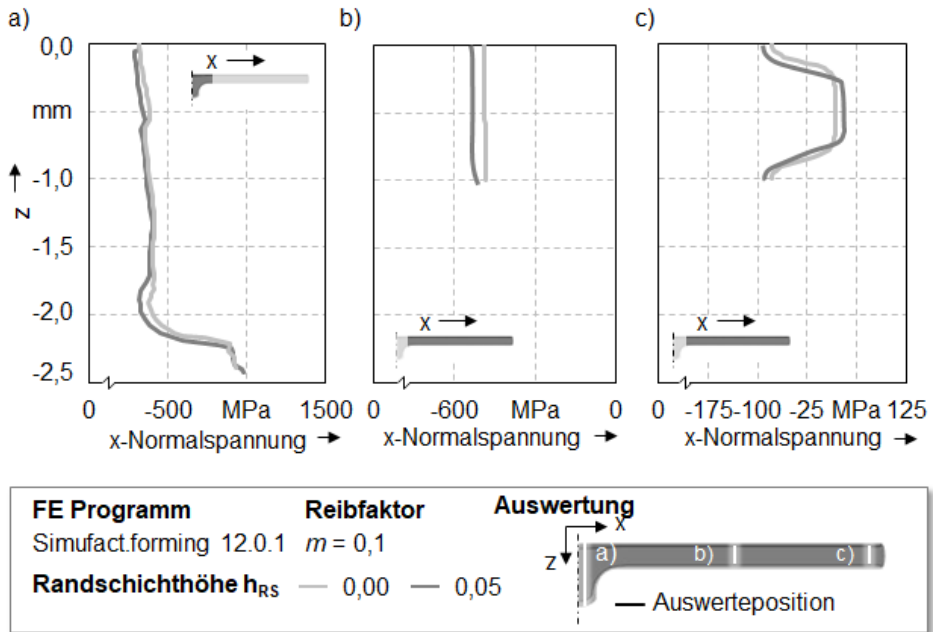


Bild 45: Verlauf der Normalspannung in x-Richtung in den Bauteilbereichen a) Zapfen, b) Mitte und c) Rand

Insgesamt ist festzuhalten, dass eine verfestigte Randzone zu einer Hemmung des Stoffflusses in x-Richtung führt. Bedingt dadurch fließt das Material verstärkt in Richtung der Matrizenkavität, was zur Ausformung eines höheren Zapfens und damit zu höheren Reibfaktoren führt. Dieser Effekt ist aus der Literatur für eine Reibungserhöhung im Zapfenpressversuch bekannt. Um zu bestätigen, dass bei einer verfestigten Randschicht und einer Reibungserhöhung ähnliche Mechanismen vorliegen, wird eine Stoffflussanalyse für Modelle ohne Randschicht mit Reibfaktoren von $m = 0,5$ und $m = 0,1$ durchgeführt. Für einen Reibfaktor von 0,5 kann eine Zapfenhöhe von 5,68 mm gemessen werden. Somit ist im Vergleich zu einem Reibfaktor von 0,1 eine signifikante Zunahme der Zapfenhöhe erkennbar. Dies geht einher mit dem Effekt der Verfestigung. Allerdings liegen deutliche Unterschiede in der prozentualen Zunahme der Zapfen-

höhen vor. Die Analyse der Fließgeschwindigkeiten in x-Richtung zeigt, dass es in der Mitte und im Randbereich des Flansches durch die Reibungszunahme zu einer Stoffflusshemmung in x-Richtung kommt, Bild 46 b) und c). Des Weiteren liegt in beiden Auswertebereichen eine Änderung des Geschwindigkeitsgradienten über die Bauteilhöhe vor. Dieser Effekt liegt in ähnlicher Weise für das Randschichtmodell vor. Die Hemmung des Stoffflusses in radialer Richtung resultiert in einer betragsmäßigen Zunahme der Fließgeschwindigkeit im Bereich des Zapfens, was zu höheren Bauteilhöhen führt, Bild 46 a).

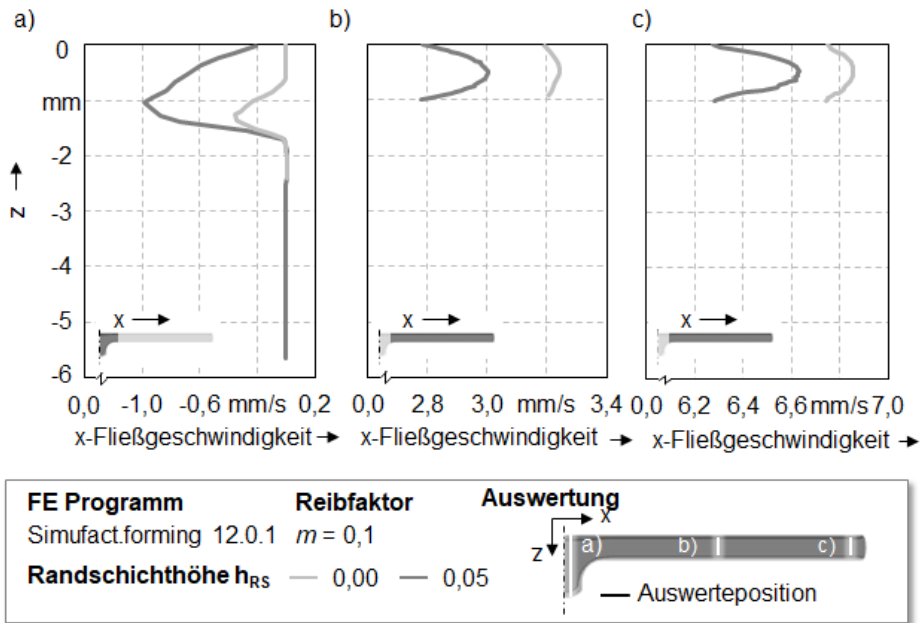


Bild 46: Verlauf der Fließgeschwindigkeit in x-Richtung in den Bauteilbereichen a) Zapfen, b) Mitte und c) Rand für eine Variation des Reibfaktors

Die Analyse der Fließgeschwindigkeiten in z-Richtung bestätigt die Annahme, dass durch die Reibungszunahme das Material verstärkt in die Matrizenkavität fließt, Bild 47. Durch die Reibungszunahme steigen die Fließgeschwindigkeiten in z-Richtung. Insgesamt kann festgehalten werden, dass bei einer Erhöhung der Reibung und einer Verfestigung der Bauteilrandzone ähnliche Effekte vorliegen. Dies bestätigt die Annahme, dass eine Verfestigung der Randzone den lateralen Stofffluss hemmt. Dadurch fließt mehr Material in die Matrizenkavität, was wiederum in höheren Zapfen resultiert. Die Hemmung des Stoffflusses geht einher mit einer Erhöhung der Reibschubspannung und damit einer zunehmenden

Reibung. Auf Basis der numerischen Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass die Verfestigung der Randzone durch den Strahlprozess eine signifikante Einflussgröße auf den Stofffluss und damit die Reibung ist.

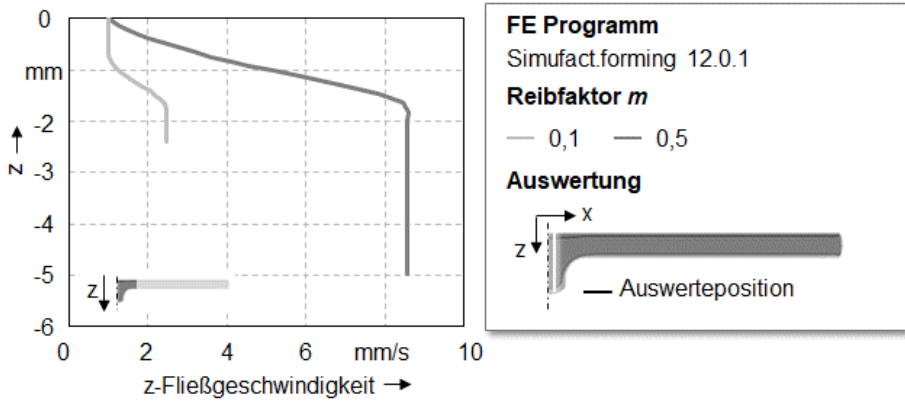


Bild 47: Verlauf der Fließgeschwindigkeit in z-Richtung im Bereich des Zapfens für eine Variation des Reibfaktors

Experimentelle Verifizierung

Für die experimentelle Verifizierung des Einflusses der Verfestigung werden zwei Probensätze mit abweichender Verfestigung und ähnlicher Rauheit hergestellt. Die Referenzproben wurden lediglich abrasiv gestrahlt. Die Strahlkombination wurde durch die Überlagerung eines Kugel- und Abrasivstrahlprozesses hergestellt. Durch die Überlagerung werden im Vergleich zu den Referenzproben Proben mit einer höheren Verfestigung bei ähnlicher Rauheit hergestellt. Für die Referenzproben und den Abrasivstrahlschritt bei der Strahlkombination wurden Strahlparameter gewählt, die zu einer möglichst hohen Rauheit bei gleichzeitig niedriger Verfestigung führen. Ausgewählt wurden der Strahlmitteldurchmesser $718 \pm 246 \mu\text{m}$ und der Strahldruck 1 bar. Um durch das Kugelstrahlen eine möglichst hohe Verfestigung zu erzielen, wurde eine Parameterstudie zum Einfluss von Strahldruck und Strahlmitteldurchmesser durchgeführt. Anhand der Studie wurde ein keramisches Strahlgut mit einem Strahlmitteldurchmesser von $250 \pm 425 \mu\text{m}$ ausgewählt. Als Strahldruck wurden 3 bar gewählt. Die Überprüfung der Rauheit bestätigt anhand des Rpk Wertes, dass durch die Strahlkombination keine Änderung der Rauheit im Vergleich zur Referenzprobe vorliegt, Bild 48 a). Die Analyse der Verfestigung zeigt, dass für beide Werkstoffe durch die Kombination des Abrasivstrahlprozesses mit einem vorgelagerten Kugelstrahlschritt eine signifikante Zunahme der Verfestigung im Vergleich zur Referenzprobe erreicht wird,

Bild 48 b). Somit sind die hergestellten Proben geeignet, um experimentell den Einfluss der Verfestigung unabhängig von der Rauheit zu untersuchen.

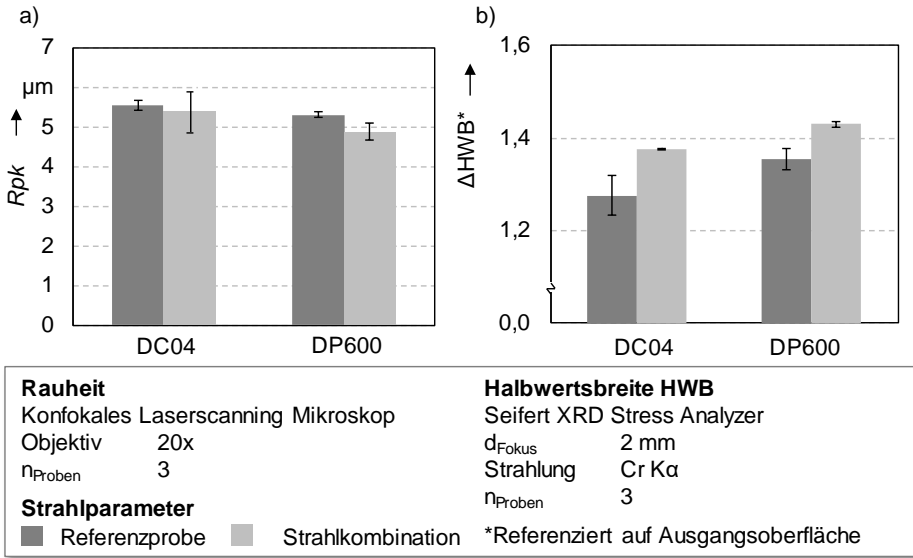


Bild 48: Vergleich von a) Rauheit und b) Verfestigung

Die hergestellten Proben wurden im Zapfenpressversuch eingesetzt und die ermittelten Reibfaktoren mit den Rauheits- und Verfestigungswerten korreliert, Bild 49.

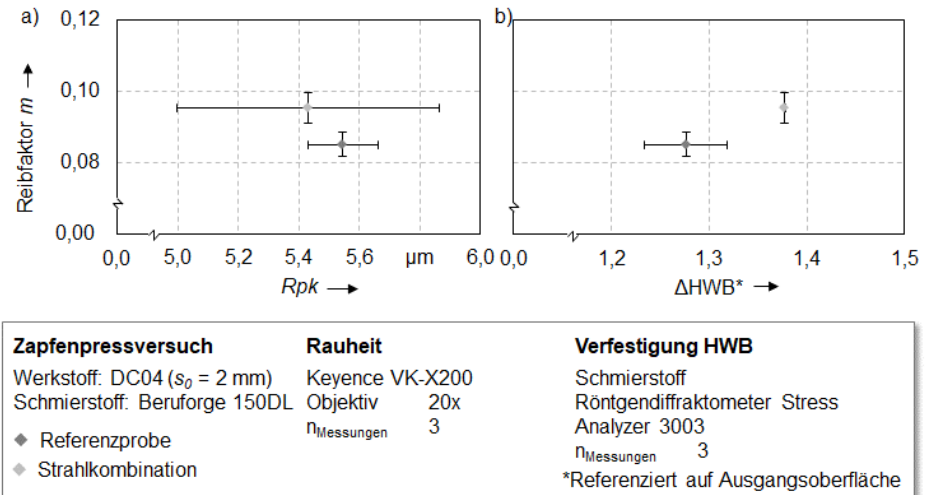


Bild 49: Korrelation zwischen Reibung und a) Rauheit respektive b) Verfestigungszunahme

Bei der Analyse des Rauheitseinflusses ist zu erkennen, dass kein signifikanter Unterschied im Rpk Wert zwischen Referenzprobe und Strahlkombination vorliegt. Jedoch weichen die Reibfaktoren voneinander ab, Bild 49 a). Die Korrelation von Reibung und Verfestigung zeigt, dass unterschiedliche Verfestigungswerte zu abweichenden Reibfaktoren führen, Bild 49 b). Insgesamt deutet dies darauf hin, dass bei zunehmender Verfestigung und gleichbleibender Rauheit die Reibung ansteigt. Dies bestätigt die in Abschnitt 6.2.1.2 getroffene Annahme und die numerischen Untersuchungen, dass die Verfestigung den Stofffluss hemmt, die Reibschubspannung und damit die Reibung erhöht. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die durch den Strahlprozess hervorgerufene randnahe Verfestigung die maßgebliche tribologisch relevante Randzoneneigenschaft von abrasivgestrahlten Platinenoberflächen ist.

6.2.2 Mikroprägen von Platinen

Das in Abschnitt 4.2.1 beschriebene Mikroprägen ist eine Möglichkeit, um die Reibung zu reduzieren [146]. Durch das Mikroprägen werden Schmieraschen auf die Platinenoberfläche appliziert, welche reibungsreduzierend während der Umformung wirken. Dieses Verfahren verändert die beiden Randzoneneigenschaften: Topographie und randnahe Verfestigung. Um den Einfluss der Randzoneneigenschaften auf die Reibung von mikrogeprägten Platinenoberflächen zu untersuchen, werden die geometrischen Eigenschaften der geprägten Strukturen modifiziert. Angepasst werden Durchmesser, Tiefe und Flächendeckungsgrad der Strukturen. Die Struktureigenschaften sind in Abschnitt 4.2.1 aufgeführt.

6.2.2.1 Charakterisierung mikrogeprägter Platinen

Fertigungsgenauigkeit mikrogeprägter Platinen

Zu Gewährleistung der Fertigungsgenauigkeit der Strukturen wurden ausgewählte Strukturen auf Zapfenpressproben optisch vermessen. Auf jeder Zapfenpressprobe wurde die Genauigkeit der Strukturen an sechs Messpunkten ausgewertet. Es wurde jeweils eine Struktur in der Probenmitte und am Probenrand gemessen. Zusätzlich wurden vier Strukturen im Bereich zwischen Probenrand und Probenmitte analysiert. Die Messpositionen sind in Bild 50 dargestellt.

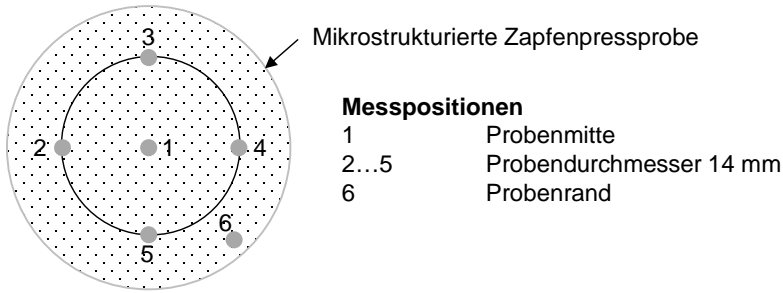


Bild 50: Messpositionen zur Analyse der Fertigungsgenauigkeit der Mikrostrukturen

Bei der Analyse von Proben mit einem Strukturdurchmesser von 300 μm und einem Flächendeckungsgrad von 10 % ist zu erkennen, dass die drei Schmierstaschentiefe an den Messpositionen 1 bis 5 präzise abgebildet werden, Bild 51.

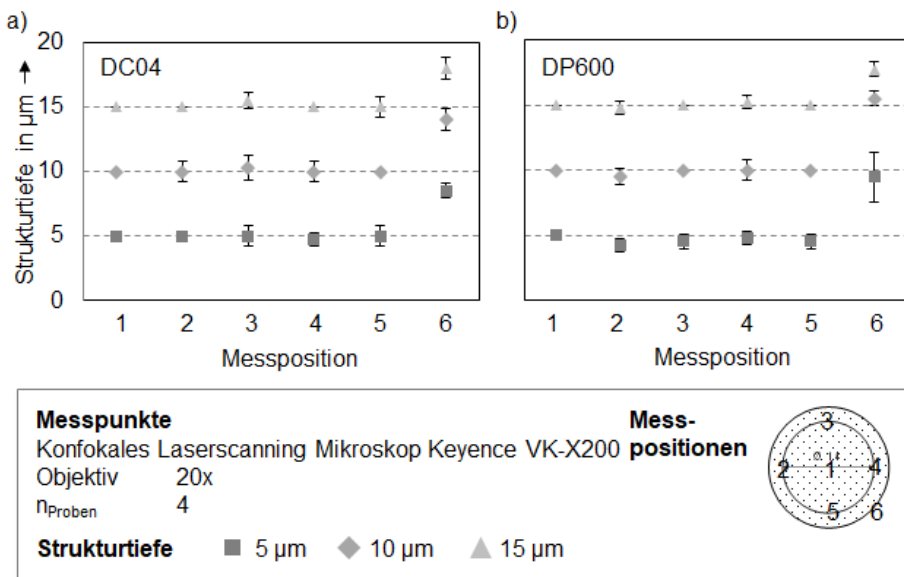


Bild 51: Fertigungsgenauigkeit Zapfenpressprobe für einen Schmierstaschendurchmesser von 300 μm und einen Flächendeckungsgrad von 10 % für a) DCo4 und b) DP600

Bei Messposition 6 respektive dem Probenrand kommt es für sämtliche Schmierstaschentiefen zu einem signifikanten Anstieg der Strukturtiefe. Für den Werkstoff DCo4 liegt für eine Soll-Tiefe von 5 μm eine Ist-Tiefe von $8,5 \pm 0,6 \mu\text{m}$ vor. Dies entspricht einer Abweichung von circa 70 %. Bei den Schmierstaschentiefen 10 μm und 15 μm liegen Abweichungen von 40 % und 20 % vor. Für DP600 ist ein ähnlicher Zusammenhang erkennbar. Zur

Erzeugung der drei Strukturturen wurde ein Stempel mit einer Höhe der Prägepins von 18 μm genutzt. Die Höhe der Prägepins ist somit größer als die drei zu erzeugenden Soll-Tiefen. Da die Ausformung der Mikrostrukturen am Probenrand nicht in beide Richtungen durch weitere Prägepins begrenzt ist, kann das Material an den Prägepins nach oben steigen. Dies erklärt die höheren Ist-Strukturturen. Bei der Analyse der Fertigungsgenauigkeit des Strukturdurchmessers für einen Soll-Durchmesser von 300 μm und einem Flächendeckungsgrad von 10 % ist zu erkennen, dass Soll- und Ist-Durchmesser voneinander abweichen, Bild 52.

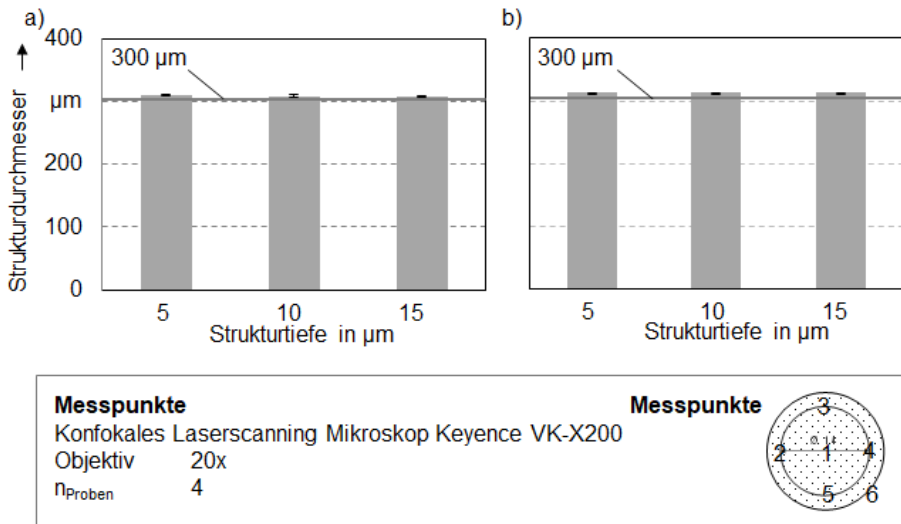


Bild 52: Fertigungsgenauigkeit Zapfenpressprobe für einen Schmierfaschdurchmesser von 300 μm und einen Flächendeckungsgrad von 10 % für a) DCo4 und b) DP600

Zunächst ist zu erwähnen, dass es bereits durch das Erodieren zu einer Abweichung des Ist- vom Soll-Prägepindurchmessers kommt. Der durchschnittliche Durchmesser der Prägepins liegt bei 312 μm . Nach dem Prägen liegt der mittlere Strukturdurchmesser von DCo4 bei 308 μm . Bei DP600 nimmt dieser einen Wert von 310 μm an. Die Abweichungen zwischen Struktur- und Prägepindurchmesser sind durch ein elastisches Rückfedern des Werkstoffs nach dem Prägeprozess erklärbar. Für DP600 fällt das Rückfedern aufgrund der höheren Werkstofffestigkeit geringer aus. In Stichversuchen konnte für die exemplarisch vorgestellten Zusammenhänge im Hinblick auf die Fertigungsgenauigkeit von Strukturtiefe und Strukturdurchmesser nachgewiesen werden, dass die identifizierten Zusammenhänge auf sämtliche Kombinationen übertragbar sind. Insgesamt ist festzuhalten, dass eine hohe Fertigungsgenauigkeit der Strukturen durch den

Prägeprozess erzielbar ist, sodass die Strukturen zur Beeinflussung der tribologischen Bedingungen einsetzbar sind.

Struktureigenschaften

Bild 53 veranschaulicht ausgewählte Topographiefotografien von mikrostrukturierten Werkstückoberflächen. Die Strukturen sind in einem regelmäßigen gitterförmigen Muster auf die Oberfläche aufgebracht und somit deterministisch angeordnet.

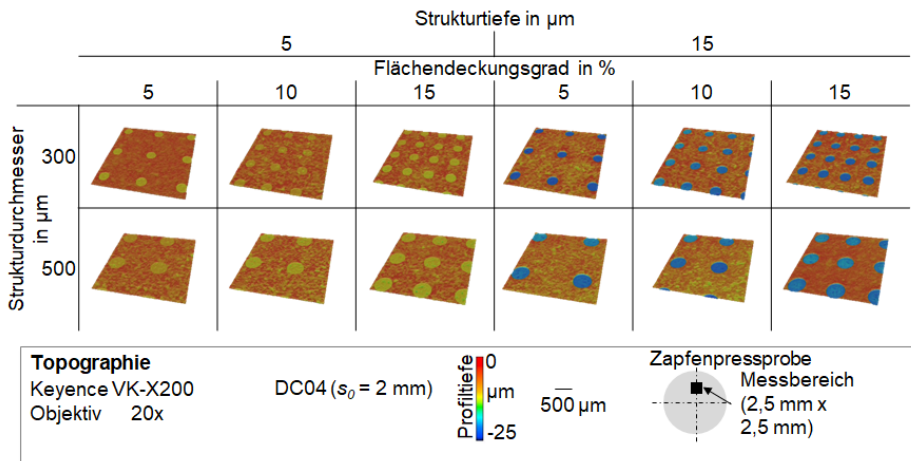


Bild 53: Topographiefotografien mikrogeprägter Platinenoberflächen

Zur Analyse der Wirkmechanismen der strukturierten Werkstückoberflächen werden auf Basis von Literaturangaben zwei Einflussfaktoren analysiert: die Schmierstoffspeicherkapazität [122] und das Potenzial zur Interaktion zwischen geprägter Struktur und auf der Oberfläche vorhandener EDT Struktur [103]. Die Schmierstoffspeicherkapazität ist von Bedeutung, da die Strukturen den Schmierstoff speichern, diesen während der Umformung in die Wirkfuge abgeben und damit die Reibung reduzieren. Die Menge an bereitgestelltem Schmierstoff beeinflusst das reibungsreduzierende Potential derartiger Strukturen und wird bestimmt durch das Strukturvolumen. Je größer dieses ist, desto mehr Schmierstoff kann gespeichert und abgegeben werden. Somit ist das Strukturvolumen als mögliche Einflussgröße auf die Reibung zu analysieren. Andererseits ist die Interaktion zwischen den geprägten Strukturen und den auf der Oberfläche vorhandenen stochastischen Strukturen der EDT Oberfläche zu berücksichtigen. Dies ist dadurch bedingt, dass durch eine Interaktion das Verhältnis von offenen und geschlossenen Schmiertaschen verändert wird, was wiederum die Reibung beeinflusst. Um die Interaktion abzubilden ist der Umfang der

geprägten Strukturen von Bedeutung. Über den gesamten Umfang der Strukturen besteht die Möglichkeit, dass die EDT Oberfläche und die geprägten Strukturen miteinander in Kontakt treten. Somit sind als Struktureigenschaften das Strukturvolumen und der Strukturumfang von Bedeutung. Relevante Struktureigenschaften sind in Bild 54 veranschaulicht.

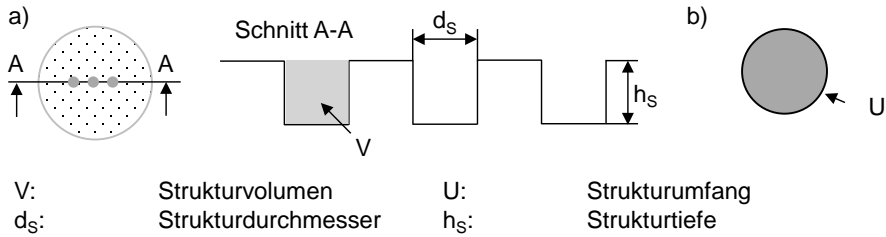


Bild 54: Veranschaulichung der Struktureigenschaften a) Strukturvolumen, Strukturtiefe, Strukturdurchmesser anhand mehrerer Strukturen und b) Strukturumfang an einer Mikrostruktur

Bild 55 zeigt die berechneten Strukturvolumina bezogen auf die Werkstückoberfläche.

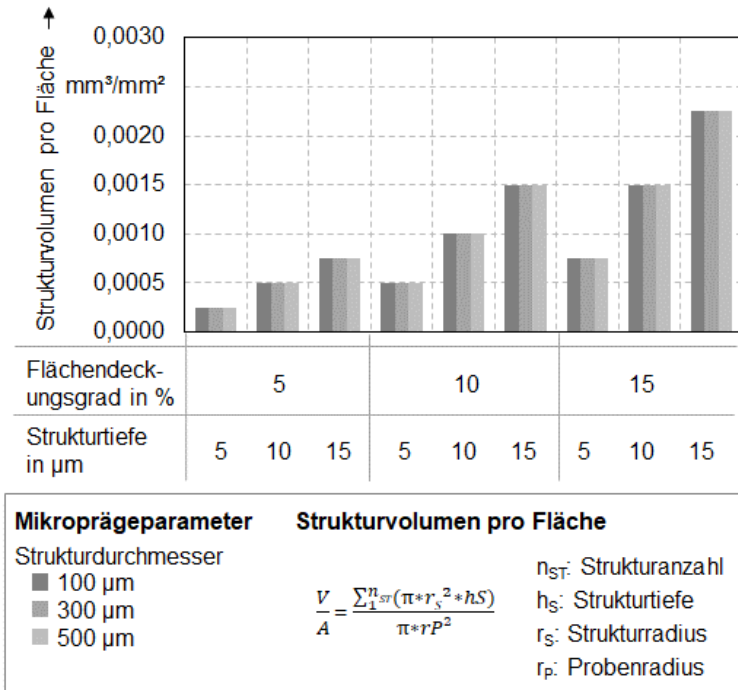


Bild 55: Bezogenes Strukturvolumen sämtlicher Strukturen auf einer geprägten Zapfenpressprobe

Das Volumen ist abhängig von Strukturtiefe und Flächendeckungsgrad. Je höher die Ausprägungen dieser beiden Struktureigenschaften sind, desto höher ist das Strukturvolumen. Das größte Schmierfahnenvolumen mit einem Wert von $0,00225 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$ kann unabhängig vom Schmierfahnenradius für eine Strukturtiefe von $15 \mu\text{m}$ und einen Flächendeckungsgrad von 15% realisiert werden. Dies ist somit die Struktur, die die größte Menge an Schmierstoff speichert respektive während der Umformung zur Verfügung stellt. Die Unterschiede im Strukturvolumen in Abhängigkeit von Strukturtiefe und Flächendeckungsgrad sind bei der Identifikation der tribologischen Wirkmechanismen zu berücksichtigen. Die Reibfaktoren sind somit in Abhängigkeit von Strukturtiefe und Flächendeckungsgrad zu bewerten.

Als weitere Struktureigenschaft ist in Bild 56 der auf die Werkstückoberfläche bezogene Strukturumfang dargestellt. Der Strukturumfang ist abhängig vom Strukturradius und vom Flächendeckungsgrad.

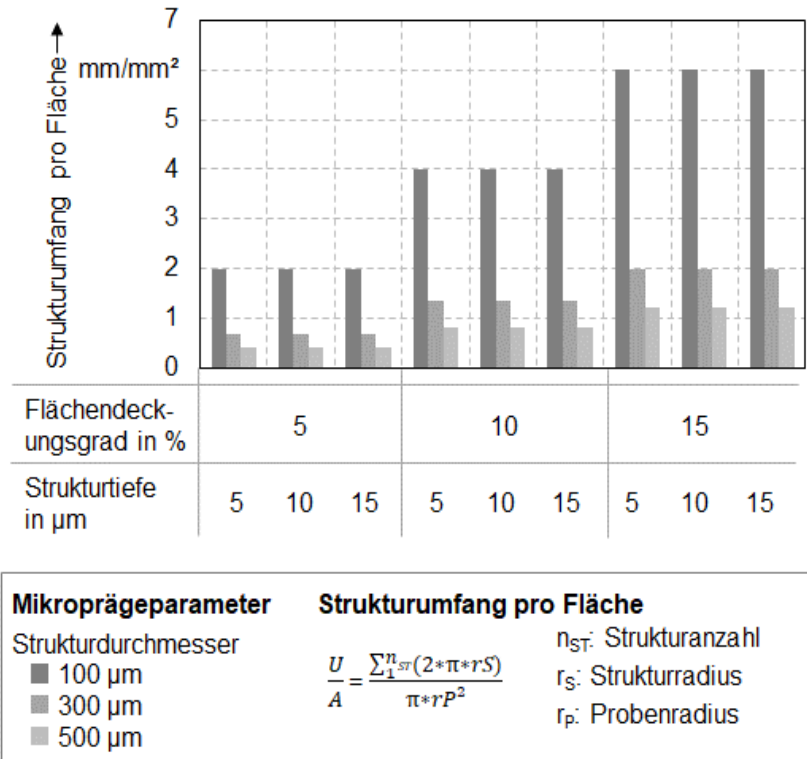


Bild 56: Umfang sämtlicher Strukturen auf einer geprägten Zapfenpressprobe

Je kleiner der Flächendeckungsgrad ist, desto kleiner ist der Gesamtumfang sämtlicher Strukturen auf der Oberfläche. Für den Strukturdurchmesser gilt: Je größer dieser ist, desto kleiner ist der Strukturumfang. Der größte Strukturumfang mit 6 mm/mm^2 wird durch Strukturen mit einem Durchmesser von $100 \text{ }\mu\text{m}$, einem Flächendeckungsgrad von 15% und allen drei Strukturturen erreicht. Der kleinste Strukturumfang mit $0,4 \text{ mm/mm}^2$ liegt für einen Strukturdurchmesser von $500 \text{ }\mu\text{m}$ und einen Flächendeckungsgrad von 5% vor. Bei dieser Strukturkombination besteht somit das geringste Potential zur Interaktion von EDT und geprägter Struktur. Diese mögliche Interaktion ist bei der Bewertung der Reibfaktoren zu berücksichtigen.

Verfestigung

Neben der modifizierten Topographie kommt es durch das Mikroprägen zu einer Veränderung der oberflächennahen Verfestigung. Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, kommt es bei Mikrohärtmessungen im Schliff zu Problemen bei randnahen Messungen. Aufgrund dieser Schwierigkeiten wird die Verfestigung über die Halbwertsbreite der Röntgeninterferenzlinien ausgewertet. Für die röntgenographischen Messungen wurde ein Fokusdurchmesser von 2 mm genutzt. Somit wird nicht die Verfestigung in einer einzelnen Struktur gemessen, sondern die Verfestigung auf der Platinenoberfläche über mehrere Strukturen hinweg. Bild 57 veranschaulicht die Zunahme der Verfestigung bezogen auf die Ausgangsoberfläche für den Werkstoff DP600. Die identifizierten Zusammenhänge sind auf DCo₄ übertragbar. Zunächst ist festzuhalten, dass die Verfestigung geringer ausfällt als für das Abrasivstrahlen. Für sämtliche Flächendeckungsgrade und Tiefen liegen die höchsten Verfestigungszunahmen für den Strukturdurchmesser $100 \text{ }\mu\text{m}$ vor. Dies kann durch die vergleichsweise hohe Strukturanzahl begründet werden. Mit abnehmendem Strukturdurchmesser und zunehmendem Flächendeckungsgrad bei gleichbleibendem Strukturdurchmesser nimmt die Verfestigung zu. Dies korreliert ebenfalls mit der Strukturanzahl. Ein ähnlicher Zusammenhang ist für die Strukturtiefe ableitbar. Die Verfestigung nimmt mit zunehmender Strukturtiefe zu.

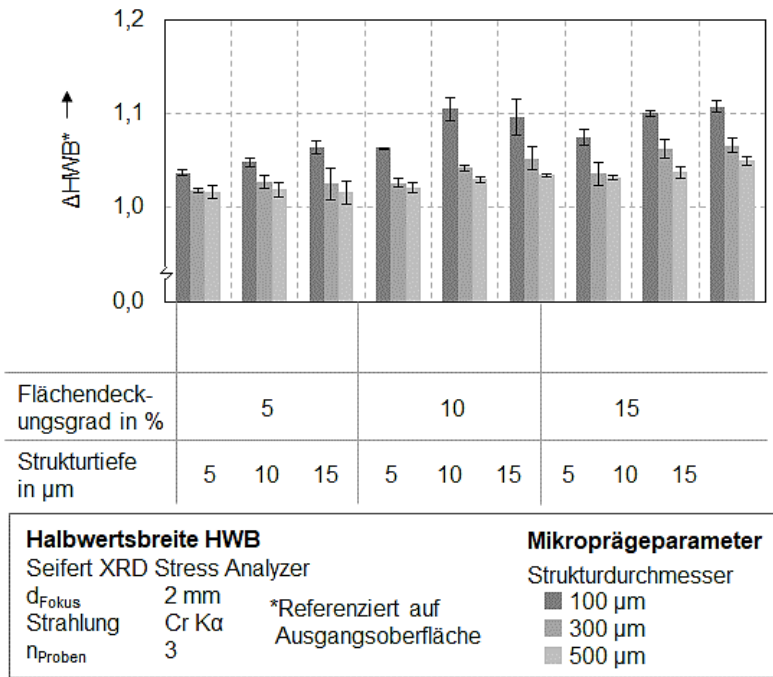


Bild 57: Verfestigungszunahme ΔHWB für DP600

6.2.2.2 Reibverhalten mikrogeprägter Platinen

Zur Analyse der tribologischen Wirkmechanismen mikrogeprägter Platinenoberflächen wurden die Reibbedingungen im Zapfenpress- und Ringtauchversuch ermittelt. Bild 58 zeigt die Ergebnisse des Zapfenpressversuchs für den Werkstoff DC04.

Sämtliche mikrogeprägten Strukturen führen zu einer Reibungsreduzierung. Die höchste Reduzierung ist durch einen Strukturdurchmesser von 500 μm bei einem Flächendeckungsgrad von 15 % und einer Strukturtiefe von 15 μm mit einem Reibfaktor von $0,059 \pm 0,001$ erzielbar. Dies entspricht einer prozentualen Reduzierung um 25 %. Die niedrigste Reibungsreduzierung mit 1,4 % liegt für den Strukturdurchmesser 100 μm , den Flächendeckungsgrad 5 % und die Tiefe 10 μm vor. Eine Änderung des Flächendeckungsgrads führt zu keinen eindeutigen Tendenzen bezüglich einer Reibungsbeeinflussung. Für den Strukturdurchmesser liegt ein Trend zu abnehmenden Reibfaktoren mit zunehmenden Durchmessern vor. Eine zunehmende Strukturtiefe führt insbesondere für die Strukturdurchmesser

300 μm und 500 μm zu abnehmenden Reibfaktoren. Bei einem Struktur-
durchmesser von 300 μm sinkt die Reibung mit zunehmender Struktur-
tiefe für alle drei Flächendeckungsgrade um 3 %.

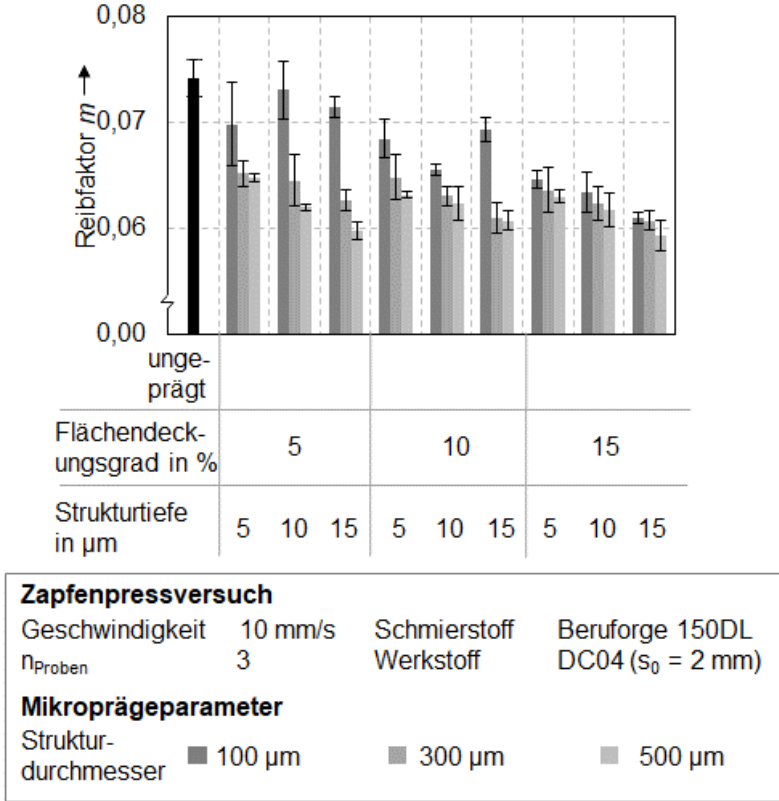


Bild 58: Reibfaktoren im Zapfenpressversuch für den Werkstoff DCo4

Diese prozentuale Reibungsreduzierung liegt bei einem Struktur-
durchmesser von 500 μm etwas höher mit Werten zwischen 5 und 8 % für die
verschiedenen Flächendeckungsgrade. Dies deutet darauf hin, dass Struk-
turdurchmesser und Struktur-
tiefe die Reibung beeinflussen. Im Rings-
tauchversuch zeigt sich, dass mit zunehmenden Struktur-
durchmesser die Reibung abnimmt, Bild 59. Dies bestätigt die Ergebnisse des Zapfen-
pressversuchs. Der Struktur-
durchmesser wirkt sich, wie in Bild 56 gezeigt, auf
den Strukturumfang aus. Je größer der Struktur-
durchmesser ist, desto
kleiner ist der Strukturumfang. Da der Strukturumfang die Interaktion von
EDT Struktur und geprägter Struktur beeinflusst, deuten die Ergebnisse
darauf hin, dass eine Wechselwirkung zwischen aufgebracht Struktur

und vorhandener Ausgangsoberfläche vorliegt. Die Analyse des Einflusses der Strukturtiefe im Ringstauchversuch zeigt für den Großteil der Ergebnisse, dass eine Zunahme der Tiefe zu einer Reduktion der Reibung führt.

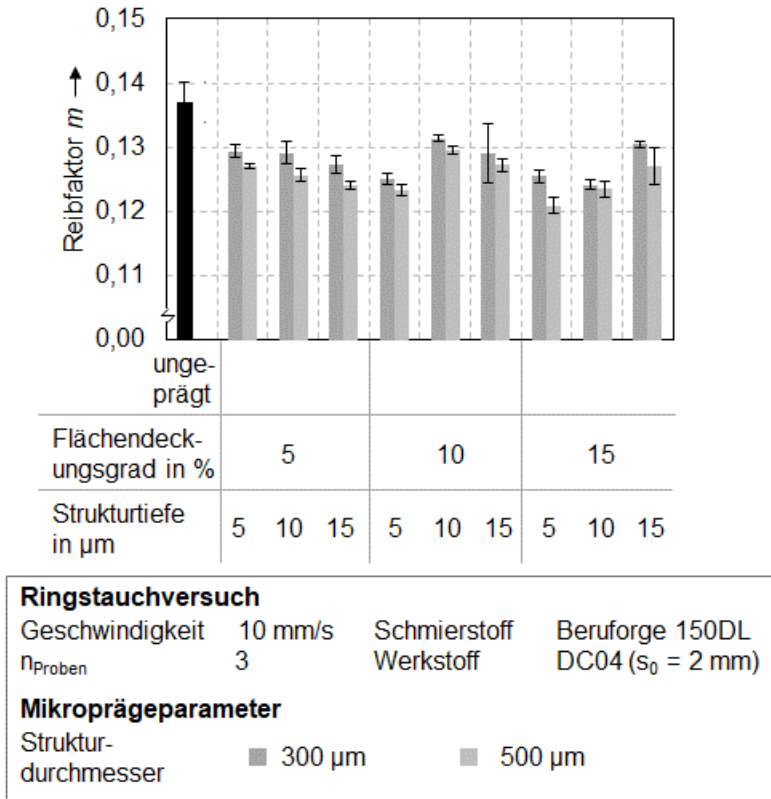


Bild 59: Reibfaktoren im Ringstauchversuch für den Werkstoff DC04

Dies bestätigt ebenfalls die Ergebnisse des Zapfenpressversuchs. Da die Strukturtiefe, wie in Bild 55 gezeigt, das Strukturvolumen beeinflusst, kann davon ausgegangen werden, dass das gespeicherte Volumen an Schmierstoff ebenfalls die Reibung beeinflusst. Je höher das Strukturvolumen ist, desto niedriger ist die Reibung. Die Analyse der Wirksamkeit mikrogeprägter DP600 Platinen zeigt, dass durch die Modifikation des härtesten Werkstoffs keine Reibungsreduzierung erzielbar ist, Bild 60. Dies kann auf die Werkstofffestigkeit zurückgeführt werden. Bei sämtlichen Oberflächen ist nach der Umformung die Prägestruktur auf der Oberfläche erkennbar.

6.2 Reibungsbeeinflussung durch werkstückseitige Oberflächenmodifikationen

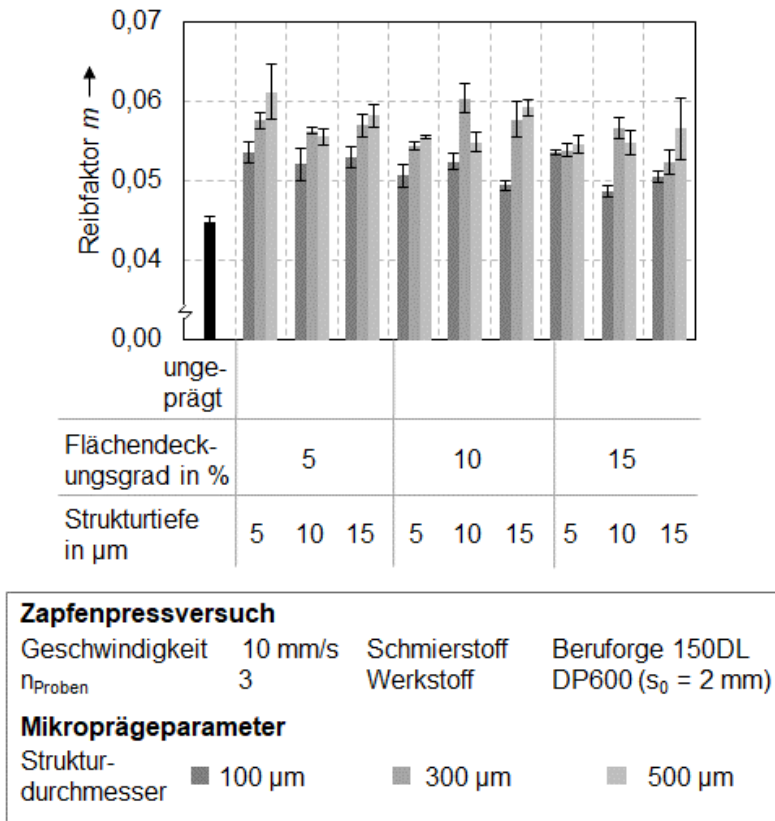


Bild 60: Reibfaktoren im Zapfenpressversuch für den Werkstoff DP600

Bild 61 veranschaulicht Oberflächenaufnahmen ausgewählter strukturierter Zapfenpressproben für DCo4 und DP600 nach der Umformung. Für beide Strukturgeometrien ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Werkstoffen erkennbar. Während die Strukturen bei DCo4 nach der Umformung nahezu komplett eingeglättet sind, sind bei den Proben aus DP600 die Mikrostrukturen deutlich erkennbar. Für den Strukturdurchmesser 300 µm nimmt die mittlere Schmiertaschentiefe nach der Umformung für DCo4 einen Wert von 5 µm an. Diese Tiefe liegt im Bereich der Ausgangsrauheit des Blechs. Für DP600 weisen die Strukturen eine mittlere Tiefe von 9 µm nach der Umformung auf. Für den Strukturdurchmesser 500 µm ist die Strukturtiefe nach der Umformung 6 µm für DCo4 und 9 µm für DP600. Somit kommt es während der Umformung aufgrund der höheren Werkstofffestigkeit zu einem geringeren Einglätten der geprägten

Strukturen. Dies deutet auf eine reduzierte Wirksamkeit von mikrogeprägten Strukturen für zunehmende Werkstofffestigkeiten hin.

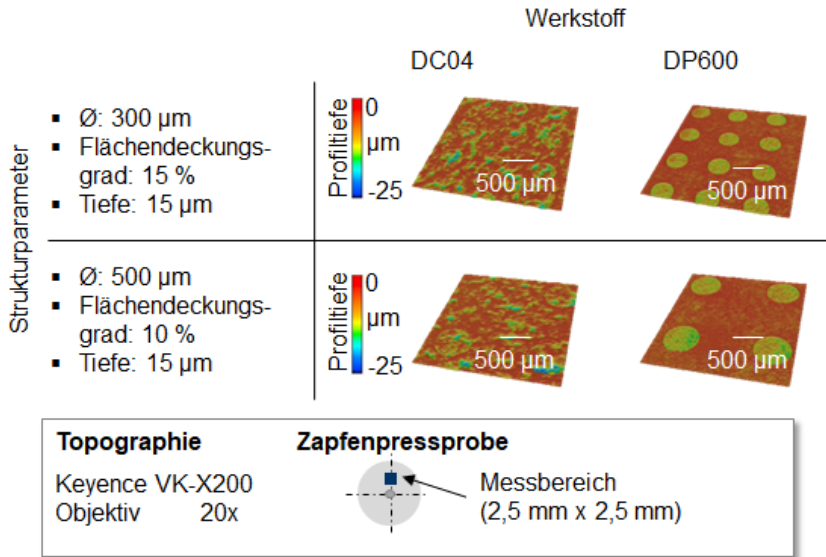


Bild 61: Mikrogeprägte Oberflächen nach der Umformung für die Werkstoffe DC04 und DP600

6.2.2.3 Ableitung und Verifizierung funktionaler Zusammenhänge

Das Ableiten von funktionalen Zusammenhängen zwischen den Randzoneigenschaften und der Reibung dient der Identifikation von tribologischen Wirkmechanismen mikrogeprägter Platinenoberflächen.

Hypothesen zur tribologischen Wirkweise mikrogeprägter Platinen

Die Korrelation von Verfestigungszunahmen und Reibfaktoren zeigt keinen eindeutigen Zusammenhang, Bild 62. Exemplarisch werden die Reibfaktoren aus dem Zapfenpressversuch und für DC04 gezeigt. Für den Ringtauchversuch resultieren ähnliche Zusammenhänge. Auf DP600 wird an dieser Stelle nicht eingegangen, da für diesen Werkstoff keine Reibungsreduzierung erreicht werden konnte. Bei der Analyse der Verfestigung konnte gezeigt werden, dass diese Randzoneeigenschaft mit abnehmenden Strukturdurchmesser und zunehmenden Flächendeckungsgrad zunimmt, Bild 57. Da eine zunehmende Verfestigung zu einer Stoffflusshemmung führt, müsste bei einer Beeinflussung des Stoffflusses durch die Verfestigung eine Zunahme der Reibung mit abnehmenden Strukturdurchmessern und zunehmenden Flächendeckungsgraden vorliegen. Da dieser

Zusammenhang nicht erkennbar ist, kann davon ausgegangen werden, dass die randnahe Verfestigung bei mikrogeprägten Proben nicht zu einer Stoffflusshemmung führt. Dieses Ergebnis widerspricht dem Untersuchungsergebnis von abrasivgestrahlten Platinenoberflächen und ist dadurch begründet sein, dass die Zunahme der Verfestigung für das Mikroprägen deutlich niedriger ausfällt als für das Abrasivstrahlen.

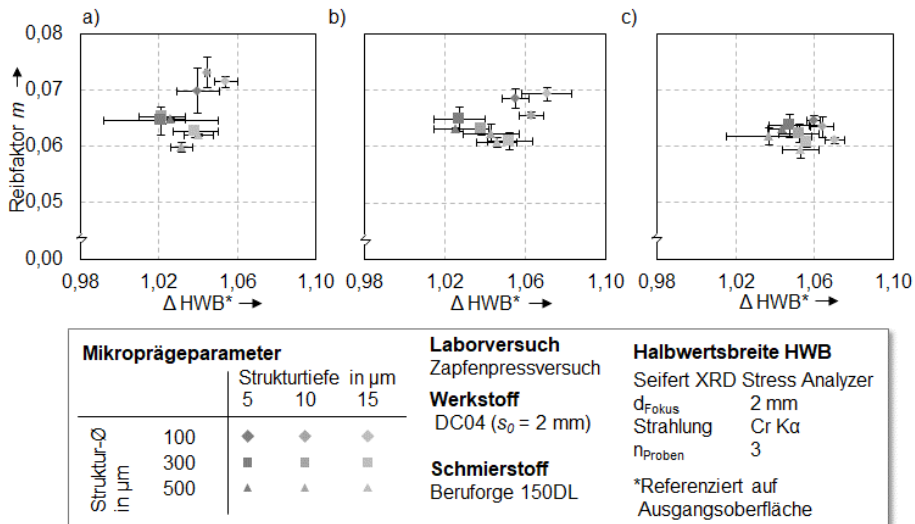


Bild 62: Korrelation von Reibfaktoren aus dem Zapfenpressversuch und Verfestigungszunahme für einen Flächendeckungsgrad von a) 5 %, b) 10 % und c) 15 %

Neben der Analyse der Verfestigung wird überprüft, wie Strukturvolumen und Strukturumfang die Reibung beeinflussen. Die Korrelation von Reibfaktor und Strukturvolumen zeigt, dass es wie vermutet einen Trend zu abnehmenden Reibfaktoren mit ansteigendem Strukturvolumen gibt, Bild 63. Durch das erhöhte Strukturvolumen kann mehr Schmierstoff gespeichert und während der Umformung freigegeben werden. Vor allem für die Durchmesser 500 μm und 300 μm kommt es bei einer zunehmenden Strukturtiefe und damit einem Anstieg des Strukturvolumens zu einer Reduktion der Reibung. Somit nimmt die Strukturtiefe Einfluss auf die Reibung. Je höher diese im untersuchten Parameterraum ist, desto niedriger ist der resultierende Reibfaktor. Im Hinblick auf das Strukturvolumen ist die Strukturtiefe die maßgebliche Einflussgröße. Für den Flächendeckungsgrad ist kein Trend ableitbar. Zusätzlich zeigen die Korrelationen in Bild 63, dass es bei gleichbleibendem Strukturvolumen zu einer Reibungsreduktion mit zunehmendem Strukturdurchmesser kommt. Somit liegt neben dem Einfluss des Strukturvolumens ein weiterer Einflussfaktor vor.

6 Entwicklung von maßgeschneiderten tribologischen Systemen im Laborversuch

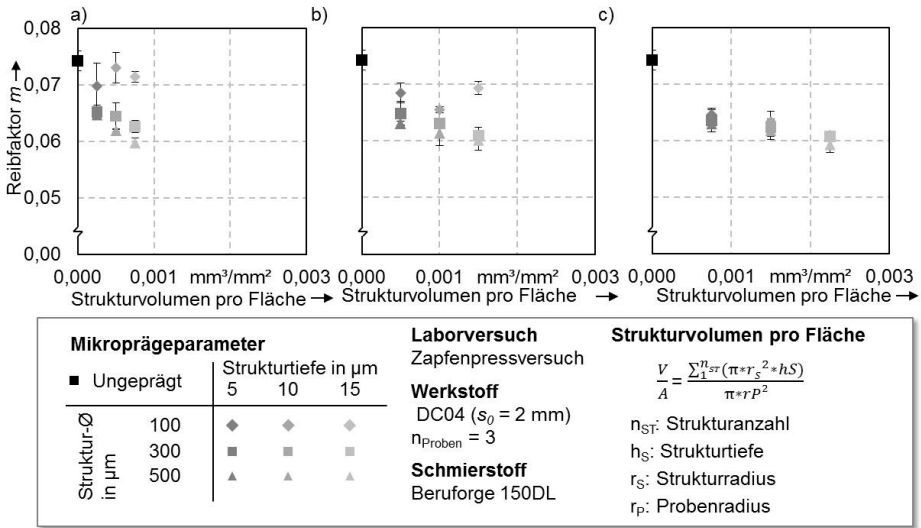


Bild 63: Korrelation von Reibfaktoren aus dem Zapfenpressversuch und Strukturvolumen für einen Flächendeckungsgrad von a) 5 %, b) 10 % und c) 15 %

Zur Identifikation dieses weiteren Einflussfaktors werden in Bild 64 Strukturumfang und Reibung korreliert. Die Diagramme zeigen, dass es einen Trend zu abnehmenden Reibfaktoren mit einer Reduktion des Strukturumfangs gibt. Der Strukturumfang wirkt sich auf die Interaktion zwischen geprägten Strukturen und auf der Ausgangsoberfläche vorhandenen EDT Strukturen aus. Je kleiner der Strukturumfang ist, desto kleiner ist das Potenzial zur Interaktion der Strukturen. Der Strukturumfang wird hier durch den Strukturdurchmesser beeinflusst. Somit scheint der Strukturdurchmesser ebenfalls die Reibung zu beeinflussen.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass einerseits das Strukturvolumen die Reibung beeinflusst. Dieser Wirkmechanismus kann über die erhöhte Menge an Schmierstoff, welcher während der Umformung bereitgestellt wird erklärt werden. Für das Strukturvolumen konnte gezeigt werden, dass besonders eine Erhöhung über die Strukturtiefe zur Reduzierung der Reibung geeignet ist. Andererseits deuten die Ergebnisse darauf hin, dass der Strukturumfang respektive der Strukturdurchmesser und damit die Interaktion von EDT Struktur und geprägter Struktur die Reibung beeinflussen. Um die hier zugrundeliegenden Wirkmechanismen zu verstehen, bedarf es weiterer Untersuchungen.

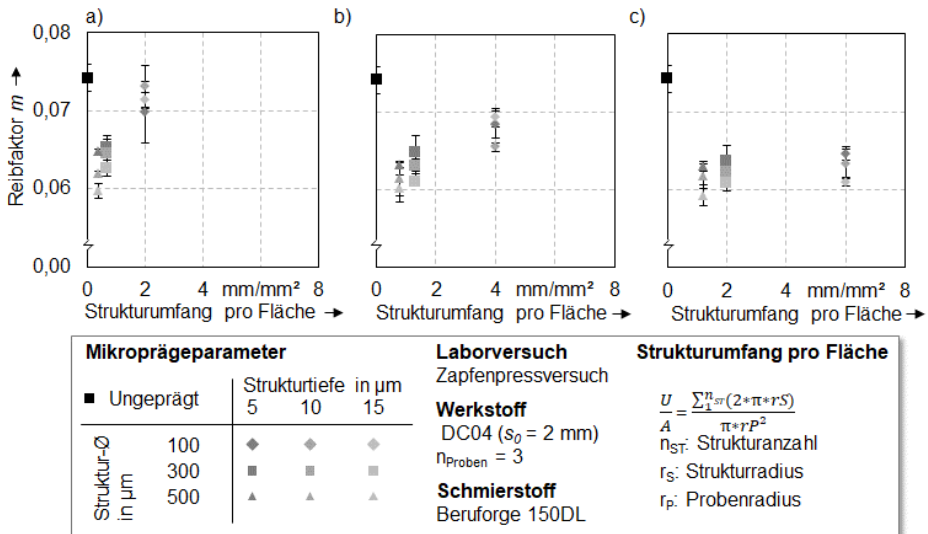


Bild 64: Korrelation von Reibfaktoren aus dem Zapfenpressversuch und Strukturumfang für einen Flächendeckungsgrad von a) 5 %, b) 10 % und c) 15 %

Numerische Verifizierung zur Ableitung von Modellvorstellungen

Für die Analyse des Einflusses des Strukturdurchmessers respektive Strukturumfangs wurde ein Halbraummodell genutzt. Die Berechnungen wurden durch den Lehrstuhl für Technische Mechanik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulationen wurden dem LFT zur Verfügung gestellt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen des Projektpartners liegt auf der Entwicklung des Halbraummodells, welches zur Erforschung eines konstitutiven Reibgesetzes für die Blechmassivumformung genutzt wird. Durch Halbraummodelle wird keine Diskretisierung des Volumens, sondern lediglich der Kontaktflächen vorgenommen. Dadurch wird eine vergleichsweise feine Auflösung der Oberfläche bei gleichzeitig reduzierten Rechenzeiten ermöglicht. Nähere Angaben zum Halbraummodell sind beispielsweise in [188] zu finden. In das Halbraummodell wurden die Kenngrößen des mechanisch-rheologischen Modells implementiert [189]. In Abhängigkeit einer Druckbelastung von bis zu 600 MPa kann die Entwicklung dieser Kenngrößen abgebildet werden. Über die Kenngrößen ist ein Rückschluss auf die tribologischen Eigenschaften möglich. Es ist davon auszugehen, dass beispielsweise mit einem zunehmenden geschlossenen Leerflächenanteil α_{cl} die Reibung sinkt. Neben der Entwicklung von geschlossenen und offenen Schmieraschen kann der Verlauf des hydrostatischen Drucks ausgeleitet

werden. Je höher der hydrostatische Druck ist, desto höher ist das Potenzial zur Reibungsreduzierung, da der Schmierstoff in den Schmiertaschen gehalten wird und zur Reibungsreduzierung beiträgt. Für die Modellierung wird das Werkstück elastisch-plastisch simuliert. Die Werkzeuge werden als elastisch angenommen. Für die Analyse der Entwicklung der Oberflächenkenngrößen werden die topographischen Aufnahmen realer Oberflächen genutzt. Die eingelesenen Aufnahmen haben eine Größe von 2,3 mm x 2,3 mm. Für die Werkzeugoberfläche wird die Aufnahme einer geläpften Werkzeugoberfläche aus ASP2023 verwendet. Exemplarisch wurde der Einfluss des Strukturdurchmessers für Oberflächen mit einem Flächendeckungsgrad von 10 % und 15 % untersucht. Als Strukturtiefe wurde 15 µm gewählt. Untersucht wurde der geschlossene Leerflächenanteil α_{cl} und der hydrostatische Druck für die Strukturdurchmesser 300 µm und 500 µm. Für die Verläufe beider Auswertegrößen wurden Stützstellen im Bereich von 0 bis 600 MPa in Schritten von 25 MPa gewählt. Die Analyse des geschlossenen Leerflächenanteils weist einen Trend zu einem zunehmenden α_{cl} Wert mit zunehmendem Strukturdurchmesser auf, Bild 65.

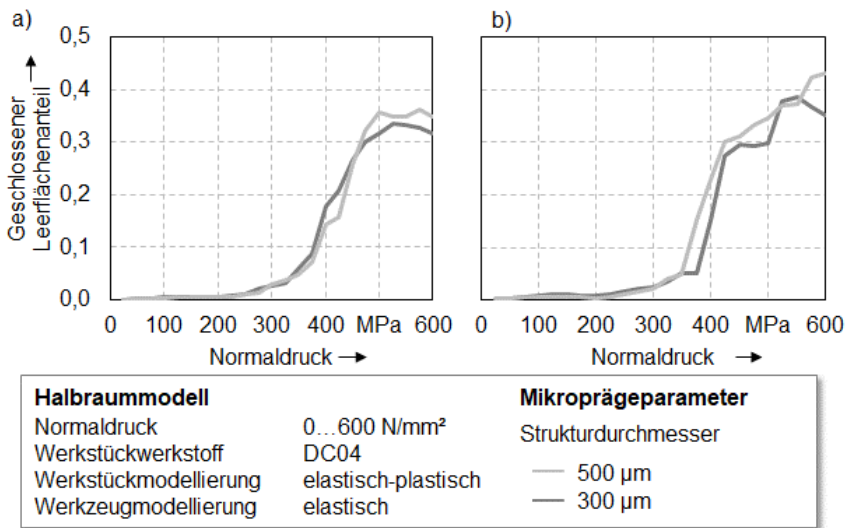


Bild 65: Verlauf des geschlossenen Leerflächenanteils für Strukturdurchmesser 300 µm und 500 µm, Flächendeckungsgrade von a) 10 % und b) 15 % bei einer Strukturtiefe von 15 µm

Vor allem bei einem Normaldruck von 600 MPa ist ein signifikanter Unterschied zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass mit zunehmendem Strukturdurchmesser bei gleichbleibenden Strukturvolumen einen höheren Anteil der Fläche durch geschlossene Schmiertaschen gekennzeichnet ist.

Die Zunahme des geschlossenen Leerflächenanteils geht einher mit einer Zunahme des hydrostatischen Drucks, Bild 66. Für größere Strukturdurchmesser bei gleichbleibenden Strukturvolumen liegt für beide Flächendeckungsgrade ein höherer hydrostatischer Druck vor. Somit kann der Schmierstoff in den Strukturen gehalten werden und zu einer Reibungsreduzierung beitragen. Insgesamt kann somit davon ausgegangen werden, dass ein zunehmender Strukturdurchmesser, welche einher geht mit einem abnehmenden Strukturumfang, zu einer Zunahme des geschlossenen Leerflächenanteils und des hydrostatischen Drucks führt.

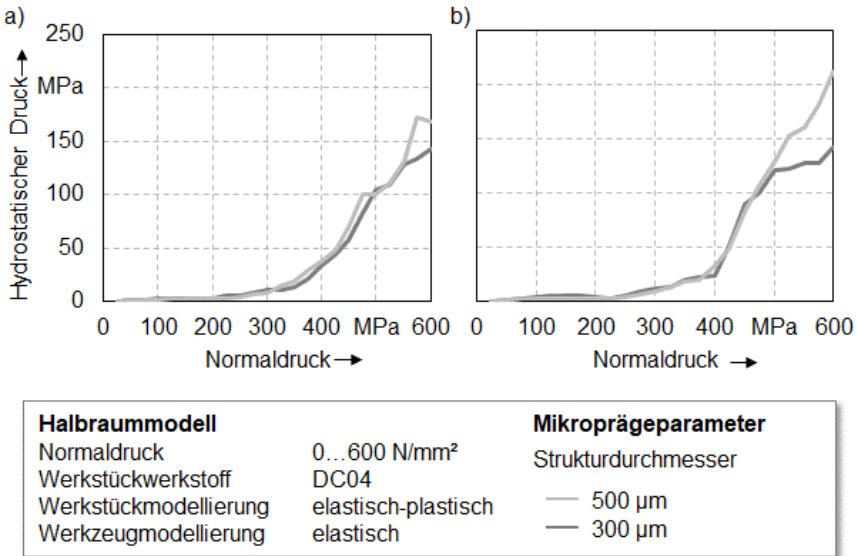


Bild 66: Verlauf des hydrostatischen Drucks für Strukturdurchmesser 300 µm und 500 µm, Flächendeckungsgrade von a) 10 % und b) 15 % bei einer Strukturtiefe von 15 µm

Um zu verstehen, wodurch dieser Zusammenhang begründet ist, wurde das Verhältnis von wahrer Kontaktfläche, geschlossenen und offenen Schmiertaschen für zwei ausgewählte Strukturdurchmesser analysiert. Für einen aufgetragenen Normaldruck von 500 und 600 MPa weisen die Oberflächen in Abhängigkeit des Strukturdurchmessers eine unterschiedliche Anzahl an geschlossenen und offenen Schmiertaschen auf, Bild 67. Bei dem größeren Strukturdurchmesser liegt eine höhere Anzahl an geschlossenen Schmiertaschen vor. In diesen Schmiertaschen kann der Schmierstoff gespeichert werden, was sich positiv auf die Reibungsreduzierung auswirkt. Die Bilder deuten darauf hin, dass bei den Oberflächen offene Schmiertaschen durch eine Interaktion der EDT Oberfläche und der geprägten Strukturen gebildet werden. Bei einem Strukturdurchmesser von 300 µm

kommt es zu einer verstärkten Interaktion der beiden Strukturen und damit einer höheren Anzahl an offenen Schmiertaschen. Erklärt werden kann dies über den Strukturumfang sämtlicher Strukturen auf der Platinenoberfläche. Je größer dieser Wert ist, desto mehr Berührungspunkte gibt es zwischen der EDT Struktur und den geprägten Strukturen.

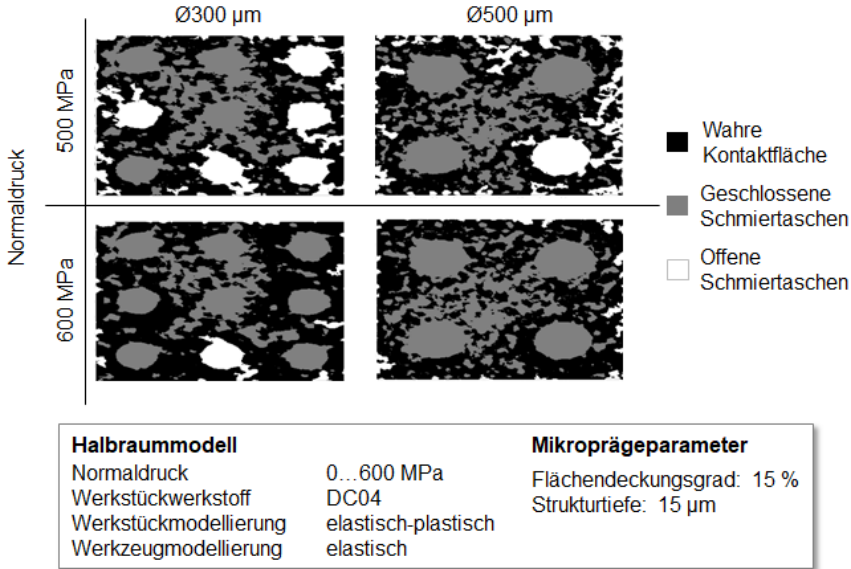


Bild 67: Verhältnis von wahrer Kontaktflächen und geschlossenen und offenen Schmiertaschen für einen Flächendeckungsgrad von 15 %, eine Strukturtiefe von 15 μm

Da der Gesamtstrukturumfang auf der Oberfläche für den Durchmesser 300 μm größer ist als bei einem Durchmesser von 500 μm kommt es zu einer verstärkten Interaktion der beiden Strukturarten. Dies führt zu einer höheren Anzahl an offenen Schmiertaschen, aus denen Schmierstoff abfließen kann und beeinflusst die Reibung. Somit ist nachgewiesen, dass die Interaktion der geprägten Strukturen mit der Ausgangsoberfläche der Platine die Reibung beeinflusst. Je kleiner das Potenzial zur Interaktion ist, desto höher ist der reibungsreduzierende Effekt.

Experimentelle Verifizierung

Auf Basis der numerischen Untersuchungen konnte ein signifikanter Einfluss der auf der Platinenoberfläche vorhandenen Ausgangsstruktur nachgewiesen werden. Um diesen Einfluss experimentell zu verifizieren, wurde die Ausgangsoberfläche von Proben aus dem Werkstoff DCo₄ modifiziert. Einerseits werden die Schmiertaschen auf geschliffene Platinen geprägt. Durch das Schleifen wird eine kanalartige Oberflächenstruktur erzeugt. Andererseits werden geläppte Oberflächen geprägt. Das Läppen ist ein dem Polieren ähnliches Verfahren, welches den geschlossenen und offenen Leerflächenanteil verkleinert. Dadurch ist nahezu keine Struktur mehr vorhanden, mit der die geprägten Strukturen interagieren können. Auf die drei Ausgangsoberflächen wurden Strukturen mit einem Durchmesser von 300 µm und 500 µm und einer Strukturtiefe von 15 µm geprägt. Als Flächendeckungsgrade wurden 5 % und 15 % gewählt. Bild 68 zeigt Topographiaufnahmen der drei Ausgangsoberflächen und der geprägten Platinenoberflächen.

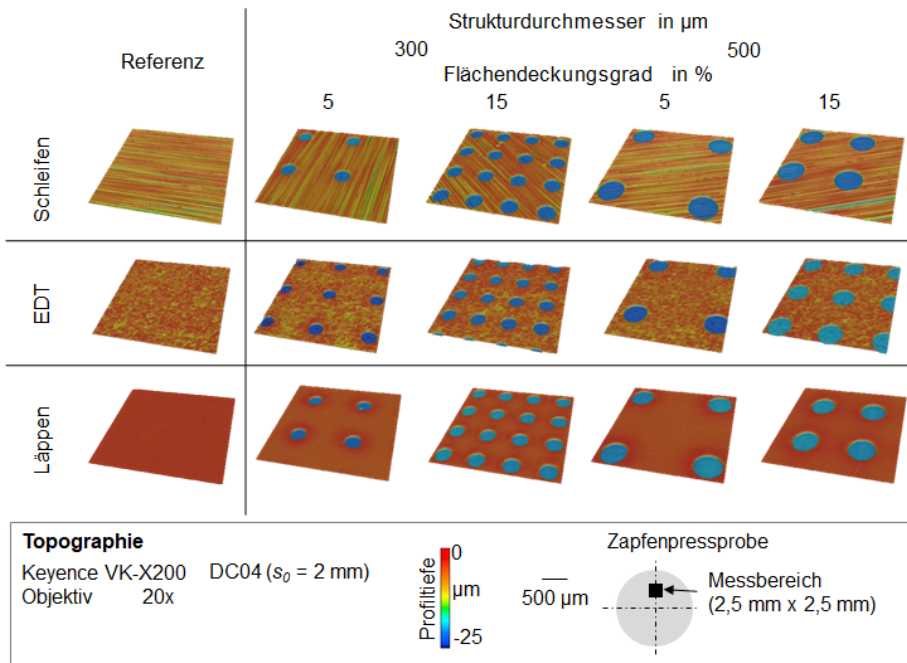


Bild 68: Topographiaufnahmen geprägten Platinenoberflächen auf EDT, geschliffenen und geläpften Ausgangsoberflächen mit einer Strukturtiefe von 15 µm

Während bei der geschliffenen Struktur Kanäle, über die der Schmierstoff abfließen kann, erkennbar sind, ist auf der geläppten Oberfläche für die analysierte Profiltiefe keine Ausgangsstruktur der Platinenoberfläche zu erkennen. Durch das Prägen von geschliffenen Oberflächen soll die Interaktion von geprägten Strukturen und Ausgangsoberfläche verstärkt werden. Dies führt zu einer verstärkten Bildung von offenen Schmieraschen. Das Prägen geläppter Oberflächen unterbindet nahezu die Interaktion von geprägten Strukturen und Ausgangsoberfläche. Dies bewirkt den gegenteiligen Effekt. Für die geprägten EDT Oberflächen ist der bereits diskutierte Effekt zu erkennen. Durch einen zunehmenden Strukturdurchmesser kommt es zu einer Abnahme des Reibfaktors bei gleichbleibendem Strukturvolumen, Bild 69 a).

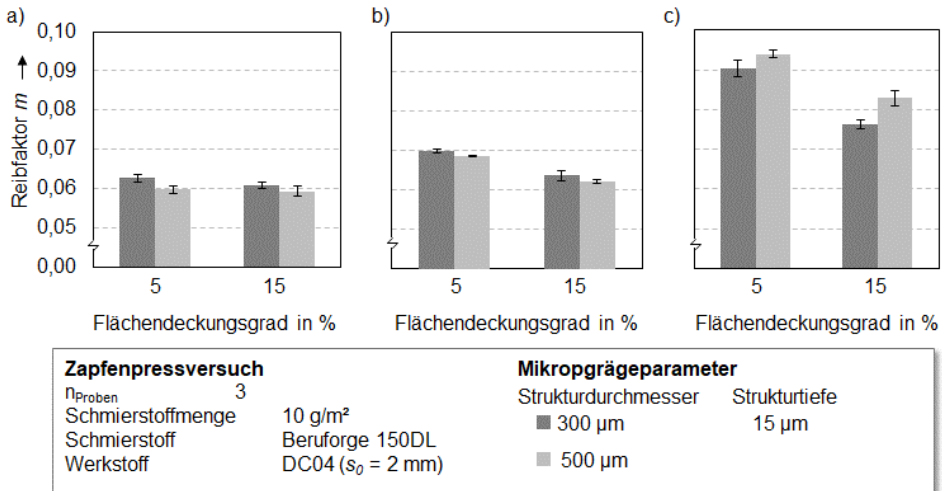


Bild 69: Reibfaktoren im Zapfenpressversuch für die Ausgangsoberflächen a) EDT, b) geschliffen und c) geläppt

Dies kann auf eine Interaktion von EDT Strukturen und geprägten Strukturen zurückgeführt werden. Dieser Effekt wird durch die geschliffenen Oberflächen bestätigt. Mit zunehmendem Strukturdurchmesser sinkt für diese Ausgangsoberfläche ebenfalls der Reibfaktor, Bild 69 b). Für einen Flächendeckungsgrad von 5 % nimmt m von $0,0700 \pm 0,0005$ auf $0,0687 \pm 0,00009$ ab. Bei einem Flächendeckungsgrad von 15 % kommt es zu einer Reibungsreduzierung um 2,5 %. Dieser Zusammenhang ist identisch mit der Wirkung von EDT Oberflächen und bestätigt die Annahme, dass es durch die Interaktion von Ausgangsoberfläche und geprägten Strukturen zu einer Beeinflussung der Reibung kommt. Die Untersuchung

der geläpten Oberfläche zeigt ebenfalls die Bedeutung der Ausgangsoberfläche. Für diese Oberfläche steigen die Reibfaktoren mit zunehmendem Strukturdurchmesser an, Bild 69 c). Für einen Flächendeckungsgrad von 5 % nimmt der Reibfaktor mit steigendem Strukturdurchmesser um 4 % zu. Bei einem Flächendeckungsgrad von 15 % liegt ein Anstieg um 8,5 % vor. Dieser Zusammenhang ist gegenteilig zu den Ergebnissen der geschliffenen und der EDT Oberflächen, bestätigt jedoch die getroffene Annahme. Aufgrund des niedrigen geschlossenen Leerflächenanteils der Ausgangsoberfläche kommt es zu nahezu keiner Interaktion zwischen Ausgangsoberfläche und geprägten Strukturen. Der Anstieg der Reibfaktoren mit zunehmendem Strukturdurchmesser ist auf die reduzierte Strukturanzahl zurückzuführen. Der Schmierstoff kann bei derartigen Oberflächen lediglich in den Strukturen und nicht in den Zwischenflächen gespeichert werden. Das fehlende Speichervolumen auf der Ausgangsoberfläche führt bei abnehmender Strukturanzahl zu zunehmenden Reibfaktoren.

Auf Basis der Ergebnisse ist festzuhalten, dass der tribologische Wirkmechanismus von geprägten Platinenoberflächen sowohl vom Strukturvolumen als auch von der Interaktion der aufgetragenen Strukturen mit der Ausgangsoberfläche bestimmt werden. Im Hinblick auf das Strukturvolumen gilt: Je größer das Strukturvolumen ist, desto höher ist das reibungsreduzierende Potenzial. Die Vergrößerung des Strukturvolumens sollte im hier untersuchten Parameterraum über die Strukturtiefe realisiert werden. Im Hinblick auf die Interaktion mit der vorhandenen Struktur auf der Ausgangsoberfläche ist festzuhalten, dass diese möglichst gering gehalten werden sollte. Dies ist dadurch begründet, dass die Interaktion die Bildung offener Schmiertaschen begünstigt und damit das reibungsreduzierende Potenzial herabsetzt. Im Rahmen der untersuchten Strukturen kann die Interaktion über einen möglichst geringen Strukturumfang respektive großen Strukturdurchmesser reduziert werden.

6.3 Reibungsbeeinflussung durch werkzeugseitige Oberflächenmodifikationen

Eine Reibungserhöhung und -reduzierung ist auch durch eine Modifikation der Werkzeugoberfläche möglich. Nachdem in Abschnitt 6.2 Möglichkeiten zur Realisierung der Anforderungen mit Hilfe platinenseitiger Oberflächenmodifikationen aufgezeigt wurden, ist das Ziel dieses Abschnitts die Identifikation der tribologischen Wirkmechanismen von werkzeugseitigen Maßnahmen.

6.3.1 Hochvorschubfräsen von Werkzeugoberflächen

Bei der Modifikation der Werkzeugoberfläche sind lediglich die veränderten topographischen Eigenschaften respektive die chemische Oberflächenzusammensetzung als tribologisch relevante Randzoneneigenschaften zu bewerten. Die randnahen Eigenschaften, wie Verfestigung oder Eigenspannungszustand sind für die Reibeigenschaften nicht relevant, da die Werkzeuge so ausgelegt sind, dass es zu keiner signifikanten plastischen Verformung während der Umformung kommt. Eine Möglichkeit, die topographischen Randzoneneigenschaften zu verändern, ist das Hochvorschubfräsen. Um die Eignung dieses Verfahrens zur werkzeugseitigen Reibungserhöhung bei gleichzeitiger Identifikation der tribologisch relevanten Randzoneneigenschaften zu bewerten, wurden unterschiedliche Oberflächen mit abweichenden topographischen Eigenschaften gefertigt. Die Parameter sind in Abschnitt 4.2.2 aufgeführt.

6.3.1.1 Charakterisierung hochvorschubgefräster Werkzeugoberflächen

Eine Veränderung des Anstellwinkels führt zu einem veränderten Materialabtrag und somit zu einer Modifizierung der topographischen Eigenschaften, Bild 70. Die Aufnahmen zeigen, dass eine Zunahme des Anstellwinkels zu einem Anstieg der Profiltiefe führt.

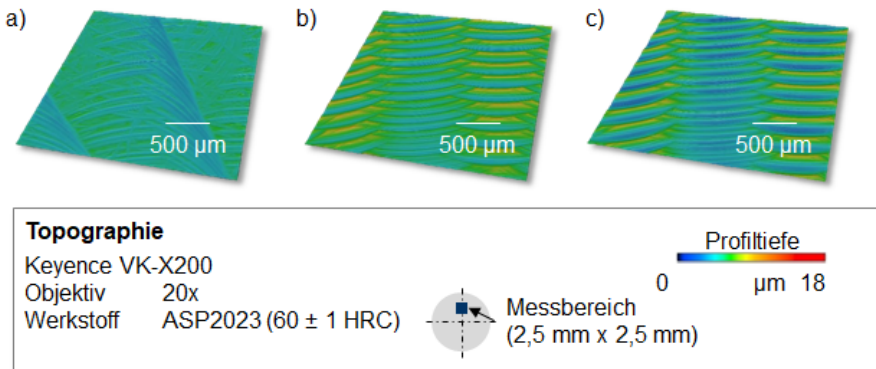


Bild 70: Topographieaufnahmen hochvorschubgefräster Werkzeugoberflächen mit einem Anstellwinkel α von a) 0° , b) $1,5^\circ$ und c) $3,0^\circ$

Dies wird durch die arithmetische Mittenrauheit R_a und die reduzierte Spitzenhöhe R_{pk} bestätigt, Bild 71. Im Vergleich zur geläppten Ausgangsoberfläche ist durch sämtliche Anstellwinkel ein Anstieg der Rauheit zu erkennen.

Der mittlere R_a -Wert steigt von $0,39 \mu\text{m}$ über $0,62 \mu\text{m}$ bis hin zu $0,75 \mu\text{m}$. Aufgrund des Materialabtrags und der sichelartigen Struktur hochvorschubgefräster Oberflächen ist der Spitzenbereich, welcher durch R_{pk} abgebildet wird, von besonderem Interesse. Dieser Wert bestätigt, dass es zu einem signifikanten Anstieg der Rauheit gegenüber der Ausgangsoberfläche kommt, Bild 71 b). Die reduzierte Spitzenhöhe steigt von $0,49 \mu\text{m}$ über $1,06 \mu\text{m}$ bis hin zu $1,38 \mu\text{m}$. Somit kann durch eine Veränderung des Anstellwinkels hochvorschubgefräste Oberflächen mit abweichenden topographischen Eigenschaften gefertigt werden.

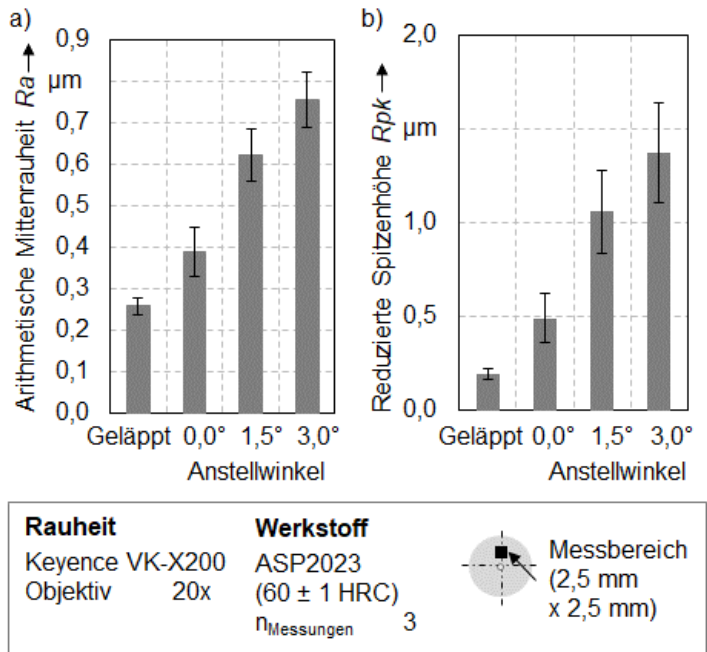


Bild 71: Arithmetische Mittenrauheit und reduzierte Spitzenhöhe in Abhängigkeit des Anstellwinkels

6.3.1.2 Reibverhalten hochvorschubgefräster Werkzeugoberflächen

Die Reibeigenschaften wurden im Zapfenpress- und Ringstauchversuch für die Werkstoffe DP600 und DCo4 ermittelt. Für beide Werkstoffe nimmt die Reibung durch das Hochvorschubfräsen im Vergleich zur geläppten Ausgangsoberfläche zu, Bild 72. Des Weiteren gibt es einen Trend zu steigenden Reibfaktoren mit zunehmenden Anstellwinkel und damit zunehmenden Profiltiefen. Für den Werkstoff DCo4 nehmen die prozentualen Reibungszunahmen mit ansteigendem Anstellwinkel Werte von 9 %, 36 % und 46 % an. Für DP600 liegen die Reibfaktoren niedriger. Dies ist auf die geringere Ausgangsrauheit der Platinen aus DP600 zurückzuführen.

Die Ergebnisse des Ringstauchversuchs bestätigen die getroffenen Annahmen, Bild 73. Mit zunehmendem Anstellwinkel nimmt der Reibfaktor für beide Werkstoffe zu. Für beide Werkstoffe ist vor allem für die Anstellwinkel $1,5^\circ$ und $3,0^\circ$ ein signifikanter Anstieg der Reibung zu erkennen. Bei einem Anstellwinkel von 0° liegen lediglich Zunahmen von 1 % für DCo4 und 4 % für DP600 vor. Des Weiteren sind analog zum Zapfenpressversuch die Reibfaktoren für DP600 niedriger als für DCo4.

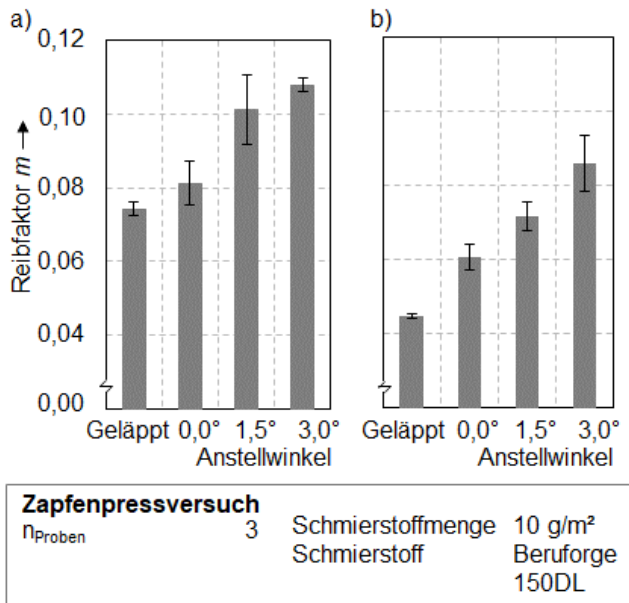


Bild 72: Reibfaktoren im Zapfenpressversuch für die Werkstoffe a) DCo4 und b) DP600

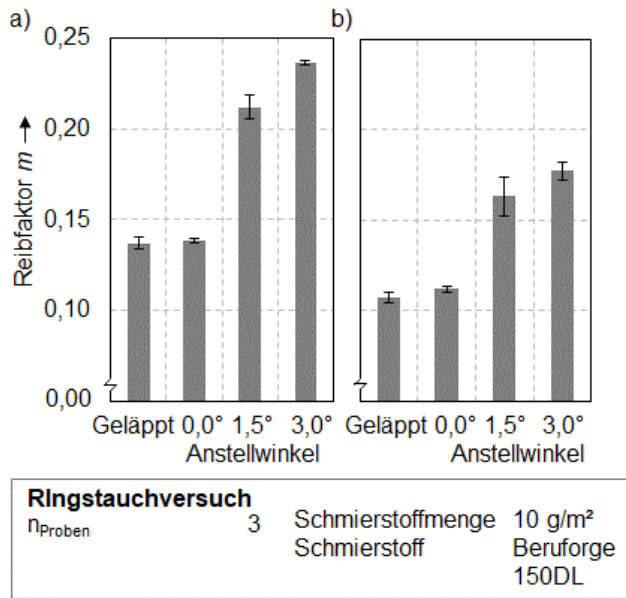


Bild 73: Reibfaktoren im Ringstauchversuch für die Werkstoffe a) DCo4 und b) DP600

6.3.1.3 Ableitung und Verifizierung funktionaler Zusammenhänge

Aufbauend auf der Analyse der Randzonen- und Reibeigenschaften werden funktionale Zusammenhänge abgeleitet. Für beide Werkstoffe wird vermutet, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Rauheit und Reibung vorliegt, Bild 74. Mit zunehmender Rauheit steigt der Reibfaktor. Für einen linearen Zusammenhang liegt das Bestimmtheitsmaß der Funktion für DCo4 bei 0,99 und für DP600 bei 0,97. Dies entspricht einer hohen Güte des Zusammenhangs. Erklärt werden kann der Anstieg der Reibung mit zunehmenden Reibfaktor über ein Verhaken der Rauheitsspitzen von Werkzeug- und Werkstückoberfläche. Dies führt zu einer Stoffflusshemmung und Reibungserhöhung.

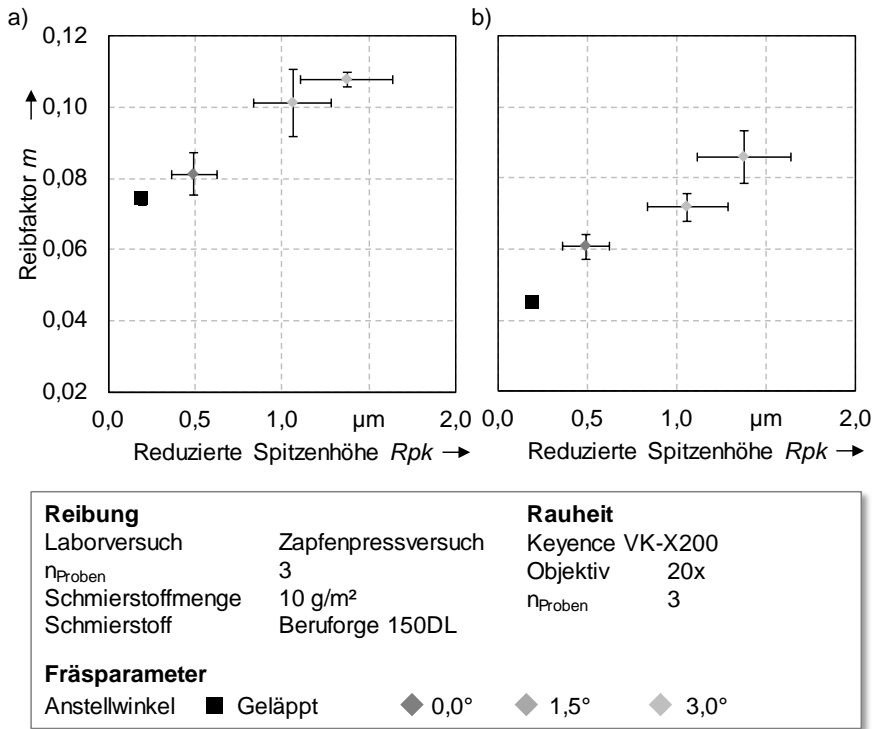


Bild 74: Korrelation von Reibfaktoren aus dem Zapfenpressversuch und Rauheit für a) DCo₄ und b) DP600

Um die durch eine Rauheitserhöhung bedingte Stoffflusshemmung zu verifizieren, wird der Einfluss einer gefrästen Topographie auf den Stofffluss durch numerische Untersuchungen analysiert. Als Simulationsmodell wurde das Modell des Zapfenpressversuchs gewählt. Auf die Oberflächen von Stempel und Matrize wurden die geometrischen Eigenschaften einer Oberfläche, welche mit einem Anstellwinkel von 3° gefräst wurde, appliziert, Bild 75.

Die Fließgeschwindigkeiten wurden am umgeformten Bauteil im Bereich des Zapfens und im Flanschbereich ausgewertet. Als Reibfaktor wurde $m = 0,1$ eingestellt. Für den Platinenwerkstoff wurde die Fließkurve des Werkstoffs DCo₄ verwendet. Bei der Analyse der umgeformten Platinen führen die strukturierten Werkzeugoberflächen zu einer signifikanten Steigerung der Bauteilhöhen mit einem Wert von 3,21 mm. Für nicht strukturierte Werkzeuge ist die Bauteilhöhe 2,42 mm. Dies bestätigt die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen. Durch eine zunehmende

Rauheit der Oberfläche kommt es zu einem Anstieg der Bauteilhöhe und damit der Reibung.

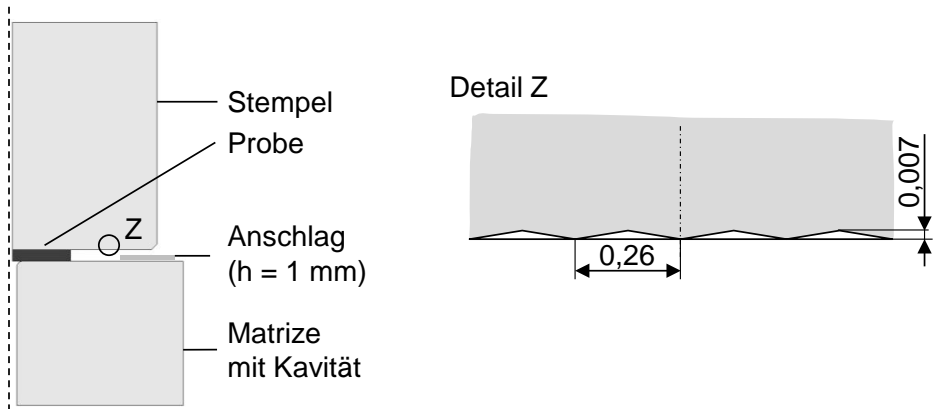


Bild 75: Geometrie einer hochvorschubgefrästen Oberfläche für numerische Untersuchungen des Zapfenpressversuchs

Die Analyse der x-Fließgeschwindigkeiten im Flanschbereich zeigt, dass durch die Strukturierung der Werkzeugoberflächen die Fließgeschwindigkeiten in x-Richtung reduziert werden, Bild 76 c). Dies deutet darauf hin, dass es durch die Strukturierung zu einer Stoffflusshemmung in lateraler Richtung kommt. Ein weiteres Indiz dafür ist der Geschwindigkeitsgradient über die Bauteilhöhe im Flanschbereich. Beide Verläufe weisen in der Bauteilmitte höhere x Fließgeschwindigkeiten auf als im Kontaktbereich von Werkstück- und Werkzeugoberfläche. Dies ist dadurch begründet, dass der Werkstoff in der Mitte des Bauteils frei in x-Richtung fließen kann. Für die Simulation mit der strukturierten Oberfläche ist der Geschwindigkeitsgradient über die Höhe des Flansches wesentlich größer, was auf eine erhöhte Stoffflusshemmung im Kontaktbereich Werkstück-Werkzeug hindeutet. Die Stoffflusshemmung in x-Richtung wird durch die Fließgeschwindigkeiten im Zapfen bestätigt, Bild 76 a) und b). Für die strukturierten Werkzeugoberflächen ist die z-Fließgeschwindigkeit und die betragsmäßige x-Fließgeschwindigkeit im Zapfenbereich höher, was auf einen verstärkten Materialfluss in die Matrizenkavität hindeutet. Somit wird der laterale Stofffluss durch die veränderte Topographie gehemmt, und mehr Material fließt in die Matrizenkavität, was wiederum zu höheren Bauteilhöhen führt. Für hochvorschubgefräste Oberfläche ist festzuhalten, dass die Topographie ein entscheidender tribologischer Wirkmechanismus im Hinblick auf die Stoffflusshemmung ist. Mit zunehmender Rauheit wird der Stofffluss gehemmt und damit die Reibung erhöht.

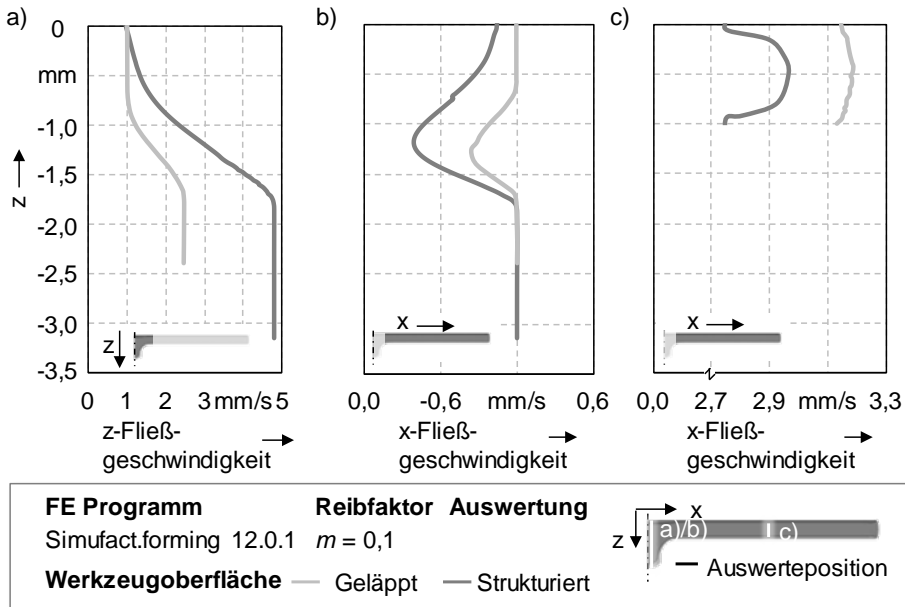


Bild 76: Verlauf a) der z-Fließgeschwindigkeit und b) der x-Fließgeschwindigkeit im Bereich des Zapfens und c) Verlauf der x Fließgeschwindigkeit in der Bauteilmitte

6.3.2 Beschichten von Werkzeugeoberflächen

Durch den Beschichtungsprozess wird eine Auflageschicht auf die Werkzeugeoberfläche aufgebracht. Diese weist eine veränderte chemische Zusammensetzung im Vergleich zur Ausgangsoberfläche auf und beeinflusst damit Stofffluss und Reibung. Neben der chemischen Zusammensetzung kommt es durch den Beschichtungsprozess zu einer Veränderung der Oberflächenrauheit, da die Rauheit der Ausgangsoberfläche durch den Beschichtungsprozess nicht identisch reproduziert wird. Um den Einfluss von Rauheit und chemischer Zusammensetzung zu analysieren, wird der Kohlenstoffanteil in der Beschichtung geändert und die beschichteten Werkzeugeoberflächen werden im unpolierten und polierten Zustand untersucht. Da eine gleichmäßige Politur der Zapfenpresswerkzeuge aufgrund der Kavität schwieriger zu realisieren ist, wurden diese Untersuchungen auf den Ringstauchversuch beschränkt.

6.3.2.1 Charakterisierung beschichteter Werkzeugoberflächen

Die taktile Messung der Oberflächenrauheiten zeigt, dass die Rauheit für sämtliche nicht nachbehandelten Oberflächen im Vergleich zur unbeschichteten Referenzoberfläche ansteigt, Bild 77. Des Weiteren ist zu erkennen, dass das Polieren der unbeschichteten Referenzoberfläche zu einer Reduzierung der Rauheit führt. Auch für sämtliche polierten Beschichtungen verringert der Polierschritt den Wert für Rpk .

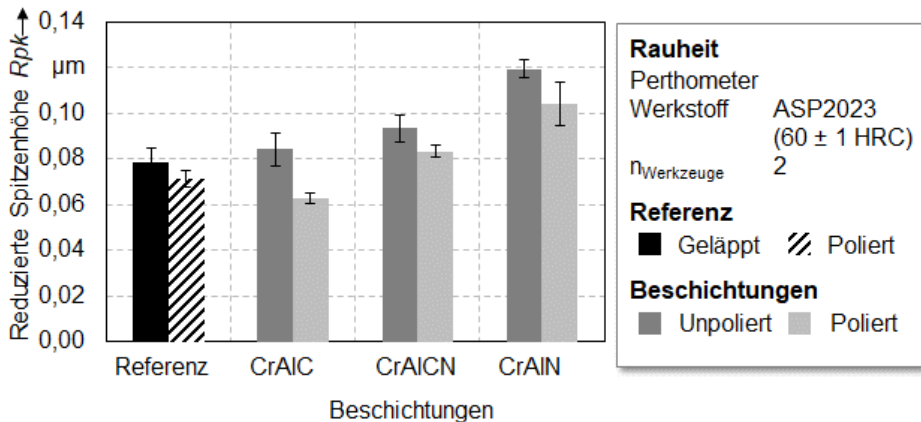


Bild 77: Reduzierte Spitzenhöhe für die Referenzoberfläche und beschichtete Oberflächen im unpolierten und polierten Zustand

Bei der CrAlC-Beschichtung wird die Rauheit von $0,084 \pm 0,007 \mu\text{m}$ auf $0,063 \pm 0,002 \mu\text{m}$ reduziert. Für die CrAlCN-Schicht ist eine durchschnittliche prozentuale Reduzierung um 12 % erreichbar. Bei der Beschichtung CrAlN liegt dieser Wert bei 15 %. Somit ist durch das Polieren eine Verringerung der Rauheit erreichbar, was die Untersuchung des Rauheitseinflusses ermöglicht.

6.3.2.2 Reibverhalten beschichteter Werkzeugoberflächen

Die Reibeigenschaften der un- und nachbehandelten Beschichtungen wurden im Ringstauchversuch für die beiden Werkstoffe DCo4 und DP600 ermittelt. Gegenüber der geläppten Referenz ist vor allem durch die unpolierten CrAlCN- und CrAlN-Beschichtung ein signifikanter Anstieg der Reibung zu erkennen, Bild 78.

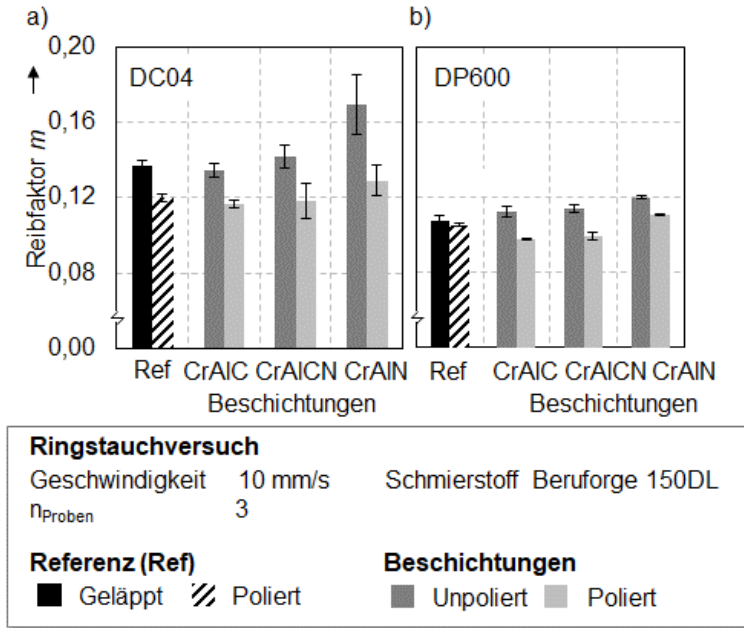


Bild 78: Reibfaktoren im Ringstauchversuch für die Werkstoffe a) DC04 und b) DP600

Der höchste Reibfaktor liegt bei DC04 für die CrAlN-Beschichtung mit $0,17 \pm 0,02$ vor. Dies entspricht einer Reibungszunahme von circa 24 % gegenüber der geläpften Referenzoberfläche. Für die CrAlCN-Beschichtung liegt eine Zunahme von 4 % vor. Bei der CrAlC-Beschichtung liegt keine signifikante Abweichung zur Referenz vor. Für DP600 treten ähnliche Tendenzen auf. Für die nicht nachbehandelten Beschichtungen ist somit keine Reibungsreduzierung möglich. Für die polierten Beschichtungen liegt für sämtliche Varianten eine Reduzierung der Reibung sowohl im Vergleich zu den unpolierten Beschichtungen als auch im Vergleich zur geläpften Referenz vor. Die niedrigste Reibung weist die CrAlC-Beschichtung mit einem Reibfaktor von $0,116 \pm 0,002$ auf. Eine mittlere Reibung liegt für die CrAlCN-Beschichtung mit einem durchschnittlichen Reibfaktor von $0,118$ vor. Die höchste Reibung wird für die CrAlN-Beschichtung mit einem Reibfaktor von $0,129 \pm 0,008$ gemessen. Werden die nachbehandelten Beschichtungen mit der polierten Referenz verglichen, ist zu erkennen, dass vor allem durch die CrAlC-Beschichtung eine Reibungsreduzierung erreicht werden kann. Auch für die CrAlCN-Beschichtung liegt der mittlere Reibfaktor mit $0,118$ leicht unter dem mittleren Reibfaktor der polierten Referenz mit $0,12$. Somit besteht ebenfalls die Möglichkeit, dass durch die

Beschichtungen die Reibung im Vergleich zu einer polierten Referenzoberfläche reduziert wird. Das Ergebnis deutet darauf hin, dass Beschichtungen im Sinne des Untersuchungsziels nutzbar sind. Dies hat neben der Reibungsreduzierung einen weiteren positiven Effekt. Beschichtungen sind Verschleißschutzschichten und beeinflussen somit das Verschleißverhalten der Werkzeugoberflächen positiv. Die Ergebnisse deuten insgesamt darauf hin, dass die geänderte chemische Zusammensetzung und die Oberflächenrauheit die Reibung beeinflusst.

6.3.2.3 Ableitung und Verifizierung funktionaler Zusammenhänge

Die Korrelation des Kohlenstoffanteils mit den ermittelten Reibfaktoren zeigt, dass ein zunehmender Kohlenstoffanteil zu einer abnehmenden Reibung führt, (Bild 79 a). Der Kohlenstoffanteil ist der einzige Parameter, der in der Elementzusammensetzung variiert. Somit bestimmt dieser Parameter maßgeblich die chemische Zusammensetzung. Sowohl für den polierten als auch für den unpolierten Zustand ist ein linearer Zusammenhang zwischen zunehmendem Kohlenstoffanteil und abnehmender Reibung zu erkennen. Somit scheint die chemische Zusammensetzung eine tribologisch relevante Randzoneneigenschaft zu sein. In Bild 79 a) ist jedoch auch zu erkennen, dass durch die unpolierten Oberflächen keine Reduzierung der Reibung gegenüber der geläpften Referenz erreichbar ist. Unter diesen Umständen sind chrombasierte Hartstoffschichten nicht im Sinne des Untersuchungsziels einsetzbar. Da für die nachbehandelten Beschichtungen eine Reibungs-reduzierung vorliegt, wurde zusätzlich die Rauheit mit der Reibung korreliert. Je höher die Rauheit ist, desto höher ist die Reibung, (Bild 79 b). Durch das Polieren der Beschichtungen kann eine signifikante Rauheitsreduzierung bei sämtlichen Varianten erzielt werden. Diese beeinflusst wiederum die Reibung, was darauf hindeutet, dass die Oberflächenrauheit von beschichteten Oberflächen eine weitere tribologisch relevante Oberflächeneigenschaft ist. Die Analyse der CrAlCN-Beschichtung zeigt, dass die Rauheit leicht höher ist als die der beiden Referenzoberflächen. Jedoch ist die Reibung niedriger. Dies deutet darauf hin, dass ein Zusammenspiel aus chemischer Oberflächenzusammensetzung und Oberflächenrauheit die Reibung und damit den Stofffluss beeinflusst. Zur Reduzierung der Reibung ist somit die Elementzusammensetzung der Beschichtung mit dem Ziel einer hohen Reibungsreduzierung anzupassen. Zusätzlich sind die beschichteten Oberflächen nachzubehandeln, um die durch den Beschichtungsprozess erhöhte Rauheit zu reduzieren. Bei Be-

rücksichtigung dieser beiden Aspekte sind Beschichtungen zur Reibungsreduzierung und als Verschleißschichten in der Blechmassivumformung einsetzbar.

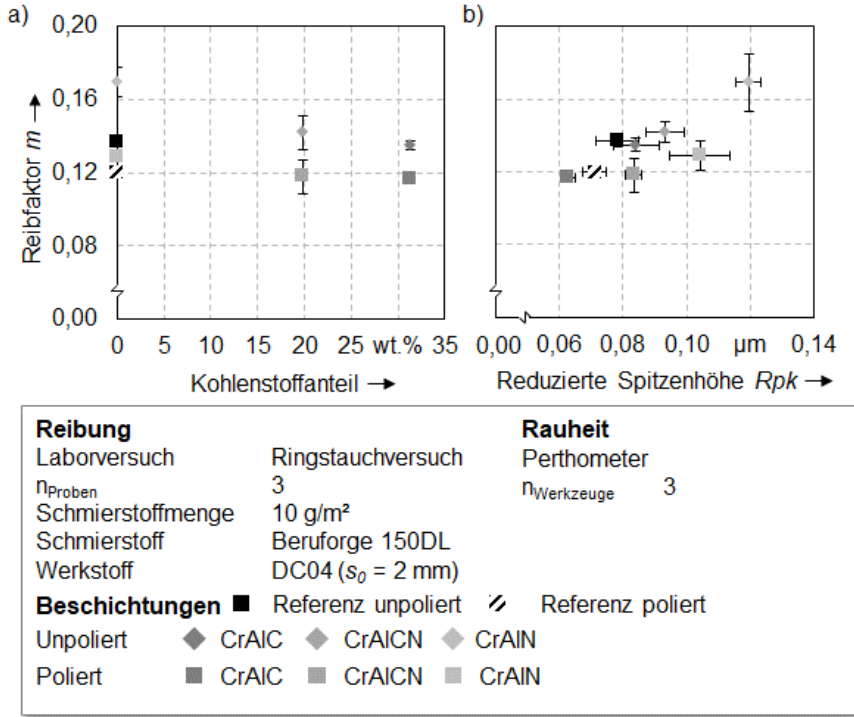


Bild 79: Korrelation zwischen a) Kohlenstoffanteil bzw. b) reduzierte Spitzenhöhe Rpk und Reibfaktoren

6.4 Reibungsbeeinflussung durch eine kombinierte Anwendung von werkzeug- und werkstückseitigen Modifikationen

Neben der reinen Modifikation von Werkstück- oder Werkzeugoberfläche besteht die Möglichkeit, beide Oberflächen simultan anzupassen. Durch diese kombinierte Anwendung wird eine zusätzliche Steigerung des reibungsbeeinflussenden Effekts erwartet. Um dies zu untersuchen, wird im folgenden Abschnitt jeweils eine Kombination aus einer reibungserhöhenden Werkzeug- und Werkstückoberfläche und reibungsreduzierenden Oberflächen an Werkstück und Werkzeug analysiert.

6.4.1 Kombination von werkzeug- und werkstückseitigen reibungserhöhenden Oberflächenmodifikationen

Für die kombinierte Anpassung mit dem Ziel einer Reibungserhöhung wurde aus Abschnitt 6.2.1 und 6.3.1 jeweils eine Oberflächenmodifikation ausgewählt. Da eine Zunahme der Reibung mit einer Zunahme der Umformkräfte und damit verbunden der Werkzeugbeanspruchung einhergeht, wird für die abrasivgestrahlten Platinen nicht die Parameterkombination mit der höchsten Verfestigung ausgewählt. Untersucht wurden Platinen, welche mit der Korngröße $718 \pm 246 \mu\text{m}$ bei einem Druck von 4 bar gestrahlt wurden. Da die hochvorschubgefrästen Werkzeugoberflächen zu einem geringeren Anstieg des Reibfaktors führen, wird für diesen Fall die Werkzeugoberfläche, welche mit einem Anstellwinkel von 3° gefräst wurde, untersucht.

Bild 80 zeigt die Ergebnisse der Zapfenpress- und Ringstauchversuche für die rein werkzeug- und werkstückseitigen Modifikationen im Vergleich zur Kombination. Im Vergleich zur Referenz führen sämtliche Modifikationen zu einer Erhöhung der Reibung. Im Zapfenpressversuch ist der Reibfaktor für die rein abrasivgestrahlte Werkstückoberfläche um 35 % höher als der Reibfaktor einer rein hochvorschubgefrästen Oberfläche. Durch die Kombination beider Oberflächenmodifikationen sinkt der im Zapfenpressversuch ermittelte Reibfaktor um 23 % im Vergleich zu abrasivgestrahlten Platinen. Allerdings steigt die Reibung um 4 % im Vergleich zur hochvorschubgefrästen Werkzeugoberfläche. Im Ringstauchversuch gibt es ebenfalls einen Trend zu einem absinkenden Reibfaktor bei einer kombinierten Anwendung im Vergleich zu rein abrasivgestrahlten Platinen. Jedoch ist der Effekt nicht so deutlich wie im Zapfenpressversuch. Somit ist die Kombination aus beiden nicht geeignet, um noch höhere Reibfaktoren zu realisieren. Dies kann mit den unterschiedlichen Wirkmechanismen der beiden Oberflächenmodifikationen begründet werden. In Abschnitt 6.2.1.3 wird die Verfestigung als maßgebliche Einflussgröße für abrasivgestrahlte Platinen identifiziert. Die Topographie hochvorschubgefräster Werkzeugoberflächen wird in Abschnitt 6.3.1.3 als Einflussgröße herausgearbeitet. Somit ist bei der werkstückseitigen Modifikation die randnahe Zone bedeutend für den Stofffluss.

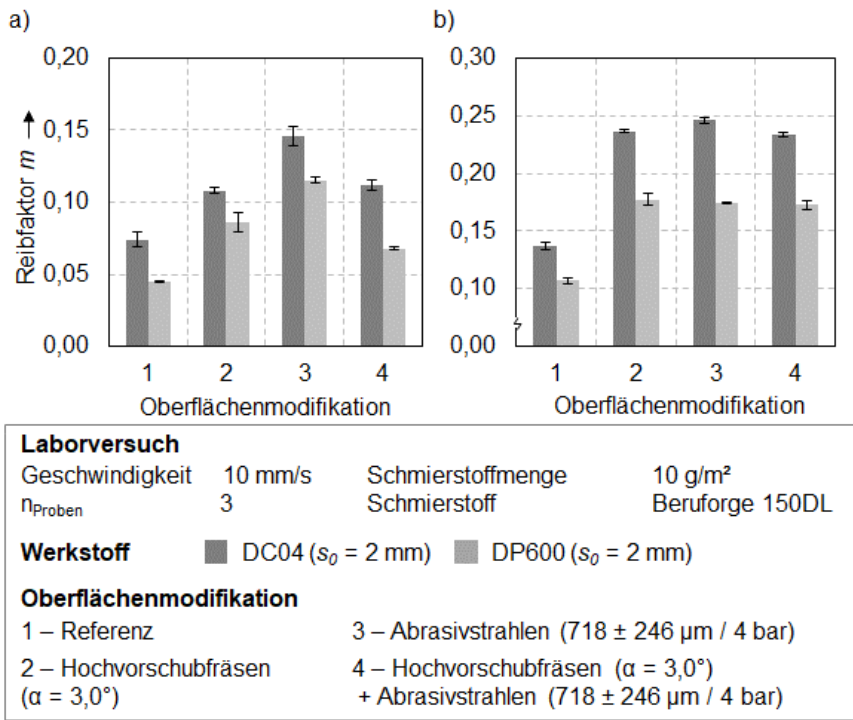


Bild 80: Ergebnisse a) Zapfenpress- und b) Ringstauchversuch

Bei der werkzeugseitigen Adaption ist die reine Topographie entscheidend. Die Reibfaktorsteigerung gegenüber ausschließlich hochvorschubgefrästen Oberflächen kann über die hohe Rauheit der abrasivgestrahlten Platinen erklärt werden. Es kommt hier zu einer Interaktion der Rauheitsspitzen von Werkzeug- und Werkstückoberfläche, was den topographischen Effekt der Werkzeugoberfläche verstärkt und zu einer zunehmenden Reibung führt.

6.4.2 Kombination von werkstück- und werkzeugseitigen reibungsreduzierenden Oberflächenmodifikationen

Für die werkstück- und werkzeugseitige Kombination zur Reibungsreduzierung werden aus den Abschnitten 6.2.2 und 6.3.2 geeignete Oberflächenmodifikationen ausgewählt. Als Laborversuch kommt lediglich der Ringstauchversuch zum Einsatz, da die Beschichtungen nur in diesem Versuch analysiert wurden. In Abschnitt 6.3.1.3 wird gezeigt, dass eine Kombination aus möglichst großen Schmiertaschendurchmessern bei einem gleichzeitig hohen Strukturvolumen zu niedrigen Reibfaktoren führt. Für

6.4 Reibungsbeeinflussung durch eine kombinierte Anwendung von werkzeug- und werkstückseitigen Modifikationen

die Untersuchungen wurden ein Schmierfächerdurchmesser von 500 μm , ein Flächendeckungsgrad von 15 % und eine Strukturtiefe von 10 μm ausgewählt. Abschnitt 6.3.2.3 zeigt, dass der Kohlenstoffanteil und die Nachbehandlung von chrombasierten Hartstoffschichten maßgeblich die tribologischen Eigenschaften beeinflusst. Für die Untersuchungen wurde die polierte CrAlCN-Beschichtung, welche die Vorteile von einem nitridischen Schichtsystem und einem vergleichsweise hohen Kohlenstoffanteil vereint, gewählt. Die Ergebnisse der Ringstauchversuche zeigen, dass durch sämtliche Oberflächenmodifikationen eine Reduzierung der Reibung im Vergleich zur unmodifizierten Referenz erzielbar ist, Bild 81.

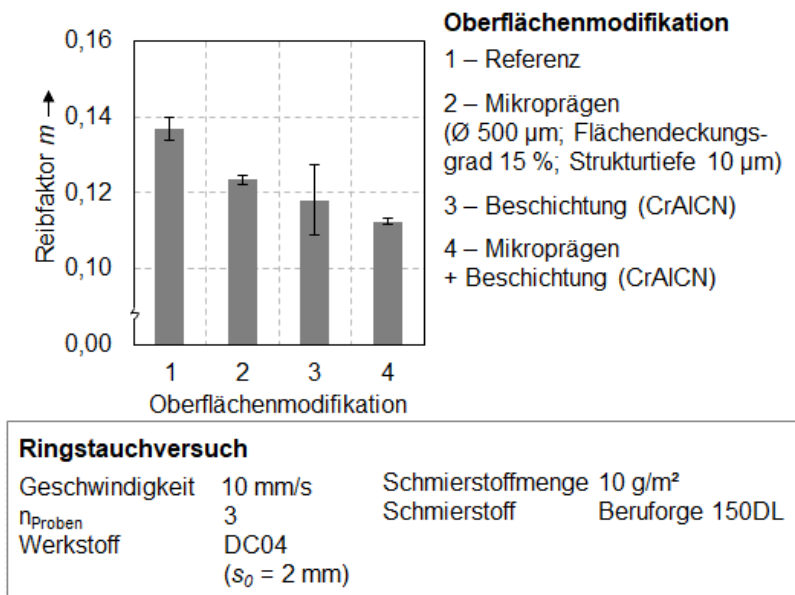


Bild 81: Ergebnisse Ringstauchversuche

Es wurde lediglich der Werkstoff DC04 analysiert, da für geprägte DP600 Platinenoberflächen keine Reibungsreduzierung erreichbar ist. Die beschichtete Werkzeugoberfläche führt mit einem mittleren Reibfaktor von 0,118 zu einem tendenziell niedrigeren Reibfaktor als die mikrogeprägte Platinenoberfläche mit 0,124. Durch die Kombination aus modifizierter Platinen- und Werkzeugoberfläche gibt es einen Trend zu einer zusätzlichen Reibungsreduzierung im Vergleich zu den rein werkstück- und werkzeugseitigen Modifikationen. In Abschnitt 6.2.2.3 wird die Interaktion der Ausgangsoberfläche und der Schmierfächer als Wirkmechanismus identifiziert. Dies ist als topographischer Wirkmechanismus zu bewerten.

Abschnitt 6.3.2.3 zeigt, dass neben der chemischen Zusammensetzung der Beschichtung die Nachbehandlung der beschichteten Oberfläche maßgeblich die tribologischen Eigenschaften beeinflusst.

Auch hier ist somit die Topographie von großer Bedeutung. Durch die Kombination beider Oberflächenmodifikationen werden rein topographische Mechanismen miteinander verknüpft. Dies scheint zu einem Verstärken der jeweiligen Effekte, und damit zu einer zusätzlichen Reibungsreduzierung zu führen.

6.5 Zusammenfassende Bewertung werkzeug- und werkstückseitiger Oberflächenmodifikationen

Auf Basis der in Kapitel 5 definierten Anforderungen werden in den Abschnitten 6.2 und 6.3 verschiedene Methoden zur Modifikation der tribologischen Bedingungen durch eine Adaption von Werkzeug- bzw. Werkstückoberflächen analysiert. Prinzipiell gilt, dass sowohl reibungserhöhende als auch reibungsreduzierende Maßnahmen zur Steuerung des Stoffflusses in der Blechmassivumformung benötigt werden. Eine weitere Anforderung ist, dass die Adaptionen lokal einstellbar sind. Durch eine gleichzeitige lokale Erhöhung und Reduzierung der Reibung ist es das Ziel, einen möglichst großen Reibfaktorunterschied zwischen den Zonen unterschiedlicher tribologischer Beanspruchungen einzustellen. Auf Basis dieser Anforderungen werden jeweils eine reibungserhöhende und -reduzierende Modifikation der Werkzeug- und Werkstückoberfläche ausgewählt. Um das Potenzial sämtlicher Modifikationen zu nutzen, ist das Ziel, die zugrundeliegenden Wirkmechanismen zu identifizieren. Bild 82 fasst die identifizierten tribologischen Wirkmechanismen sämtlicher untersuchter maßgeschneiderter Tribosysteme zusammen. Werkstückseitig ist das Abrasivstrahlen zur Reibungserhöhung geeignet. Für dieses Verfahren ist die oberflächennahe Verfestigung als Haupteinflussgröße auf den Stofffluss identifiziert worden.

Je höher die Verfestigung ist, desto höher ist die Stoffflusshemmung. Das Einbringen von Schmiertaschen auf die Platinenoberfläche ist für eine Reibungsreduzierung nutzbar. Es konnte eine Interaktion zwischen der auf der Platinenoberfläche vorhandenen stochastischen EDT Struktur und den geprägten deterministischen Schmiertaschen als stoffflussbeeinflussende Größe identifiziert werden. Durch ein großes Schmiertaschenvolumen in Verbindung mit einer reduzierten Anzahl an Schmiertaschen ist der größte reibungsbeeinflussende Effekt erzielbar. Somit beeinflussen die

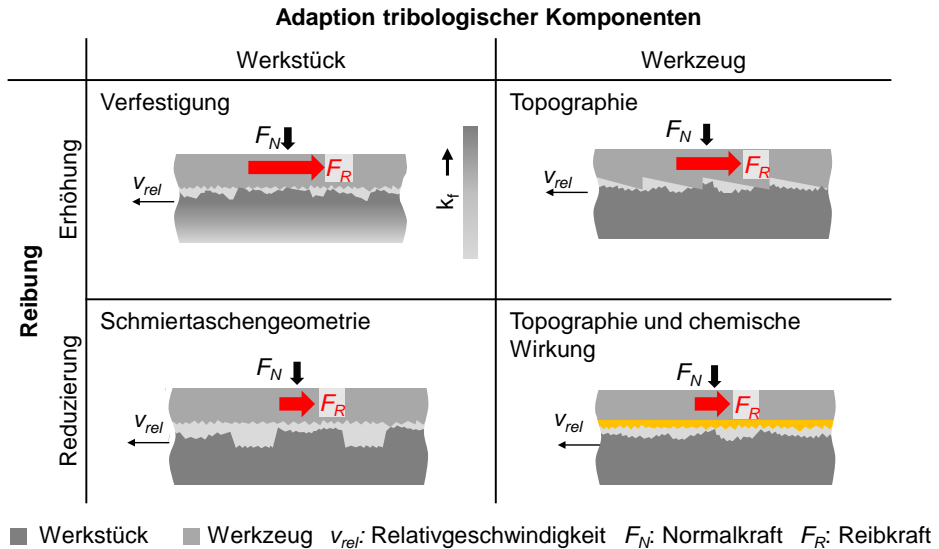


Bild 8z: Tribologische Wirkmechanismen von maßgeschneiderten tribologischen Systemen

geometrischen Eigenschaften der Schmierfahnen und damit die veränderte reibungsbeeinflussende Effekt erzielbar. Somit beeinflussen die geometrischen Eigenschaften der Schmierfahnen und damit die veränderte Topographie der Platinenoberfläche maßgeblich den Stofffluss und damit die Reibung. Werkzeugseitig sind das Hochvorschubfräsen zur Reibungserhöhung und das Applizieren von chrombasierten Hartstoffschichten zur Reibungsreduzierung geeignet. Beim Hochvorschubfräsen ist ein Zusammenhang zwischen Topographie und Reibung erkennbar. Je höher der Spitzenbereich des Rauheitsprofils ist, desto stärker wird der Stofffluss gehemmt. Zur Reibungsreduzierung konnte nachgewiesen werden, dass neben der chemischen Zusammensetzung von Beschichtungen die Schichtnachbehandlung Einfluss auf die Reibung nimmt. Für die chrombasierten Schichten konnte gezeigt werden, dass ein zunehmender Kohlenstoffanteil in Kombination mit einer möglichst niedrigen Rauheit der beschichteten Werkzeugoberfläche zu einer niedrigen Reibung führt. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die vier Verfahren zur Oberflächenmodifikation nutzbar sind, um die Wirksamkeit der in Kapitel 5 definierten Anforderungen zu überprüfen.

7 Auswahl und Untersuchung der Wirksamkeit werkstück- und werkzeugseitiger Oberflächenmodifikationen im Verifizierungsversuch

Die folgenden Abschnitte zielen auf die Synthese der Erkenntnisse aus Kapitel 5 und 6 ab. In Abschnitt 5 wird mit Hilfe einer numerischen Studie gezeigt, dass ein lokales Maßschneidern der tribologischen Bedingungen ein großes Potenzial zur Beeinflussung des Stoffflusses für ausgewählte Blechmassivumformprozesse besitzt. Bei beiden untersuchten Prozessen ist eine Steuerung des Stoffflusses aufgrund einer unzureichenden Formfüllung der Funktionselemente notwendig. Auf Basis der vorliegenden Herausforderungen und der definierten Anforderungen werden in den Abschnitten 6.2, 6.3 und 6.4 Werkzeug- und Werkstückoberflächen, welche zur lokalen Reibungserhöhung und -reduzierung geeignet sind, analysiert. Die bisherigen Untersuchungsinhalte werden in diesem Kapitel genutzt, um geeignete Oberflächenmodifikationen auszuwählen und diese im Hinblick auf ihre Wirksamkeit im Prozess zu verifizieren. Neben der tribologischen Wirksamkeit wird bei der Auswahl auch die technische Realisierbarkeit berücksichtigt. Das übergeordnete Ziel dieses Abschnitts ist die qualitative Verifizierung der bisherigen Ergebnisse.

7.1 Auswahl geeigneter Oberflächenmodifikationen

Die Auswahl der Oberflächenmodifikationen erfolgt auf Basis numerischer Stoffflussanalysen (Abschnitt 5) Die Formfüllung der Funktionselemente wird maßgeblich durch den Reibfaktorunterschied zwischen den tribologischen Zonen bestimmt. Um die Formfüllung positiv zu beeinflussen, ist zwischen dem Verzahnungs- und Bodenbereich ein großer Reibfaktorunterschied einzustellen. Im Bodenbereich wird ein hoher Reibfaktor zur Stoffflusshemmung benötigt. Um den Stofffluss zu begünstigen, ist im Bereich der Verzahnung ein niedriger Reibfaktor zu wählen. Zusätzlich wird überprüft, ob durch einen möglichst hohen Reibfaktorunterschied zwischen diesen beiden Bereichen eine weitere Steigerung der Formfüllung möglich ist. Bild 83 zeigt die numerisch identifizierten Bereiche für die notwendige Reibungsanpassung bei den ausgewählten Prozessen.

7 Auswahl und Untersuchung der Wirksamkeit werkstück- und werkzeugseitiger Oberflächenmodifikationen im Verifizierungsversuch

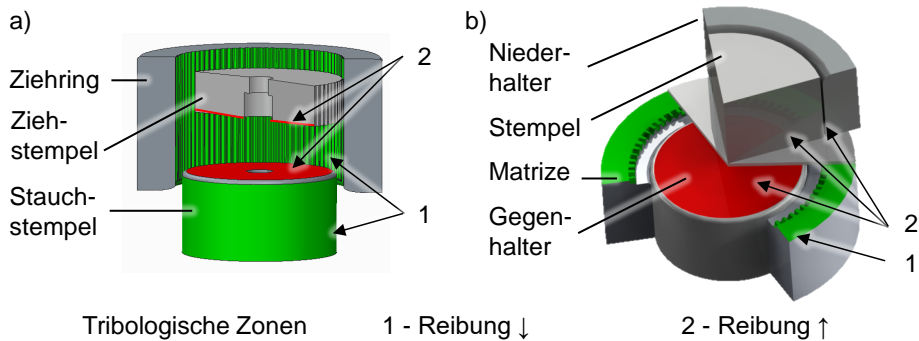


Bild 83: Tribologische Zonen a) kombinierter Tiefziehstauchprozess und b) Fließpressprozess

Beim Tiefziehstauchprozess ist die Reibung an der Kontaktfläche Stauch- und Ziehstempel zu erhöhen. Die Oberflächen im Kontakt von Gegenhalter, Niederhalter und Stempel mit der Platine sind beim Fließpressversuch so anzupassen, dass die Reibung in diesem Bereich während der Umformung hoch ist. Die Modifikation dieser Kontaktbereiche ist durch die in Abschnitt 6.2.1 und 6.3.1 vorgestellten Verfahren technisch einfach umsetzbar, da die Oberflächen eben sind. Somit kann die Wirksamkeit beider reibungserhöhender Oberflächenmodifikationen vergleichsweise einfach überprüft werden. Die reibungsreduzierenden Maßnahmen sind beim kombinierten Prozess auf die Verzahnungen des Ziehriings und auf die Mantelfläche des Stauchstempels zu applizieren. Beim Fließpressprozess ist die Reibungsreduzierung an der Matrize zu realisieren. Im Hinblick auf die technische Realisierung ist lediglich eine Adaption der Mantelfläche des Stauchstempels einfach umsetzbar. Sowohl Ziehring als auch Matrize werden in den vorliegenden Untersuchungen nicht adaptiert, da Beschichtungen in den vergleichsweise kleinen Kavitäten nicht gleichmäßig appliziert werden können, sodass die Wirksamkeit dieser negativ beeinflusst wird. Auch eine Adaption der Platinenoberfläche durch werkstückseitige Strukturen geht in diesem Bereich mit hohen Herausforderungen einher. Dies ist dadurch begründet, dass die Platinen in einem relativ großen Durchmesserbereich zu prägen sind, was wiederum hohe Anforderungen an das Prägwerkzeug stellt. Aufgrund der technischen Herausforderungen wird in beiden Prozessen die Wirksamkeit einer Reibungserhöhung in Zone 2 untersucht. Im kombinierten Prozess wird zusätzlich der Einfluss einer Reibungsreduzierung an der Mantelfläche des Stauchstempels untersucht.

Als reibungserhöhende Maßnahmen werden das Abrasivstrahlen und das Hochvorschubfräsen verwendet. Polierte Beschichtungen werden als reibungsreduzierende Maßnahmen untersucht. Um die Prozesskräfte zu beschränken, wurde für das Abrasivstrahlen eine Parameterkombination mit einer geringeren Verfestigung gewählt. Untersucht wurden Platinen, welche mit dem Strahlmitteldurchmesser $718 \pm 246 \mu\text{m}$ und dem Druck 4 bar gestrahlt wurden. Da die hochvorschubgefrästen Werkzeugoberflächen zu geringeren Reibfaktorzunahmen führen, wurde die mit einem Anstellwinkel von $\alpha = 3^\circ$ gefräste Oberfläche untersucht. Des Weiteren wurde als reibungsreduzierende Maßnahme die polierte CrAlCN-Beschichtung, welche die Vorteile von einem nitridischen Schichtsystem und einem vergleichsweise hohen Kohlenstoffanteil vereint, gewählt. Um neben der reinen Wirksamkeit dieser Modifikationen eine möglichst hohe Anzahl an Reibfaktorunterschieden zwischen den Zonen zu realisieren, wird zusätzlich die Kombination aus werkzeugeitigen Hochvorschubfräsen und werkstückseitigen Abrasivstrahlen untersucht. Bild 84 zeigt die durch die Oberflächenmodifikationen realisierten Reibfaktorunterschiede zwischen den tribologischen Zonen.

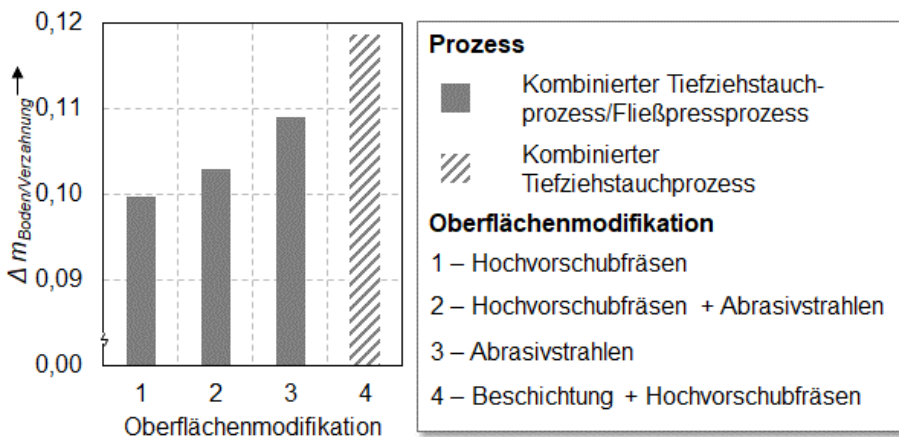


Bild 84: Reibfaktorgradienten

Bei sämtlichen Adaptionen wird Zone 2 respektive der Bereich des Bauteilbodens modifiziert. Lediglich bei Kombination 4 wird zusätzlich zu Zone 2 die Zone 1 respektive der Verzahnungsbereich adaptiert. Diese Untersuchung wurde nur für den kombinierten Prozess durchgeführt. Der Reibfaktorunterschied zwischen den beiden Zonen steigt von der hochvorschubgefrästen Oberfläche über die Kombination bis zum Abrasivstrahlen an.

Durch die simultane Modifikation von Zone 1 und 2 im kombinierten Prozess ist ein weiterer Anstieg des Reibfaktorunterschieds $\Delta m_{\text{Boden/Verzahnung}}$ realisierbar.

Durch diesen Versuchsplan ist es somit einerseits möglich, die Wirksamkeit von Abrasivstrahlen, Hochvorschubfräsen und nachbehandelten chrombasierten Beschichtungen zu untersuchen. Andererseits kann der Einfluss eines steigenden Reibfaktorunterschieds zwischen den tribologischen Zonen untersucht werden.

7.2 Einsatz und Bewertung der Wirksamkeit in Verifizierungsversuchen

Die ausgewählten maßgeschneiderten Oberflächen wurden auf die entsprechenden Platinen- und Werkzeugbereiche appliziert, Bild 85.

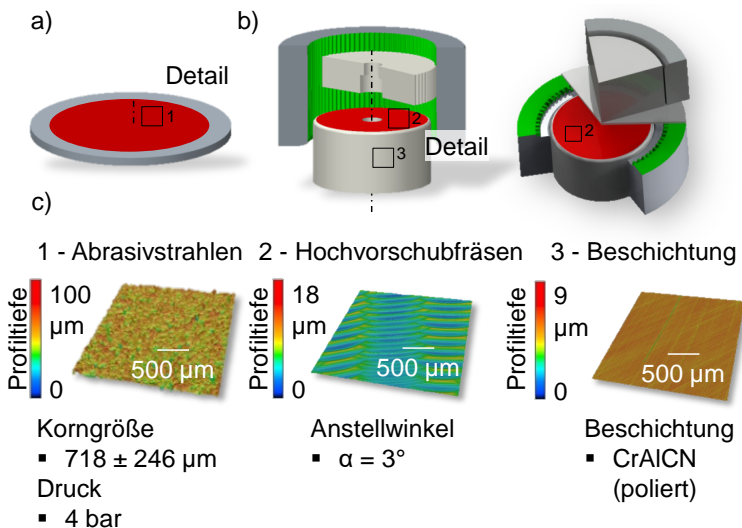


Bild 85: Detailansicht der Positionen a) platinen- und b) werkzeugseitiger Modifikationen und c) die ausgewählten maßgeschneiderten Oberflächen

Die Randbedingungen, beispielsweise im Hinblick auf Niederhalter- und Gegenhalterkräfte, wurden für die Versuche mit maßgeschneiderten Oberflächen analog zu den in Abschnitt 4.5 beschriebenen Referenzprozessen gewählt. Als Zielgröße wird die Maximierung der Formfüllung gewählt, da diese das Einsatzverhalten der Bauteile beeinflusst. Neben der Formfüllung werden für ausgewählte Oberflächenmodifikationen die Umformkräfte analysiert, um eine Aussage bezüglich der Werkzeugbeanspruchungen zu treffen.

Formfüllung

Sämtliche Adaptionen der Oberflächen führen zu einer Steigerung der Formfüllung im Vergleich zum Referenzprozess, Bild 86. Somit ist die lokale Adaption von Werkzeug- und/oder Platinenoberfläche eine Möglichkeit, um das Einsatzverhalten von blechmassivumgeformten Komponenten positiv zu beeinflussen.

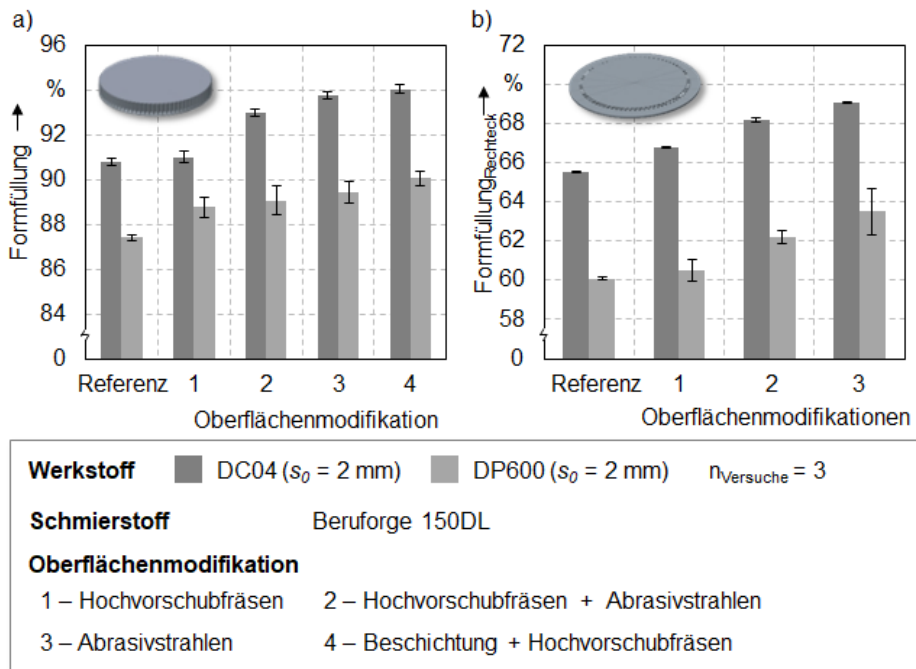


Bild 86: Formfüllungen der Funktionselemente im a) kombinierten Tiefziehstauchprozess und im b) Fließpressprozess

Für die experimentelle Auswertung werden im kombinierten Prozess sämtliche Elemente analog zu den numerischen Untersuchungen gemessen. Im Fließpressprozess wird pro ausgewerteten Versuch der Mittelwert aus zwei Funktionselementen gebildet. Die Formfüllungssteigerung kann für DC04 und DP600 gezeigt werden. Beim kombinierten Tiefziehstauchprozess steigt die Formfüllung der Funktionselemente durch das Hochvorschubfräsen für den Werkstückwerkstoff DC04 um lediglich 0,23 %. Diese Zunahme ist als Trend zu bewerten und deutet darauf hin, dass dieses Verfahren nur bedingt geeignet ist, um den Stofffluss zu steuern. Durch die kombinierte Anwendung von werkzeugseitigen Hochvorschubfräsen und platinenseitigen Abrasivstrahlen im Bereich des Bauteilbodens steigt die Formfüllung um 2 %. Das Abrasivstrahlen führt zu einer Steigerung

7 Auswahl und Untersuchung der Wirksamkeit werkstück- und werkzeuggesteiger Oberflächenmodifikationen im Verifizierungsversuch

um 3 %. Durch die kombinierte Modifikation von Zone 1 und Zone 2 steigt die Formfüllung um 3,3 %. Für DP600 sind geringere Formfüllungssteigerungen zu erkennen, was durch die höhere Werkstofffestigkeit begründet ist. Die Wirksamkeit der Oberflächenmodifikationen im Fließpressprozess ist identisch zum kombinierten Prozess. Das Hochvorschubfräsen führt zur geringsten Formfüllungszunahme, die Kombination aus werkstück- und werkzeuggesteiger Modifikation zu einer mittleren Zunahme und das Abrasivstrahlen zu höchsten Steigerung. Die prozentualen Zunahmen liegen zwischen 1,3 % und 3,5 %. Werden die beiden Prozesse miteinander verglichen ist erkennbar, dass durch identische Oberflächenmodifikationen im kombinierten Prozess geringere Zunahmen erreicht werden als im Fließpressprozess. Dieser Zusammenhang geht einher mit den Ergebnissen der numerischen Analyse. Erklärbar ist dies durch die unterschiedlichen Geometrieformen der Funktionselemente. Insgesamt ist festzuhalten, dass sämtliche Oberflächenmodifikationen die Formfüllung beeinflussen. Das Hochvorschubfräsen ist vor allem bei dreiecksförmigen Elementen nur bedingt geeignet. Neben der Verifizierung der Wirksamkeit wird überprüft, ob ein zunehmender Reibfaktorunterschied zu einer Steigerung der Formfüllung führt, Bild 87.

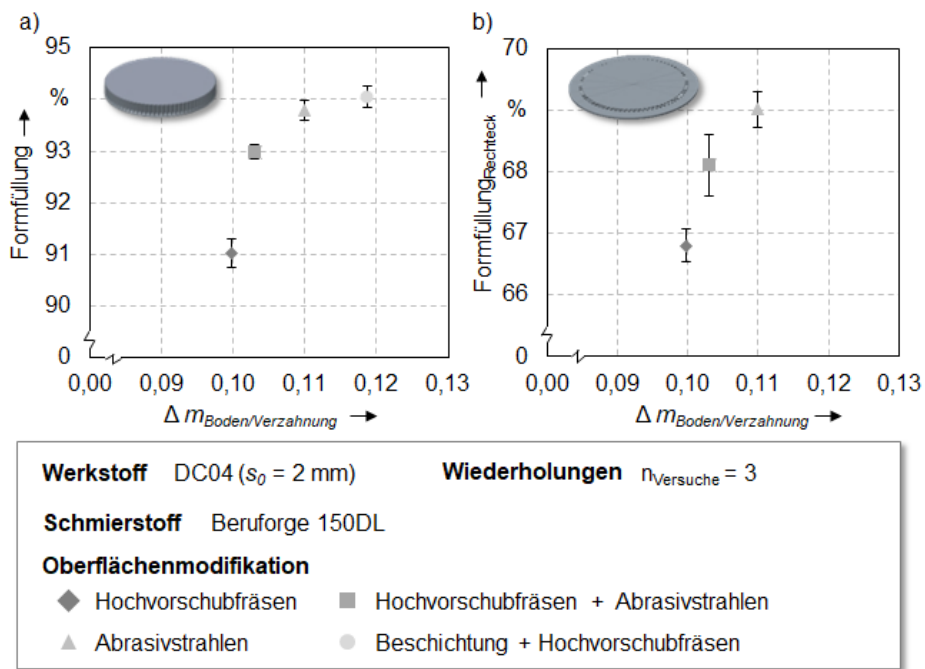


Bild 87: Korrelation zwischen Formfüllung und Reibfaktorgradienten für a) den kombinierten Tiefziehstauchprozess und b) den Fließpressprozess

Für beide Prozesse gilt: Je höher der Reibfaktorgradient $\Delta m_{\text{Boden/Verzahnung}}$ ist, desto höher ist die Formfüllung. Dies bestätigt die numerischen Ergebnisse. Somit sind durch die Maximierung des Reibfaktorunterschiedes zwischen Zonen variierender tribologischer Beanspruchungen die größtmöglichen Steigerungen der Formfüllungswerte und damit die bestmögliche Steuerung des Stoffflusses erzielbar. Neben diesem prinzipiellen Zusammenhang stimmen die experimentell und numerisch ermittelten Verläufe überein. Während die Formfüllung beim kombinierten Prozess in eine Art Sättigung läuft, scheint die Formfüllung beim Fließpressprozess kontinuierlich zu steigen. Dies kann dadurch begründet sein, dass beim Fließpressprozess prozentuale Formfüllungen von unter 70 % vorliegen. Beim kombinierten Prozess werden bereits Formfüllungen von über 90 % erreicht.

Analyse der benötigten Umformkräfte

Die Analyse der Formfüllung zeigt, dass eine Verbesserung der Bauteilgenauigkeit mit zunehmenden Reibfaktorunterschied zwischen den beiden Zonen realisierbar ist. Dies wurde durch eine Reibungserhöhung im Bereich des Bauteilbodens erreicht. Reibungserhöhungen resultieren in ansteigenden Umformkräften was wiederum zu einer Zunahme der Werkzeugbeanspruchungen führt. Die Auswertung der Umformkräfte von ausgewählten Oberflächenmodifikationen im Fließpressversuch zeigt, dass es mit zunehmendem Reibfaktorunterschied zu einem Anstieg der Umformkräfte kommt, Bild 88.

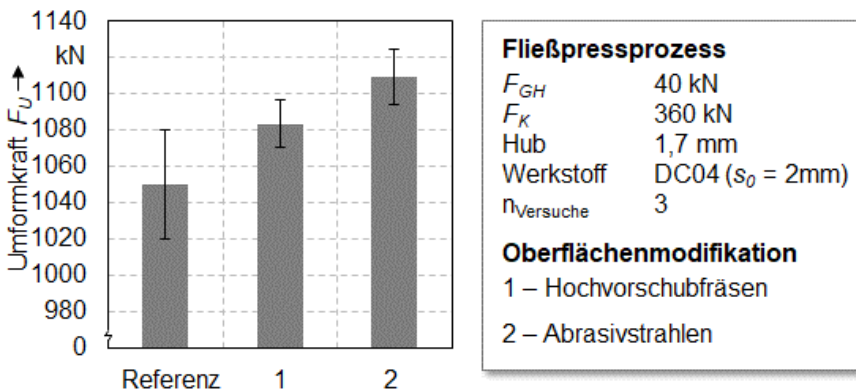


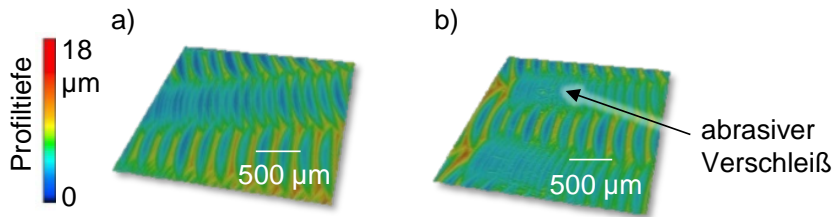
Bild 88: Umformkräfte für unterschiedliche Oberflächenmodifikationen im Fließpressprozess

Im Vergleich zur Referenz steigt die Umformkraft durch ein werkzeugseitiges Hochvorschubfräsen um 33 kN. Durch das werkstückseitige Abrasivstrahlen kommt es zu einer weiteren Erhöhung der Umformkräfte auf 1109 kN. Dies entspricht einem prozentualen Kraftanstieg um circa 6 % im Vergleich zur Referenz. Dieser Kraftanstieg wird sich direkt auf die wirkenden Spannungen auswirken. Der Anstieg der Umformkräfte ist allerdings sehr gering, was als positiv im Hinblick auf die wirkenden Werkzeugbeanspruchungen zu werten ist. Der geringe Anstieg ist durch die niedrigen Reibfaktorunterschiede zu erklären. Somit wirken maßgeschneiderte tribologische Systeme positiv auf die Bauteilumformung und gleichzeitig lässt der lediglich geringe Anstieg der Umformkräfte darauf schließen, dass die Werkzeuglebensdauer durch derartige Modifikationen nicht signifikant negativ beeinflusst wird.

Weiterführende Anforderungen an maßgeschneiderte Oberflächen

Neben den beiden genannten Forderungen gilt es zu gewährleisten, dass maßgeschneiderte Oberflächen Potenzial für einen Einsatz im Serienprozess aufweisen. Um dies zu erreichen, müssen die Oberflächenmodifikationen über eine große Anzahl an Umformoperationen zu einer Verbesserung des Prozessergebnisses führen. Bei den rein werkstückseitigen Modifikationen ist dies nicht mit Herausforderungen verbunden, da die Modifikationen vor jeder Umformung auf das Halbzeug appliziert werden. Bei den werkzeugseitigen Oberflächen kann ein Verschleiß der maßgeschneiderten Werkzeugoberflächen zu einer reduzierten Wirksamkeit über die Einsatzzeit führen. Um die Verschleißbeständigkeit der modifizierten Werkzeugoberflächen zu analysieren, wurden ausgewählte Aktivteile nach den Umformversuchen optisch charakterisiert und mit Oberflächen vor dem Einsatz verglichen, Bild 89.

Nach der Umformung ist an der gefrästen Struktur ein abrasiver Verschleiß zu erkennen. Diese Aufnahme ist als Extremfall hervorzuheben. Bei sämtlichen anderen charakterisierten Oberflächen liegt lediglich eine Einglättung der Oberfläche vor. Beides kann jedoch zu einer reduzierten Wirksamkeit der Strukturen über die Einsatzdauer führen. Auch bei den beschichteten Oberflächen wurden Veränderungen über die Einsatzzeit nachgewiesen. Neben einer Einglättung der Oberfläche lag in hochbelasteten Bereichen ein Abplatzen der Beschichtung vor. Auch dies reduziert die Wirksamkeit beschichteter Werkzeugoberflächen. Diese Verschleißerscheinungen werkzeugseitiger Oberflächenmodifikationen motivieren die Notwendigkeit zur Nachbehandlung.



Topographie

Konfokales Laserscanning Mikroskop Keyence VK-X200

Objektiv 20x

Werkstoff ASP2023 (60 ± 1 HRC)

Bild 89: Hochvorschubgefräste Werkzeugoberfläche a) vor und b) nach zehn Umformungen

Eine weitere Anforderung, um den seriennahen Einsatz zu realisieren, ist eine Begrenzung des Aufwands bei der Herstellung der maßgeschneiderten Oberflächen. Bei den werkzeugseitigen Modifikationen werden die Werkzeuge lediglich vor dem Einsatz modifiziert. Dies ist als positiv im Hinblick auf den Fertigungsaufwand zu bewerten. Bei der Nutzung von werkstückseitigen Oberflächenmodifikationen ist der Aufwand wesentlich höher, da jede Platine vor dem Einsatz modifiziert werden muss. Dies führt zu einer deutlichen Verlängerung der Prozessketten. Insgesamt ist somit festzuhalten, dass im Hinblick auf den seriennahen Einsatz werkzeug- und werkstückseitige Oberflächenmodifikationen sowohl Vor- als auch Nachteile aufweisen.

8 Bewertung von maßgeschneiderten tribologischen Systemen für die Blechmassivumformung

Im Rahmen der Arbeit werden Methoden zur Stoffflusssteuerung von Blechmassivumformprozessen über maßgeschneiderte tribologische Systeme untersucht. Für eine gezielte Steuerung des Stoffflusses sind Methoden zur lokalen Erhöhung und Reduzierung notwendig. Untersucht wurde das platinenseitige Abrasivstrahlen und das werkzeugseitige Hochvorschubfräsen zur Reibungserhöhung. Als reibungsreduzierende Maßnahmen wurden platinenseitige deterministische Strukturen und auf das Werkzeug applizierte chrombasierte nitridische Beschichtungen untersucht. Durch die Analyse der Oberflächenmodifikationen in Laborversuchen konnten die dominanten tribologischen Wirkmechanismen identifiziert werden. Diese können unabhängig vom untersuchten Parameterraum für sämtliche Blechmassivumformprozesse genutzt werden, um entsprechend der jeweiligen Anforderungen geeignete Maßnahmen auszuwählen. Durch eine gezielte Nutzung der jeweils identifizierten Wirkmechanismen wird des Weiteren eine Beeinflussung im Sinne einer weiteren Erhöhung bzw. Reduzierung der Reibung ermöglicht. Bild 90 stellt die tribologische Wirkweise der Modifikationen gegenüber. Zusätzlich werden diese bezüglich der Beeinflussung von Prozesskettenlänge und Werkzeugverschleiß bewertet.

Im untersuchten Parameterraum führt das Abrasivstrahlen zu einer stärkeren Erhöhung der Reibung als das Hochvorschubfräsen. Durch Beschichtungen konnte eine höhere Reduzierung der Reibung als mit werkstückseitigen Strukturen erzielt werden. Werden diese Ergebnisse für die Auslegung von maßgeschneiderten tribologischen Systemen für die beiden untersuchten Blechmassivumformprozesse genutzt, dann ist eine Kombination aus lokal abrasivgestrahlten Platinen und lokal beschichteten Werkzeugoberflächen als geeignete Oberflächenmodifikation zu bewerten. Durch diese Kombination ist die größte Steigerung der Formfüllung zu erwarten. Somit kann die vorliegende Matrix genutzt werden, um auf Basis numerischer Untersuchungen die am besten geeigneten Oberflächenmodifikation auszuwählen.

Werden die Methoden im Hinblick auf die Prozesskettenlänge bewertet, ist zu erkennen, dass beide werkstückseitigen Maßnahmen zu einer deutlichen Verlängerung der Prozesskette führen. Dies liegt daran, dass jede

8 *Bewertung von maßgeschneiderten tribologischen Systemen für die Blechmassivumformung*

Platine vor dem Einsatz entsprechend konditioniert werden muss. Durch das Hochvorschubfräsen ist eine Verkürzung der Prozesskette zu erwarten, da die vergleichsweise aufwendigere Werkzeugendbearbeitung entfällt. Beschichtungen führen lediglich zu einer geringen Verlängerung der Prozesskettenlänge, da Beschichtungen standardmäßig auf Umformwerkzeuge appliziert werden. Die notwendige Nachbehandlung der Beschichtungen durch Polieren muss jedoch berücksichtigt werden. Bei der Bewertung von Verschleißaspekten weisen die werkzeugseitigen Modifikationen deutliche Nachteile auf. Bereits nach wenigen Versuchen wurde im Rahmen der Arbeit ein Verschleiß der Werkzeugoberflächen detektiert. Dies reduziert die Wirksamkeit der Modifikationen über die Einsatzzeit. Da werkstückseitige Modifikationen vor jeder Umformung appliziert werden, ist keine Veränderung des Verschleißverhaltens zu erwarten.

	Maßgeschneiderte tribologische Systeme			
	Reibungserhöhung		Reibungsreduzierung	
	Abrasivstrahlen - Werkstück -	Hochvorschub- fräsen - Werkzeug -	Mikroprägen - Werkstück -	Beschichtung - Werkzeug -
Δ Reibfaktor m	↑↑	↑	↓	↓↓
Dominanter Wirk- mechanismus	Randnahe Verfestigung	Topographie	Topographie	Topographie + chemische Zusammensetzung
Formfüllung Funktionselemente	↑↑	↑	-	↑↑
Prozessketten- länge	↑↑	↓	↑↑	↑
Werkzeug- verschleiß	o	↑↑	o	↑↑

↑ Erhöhung ↑↑ Starke Erhöhung ↓ Reduzierung ↓↓ Starke Reduzierung O keine Beeinflussung

Bild 90: Bewertungsmatrix maßgeschneiderter tribologischer Systeme

Auf Basis der Bewertung der einzelnen untersuchten Methoden sollen die maßgeschneiderten tribologischen Systeme im Allgemeinen bezüglich der Erfüllung der Anforderungen in der Blechmassivumformung bewertet werden. Bewertungskriterien sind die geometrische Bauteilgenauigkeit und wirtschaftliche Aspekte, wie beispielsweise die Eignung für einen seriennahen Einsatz und die Beeinflussung der Prozesskettenlänge. Es konnte nachgewiesen werden, dass die untersuchten maßgeschneiderten Tribosysteme für eine Steuerung des Stoffflusses geeignet sind und zu einer Verbesserung der Formfüllung führen. Mit Blick auf einen seriennahen

Einsatz weisen platinenseitige Oberflächenmodifikationen im Hinblick auf Verschleißaspekte ein hohes Potenzial auf, da sie die volle Wirksamkeit bei jeder Umformung aufweisen. Da bei werkzeugseitigen Oberflächenmodifikationen mit Verschleiß zu rechnen ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Wirksamkeit bei hohen Hubzahlen nachlässt. Jedoch weisen werkzeugseitige Modifikationen Potential zur Verkürzung der Prozesskette auf, da diese Verfahren eine aufwendige Werkzeugendbearbeitung ersetzen können. Somit weisen werkzeug- und werkstückseitige Oberflächenmodifikationen Vor- Nachteile im Hinblick auf wirtschaftliche Aspekte auf. Für die Blechmassivumformung bedeutet das insgesamt, dass für sämtliche Prozesse die Anforderungen zu definieren sind. Auf Basis der Anforderungen und unter Berücksichtigung der jeweiligen Vor- und Nachteile der maßgeschneiderten tribologischen Systemen kann die erarbeitete Matrix zur effizienten und effektiven Auswahl von tribologischen Stoffflusssteuerungsmethoden genutzt werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die produzierende Industrie wird in den letzten Jahrzehnten verstärkt mit Herausforderungen im Hinblick auf ökonomische und ökologische Aspekte konfrontiert. Im Speziellen sind dies Forderungen nach einer gesteigerten Funktionsintegration, der Verkürzung von Prozessketten und der Berücksichtigung von Leichtbauaspekten. Derartige Anforderungsprofile lassen die konventionellen Verfahren der Blech- und Massivumformung an ihre Grenzen stoßen. Eine Möglichkeit, den Anforderungen gerecht zu werden, besteht in der kombinierten Anwendung von Blech- und Massivumformverfahren im Rahmen der sogenannten Blechmassivumformung. Die Kombination birgt wiederum neue Herausforderungen. Während der Umformung kommt es zu einem simultanen Auftreten von Bedingungen aus Blech- und Massivumformung. Dies beeinflusst den Stofffluss und motiviert die Notwendigkeit zur Erforschung von Stoffflusssteuerungsmethoden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden globale Stoffflusssteuerungsmethoden über eine lokale Einstellung der tribologischen Bedingungen erforscht und im Hinblick auf ihre Wirksamkeit verifiziert. Hierfür wurden die tribologischen Wirkmechanismen identifiziert, um unabhängig vom untersuchten Parameterraum den Einsatz der Methoden für die Blechmassivumformung zu gewährleisten.

Im Rahmen der Arbeit sollte die Formfüllung von Funktionselementen blechmassivumgeformter Komponenten verbessert werden, um das Bauteileinsatzverhalten positiv zu beeinflussen. Unter Berücksichtigung dieser Zielgröße wurden numerische Stoffflussanalysen für einen kombinierten Tiefziehstauchprozess und einen Fließpressprozess durchgeführt. Beide Prozesse sind durch zwei Zonen mit variierenden tribologischen Beanspruchungen gekennzeichnet. Der Unterschied zwischen den beiden Zonen führt zu einem Stofffluss vom Bereich der Funktionselemente in den Bauteilboden, was wiederum eine reduzierte Formfüllung der Funktionselemente zur Folge hat. Mit Hilfe der numerischen Stoffflussanalyse konnte gezeigt werden, dass ein zunehmender Reibfaktorunterschied zwischen den beiden Bereichen zu einer Erhöhung der Formfüllung führt. Im Bereich der Verzahnung ist der Reibfaktor niedriger als im Bauteilboden zu wählen. Somit werden zur globalen Steuerung des Stoffflusses lokal einstellbare Methoden zur Reduzierung und Erhöhung der Reibung benötigt.

Auf Basis dieser Anforderungen wurden das platinenseitige Abrasivstrahlen und das werkzeugseitige Hochvorschubfräsen als reibungserhöhende Maßnahmen untersucht. Chrombasierte nitridische Werkzeugbeschichtungen und platinenseitige deterministische Strukturen wurden als reibungsreduzierende Methoden untersucht. Ziel war das Identifizieren tribologischer Wirkmechanismen, um die Ergebnisse unabhängig vom untersuchten Parameterraum für die Blechmassivumformung nutzbar zu machen. Um dies zu realisieren, wurde eine Kombination aus einem experimentellen und numerischen Ansatz gewählt. In den experimentellen Untersuchungen wurden die Laborversuche Zapfenpress- und Ringstauchversuch genutzt. Des Weiteren wurden die Werkstoffe DCo4 und DP600 analysiert. Für den numerischen Ansatz wurden adaptierte FE Simulationen des Zapfenpressversuchs und ein Halbraummodell des Projektpartners am Lehrstuhl für Technische Mechanik genutzt.

Die Basis für die experimentellen Untersuchungen bilden die tribologisch relevanten Randzoneneigenschaften. Für das Abrasivstrahlen wurden die Rauheit und die oberflächennahe Verfestigung in experimentellen Untersuchungen als tribologisch relevant identifiziert. Mit Hilfe einer vereinfachten numerischen Modellierung von verfestigten Randzonen im Zapfenpressversuch konnte gezeigt werden, dass die Verfestigung den Stofffluss hemmt und damit Reibschubspannung und Reibung erhöht. Beim Hochvorschubfräsen stellt die veränderte Topographie die tribologisch relevante Randzoneneigenschaft dar. In numerischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Zunahme der Profiltiefe zu einer Hemmung des Stoffflusses führt. Für die platinenseitigen deterministischen Strukturen ist die veränderte Topographie und die oberflächennahe Verfestigung als relevante Randzoneneigenschaften zu bewerten. Mit Hilfe von numerischen und experimentellen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Interaktion zwischen der auf der Platine vorhandenen stochastischen Struktur und der applizierten deterministischen Struktur maßgeblich den Stofffluss beeinflusst. Bei den chrombasierten Hartstoffschichten wurde die chemische Zusammensetzung als eine relevante Einflussgröße identifiziert. Neben dieser kommt der Nachbehandlung der Beschichtungen eine große Rolle zu.

Auf Basis der tribologischen Wirkmechanismen und der numerisch definierten Prozessanforderungen wurden in einem Syntheseschritt geeignete Modifikationen ausgewählt und deren Wirksamkeit im Umformprozess verifiziert. Für das platinenseitige Abrasivstrahlen, das werkzeugseitige Hochvorschubfräsen und die polierte chrombasierte nitridische Werkzeugbeschichtung konnte nachgewiesen werden, dass eine Steuerung des

Stoffflusses möglich ist. Für sämtliche Konfigurationen wurde eine Erhöhung der Formfüllung der Funktionselemente erzielt. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass eine Zunahme des Reibfaktorunterschieds zwischen tribologischen Zonen zu einer Erhöhung der Formfüllung führt.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Punkte aufgezeigt, welche in anschließenden Forschungsarbeiten thematisiert werden sollten. Ein wesentlicher Aspekt stellt die Verbesserung der Verschleißbeständigkeit werkzeugseitiger Oberflächenmodifikationen dar. Hierfür ist es notwendig, dass die werkzeugseitigen Modifikationen in einem seriennahen Verschleißprüfstand untersucht werden. Auf Basis dieser Ergebnisse gilt es, Methoden zur Verbesserung der Verschleißbeständigkeit zu identifizieren. Des Weiteren gilt es zu überprüfen, ob die platinenseitigen Modifikationen auf die Werkzeugoberfläche übertragbar sind. Dieser Ansatz zielt auf eine Verkürzung der Prozesskettenlänge ab. Im Rahmen der Arbeit wurden lediglich maßgeschneiderte tribologische Systeme über eine Modifikation von Werkzeug- und Werkstückoberfläche untersucht. Anschließende Forschungsarbeiten sollten die Möglichkeit zur lokalen Adaption der Reibung über den Schmierstoff, beispielsweise durch die Nutzung der Schmierstoffeigenschaften, untersuchen.

10 Summary and outlook

In the last decades the industry is faced with a lot of economic and ecological challenges. Especially requirements regarding products with a high functional integration, a shortening of the process chains and the consideration of light weight aspects are of major importance. Conventional sheet- and bulk forming operations are limited while realizing such requirements. One possibility to meet those challenges is the combination of sheet- and bulk forming operations using sheet-bulk forming processes. This combination leads to several new challenges. These forming processes are characterized by a globally and locally spatial and temporal variation of load conditions. During one forming operation, low contact normal stresses combined with a low surface enlargement can simultaneously occur with very high contact normal stresses and a high surface enlargement. The resulting gradient leads to an uncontrolled material flow, in many cases yielding a reduced product quality. The focus of this thesis is the research of global methods to control the material flow using local adaptations of the tribological system. To realize this, the tribological mechanisms of different surface modifications were identified. This should guarantee the use of the results independently from the investigated parameter range.

The target of the thesis was the improvement of the die filling of functional elements. This should lead to an improved in-service behavior of functional components. To realize this numerical feasibility studies were used. A combined deep-drawing and upsetting process and an extrusion process were investigated as sheet-bulk metal forming processes. The numerical analysis revealed that both processes are characterized by two zones of varying tribological load conditions. In the area where the functional elements are formed high contact normal stresses and high surface enlargements occur. The remaining areas are characterized by low tribological load conditions. This difference leads to a material flow from the area of the functional elements into the bottom area of the produced component, yielding a reduced die filling of the functional elements. Using numerical studies revealed that the difference of the friction coefficient between the two areas of varying load conditions significantly influences the material flow. The friction coefficient in the area of the functional elements needs to be lower than the friction coefficient in the remaining component areas. The higher the difference, the higher is the resulting die filling of the functional elements. Thus, to control the material flow methods to increase and to reduce the friction are needed.

Based on this requirement workpiece-sided abrasive blasting and tool-sided high-feed milling were analyzed as methods to increase friction. Chrome based hard coatings on the tool surface and workpiece-sided deterministic structures were investigated to reduce the friction. To use the results independently from the investigated parameter range, the aim of the study was the identification of the tribological mechanisms of each tailored surface. To realize this, a combined numerical and experimental approach was used. Within the experimental investigation the pin extrusion test and the ring compression test were used as laboratory friction tests. Additionally, the two workpiece materials DCo4 and DP600 were investigated. For the numerical investigation a FE Model of the pin extrusion test with a simplified modelling of hardened surface layers and a half-space model of the Chair of Applied Mechanics was used.

The bases of the investigations are the surface layer properties of workpiece and tool. For abrasive blasting a roughening and work hardening of the surface layer was identified. Using the FE Model of the pin extrusion test the work hardening was identified as main influencing factor on the friction and thus the material flow. For the high-feed milling processes the change of the surface topography was identified as the relevant surface layer property. Numerical investigations have shown that the increase of the profile depth leads to an impedance of the material flow. The topography and the work hardening of the surface layer were identified as relevant properties for the workpiece-sided deterministic structures. Using the half-space model the interaction between the deterministic and the stochastic structure of the EDT workpiece surface was identified as main influencing factor on the friction conditions. This numerical result has been verified using experimental investigations. The chemical surface properties and the surface roughness of coated surfaces were identified as main influencing factor on the material flow for this kind of surface modification.

Based on the tribological mechanisms und the numerically identified requirements suitable surface modifications were chosen and their effectiveness was verified in the selected sheet-bulk metal forming processes. The effectiveness of workpiece-sided abrasive blasting, tool-sided high-feed milling and tool-sided chrome based hard coatings could be verified for both sheet-bulk metal forming processes. All tailored surfaces could be used to increase the die filling of the functional elements. A higher friction gradient between both zones of varying tribological load conditions leads to an additional increase of the die filling of the functional elements.

Further investigations should focus on the analysis of the wear behavior especially of tool-sided tailored surfaces. Within the current investigations it has been shown that the high-feed milled surfaces and the coated surfaces are characterized by a surface smoothing and abrasive wear. Based on the experimental investigation of the wear behavior methods to improve the wear should be identified. Another point which should be investigated is the transferability of the workpiece-sided adaptations on the tool surface. The aim of this investigation is the shortening of the process chains. Additionally, the suitability of a local adaptation of the tribological conditions using different lubricants should be investigated.

Literaturverzeichnis

- [1] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/157841/umfrage/ranking-der-20-laender-mit-dem-groessten-bruttoinlandsprodukt/>, (aufgerufen am 10.03.2017)
- [2] <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/industrieland-1-2017.pdf>, (aufgerufen am 10.03.2017)
- [3] <https://www.bmbf.de/de/deutschlands-innovationskraft-waechst-3782.html>, (aufgerufen am 10.03.2017)
- [4] Barthel, T.; Böhler-Baedeker, S.; Bormann, R.; Dispan, J.; Fink, P.; Koska: Zukunft der deutschen Automobilindustrie Herausforderungen und Perspektiven für den Strukturwandel im Automobilsektor, Diskussionspaper der Arbeitskreise innovative Verkehrspolitik und nachhaltige Strukturpolitik, Friedrich-Ebert Stiftung, 2010
- [5] <https://www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/zahlen-und-daten-uebersicht.html>, (aufgerufen am 10.03.2017)
- [6] <http://www.staufen.ag/de/news-events/news/article/2016/08/studie-deutsche-industrie-verspuert-starken-innovationsdruck/>, (aufgerufen am 10.03.2017)
- [7] <http://www.zeit.de/auto/2012-12/leichtbau-auto-sprit>, (aufgerufen am 14.03.2017)
- [8] Merklein, M.; Allwood, J. M.; Behrens, B. A.; Brosius, A.; Hagenah, H.; Kuzman, K.; Mori, K.; Tekkaya, A. E.; Weckenmann, A.: Bulk forming of sheet metal. *Annals of the CIRP* 61(2012)2, 725-745
- [9] Bay, N.; Azushima, A.; Groche, P.; Ishibashi, I.; Merklein, M.; Morishita, M.; Nakamura, T.; Schmid, S.; Yoshida M.: Environmentally benign tribo-systems for metal forming. *Annals of the CIRP* 59(2010) 2, 760-780
- [10] Merklein, M.; Hagenah, H.; Schneider, T.: Sheet-bulk metal forming processes – state of the art and its perspectives. In: Kolleck, R. (Hrsg.): *TTP 2013 - Tools and technologies for processing ultra high strength materials*, Verlag der TU Graz, 2013, 197-204
- [11] Doege, E.; Thalemann J.: Near net-shape forming in sheet-metal forming and forging. *Annals of the CIRP* 38(1989), 609-616

- [12] Kleiner, M.; Geiger, M.; Klaus, A.: Manufacturing of lightweight components by metal forming. *Annals of the CIRP* 52(2003)2, 521-542
- [13] Merklein, M.; Hagenah, H.; Schneider, T.: Blechmassivumformung – Stand der Technik und Ausblick: In: M. Merklein (Hrsg.): Tagungsband zum 2. Workshop Blechmassivumformung, Bamberg: Meisenbach Verlag, 2013, 1-10
- [14] Lange, K.: Umformtechnik - Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 3: Blechbearbeitung. Berlin: Springer Verlag, 1990, 2. Auflage
- [15] Lange, K.: Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 2: Massivumformung. Berlin: Springer Verlag, 1990, 2. Auflage
- [16] Merklein, M.; Tekkaya, A. E.; Brosius, A.; Opel, S.; Koch, J.: Overview on sheet-bulk metal forming processes. *Proceedings of the 10th ICTP*, 2011, 1109-1114
- [17] Mori, K.: Bulk Forming of sheet metals for controlling wall thickness distribution of products. *Steelresearch Journal*, Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2012, 17-24
- [18] Wang, Z. G.; Yoshikawa, Y.; Osakada, K.: A new forming method of solid bosses on a cup made by deep drawing. *Annals of the CIRP* 62(2013)1, 291-294
- [19] Mori, K.; Abe, Y.; Osakada, K.; Hiramatsu, S.: Plate forging of tailored blanks having local thickening for deep drawing of square cups. *Journal of Materials Processing Technology* 211(2011)10, 1569-1574
- [20] Wang, Z.; Yoshikawa, Y.: A new forming method of triple cup by plate forging. *Procedia Engineering* 81(2014), 389-394
- [21] Biermann, D.; Merklein, M.; Engel, U.; Tillmann, W.; Surmann, T.; Hense, R.; Herper, J.; Koch, J.; Krebs, E.; Vierzigmann, U.: Umformwerkzeuge in der Blechmassivumformung. In: M. Merklein (Hrsg.): Tagungsband zum 1. Workshop Blechmassivumformung, Bamberg: Meisenbach Verlag, 2011, 1-20
- [22] Merklein, M.; Koch, J.; Opel, S.; Schneider, T.: Fundamental investigations on the material flow at combined sheet and bulk metal forming processes. *Annals of the CIRP* 60(2011)1, 283-286

- [23] Oyachi, Y.; Allwood, J.M.: Characterizing the class of local metal sheet thickening processes. *Steel Research International*, 2011, 1020–1030
- [24] Vierzigmann, U.; Koch, J.; Merklein, M.; Engel, U.: Material flow in sheet-bulk metal forming. *Key Engineering Material* 504–506(2012), 1035–1040
- [25] Merklein, M.; Löffler, M.; Schneider, T.: Plastic flow and its control in sheet – bulk metal forming of thin-walled functional components. *Annals of the CIRP* 64(2015), 245–248
- [26] Siegert, K.: *Blechumformung: Verfahren, Werkzeuge und Maschinen*, Heidelberg: Springer-Verlag, 2015
- [27] Saba, N.: *Untersuchung der plastischen Formgebung unter Einfluss örtlich und zeitlich veränderlicher Temperatur- und Spannungszustände*. Dissertation, Universität Kassel, 2011
- [28] Ostermann, F.: *Anwendungstechnologie Aluminium*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2014, 3. Auflage
- [29] Müllerschön, H.: *Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Ziehen nicht-axialsymmetrischer Blechformteile durch Variation der Plattenbefüllung*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1997
- [30] Rambke, M.: *Ermittlung von Zuschnittsgeometrien für Tiefziehteile mit elementaren Methoden*. Dissertation, Universität Hannover, 1998
- [31] Park, S. H.; Yoon, J. W.; Yang, D. Y.; Kim, Y. H.: Optimum blank design in sheet metal forming by the deformation path iteration method. *International Journal of Mechanical Sciences* 41(1999)10, 1217–1232
- [32] Merklein, M.; Johannes, M.; Lechner, M.; Kuppert, A.: A review on tailored blanks - Production, applications and evaluation. *Journal of Materials Processing Technology* 214(2014)2, 151–164
- [33] Merklein, M.; Vogt, U.: Enhanced formability of ultrafine-grained aluminum blanks by local heat treatments. *Key Engineering Materials* 410–411(2009), 169–176
- [34] Völkner, W.; Sörgel, H.: Einfluß von Ziehstabgeometrie und Niederhalterkraft auf die Bremswirkung beim Tiefziehen. *Maschinenmarkt* 103(1997), 30–33

- [35] Elend, L.-E.: Einsatz elastischer Niederhaltersysteme zur Erweiterung der Prozeßgrenzen beim Tiefziehen. Dissertation, Universität Hannover, 2001
- [36] Samuel, M.: Influence of drawbead geometry on sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* 122(2002)1, 94–103
- [37] Obermeyer, E. J.; Majlessi, S. A.: A review of recent advances in the application of blank-holder force towards improving the forming limits of sheet metal part. *Journal of Materials Processing Technology* 75(1998), 222–234
- [38] Doege, E.: *Handbuch Umformtechnik*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2007, 2. Auflage
- [39] Gunnarsson, L.; Asnafi, N.; Schedin, E.: In-process control of blank holder force in axi-symmetric deep drawing with degressive gas springs. *Journal of Materials Processing Technology* 73(1998), 89–96
- [40] Langner, J. ; Stonis, M.; Behrens, B.-A. : Investigation of a moveable flash gap in hot forging. *Journal of Materials Processing Technology* 231(2016), 199–208
- [41] Neuberger, F.; Möckel, L.: Richtwerte zur Ermittlung der Gratdicke und des Gratbahnverhältnisses beim Gesenkschmieden von Stahl. *Werkstatttechnik* 51(1961), 725–727
- [42] Behrens, B.-A.; Klawitter, G.; Hoffmann, M.: A Die-circulatory variation of the flash land can rise economic efficiency of drop forging. *Production Engineering* 12(2005)2, 65–68
- [43] Langner, J.; Stonis, M.; Behrens, B.-A.: Experimental investigation of a variable flash gap regarding material flow and influence of trigger forces. *Production Engineering* 9(2015)3, 289–297
- [44] Sweeney, K.: *Kaltfließpressen von Schrägverzahnungen*. Dissertation, RWTH Aachen, 1999
- [45] Koll, W.: *Kaltfließpressen von Bauteilen mit Verzahnungen*. Dissertation, RWTH Aachen, 1990
- [46] König W.; Koll, W.: Cold extrusion of helical involute cylindrical gears. *European Journal of Mechanical Engineering* 35(1990)4, 178–183

- [47] Jütte, F.: Beitrag zum Präzisionsumformen von Stirnradverzahnungen. Dissertation, Universität Paderborn, 1986
- [48] Körner, E.; Knödler, R.: Possibilities of warm extrusion in combination with cold extrusion. *Journal of Materials Processing Technology* 35(1992)3-4, 451-465
- [49] Kayat, K.; Kurt, A.; Weidig, U.; Steinhoff, K.; Tekkaya, A.E.: Simultaneous cold and hot forging in a single forming step - Principle, possibilities and limitations. *Proceedings of the 3rd International Conference on Industrial Tools*, 2001, 97-101
- [50] Merklein, M.; Koch, J.; Schneider, T.; Opel, S.; Vierzigmann, U.: Manufacturing of complex functional components with variants by using a new sheet metal forming process -Sheet -Bulk metal forming. *International Journal of Material Forming* 3(2010), 347-350
- [51] Germain, S.; Landkammer, P.; Steinmann, P.: On a recursive formulation for solving inverse form finding problems in isotropic elastoplasticity. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Science* 1(2014)10, 1-19
- [52] Landkammer, P.; Steinmann, P.: A fast approach to shape optimization using the inverse FEM. *Key Engineering Materials* 611(2014), 1404-1412
- [53] Landkammer, P.; Söhngen, B.; Loderer, A.; Krebs, E.: Experimentelle Verifizierung eines Benchmark-Umformprozesses. In: M. Merklein (Hrsg.): *Tagungsband zum 18. Workshop Simulation in der Umformtechnik & 3. Industriekolloquium Blechmassivumformung 2015 - DFG Transregio 73*, 2015, 91-110
- [54] Hetzner, H.; Koch, J.; Tremmel, S.; Wartzack, S.; Merklein, M.: Improved sheet-bulk metal forming processes by local adjustment of tribological properties. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 33(2011)6, 61011-1-11
- [55] Czichos, H.; Habig, K.: *Tribologie- Handbuch*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010, 3. Auflage
- [56] Bartz, W. J.: *Tribologie und Schmierung in der Umformtechnik*. Renningen: Expert Verlag, 1987
- [57] Reissner, J.: *Umformtechnik multimedial*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2009

- [58] Bartz, W.J.: Handbuch der Tribologie und Schmierungstechnik: Kapitel 3 – Grundlagen der Schmierstoffe. Eigenverlag – Technische Akademie Esslingen, 1987
- [59] Meiler, M.; Pfestorf, M.; Geiger, M.; Merklein, M.: The use of dry film lubricants in aluminum sheet metal forming. *Wear* 255(2003)7–12, 1455–1462
- [60] Siegert, K.; Dogan, N.; Kleinert, H.: Verarbeitungsverhalten von Aluminiumblechen mit Trockenschmierstoffen. EFB-Forschungsbericht Nr. 184, 2002
- [61] Sobotka, J.: Evaluation of using drylubes and semidrylubes lubrication in series production stamping of car body mouldings. *Metal*, 2007, 1–6
- [62] Bay, N.; Nakamura, T.; Schmid, S.: Green Lubricants For Metal Forming. In: E. Felder; P. Montmitonnet (Hrsg.): Proceedings of the 4th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes, 2010, 5–35
- [63] Lehnert, W. (Hrsg.): Meform 2016, Schmierung bei den Prozessen der Warm- und Kaltumformung. Freiberg, 1996
- [64] Ullmann, R.H.: Fließpressöle für die Kaltmassivumformung. In: Tribologie und Schmierung bei der Massivumformung, Renningen: Expert Verlag, 2004, 300–311, 13. Auflage
- [65] Azushima, A.; Xue, W.D.; Yoshida, Y.: Influence of lubricant factors on coefficient of friction and clarification of lubrication mechanism in hot rolling. *ISIJ International* 93(2007)11, 681–686
- [66] Pawelski, O.: Einfluss der Schmierung bei der Formgebung von Stahl. *Schmiertechnik* 3(1968), 129–138
- [67] Nittel, K.-D.: Chemische Beschichtungssysteme als Schmierstoffträger für die Kaltmassivumformung. In: Tribologie und Schmierung bei der Massivumformung, Renningen: Expert Verlag, 2004, 312–327, 13. Auflage
- [68] Baur, J.; Sieger, K.; Malek, R.: Betrachtung der Reibung beim Draht- und Rohrziehen. In: Tribologie und Schmierung bei der Massivumformung, Renningen: Expert Verlag, 2004, 40–93, 13. Auflage
- [69] Singer, F.: Verfahren zur Herstellung von die Kaltformgebung erleichternden Filmen auf Eisen und Stal. Deutsches Patent, DE000001141154A

- [70] Bay, N.: The state of the art in cold forging lubricants. *Journal of Materials Processing Technology* 46(1994), 19–40
- [71] Groche, P.; Zang, S.: Zinkphosphatfreie Kaltmassivumformung von Abschnitten. *Massivumformung*, März 2016, 50–54
- [72] Hollmann, F.: Phosphatfreie Konversionsbeschichtung Ersatz für eine Phosphatierung für die Kaltumformung. In: P. Groche (Hrsg.). 30. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer, 2015, 111–121
- [73] Wang, Z. G.; Komiyama, S.; Yoshikawa, Y.; Suzuki, T.; Osakada, K.: Evaluation of lubricants without zinc phosphate precoat in multi-stage cold forging. *Annals of the CIRP* 64(2015)1, 285–288
- [74] Matfeld, P.: Tribologie der zinkphosphatfreien Kaltmassivumformung. Dissertation, RWTH Aachen, 2013
- [75] Köhler, M.: Beitrag zur zinkphosphatschichtfreien Kaltmassivumformung durch tribologisch vorteilhafte Halbzeugoberflächen. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2009
- [76] Rupp, M.: Möglichkeiten und Grenzen der Kaltmassivumformung zinkphosphatschichtfreier Drähte. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1997
- [77] Evans, C. J.; Bryan, J. B.: "Structured", "Textured" or "Engineered" Surfaces. *Annals of the CIRP* 48(1999)2, 541–556
- [78] Staeves, J.: Beurteilung der Topografie von Blechen im Hinblick auf die Reibung bei der Umformung. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 1998
- [79] Mössle, E.: Einfluss der Blechoberfläche beim Ziehen von Blechteilen aus Aluminiumlegierungen. Dissertation, Universität Stuttgart, 1983
- [80] Pankert, R.: Aufrauhen von Arbeitswalzen in Kaltwalzwerken. *Stahl und Eisen* 110(1990)3, 55–60
- [81] Heberer, K.-H. : Funkenerodiennaschine zur Oberflächenbearbeitung von Kaltwalzen. *Stahl und Eisen* 107(1987), 109–110
- [82] Zimnik, K.; Ritterbach, W.; Müll, B.: Pretex - Ein neues Verfahren zur Erzeugung texturierter Feibleche für höchste Ansprüche. *Stahl und Eisen* 118(1998), 75–80
- [83] Crahay, A.; Bragard, J.: Production of surfaces of textured work rolls by means of laser pulses. *Proceedings of the 12th Biennial Congress of the International Deep Drawing Research Group*, 1982, 153–164

- [84] Dolves, J.: Electron beam texturing of rolls. *Iron and Steel Engineer* 68(1991)8, 33–38
- [85] Simaao, J.; Aspinwall, D.K.; Wise, M.L.H.; Menshaw, M.F.: Mill roll texturing using EDT. *Journal of Materials Processing Technology* 45(1994)1–4, 786–797
- [86] Zhou, R.; Cao, J.; Wang, Q. J.; Meng, F.; Zimowski, K.; Xia, Z. C.: Effect of EDT surface texturing on tribological behavior of aluminum sheet. *Journal of Materials Processing Technology* 211(2011)10, 1643–1649
- [87] Liewald, M.; Wagner, S.; Becker, D.: Influence of surface topography on the tribological behaviour of aluminium alloy 5182 with EDT surface. *Tribology Letters* 39(2010)2, 135–142
- [88] Steinhoff, K.; Rasp, W.; Pawelski, O.: Development of deterministic-stochastic surface structures to improve the tribological conditions of sheet forming processes. *Journal of Materials Processing Technology* 60(1996), 355–361
- [89] Pfestorf, M.: Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1997
- [90] Geiger, M.; Pfestorf, M.; Engel, U.: 3D Oberflächenanalyse bei Feiblechen. *Stahl und Eisen* 115(1995), 47–53
- [91] Schmoeckel, D.; Prier, M.; Staeves, J.: Topography deformation of sheet metal during the forming process and its influence on friction. *Annals of the CIRP* 46(1997)1, 175–178
- [92] Grübler, R.: Simulation des umformtechnischen Tribosystems. Dissertation, ETH Zürich, 2002
- [93] Wagner, S.: 3D-Beschreibung der Oberflächenstrukturen von Feiblechen. Dissertation, Universität Stuttgart, 1996
- [94] Bech, J.; Bay, N.; Eriksen, M.: A Study of mechanisms of liquid lubrication in metal forming. *Annals of the CIRP* 47(1998)1, 221–226
- [95] Shimizu, I.; Andreasen, J.L.; Bech, J.I.; Bay, N.: Influence of workpiece surface topography on the mechanisms of liquid lubrication in strip drawing. *Journal of Tribology* 123(2001)2, 290–294

- [96] Sørensen, C.G.; Bech, J.I.; Andreasen, J.L.; Bay, N.; Engel, U.; Neudecker, T.: A basic study of the influence of surface topography on mechanisms of liquid lubrication in metal forming. *Annals of the CIRP* 48(1999)1, 203–208
- [97] Shimizu, I.; Martins, P.A.F.; Bay, N.; Andreasen, J.L.; Bech, J.I.: Influences of lubricant pocket geometry and working conditions upon micro-lubrication mechanisms in upsetting and strip drawing. *International Journal of Surface Science and Engineering* 4(2010)1, 42–54
- [98] Prinzig, O.; Müllerschön, W.: Strahlprozessoptimierung durch kantige Strahlmittel. *Schmiede Journal* März 2003, 36–38
- [99] Kappes, B.: Über den Nachweis tribologischer Effekte mit Hilfe von Modellversuchen im Bereich der umweltfreundlichen Kaltmassivumformung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2005
- [100] Stahlmann, J.: Untersuchungen und Methoden zur Beschreibung und Nutzung tribologischer Systeme mit strukturierten Halbzeugoberflächen in der Kaltmassivumformung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2011
- [101] Balendra, R.; Rosochowska, M.; Chodnikiewicz, K., Smith, R.: Preliminary assessment of the influence of surface micro-geometries on friction: *Proceedings of the 8th ICTP*. 2005, 50–51
- [102] Azushima, A.; Tanaka, T.: Lubricant behavior trapped within pockets on workpiece surface in lubricated upsetting by means of direct fluorescence observation technique. *Annals of the CIRP* 49(2000)1, 165–168
- [103] Steinhoff, K.; Rasp, W.; Pawelski, O.: Entwicklung von tribologisch optimierten Oberflächenstrukturen für die Blech- und Massivumformung. *Tribologie+Schmierungstechnik* 45(1998)2, 31–36
- [104] Andreas, K.: Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2015
- [105] Jawahir, I.S.; Brinksmeier, E.; M'Saoubi, R.; Aspinwall, D.K.; Outeiro, J.C.; Meyer, D.; Umbrello, D.; Jayal, A.D.: Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *Annals of the CIRP* 60(2011)2, 603–626

- [106] Spencer, N.D.: *Tailoring Surfaces*. Singapur: World Scientific Publishing C. Pte. Ltd., 2011, 5. Auflage
- [107] Nicolaus, M.; Schäpers, M.: Grundlagen der Dünnschichttechnologie. In: Bach, F.-W.; Möhwald, K.; Laarmann, A.; Wenz, T. (Hrsg.): *Moderne Beschichtungsverfahren*, Weinheim: Wiley-VCH, 2005, 35-56
- [108] Tillmann, W.; Stangier, D.; Schröder, P.: Investigation and optimization of the tribo-mechanical properties of CrAlCN coatings using Design of Experiments. *Surface and Coatings Technology* 308(2016), 147-157
- [109] Podgornik, O.; Hogmark, B.; Sandberg, S.: Influence of surface roughness and coating type on the galling properties of coated forming tool steel. *Surface and Coating Technology* 184(2004)2, 338-348
- [110] Schöck, M.; Kammerer, J.: Werkzeugwerkstoffe. In: Lange, K.; Kammerer, M.; Pöhlndt, K.; Schöck, J. (Hrsg.): *Fließpressen: Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke*, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, 283-307
- [111] Pesch, H.; Sattel, P.; Woestmann, S.; Mararczyk, S.; Herden, P.; Stucky, K.; Martens, T.; Ulrich, A.; Holleck, S.: Performance of hard coated steel tools for steel sheet drawing. *Surface and Coating Technology* 163-164(2003), 739-746
- [112] Bobzin, K.; Bagcivan, N.; Immich, P.; Warnke, C.; Klocke, F.; Zeppenfeld, C.; Mattfeld, P.: Advancement of a nanolaminated TiHfN/CrN PVD tool coating by a nano-structured CrN top layer in interaction with a biodegradable lubricant for green metal forming. *Surface and Coating Technology* 203(2009)20-21, 3184-3188
- [113] Andreas, K.; Merklein, M.: On the tribological influence of coatings in cold forging. In: Bouzakis, K.-D.; Bobzin, K.; Denkena, B.; Merklein, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Conference THE "A" Coatings in Manufacturing Engineering*, 2014, 23-32
- [114] Donnet, C.; Erdemir, A.: New horizon in the tribology of diamondlike carbon films. *Surface Engineering* 24(2008)6, 399-401

- [115] Hetzner, H.; Zhao, R.; Tremmel, S.; Wartzack, S.: Tribological adjustment of tungsten-modified hydrogenated amorphous carbon coatings by adaption of the deposition parameters. In: Bouzakis, K.-D.; Bobzin, K.; Denkena, B.; Merklein, M. (Hrsg.): Proceedings of the 11th International Conference "THE" A" Coatings in Manufacturing Engineering, 2013, 39–49
- [116] Neudecker, T.: Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2004
- [117] Doege, E.; Schutz-Marner, H.; Voelkner, W.; Briunling, S.: Ermittlung optimierter Oberflächenverhältnisse Werkzeug-Werkstück beim Tiefziehen. EFB Forschungsbericht Nr. 137, 1999
- [118] Twardy, S.: Funktionsgerechte Fertigung von Mikroumformwerkzeugen durch Mikrofräsen. Dissertation, Universität Bremen, 2014
- [119] Twardy, S.; Riemer, O.; Brinksmeier, E.: Tribology of micro milled surfaces. *Key Engineering Materials* 447-448(2010), 681–684
- [120] Brinksmeier, E.; Riemer, O.; Twardy, S.: Tribological behavior of micro structured surfaces for micro forming tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 50(2010)4, 425–430
- [121] Trauth, D.H.: Tribology of machine hammer peened tool surface for deep drawing. Dissertation, RWTH Aachen, 2016
- [122] Popp, U.: Grundlegende Untersuchungen zum Lasterstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2006
- [123] Geiger, M.; Popp, U.; Engel, U.: Excimer laser micro texturing of cold forging tool surfaces - influence on tool life. *Annals of the CIRP* 51(2002)1, 231–234
- [124] Wagner, K.: Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2011
- [125] Wagner, K.; Völkl, R.; Engel, U.: Tool life enhancement in cold forging by locally optimized surfaces. *Journal of Materials Processing Technology* 201(2008)1–3, 2–8

- [126] Köhler, M.: Verfahrensvergleich der Oberflächenfinish-Verfahren Hartglattwalzen und Festklopfen. Abschlussbericht GCFG Studie, 2001
- [127] Norm DIN EN 10130:2007-02: Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen. Düsseldorf: Beuth, 2007
- [128] Läßle, V.; Drube, B.; Wittke, G.; Kammer, C.: Werkstofftechnik Maschinenbau - Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen, Europa-Lehrmittel, 2011, 3. Auflage
- [129] Norm DIN 50106:2016-03: Prüfung metallischer Werkstoffe – Druckversuch bei Raumtemperatur. Düsseldorf: Beuth, 2016 (zurückgezogen)
- [130] Merklein, M.; Kuppert, A.: A Method for the layer compression test considering the anisotropic material behavior. International Journal of Metal Forming₁₂(2009), 483–486
- [131] 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
- [132] Swift, H.W.: Plastic instability under plane stress. Journal of the Mechanics and Physics of Solids ₁(1952)₁, 1–18
- [133] Datenblatt ASP2023, Firma Zapp, URL: <http://www.erasteel.com/de/content/asp-staehle> (aufgerufen am 11.04.2017)
- [134] Lange, K.: Sonderverfahren, Prozesssimulation, Werkzeugtechnik, Produktion. In Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Heidelberg: Springer-Verlag, 1993
- [135] Datenblatt Multidraw KTL N 16, Firma Zeller+Gmelin, 2015
- [136] Datenblatt Hotmelt Iloform PN 951 HM, Firma Castrol, 2014
- [137] Datenblatt Gardobond® Z 3100/10, Firma Chemetall, 2015
- [138] Datenblatt Gardolube® L 6176, Firma Chemetall, 2015
- [139] Datenblatt Gardomer® L 6261, Firma Chemetall, 2016
- [140] Datenblatt Beruforge 150 DL, Firma Bechem, 2014

- [141] Friedrich, C.: Tribologische Problemlösungen mit PVD-Hartstoffschichten zum Verschleißschutz. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1997
- [142] Brinksmeier, E: Prozess- und Werkstückqualität in der Feinbearbeitung. Habilitationsschrift, Universität Hannover, 1991
- [143] Suh, N.P.: Surface Engineering. *Annals of the CIRP* 36(1987)1, 403-408
- [144] Brinksmeier, E: Randzonenanalyse geschliffener Werkstücke. Dissertation, Universität Hannover, 1982
- [145] Vierzigmann, U.: Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces. Dissertation, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, 2015
- [146] Vierzigmann, U.; Merklein, M.; Engel, U.: Friction conditions in sheet-bulk metal forming. *Procedia Engineering* 19(2011), 377-382
- [147] Norm DIN 8200:1982-10: Strahlverfahrenstechnik: Begriffe, Einordnung der Strahlverfahren. Düsseldorf: Beuth, 1982
- [148] Strahl-Informationen-Zentrum: Merkblatt 12: Strahlen von Stahl. URL: <http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/10/MB-212-Strahlen-von-Stahl.pdf> (aufgerufen am 11.04.2017)
- [149] Momber, A.W.; Wong, Y.C.; Budidharma, R.Ij.: Hydrodynamic profiling and grit blasting of low-carbon steel. *Tribology International* 35(2002), 271-281
- [150] Tosha, K.; Iida, K.: Residual stress on the grit blasted surfaces. *Metal Behaviour & Surface Engineering* (1989), 323-328
- [151] Horowitz, I.: Die Grundlagen der Strahltechnik. Band 1: Oberflächenbehandlung mittels Strahlmitteln Handbuch über Strahltechnik und Strahlanlagen. Essen: Vulkan-Verlag, 1976, 2. Auflage
- [152] Datenblatt Microstrahlanlage PEENMATIC 770S, Firma Iepco
- [153] Norm DIN 8583-3:2003-3: Fertigungsverfahren Druckumformen. Düsseldorf: Beuth, 2003

- [154] Ike, H.; Plancak, M.: Coining process as a means of controlling surface microgeometry. *Journal of Materials Processing Technology* 80–81(1998), 101–107
- [155] Hense, R.; Wels, C.; Kersting, P.; Vierzigmann, U.; Löffler, M.; Biermann, D.; Merklein, M.: High-feed milling of tailored surfaces for sheet-bulk metal forming tools. *Production Engineering* 9(2015)2, 215–223
- [156] 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
- [157] Norm DIN 8580:2003-09: Fertungsverfahren – Begriffe, Einteilung. Düsseldorf: Beuth, 2003
- [158] Freiburg, D.; Hense, R.; Kersting, P.; Biermann, D.: Determination of force parameters for milling simulations by combining optimization and simulation techniques. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 138(2015)4
- [159] Löffler, M.; Freiburg, D.; Gröbel, D.; Loderer, A.; Matthias, S.: Untersuchung von Tailored Surfaces hinsichtlich ihres tribologischen Einflusses auf Prozesse der Blechmassivumformung. In: M. Merklein (Hrsg.): Tagungsband zum 18. Workshop Simulation in der Umformtechnik & 3. Industriekolloquium Blechmassivumformung 2015 - DFG Transregio 73, 2015, 131–146
- [160] Kersting, P.; Gröbel, D.; Merklein, M.; Sieczkarek, P.; Wernicke, S.; Tekkaya, A.E.; Krebs, E.; Freiburg, D.; Biermann, D.; Weikert, T.; Tremmel, S.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Matthias, S.; Reithmeier, E.; Löffler, M.; Beyer, F.; Willner, K.: Experimental and numerical analysis of tribological effective surfaces for forming tools in Sheet-Bulk Metal Forming. *Production Engineering* 10(2016)1, 37–50
- [161] Biermann, D.; Freiburg, D.; Hense, R.; Tillmann, W.; Stangier, D.: Influence of surface modifications on friction using high-feed milling and wear resistant PVD-coating for sheet-metal forming tools. *Key Engineering Materials* 639(2015), 275–282

- [162] Freiburg, D.; Kersting, P.; Biermann, D.: Simulation and structuring of complex surface areas using high feed milling. In: 8th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, 8(2015), 93–98
- [163] Bobzin, K.: Oberflächentechnik für den Maschinenbau. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013
- [164] Clarysse, F.; Lauwerens, W.; Vermeulen, M.: Tribological properties of PVD tool coatings in forming operations of steel sheet. *Wear* 264(2008), 400–404
- [165] Herper, J.: Tribologische Untersuchungen von verschleiß- und reibungsarmen nanostrukturierten bionischen PVD Beschichtungen. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2013
- [166] Bobzin, K.; Lugscheider, E.; Pinero, C.: Neue PVD-Schichtkonzepte für hoch beanspruchte Werkzeuge für umweltverträgliche Fertigungsprozesse. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 10-11(2004), 851–857
- [167] Löffler, M.; Andreas, K.; Engel, U.; Weikert, T.; Tremmel, S.; Wartzack, S.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Merklein, M.: Surface modifications for adaption of tribological conditions in sheet-bulk metal forming processes. In: Bouzakis, K.-D.; Bobzin, K.; Denkena, B.; Merklein, M. (Hrsg.): Proceedings of Proceedings of International Conference THE "A" Coatings in Manufacturing Engineering, 2016, 13–20
- [168] Polcar, T.; Cvrcek, L.; Siroky, P.; Novak, R.: Tribological characteristics of CrCN coatings at elevated temperature. *Vacuum* 80(2005)1–3, 113–116
- [169] Brizuela, M.; Garcia-Luis, A.; Braceras, I.; Onate, J. I.; Sánchez-López, J. C.; Martínez- Martínez, D.: Magnetron Sputtering of Cr(Al)N coatings: Mechanical and tribological study. *Surface Coating and Technology* 200(2005), 192–197
- [170] Norm DIN 25178-602: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 602: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (mit chromatisch konfokaler Sonde). Berlin: Beuth, 2011
- [171] Norm DIN EN ISO 3274: Geometrische Produktspezifikationen; Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten. Düsseldorf: Beuth, 1997

- [172] Geiger, M.; Pfestdorf, M.; Engel, U.: New developments for the qualification of technical surfaces in forming processes. *Annals of the CIRP* 46(1997), 171–174
- [173] Norm DIN EN ISO 6507-1:2016-08: Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren. Düsseldorf: Beuth, 2016
- [174] Tosha, K.: Effect of shot peening on surface texture and surface integrity. *Proceedings of the International Conference on Shot Peening*, 2011
- [175] Male, M.G.; Cockroft, A.T.: A method for determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation. *Journal of the Institute of Metals* 93(1964), 38–46
- [176] Cristino, V.A.M.; Rosa, P.A.R.; Martins, P.A.F.: Surface roughness and material strength of tribo-pairs in ring compression tests. *Tribology International* 44(2011)2, 134–143
- [177] Lawanwong, K.: An investigation of thin film coating for evaluation friction coefficient using ring compression test. *Applied Mechanics and Materials* 152–154(2012), 1281–1286
- [178] Noh, J.H.; Seo, J.M.; Hwang, B.B.: FE analysis of the sensitivity of friction calibration curves to dimensional changes in a ring compression test. *Metals and Materials International* 17(2011)2, 187–197
- [179] Noh, J.H.; Min, K.H.; Hwang, B.B.: Deformation characteristics at contact interface in ring compression. *Tribology International* 44(2011)9, 947–955
- [180] Rao, K.P.; Sivaram, K.: A review of ring-compression testing and applicability of the calibration curves. *Journal of Materials Processing Technology* 37(1993)1–4, 295–318
- [181] Vierzigmann, U.; Schneider, T.; Koch, J.; Groebel, D.: Untersuchung von Tailored Surfaces für die Blechmassiv- umformung mittels angepasstem Ringstauchversuch. In: M. Merklein (Hrsg.): *Tagungsband zum 2. Workshop Blechmassivumformung 2013 DFG Transregio 73*, Bamberg: Meisenbach Verlag, 2013
- [182] Burgdorf, M.: Untersuchungen über das Stauchen und Zapfenpressen. *Berichte aus dem Institut für Umformtechnik, Technische Hochschule Stuttgart*, Nr. 5, Essen: Giradet, 1966

- [183] Wagener, H.W.; Friz, R.: Reibung in der Kaltmassivumformung. In: Bartz, W. (Hrsg.): Tribologie und Schmierung bei der Massivumformung. Renningen: Expert Verlag, 2004, 13. Auflage, 15-39
- [184] Schneider, T.: Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2016
- [185] Gröbel, D.; Koch, J.; Vierzigmann, U.; Engel, U.; Merklein, M.: Investigations and approaches on material flow of non-uniform arranged cavities in sheet bulk metal forming processes. *Procedia Engineering* 2014, 401-406
- [186] Netsch, T.: Methoden zur Ermittlung von Reibmodellen für die Blechumformung, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1994
- [187] Löffler, M.; Andreas, K.; Engel, U.; Merklein, M.: Applicability of blasted blanks for adaption of tribological conditions in sheet-bulk metal forming. *Procedia CIRP* 45(2016), 239-242
- [188] Beyer, F.; Löffler, M.; Willner, K.; Engel, U.; Merklein, M.: Enhancement of a constitutive friction law by considering plastic smoothing of rough surfaces in dependency on the bulk stresses. *Tribology in Industry* 38(2016)2, 163-175
- [189] Hauer, F.: Die elasto-plastische Einglättung rauher Oberflächen und ihr Einfluss auf die Reibung in der Umformtechnik. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2014

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [25] Merklein, M.; Löffler, M.; Schneider, T.: Plastic flow and its control in sheet – bulk metal forming of thin-walled functional components. *Annals of the CIRP* 64(2015), 245–248
- [155] Hense, R.; Wels, C.; Kersting, P.; Vierzigmann, U.; Löffler, M.; Biermann, D.; Merklein, M.: High-feed milling of tailored surfaces for sheet-bulk metal forming tools. *Production Engineering* 9(2015)2, 215–223
- [156] 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] Löffler, M.; Freiburg, D.; Gröbel, D.; Loderer, A.; Matthias, S.: Untersuchung von Tailored Surfaces hinsichtlich ihres tribologischen Einflusses auf Prozesse der Blechmassivumformung. In: M. Merklein (Hrsg.): Tagungsband zum 18. Workshop Simulation in der Umformtechnik & 3. Industriekolloquium Blechmassivumformung 2015 - DFG Transregio 73, 2015, 131–146
- [160] Kersting, P.; Gröbel, D.; Merklein, M.; Sieczkarek, P.; Wernicke, S.; Tekkaya, A.E.; Krebs, E.; Freiburg, D.; Biermann, D.; Weikert, T.; Tremmel, S.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Matthias, S.; Reithmeier, E.; Löffler, M.; Beyer, F.; Willner, K.: Experimental and numerical analysis of tribological effective surfaces for forming tools in Sheet-Bulk Metal Forming. *Production Engineering* 10(2016)1, 37–50
- [167] Löffler, M.; Andreas, K.; Engel, U.; Weikert, T.; Tremmel, S.; Wartzack, S.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Merklein, M.: Surface modifications for adaption of tribological conditions in sheet-bulk metal forming processes. In: Bouzakis, K.-D.; Bobzin, K.; Denkena, B.; Merklein, M. (Hrsg.): Proceedings of Proceedings of International Conference THE" A" Coatings in Manufacturing Engineering, 2016, 13–20.
- [187] Löffler, M.; Andreas, K.; Engel, U.; Merklein, M.: Applicability of blasted blanks for adaption of tribological conditions in sheet-bulk metal forming. *Procedia CIRP* 45(2016), 239–242

- [188] Beyer, F.; Löffler, M.; Willner, K.; Engel, U.; Merklein, M.: Enhancement of a constitutive friction law by considering plastic smoothing of rough surfaces in dependency on the bulk stresses. *Tribology in Industry* 38(2016)2, 163-175
- [P1] Merklein, M.; Gröbel, D.; Löffler, M.; Schneider, T.; Hildenbrand, P.: Sheet-bulk metal forming – forming of functional components from sheet metals. In: Y. Qin, T.A. Dean, J. Lin, S.J. Yuan, F. Vollertsen (Hrsg.): Proceedings of the 4th International Conference on New Forming Technology, MATEC Web of Conferences, 2015, 01001 1-12
- [P2] Löffler, M.; Gröbel, D.; Engel, U.; Andreas, K.; Merklein, M.: Analysis of Effectiveness of Locally Adapted Tribological Conditions for Improving Product Quality in Sheet-Bulk Metal Forming. *Applied Mechanics and Materials* 794(2015), 81-88
- [P3] Löffler, M.; Schneider, T.; Vierzigmann, U.; Engel, U.; Merklein, M.: Locally Adapted Tribological Conditions as a Method for Influencing the Material Flow in Sheet-Bulk Metal Forming Processes. *Key Engineering Materials* 639(2015), 267-274
- [P4] Löffler, M.; Andreas, K.: Einfluss des Schmierstoffs auf die Werkstückqualität in der Blechmassivumformung. In: Tagungsband XXXV. Verformungskundliches Kolloquium (Hrsg.): Bruno Buchmayr, 2016, 111-116
- [P5] Merklein, M.; Lechner, M.; Gröbel, D.; Löffler, M.; Schneider, T.; Schulte, R.; Hildenbrand, P.: Innovative approaches for controlling the material flow in sheet-bulk metal forming processes. *Manufacturing Review* 3(2016)2, 1-17
- [P6] Freiburg, D.; Löffler, M.; Merklein, M.; Biermann, D.: Surface Structuring of Forming Tool Surfaces by High-Feed Milling. In: Robert Schmitt; Günther Schuh (Hrsg.): 7. WGP-Jahreskongress, 7(2017)7, Aachen: Apprimus Verlag, Aachen, 2017, 63-70
- [P7] Löffler, M.; Engel, U.; Andreas, K.; Merklein, M.: Identification of tribological mechanisms of shot peened steel surfaces for an application in sheet-bulk metal forming. In: Proceedings of the 13th International Conference on Shot Peening (Hrsg.): Martin Levesque, 2017, 67-72

- [P8] Löffler, M.; Schulte, R.; Freiburg, D.; Biermann, D.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Merklein, M.: Control of the material flow in sheet-bulk metal forming using modifications of the tool surface. In: International Journal of Material Forming, (2018), Springer, 1-10

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten¹

- [S1] Stirner, A.; Löffler, M.; Merklein, M.: Herstellung von Tailored Surfaces mittels Mikroprägen für tribologische Untersuchungen in der Blechmassivumformung. Erlangen, 2014
- [S2] Manou, K.; Löffler, M.; Merklein, M.: Untersuchung tribologischer Systeme der Blechmassivumformung im Streifenziehversuch. Erlangen, 2014
- [S3] Deflize, M.; Löffler, M.; Merklein, M.: Untersuchung verschiedener Tribosysteme im Ringstauchversuch. Erlangen, 2014
- [S4] Killmann, M.; Löffler, M.; Merklein, M.: Untersuchung mechanischer und tribologischer Eigenschaften mikrogeprägter Bauteile. Erlangen, 2015
- [S5] Eberle, H. J.; Löffler, M.; Merklein, M.: Untersuchung werkzeugseitiger Tailored Surfaces in ausgewählten Laborversuchen. Erlangen, 2015
- [S6] Ostermeyer, O.; Löffler, M.; Merklein, M.: Experimentelle Untersuchung von adaptierten Tribosystemen auf Basis einer numerischen Stoffflussanalyse für die Blechmassivumformung. Erlangen, 2015
- [S7] Göttler, C.; Löffler, M.; Merklein, M.: Qualifizierung von Schmierstoffen für die Blechmassivumformung. Erlangen, 2015
- [S8] Sapper, I.; Löffler, M.; Merklein, M.: Systematische Untersuchung von Strahlprozessen in Hinblick auf die Beeinflussung des tribologischen Einsatzverhaltens. Erlangen, 2015
- [S9] Hick, M.; Löffler, M.; Merklein, M.: Herstellung und Untersuchung tribologischer Eigenschaften mikrogeprägter Tailored Surfaces. Erlangen, 2016
- [S9] Henneberg, J.; Löffler, M.; Merklein, M.: Numerische Stoffflussanalyse zur Bewertung der Wirksamkeit von maßgeschneiderten tribologischen Systemen in der Blechmassivumformung. Erlangen, 2016

¹Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in.

- [S10] Faure, F.; Löffler, M.; Merklein, M.: Untersuchung von maßgeschneiderten tribologischen Systemen im Laborversuch. Erlangen, 2016
- [S11] Stachow, S.; Löffler, M.; Merklein, M.: Experimentelle Untersuchung der Wirksamkeit von adaptierten Tribosystemen in der Blechmassivumformung
- [S12] Henneberg, J.; Löffler, M.; Merklein, M.: Analyse von maßgeschneiderten Werkzeugoberflächen zur Stoffflusssteuerung in der Blechmassivumformung. Erlangen, 2017

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 10/2018):

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
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der
rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität
automatisierter Montagesysteme
durch Sensorintegration und erweiterte
Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von
Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

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

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
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 Bruchverhal-
tens 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 Montage-
feinplanung
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 Biegeumforme mit
elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für
kooperierende Industrieroboter in
Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer
Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen
Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge
Laserstrahlschneiden und -schweißen
in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung
von Materialflußstrukturen in der
Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von
kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung
bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer
CAD/CAM-Prozesskette für die
Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen: Prozeßführung und
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-
beitung 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 Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simula-
tionsverfahrens 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 Bearbei-
tungsabläufe 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 durchflußbestimmen-
der Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung
keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und
Schulung an Steuerungssoftware von
SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der
Angebotsbearbeitung in der
Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim
Schneiden mit einem gepulsten
Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18241-1.

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

Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur
Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der
Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten
Handhabungsplanung komplexer
Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten
Materialversorgung in flexiblen
Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und
Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer
Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle
Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und
Multimedia-Unterstützung in
Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.
ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und
Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung
mit Excimerlasern - Systemkomponenten
und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit
Zweistrahlschweißtechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration
für flexible Fertigungszellen mit
kooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit
Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim
3D-Laserstrahlschweißen von
Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer
CA-Anwendungen über einem
STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen
(3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und
der Fokusparameter einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt- und
Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept
für den flexiblen Materialfluß in der
Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim
Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung
an offenen CNC-Steuerungen zur
Prozeß- und 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
Spulenwickeln
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 Meißner
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 mechani-
scher Eigenschaften von Feinblechen mit
dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-102-4.

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

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

Band 80: Sorin Niederkorn
Meßeinrichtung zur Untersuchung
der Wirkflächenreibung bei umformtech-
nischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert
Regelung der Fokuslage beim Schweißen
mit CO₂-Hochleistungslasern unter
Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo
Development and Implementation of
Hierarchical Control Structures of
Flexible Production Systems Using High
Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt
Effizienzsteigerung bei Demontage
und Recycling durch flexible
Demontagetechologien und optimierte
Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der
Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger
Herstellungs- und Prüfverfahren für
thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach
Beitrag zur rechnerunterstützten
verursachungsgerechten
Angebotskalkulation von Blechteilen
mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung
der Anschlußgeometrie elektronischer
SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk
Simulationsbasierte
Lebensdauervorhersage 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 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 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 Prozeßebe 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 Integra-
tion 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 Montage-
systemen 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 Elektronikpro-
duktion
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 Anschlußkontak-
ten 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 Ein-
satz 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 - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, 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 produktbezoge-
ner 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 Magnesiumlegie-
rungen 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 Produkt-
strukturen 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 Diodenlaserstrah-
lung 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-Ent-
wicklung 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 Kleinst-
teile 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 trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten 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 - Prozessana-
lyse 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 Leichtbauverbundstruk-
turen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-228-4.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen 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 bleifreie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (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 wirkmedienba-
sierte 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 Werkzeug-
lebensdaueroptimierung und Präzisions-
fertigung 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 makrome-
chatronischen 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 Herstellungs-
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-
rung von einsetzgerechten elektroni-
schen 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 Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen 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 Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktlagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
beim Laserstrahltiefschweißen
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
Laserdurchstrahlenschweißen
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 Laserdurchstrahl-
schweißen thermoplastischer Kunststoffe
LFT, 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 Größeneffek-
ten 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 Lösun-
gen zur Robustheitssteigerung elektroni-
scher 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 Prozess-
grenzen bei der Innhochdruck-Umform-
ung 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 Optimie-
rung 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-prozessspezifi-
scher 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 Lichtwellenlei-
tern
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 Ver-
sagens 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 Umform-
werkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimu-
lation 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 Kupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-
stoffen - 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
Brücksichtigung 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 Entwick-
lung 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 Develop-
ment
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-351-1.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-380-1.

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

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

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

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des
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 aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
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 Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischeneschalteten 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 beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung 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 disk-
ret 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 Unternehmenscontrol-
lings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 295: Sven 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 Werkerinformations-
systeme 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 unter-
stützten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der höherfes-
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellan
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) / Exper-
imentelle 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 Magnesiumle-
gierung 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 Blechmassivumformpro-
zessen durch maßgeschneiderte
tribologische Systeme
LFT, vi u. 166 Seiten, 90 Bilder, 6 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Zunehmende Anforderungen an Funktionsbauteile, wie beispielsweise nach erhöhter Bauteilkomplexität, Funktionsintegration und Material- und Energieeffizienz führen dazu, dass konventionelle Verfahren der Blech- und Massivumformung an ihre Grenzen stoßen. Ein Lösungsansatz zur Erweiterung der Verfahrensgrenzen besteht in der Kombination klassischer Verfahren im Rahmen der sogenannten Blechmassivumformung. Jedoch birgt diese kombinierte Anwendung ebenfalls Herausforderungen. Variierende Spannungszustände führen beispielsweise zu einem unkontrollierten Stofffluss und einer damit reduzierten Formfüllung der Funktionselemente. Dies beeinflusst wiederum das spätere Einsatzverhalten der Bauteile negativ. Auf Basis dieser Herausforderung verfolgt die vorliegende Arbeit die übergeordnete Zielsetzung einer globalen Stoffflusssteuerung durch eine lokale Anpassung des tribologischen Systems. Um dies zu realisieren, werden verschiedene tribologische Systeme im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit zur Steuerung des Stoffflusses in der Blechmassivumformung untersucht. Hierbei gilt es auf Basis einer numerischen Stoffflussanalyse verschiedene platinen- und werkzeugseitige Oberflächenmodifikationen auszuwählen. In einem kombinierten Ansatz aus experimentellen und numerischen Untersuchungen werden die ausgewählten Modifikationen näher analysiert. Ziel ist die Identifikation der tribologischen Wirkmechanismen der einzelnen Oberflächenmodifikationen. Auf Basis dieser numerischen und experimentellen Ergebnisse werden abschließend geeignete tribologische Systeme gewählt und deren Wirksamkeit in zwei Blechmassivumformprozessen verifiziert.

