

FAU Studien aus dem Maschinenbau 323

Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier
Tiefziehprozesse durch
maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch
maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 323

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

Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier
Tiefziehprozesse durch
maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

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

Erlangen
FAU University Press
2019

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

Tenner, Jennifer. 2019. *Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 323. Erlangen: FAU University Press.

DOI: 10.25593/978-3-96147-197-3.

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: 978-3-96147-196-6 (Druckausgabe)

eISBN: 978-3-96147-197-3 (Online-Ausgabe)

ISSN: 2625-9974

DOI: 10.25593/978-3-96147-197-3

**Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse
durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Jennifer Tenner, M.Sc. (geb. Steiner)

aus Nordhausen

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

Tag der mündlichen

Prüfung: 06.12.2018

Vorsitzender des

Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Alexander Brosius, TU Dresden

Vorwort

Diese Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT). Wesentliche Ergebnisse wurden innerhalb des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Schwerpunktprogramms SPP1676 im Projekt „Trockenumformung mit lokal angepassten tribologischen Bedingungen“ erarbeitet.

Ein herzlicher Dank gilt der Ordinaria des LFT Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein für die intensiven wissenschaftlichen Diskussionen und die Betreuung meiner Arbeit. Bedanken möchte ich mich auch für das entgegengebrachte Vertrauen während der Leitung der Forschungsgruppe „Blechumformung“, welche meine persönliche Weiterentwicklung gefördert hat. Prof. Dr.-Ing. Alexander Brosius danke ich für die Übernahme des Koreferats und die konstruktiven Diskussionen innerhalb des SPP1676. Bei Prof. Dr.-ing. habil. Stefan Becker und Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Manfred Geiger möchte ich mich für die Mitwirkung an meinem Promotionsverfahren als fachfremder Gutachter und Prüfungsvorsitzender bedanken. Weiterhin gilt mein Dank allen Mitarbeitern am LFT für die produktive Zusammenarbeit. Insbesondere möchte ich mich bei den Mitgliedern der Forschungsgruppen „Blechumformung“ und „Oberfläche und Tribologie“ für die fachlichen Anregungen bedanken. Ebenso gilt mein Dank allen technischen Mitarbeitern und den Teams aus Sekretariat, Buchhaltung und Systemadministration. Ich danke allen Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, welche durch ihre Arbeit zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben. Mein Dank gilt außerdem Rong Zhao, Benedict Rothhammer, Dr.-Ing. Stephan Tremmel, Tom Häfner und Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt für die erfolgreiche Zusammenarbeit im gemeinsamen Forschungsprojekt. Einen besonderen Dank richte ich an Maria Löffler, Kim Krachenfels, Christoph Kiener, Florian Pilz, Reiner Stadter, Patrik Schwingenschlögl, René Stein und Sebastian Wiesenmayer für die vertrauensvolle Zusammenarbeit. Ich danke außerdem der Firma HOT für die gute Zusammenarbeit und die Bereitstellung beschichteter Proben.

Abschließend gilt meinem Mann, meiner Familie und meinen Freunden ein herzlicher Dank für die bedingungslose Unterstützung auf meinem bisherigen Lebensweg.

Erlangen, im Februar 2019

Jennifer Tenner

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik und Forschung.....	5
2.1 Konventionelles Tiefziehen	5
2.1.1 Verfahrensbeschreibung.....	6
2.1.2 Beschreibung der Versagensarten und Prozessgrenzen.....	8
2.1.3 Maßnahmen zur Erweiterung der Prozessgrenzen	10
2.1.3.1 Halbzeugbezogene Maßnahmen.....	10
2.1.3.2 Werkzeugbezogene Maßnahmen	14
2.1.3.3 Zwischenstoffbezogene Maßnahmen	18
2.1.4 Forschungstrends beim Tiefziehen.....	20
2.2 Schmierstofffreies Tiefziehen	22
2.2.1 Verfahren, Chancen und Herausforderungen.....	23
2.2.2 Bisherige Maßnahmen zur Realisierung des schmierstofffreien Tiefziehens	24
2.3 Zusammenfassende Bewertung.....	31
3 Zielsetzung und methodisches Vorgehen	37
4 Werkstoffe und Versuchsmethoden.....	41
4.1 Verwendete Werkstoffe und Schmierstoffe.....	41
4.2 Messmittel zur Charakterisierung von Werkzeug- und Werkstückeigenschaften	47
4.3 Methoden zur Ermittlung des tribologischen Einsatzverhaltens ...	51
4.3.1 Probenvorbereitung.....	52
4.3.2 Streifenziehanlage.....	53
4.3.3 Tiefziehpresse und Versuchswerkzeug.....	55
4.4 Finite-Element Modellierung	57
5 Definition von Anforderungen an Oberflächenmodifikationen für das Trockentiefziehen	61
5.1 Vergleichende Analyse der tribologischen Bedingungen im beölneten und trockenen Kontakt.....	61
5.1.1 Analyse in Laborversuchen	61
5.1.2 Analyse in Tiefziehversuchen.....	73

5.2	Inverse numerische Identifikation tribologischer Anforderungen .	77
5.2.1	Validierung des FE-Modells	78
5.2.2	Ableiten von Anforderungen an Oberflächenmodifikationen	84
6	Erforschung der Oberflächenmodifikationen im Labormaßstab	89
6.1	Entwicklung von Oberflächenmodifikationen	89
6.1.1	Amorphe Kohlenstoffschichten	89
6.1.2	Lasergenerierte Oberflächenmodifikationen	95
6.2	Tribologisches Einsatzverhalten	98
6.2.1	Einsatzverhalten amorpher Kohlenstoffschichten	99
6.2.2	Einsatzverhalten lasergenerierter Oberflächenmodifikationen	106
6.2.2.1	Einfluss von Mikrostrukturen auf unbeschichteten Werkzeugoberflächen	106
6.2.2.2	Einfluss von Mikrostrukturen auf beschichteten Werkzeugoberflächen	108
6.3	Ursache-Wirkzusammenhänge zwischen Oberflächeneigenschaften und Einsatzverhalten	114
6.3.1	Ursache-Wirkzusammenhänge bei amorphen Kohlenstoffschichten	114
6.3.2	Ursache-Wirkzusammenhänge bei lasergenerierten Oberflächenmodifikationen	124
6.4	Eignung der Oberflächenmodifikationen für das Trockentiefziehen	130
7	Auslegung und Erprobung eines maßgeschneiderten Werkzeugs für das Trockentiefziehen	133
7.1	Numerische Auslegung des Referenzprozesses	133
7.2	Trockentiefziehen mit maßgeschneidertem Werkzeug	142
7.3	Bewertung maßgeschneiderter Oberflächen für das schmierstofffreie Tiefziehen	153
8	Zusammenfassung und Ausblick	157
9	Summary and Outlook	161
	Literaturverzeichnis	165

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
c	N/mm	Federsteifigkeit
d	Ns/mm	Dämpfungskoeffizient
d _{St}	mm	Stempeldurchmesser
h	mm	Napfhöhe
k _f	MPa	Fließspannung
k _{f_a}	N/mm ²	Fließspannung am Außenrand
k _{f_i}	N/mm ²	Fließspannung am Innenrand
l _r /l _n	-	Verhältnis Einzel- zu Gesamtmesstrecke
m _{Öl/Trocken}	g/m ²	Schmiermittelmenge
n	-	Anzahl der Wiederholungen
p _N	N/mm ²	Flächenpressung
r ₀	-	senkrechte Anisotropie in 0° Walzrichtung
r ₄₅	-	senkrechte Anisotropie in 45° Walzrichtung
r ₉₀	-	senkrechte Anisotropie in 90° Walzrichtung
r _b	-	Quotient der plastischen Dehnung
s ₀	mm	Ausgangsblechdicke
sp ²	-	Hybridisierung des Kohlenstoffs in Graphitform
sp ³	-	Hybridisierung des Kohlenstoffs in Diamantform
v	-	Querkontraktionszahl (Poissonzahl)
v _{rel}	mm/s	Relativgeschwindigkeit
C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄	-	Konstanten der Hockett-Sherby-Fließkurvenapproximation
D ₀	mm	Ausgangsdurchmesser Platine
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
F _N	N	Normalkraft
F _R	N	Reibkraft
F _{RO}	N	Reibkraft zwischen Blech und oberer Reibbacke
F _{RU}	N	Reibkraft zwischen Blech und unterer Reibbacke
F _Z	N	Ziehkraft
M	-	Fließortexponent

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

R_m	N/mm^2	Zugfestigkeit
R_{pk}	μm	Reduzierte Spitzenhöhe nach DIN EN ISO 4287
R_{vk}	μm	Reduzierte Riefentiefe nach DIN EN ISO 4287
R_z	μm	Gemittelte Rautiefe nach DIN EN ISO 4287
S_a	μm	Mittlere arithmetische Höhe skalenbegrenzter Oberfläche nach DIN EN ISO 25178-2
S_{pk}	μm	Reduzierte Riefentiefe skalenbegrenzter Oberfläche nach DIN EN ISO 25178-2
U	kV	Beschleunigungsspannung
V_{cl}	mm^3/m^2	Geschlossenes Leervolumen
V_{op}	mm^3/m^2	Offenes Leervolumen
α_1 bis α_8	-	Koeffizienten Barlat 2000
λ_c	mm	Langwelliger Profilfilter
λ_s	μm	kurzwelliger Profilfilter
δ_F	%	Flächendeckungsgrad
μ	-	Reibzahl
σ_o	N/mm^2	Fließspannung in 0° -WR
σ_1, σ_2	N/mm^2	Hauptnormalspannungen
σ_{45}	N/mm^2	Fließspannung in 45° -WR
σ_{90}	N/mm^2	Fließspannung in 90° -WR
σ_b	N/mm^2	Biaxiale Fließspannung
σ_N	MPa	Kontaktnormalspannung
σ_r	N/mm^2	Radialspannung
σ_t	N/mm^2	Tangentialspannung
σ_x	N/mm^2	Fließspannung in x-Richtung
σ_y	N/mm^2	Fließspannung in y-Richtung
σ_z	N/mm^2	Fließspannung in z-Richtung
ϕ	-	Umformgrad
ϕ_1	-	Hauptumformgrad
ϕ_2	-	Nebenumformgrad

Abkürzung	Beschreibung
a-C:H	Amorphe wasserstoffhaltige Kohlenstoffschicht
a-C:H:Si	Amorphe wasserstoffhaltige Kohlenstoffschicht mit Siliziumdotierung
a-C:H:W	Amorphe wasserstoffhaltige Kohlenstoffschicht mit Wolframdotierung
ATOS	Advanced Topometric Sensor
C ₂ H ₂	Acetylen
C ₆ H ₈ O ₇	Zitronensäure
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge-Coupled Device
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CrN	Chromnitrid
CVD	Chemical Vapour Deposition (Beschichtung durch chemische Abscheidung aus der Dampfphase)
D ₃ PLOT	3D visualisierte Ergebnisdatei für LS-PrePost
DLC	Diamond like Carbon
EDT	Electrical Discharge Texturing
EDM	Electro Discharge Machining
EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Energiedisper-sive Röntgenspektroskopie)
EP	Extreme Pressure
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
FLC	Forming Limit Curve
GFK	Grenzformänderungskurve
HF	Haftfestigkeitsklassen des Rockwell-Eindringverfahrens nach VDI-Richtlinie 3824
HRC	Härte nach dem Rockwell-Eindringverfahren
HV	Härte nach dem Vickers-Eindringverfahren
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologie
LT	Lasertextuierung
MPP	Massivly Parallel Processing
N ₂	Stickstoff
NaOH	Natronlauge

PACVD	Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition (Plasmaunterstützte Beschichtung durch chemische Abscheidung aus der Dampfphase)
PVD	Physical Vapour Deposition (Beschichtung durch physikalische Abscheidung aus der Dampfphase)
REo-RE ₅ , Llo	Parametersets der Mikrostrukturierung (RE = Rechteck, LI = Linie)
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
REM	Rasterelektronenmikroskopie
SBT	Shot Blast Verfahren
SFB	Sonderforschungsbereich
SG	Segmentgruppe
SZV	Streifenziehversuch
TaC	Tantalschicht
ta-C	tetraedisch amorphe Kohlenstoffschicht
TiAlN	Titanaluminiumnitrid
TiB ₂	Hartstoffbeschichtung aus Titanborid
TiN	Hartstoffbeschichtung aus Titannitrid
WC	Wolframkarbid
WR	Walzrichtung
WS	Werkstück
WZ	Werkzeug
ZrCg	Gradiertes Zirkoniumkarbid
ZrO ₂ -WC	Zirkonium basierte Keramik

1 Einleitung

Bauteile aus Blech gehören heutzutage zu den Gegenständen, die uns ganz selbstverständlich im Alltag begegnen. Seien es Haushaltsgegenstände wie Töpfe und Kannen, Bestandteile von Elektronikprodukten wie die Hülle des Mobiltelefons, die Klingel am Fahrrad oder die Karosserie des Autos – all diese Komponenten werden durch die vielfältigen Verfahren der Blechumformung in die gewünschte Form gebracht. Blechumformende Unternehmen beschäftigten im Jahr 2016 100.159 Arbeitnehmer, was die Branche zu einem bedeutenden Arbeitgeber für den Wirtschaftsstandort Deutschland macht [1]. Insgesamt wurden im Bereich der Blechumformindustrie im Jahr 2016 4,72 Millionen Tonnen umgeformte Blechteile und somit 3,1 % mehr als noch im Vorjahr produziert [1]. Mit 55 % der gesamten Produktionsleistung fiel der größte Anteil auf Blechformteile aus Stahl für den Fahrzeugbau, gefolgt von 8 % der Produktionsleistung für den Maschinenbau [1]. Somit stellt die Automobilbranche den mit Abstand wichtigsten Absatzmarkt für die Blechumformung dar. Die Automobilindustrie selbst zählt wiederum zu den Schlüsselindustrien Deutschlands. Allein die Automobilhersteller beschäftigten im Jahr 2015 458.800 Arbeitnehmer. Zusammen mit den Zulieferern hängen deutschlandweit knapp 800.000 Beschäftigte direkt von den Entwicklungen in der Automobilbranche ab [2]. Zudem investierte die Automobilindustrie im Jahr 2015 fast 40 % der gesamten industriellen Forschungs- und Entwicklungsausgaben in Deutschland [2], gefolgt von der Branche der elektronischen und optischen Erzeugnisse sowie Datenverarbeitungsgeräten und dem Maschinenbau mit etwa 10 % [3]. Somit stellt die Automobilindustrie den mit Abstand größten Investor dar. Neben dem Wachstumskurs bei Umsatz und Beschäftigung befanden sich im Jahr 2015 die Produktion und der Export von Pkws auf einem neuen Rekordniveau [2]. Die Branche gerät jedoch durch zunehmenden internationalen Konkurrenzkampf und Glaubwürdigkeitsverluste durch die Dieseldramatik zunehmend unter Druck [4]. Dies wird durch einen Rückgang der Neuzulassungen auf dem deutschen Pkw-Markt um 3 % und den starken Einbruch des Dieselmärkteils im ersten Halbjahr 2017 deutlich [5]. Der Erfolg auf internationalen Märkten hängt neben der Entwicklung hochqualitativer, innovativer und nachhaltiger Produkte auch von politischen Auflagen und Restriktionen ab. Ein Beispiel dafür stellt die im Jahr 2007 von der Europäischen Union erlassene REACH-Verordnung dar, welche Mensch und Umwelt durch „Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of

Chemicals“ vor Stoffen mit negativen Gesundheits- und Umwelteinflüssen schützen soll [6]. Dieser Beschluss verpflichtet die Industrie zunehmend zum Verzicht auf umweltschädliche Substanzen.

Vor diesem Hintergrund müssen sowohl die Automobilhersteller selbst als auch ihre Zulieferer sämtliche Fertigungsprozesse und den damit verbundenen Einsatz umwelt- sowie gesundheitsgefährdender Stoffe überdenken. Das Tiefziehen gehört zu den bedeutendsten Blechumformprozessen [7] und stellt ein unverzichtbares Verfahren im Karosseriebau zur Herstellung von Innen- und Außenhautteilen sowie Struktur- und Anbauteilen dar [8]. Daher würde eine Reduzierung der Gesundheits- und Umweltschädlichkeit dieses Verfahrens eine signifikante Hebelwirkung auf die ökologische Bilanz der gesamten Prozesskette besitzen.

Beim Tiefziehen werden üblicherweise vor der Umformung Schmierstoffe auf das Werkstück appliziert, um Reibung und Verschleiß zu reduzieren. Bevor weitere Produktionsschritte wie Fügen oder Lackieren durchgeführt werden können, ist eine öl- und fettfreie Oberfläche obligatorisch. Daher ist nach der Umformung eine aufwendige Reinigung und Trocknung der umgeformten Bauteile notwendig. Die Schmierstoffe selbst und die Reinigungsmittel enthalten meist umwelt- sowie gesundheitsschädliche Substanzen. Die umweltpolitischen Vorgaben der REACH-Verordnung und die Umweltschutzziele der Agenda 2020 für Europa [9] sowie der allgemeine Trend zu verstärkter Nachhaltigkeit und effizienter Ressourcennutzung motivieren die Realisierung von schmierstofffreien – sogenannten trockenen – Tiefziehprozessen. Eine an der Prozesskette orientierte Definition versteht unter Trockenumformung sämtliche Metallumformverfahren, bei denen das Werkstück (WS) das Werkzeug (WZ) ohne die Notwendigkeit einer zusätzlichen Reinigung oder Trocknung verlässt [10]. Der Verzicht auf Schmierstoffe führt jedoch durch den direkten Werkzeug-Werkstück-Kontakt zu intensiven Interaktionen an der Kontaktfläche. Dies bedingt, abhängig von der Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften der sich berührenden Kontaktpartner, eine erhöhte Reibung und zunehmenden Verschleiß. Um den Herausforderungen des Trockentiefziehens zu begegnen, sind daher Maßnahmen zur Reibungs- und Verschleißreduktion notwendig.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die tribologischen Bedingungen im schmierstofffreien Kontakt in Abhängigkeit des Blechwerkstoffs, der Oberflächeneigenschaften und Prozessparameter untersucht. Daraus werden die primär vorherrschenden Verschleißmechanismen abgeleitet und die Reibung im trockenen Kontakt in Referenz zu geschmierten

Bedingungen quantifiziert. Anschließend wird die notwendige Reibungsreduktion zur Realisierung des Trockentiefziehens mittels einer numerischen Simulation anhand eines Modellprozesses ermittelt. Als Ansätze zur Erhöhung der Verschleißbeständigkeit und zur Beeinflussung der Reibung werden werkzeugseitige Oberflächenmodifikationen untersucht. Das tribologische Einsatzverhalten der Modifikationen wird im Labormaßstab quantifiziert. Durch eine Charakterisierung der oberflächennahen Eigenschaften vor und nach den Laborversuchen werden Rückschlüsse auf Wirkzusammenhänge zwischen Oberflächeneigenschaften und den resultierenden tribologischen Bedingungen abgeleitet. Ein Demonstratorprozess des Trockentiefziehens wird mittels der experimentell ermittelten Reibzahlen numerisch ausgelegt. Die am besten geeigneten Oberflächenmodifikationen werden auf das Tiefziehwerkzeug appliziert und ihr Einsatzverhalten in einem realen Trockentiefziehprozess untersucht. Die Ergebnisse aus den experimentellen Tiefziehversuchen werden genutzt, um die Übertragbarkeit der Laborversuche auf reale Umformprozesse aufzuzeigen sowie abschließend das Potential der entwickelten Oberflächenmodifikationen für den Einsatz im Trockentiefziehen zu bewerten.

2 Stand der Technik und Forschung

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Erforschung von maßgeschneiderten Werkzeugoberflächen zur Realisierung von schmierstofffreien Tiefziehprozessen. Im folgenden Kapitel wird daher zunächst ein Überblick über das konventionelle Tiefziehen, dessen Verfahrensgrenzen, sowie bestehende Maßnahmen zur Erweiterung dieser Grenzen gegeben. Anschließend werden das schmierstofffreie Tiefziehen beschrieben und die damit verbundenen Herausforderungen analysiert. Darauf folgt eine Zusammenfassung bisher untersuchter Maßnahmen zur Realisierung von schmierstofffreien Tiefziehprozessen. Eine abschließende Bewertung der bereits vorhandenen Forschungsergebnisse am Ende dieses Kapitels wird genutzt, um den Forschungsbedarf auf dem Gebiet des Trockentiefziehens aufzuzeigen und somit den Untersuchungsbedarf für die vorliegende Arbeit abzuleiten.

2.1 Konventionelles Tiefziehen

Tiefziehen, als eines der bedeutendsten Verfahren in der Blechumformung [11], findet Anwendung in Klein- und Großserien bei der Herstellung von Haushaltsgeräten, Blechteilen im Maschinen- und Anlagenbau sowie bei der Fertigung von Karosserieteilen für die Automobilindustrie [12]. Neben dem Tiefziehen mit Werkzeugen existieren Varianten mit Wirkmedien und Wirkenergien [13], welche die notwendige Umformkraft aufbringen. Das Tiefziehen mit Werkzeugen wird weiterhin unterschieden in Verfahren mit starrem oder nachgiebigem Werkzeug. Letzteres spielt in der industriellen Anwendung jedoch eine untergeordnete Rolle. Zudem wird das Verfahren in Tiefziehen im Erst- und im Weiterzug unterteilt. Ein Weiterzug wird benötigt, wenn die erreichbare Ziehtiefe im Erstzug nicht ausreicht. Ein bereits gezogenes Teil wird im Weiterzug zu einem Teil mit höherer Ziehtiefe und kleinerem Durchmesser umgeformt. Das Tiefziehen im Weiterzug kommt bei der Herstellung von Strukturbauteilen jedoch nur selten und für Außenhautteile praktisch gar nicht zur Anwendung [8]. Nachfolgend wird daher lediglich das Tiefziehen mit starren Werkzeugen im Erstzug vorgestellt.

2.1.1 Verfahrensbeschreibung

Das Tiefziehen ist nach DIN 8584 als das Zugdruckumformen von ebenen Blechhalbzeugen zu einem Hohlkörper oder von Hohlkörpern zu Hohlkörpern kleineren Durchmessers beschrieben [13]. Beim Tiefziehen wird keine Änderung der Blechdicke beabsichtigt. Das Prinzip des Tiefziehens sowie die dabei vorherrschenden Spannungszustände sind in Bild 1 dargestellt. Abgebildet ist das Tiefziehen mit Niederhalter im Erstzug. Werkzeugseitig sind lediglich die Aktivteile Niederhalter, Matrize und Stempel, welche in direktem Kontakt mit dem Blech stehen, dargestellt. Der Platineuzuschnitt mit dem Ausgangsdurchmesser D_0 wird auf der Matrize positioniert. Anschließend bringt der Niederhalter eine definierte Normalkraft auf. Bei großen Blechdicken und geringem Ziehverhältnis besteht die Möglichkeit auf einen Niederhalter zu verzichten. Da in industriellen Anwendungen jedoch häufig dünnwandige Bauteile mit hohen Ziehverhältnissen hergestellt werden, ist zumeist der Einsatz eines Niederhalters notwendig. Dieser kontrolliert den Stofffluss im Flanschbereich zwischen Niederhalter und Matrize und verhindert die Bildung von Falten.

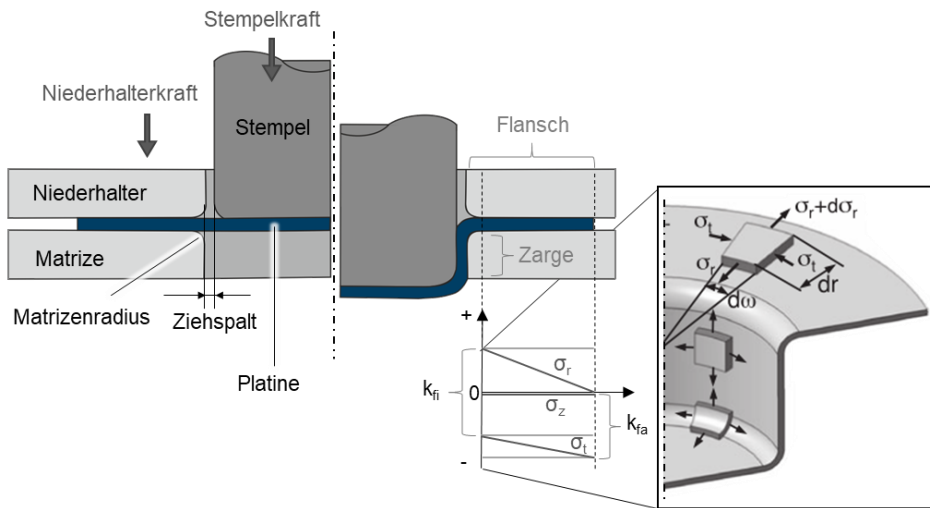


Bild 1: Schematischer Ablauf eines Tiefziehprozesses inklusive der Darstellung der vorherrschenden Spannungszustände nach [8]

Nach dem Aufbringen der Niederhalterkraft verfährt der Stempel mit dem Durchmesser d_{st} in der Regel weggebunden auf das Blech und bringt somit die notwendige Umformkraft auf. Die Krafteinleitung erfolgt beim Tiefziehen mittelbar über die auf den Ziehteilboden wirkende Stempelpkraft [14]. Von dort wird die Kraft über die Zarge in die Umformzone im Flansch übertragen. Zu Beginn des Tiefziehens herrschen Biege- und Streckziehbeanspruchungen vor. Dies verursacht eine ungewollte Ausdünnung des Blechs, welche, bedingt durch die Kaltverfestigung, zu einer Erhöhung der notwendigen Umformkraft führt. Eine größere Umformkraft bewirkt erhöhte Spannungen und bestimmt somit auch die tribologischen Bedingungen. Erst wenn das Blech vollständig an Stempel- und Matrizenradien anliegt und aus dem Flanschbereich in die Zarge fließt, beginnt das eigentliche Tiefziehen. Dem Fließen aus dem Flansch wirkt die Reibkraft zwischen Niederhalter und Blech sowie zwischen Blech und Matrize entgegen. Beim Tiefziehen liegt in der Regel ein Mischreibungszustand vor [14]. Dieser besteht aus Anteilen der Grenz- und hydrodynamischen Reibung. Die Reibzahlen liegen üblicherweise in einem Bereich zwischen 0,03 und 0,1. Bei der Grenzreibung kommt es zur direkten Berührung der Grenzschichten wie den Oxidschichten der beiden Kontaktpartner. Hydrodynamische Reibung liegt vor, wenn der Schmierstoff für eine vollständige Trennung von Werkzeug- und Werkstückoberfläche sorgt. Je höher der hydrodynamische Anteil der Reibung, desto niedriger ist die vorherrschende Reibzahl und desto geringer sind die Rückhalterkräfte im Flanschbereich beim Tiefziehen. Die Stempelpkraft wird demnach neben Geometrie, Blechdicke und Materialeigenschaften auch entscheidend von den tribologischen Bedingungen beeinflusst. Der Tiefziehprozess ist beendet, wenn der Stempel soweit verfahren ist, dass die gewünschte Ziehtiefe des Bauteils erreicht wurde. Im Ziehteilboden und der Zarge liegen während des Tiefziehens tangentielle und radiale Zugspannungen vor. Im Flanschbereich sind hingegen bei rotationssymmetrischen Bauteilen radiale Zug- und tangentielle Druckspannungen vorherrschend. Bei anspruchsvolleren Geometrien, wie beispielsweise Rechteck- oder Kreuznäpfen, unterscheiden sich die Tangentialspannungen je nach Flanschbereich. In den Eckbereichen sind nach wie vor tangentielle Druckspannungen vorherrschend, wohingegen an den Kanten ausschließlich Zugspannungen vorliegen. Gerade die Bereiche reiner Zugspannungen können ein Ausdünnen des Blechs und somit ein vorzeitiges Versagen begünstigen. Beim Tiefziehen mit Niederhalter liegen im Flansch zusätzlich Druckspannungen senkrecht zur Blechebene an, welche jedoch einen deutlich geringeren Wert aufweisen als die Spannungen in der Blechebene. Die am Werkstück anliegenden Spannungszustände und deren Höhe

nehmen Einfluss auf Reibung und Verschleiß beim Tiefziehen. Je größer die Reibung, desto stärker wird der Werkstofffluss gehemmt und die Ausdünnung erhöht. Somit begrenzen auch die tribologischen Bedingungen das Prozessfenster, in dem Gutteile hergestellt werden können. Die Versagensfälle, welche die Grenzen des Prozesses bestimmen, werden im Nachfolgenden erläutert.

2.1.2 Beschreibung der Versagensarten und Prozessgrenzen

Vor dem Hintergrund der in dieser Arbeit angestrebten Realisierung von schmierstofffreien Tiefziehprozessen ist es notwendig, die Prozessgrenzen des konventionellen Tiefziehens zu kennen, da diese ebenso im Fall ohne Schmierung zu beachten sind. Die beiden primären Versagensarten, welche das Prozessfenster beim konventionellen Tiefziehen bestimmen, sind Falten- und Rissbildung. Falten 1. Ordnung entstehen durch zu hohe tangentielle Druckspannungen im Flansch, welche zum Ausknicken des Blechs führen. Falten 2. Ordnung werden durch konische Ziehteilzargen oder zu große Ziehspalte hervorgerufen. Zur Rissbildung kommt es, wenn die Stempelkraft die durch die Zarge in die Umformzone übertragbare Kraft überschreitet. Vor allem die Maßnahmen zur Vermeidung von Falten 1. Ordnung und von Rissen stehen in einem Spannungsfeld. Der Faltenbildung 1. Ordnung wird durch eine Erhöhung der Niederhalterkraft entgegengewirkt. Um Risse auszuschließen, ist eine Reduktion der Niederhalterkraft notwendig, da dies ein leichteres Nachfließen des Werkstoffs aus dem Flansch ermöglicht und somit die ungewollte Blechausdünnung in der Zarge einschränkt. Diese direkt im Prozess einstellbare Maßnahme einer angepassten Niederhalterkraft kann demnach nur in einem beschränkten Maß zur Erweiterung der Prozessgrenzen beitragen. Weitere Versagensformen stellen unerwünschte Formabweichungen, wie Rückfederung und Zipfelbildung am Rand des gezogenen Bauteils, dar. Diese Prozessgrenzen werden primär durch die Materialeigenschaften des Blechs wie Verfestigungsverhalten und Anisotropie beeinflusst. Auch eine Abweichung der Oberflächenrauheit des Bauteils nach der Umformung vom Sollwert kann eine Prozessgrenze darstellen. Gerade für Sichtbauteile oder nachgeschaltete Bearbeitungsschritte ist die Beschaffenheit der Oberfläche nach der Umformung ein entscheidendes Qualitätskriterium. Zu raue oder beschädigte Blechoberflächen resultieren in der Regel aus zu hoher Reibung oder Verschleißerscheinungen auf dem Werkzeug.

Das Prozessfenster für das versagensfreie Tiefziehen von Gutteilen ohne Risse und Falten lässt sich in Abhängigkeit vom Ziehverhältnis (D_o/d_{St}) und der gewählten Niederhalterkraft beschreiben. Je kleiner das Ziehverhältnis, desto größer ist der einstellbare Bereich der Niederhalterkraft, der zur Herstellung von Gutteilen führt. Bei größerem Ziehverhältnis ist die Wahl der Niederhalterkraft umso wichtiger, da bereits eine geringe Abweichung von der idealen Kraft nach oben zu Rissen und nach unten zu Falten führen wird. Aktuelle Forschungsaktivitäten beschäftigen sich mit der Vorhersage der Prozessgrenzen und der numerischen Abbildung des Versagensverhaltens, um das Prozessverständnis zu erhöhen und somit kostenaufwändige Trial-and-Error-Versuche während der Prozessauslegung zu reduzieren [15]. Die Umformbarkeit der Werkstoffe wird meist durch die Grenzformänderungskurve (GFK) dargestellt, welche in Nakajima- oder Marciniakversuchen ermittelt wird. Durch die Implementierung der GFK in die Tiefziehsimulation kann ein Versagen durch Falten oder Risse vorhergesagt werden. Einen Überblick über die Methoden zur Ermittlung und Auswertung von Grenzformänderungsversuchen ist in [16] gegeben. Der bereits etablierte Ansatz der Schnittlinienmethode nach ISO 12004-2 [17] und die zeitabhängige Methode nach [18] werden durch moderne Ansätze der Mustererkennung ergänzt [19]. Affronti und Merklein wiesen nach, dass die Beschreibung des Versagensverhaltens unter Tiefziehbedingungen durch eine direkte Erfassung der Oberflächeneigenschaften verbessert werden kann [20]. Zur Beschreibung des Versagens durch Risse beim Tiefziehen von modernen Leichtbauwerkstoffen sind herkömmliche GFK aufgrund der verminderten Duktilität und der Scherempfindlichkeit oft nicht mehr ausreichend. Doig et al. [21] belegten, dass die Verwendung eines Schädigungskriteriums nach Lemaitre geeignet ist, um die kritische Ziehtiefe sowie die Risslage besonders unter Scherbeanspruchung numerisch abzubilden. Fortschritte im Bereich der Simulation von Falten wurden von Saxena und Dixit [22] unter Verwendung des Bifurkationskriteriums nach Hill am Beispiel von tiefgezogenen Rechtecknäpfen erzielt. Sie wiesen nach, dass dieses Kriterium zur Darstellung der Faltenbildung geeignet ist und ermittelten den Einfluss verschiedener Prozessparameter wie Niederhalterkraft und Matrizenradius auf die Ausprägung der Falten. Die genannten Forschungsaktivitäten tragen dazu bei, das Verständnis des Umform- sowie Versagensverhaltens zu erhöhen und daraus neue Ansätze zur Erweiterung der Prozessgrenzen abzuleiten. Nachfolgend wird ein Überblick zu den etablierten Maßnahmen gegeben.

2.1.3 Maßnahmen zur Erweiterung der Prozessgrenzen

Das Prozessfenster kann erweitert werden, indem die Zone der Kraftübertragung entlastet oder verstärkt wird [23]. Beim Entlasten wird die Rückhaltekraft im Flansch reduziert und somit die Zugspannungen in der Zarge verringert. Ein Verstärken ist durch höher beanspruchbare Blechwerkstoffe möglich. Um die Prozessgrenzen zu erweitern, werden halbzeug- oder werkzeugseitige Maßnahmen ergriffen sowie die Eigenschaften des Zwischenstoffs in der Kontaktzone angepasst. Einen Überblick über Möglichkeiten zur Erweiterung der Prozessgrenzen geben die nachfolgenden Abschnitte.

2.1.3.1 Halbzeugbezogene Maßnahmen

Seitens der Halbzeuge ist es möglich, das Prozessfenster durch die blechseitige Beeinflussung der tribologischen Bedingungen, die Werkstoffauswahl, die Verwendung maßgeschneiderter Halbzeuge sowie prozessangepasster Platinezuschneide zu erweitern. Die tribologischen Bedingungen sind eng mit den Versagenskriterien des Tiefziehens verknüpft. Gelingt es, Reibung und Verschleiß infolge der langen Gleitwege und lokal hohen Spannungen zu reduzieren, sinkt die Umformkraft, wodurch besonders ein Versagen durch Risse verhindert werden kann. Einen halbzeugseitigen Ansatz zur Beeinflussung der tribologischen Bedingungen stellt das Beschichten der Bleche vor der Umformung dar. Tiefziehstähle werden meist mit einer Zinkschicht versehen, primär, um das Material vor Korrosion zu schützen, aber auch, um die tribologischen Eigenschaften zu verbessern. Groche und Hennig wiesen nach, dass die Zinkschicht bei Verwendung von feuerverzinkten Blechen, besonders bei geringen Schmiermittelmengen, eine Schmierfunktion übernimmt [24]. Im Gegensatz dazu wird zwar bei elektrolytisch verzinkten Blechen eine bessere Anhaftung am Grundmaterial gewährleistet, jedoch gleichzeitig die Eigenschmierleistung verschlechtert. Harada et al. [25] zeigten, dass die Umformbarkeit von Beta-Titanlegierungen durch das Verstärken der Oxidschicht mittels Wärmebehandlung in einem mehrstufigen Tiefziehprozess erfolgreich zu einer Erweiterung der Prozessgrenzen beiträgt [26]. Die Oxidschicht verhindert einen direkten Kontakt des adhäsionsfreudigen Titans mit den Werkzeugoberflächen und schützt somit vor Kaltaufschweißungen.

Die tribologischen Bedingungen werden neben einer Beschichtung der Bleche auch durch deren Topografie beeinflusst. Im sogenannten Dressierverfahren wird durch speziell bearbeitete Walzenoberflächen eine

stochastische oder deterministische Textur auf die Blechoberfläche appliziert. Ziel der Strukturierung ist es, neben der Beeinflussung der Lackierfähigkeit und Optik, Reservoirs zur Aufnahme des Schmierstoffs zu schaffen und somit die Reibung im Umformprozess zu reduzieren [27]. Staeves [28] gibt einen Überblick zu den Dressierverfahren Shot Blast Texturing (SBT), Electrical Discharge Texturing (EDT), Laser Texturing (LT), Electron Beam Texturing (EBT) sowie Preussag Texturing (PreTex) und die resultierende Textur der Blechoberflächen. Während mittels SBT, EDT und PreTex stochastische kraterförmige Strukturen auf dem Blech abgebildet werden, resultieren für LT und EBT deterministische oder pseudostochastische, annähernd kreisförmige Strukturen. Mittels EDT können im Vergleich zu SBT höhere Spitzenzahlen und geringere Rauheiten bei höherer Reproduzierbarkeit realisiert werden. Beim mittlerweile nur noch für Aluminium verwendeten Mill-Finish mit geschliffenen Walzen resultiert eine regelmäßige riefenförmige Textur auf dem Blech [28]. Gachot et al. [29] geben einen Überblick über verschiedene Verfahren zur Texturing, die einstellbaren Textureigenschaften sowie die daraus resultierenden tribologischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Kontaktbedingungen. Nach dem aktuellen Stand der Forschung können keine allgemein gültigen Empfehlungen hinsichtlich notwendiger Textureigenschaften zur Reibungsreduzierung gegeben werden. Einen Ansatz zur Vorhersage des tribologischen Einsatzverhaltens in Abhängigkeit der Topografie texturierter Oberflächen liefern Weidel und Engel [30] durch das mechanisch-rheologische Modell, welches auf einer 3D-Oberflächencharakterisierung basiert. Für den Bereich der Mischreibung, welcher beim Tiefziehen primär vorherrscht, zeigten Kovalchenko et al. [31], dass lastertexturierte im Vergleich zu nicht texturierten geschliffenen und polierten Oberflächen bei Verwendung von hochviskosem Öl zu niedrigeren Reibzahlen führen. Zusätzlich wurde der Bereich von Geschwindigkeiten und Flächenpressungen, in denen Misch- oder Flüssigkeitsreibung vorliegen, deutlich erweitert. Im Gegensatz dazu führten lasertexturierte Oberflächen in Untersuchungen von Scaraggi et al. [32] zu einem verstärkten Abfließen von Schmierstoff aus der Kontaktzone, was erhöhte Reibzahlen bewirkte. In weiteren tribologischen Laborversuchen zeigten Zhou et al. [33], dass Aluminiumbleche mit EDT-Textur bei höheren Flächenpressungen zu einer niedrigeren Reibung als Texturen, welche mit geschliffenen Walzen (Mill-Finish) hergestellt wurden, führen. Grund für das vorteilhafte Verhalten von EDT-Texturen ist die Bereitstellung von Schmierstoffreservoirs durch ein höheres geschlossenes Leervolumen, in welchem der Schmierstoff gesammelt und unter Einwirkung der

Flächenpressung in die Wirkfuge gedrückt wird [34]. Um ein Texturierungsverfahren sowie die gewünschten Textureigenschaften auszuwählen, gilt es, die im Tiefziehprozess vorherrschenden Kontaktbedingungen bezüglich Pressungen, Umformgeschwindigkeit, Schmierstoffviskosität und -menge sowie Materialeigenschaften in tribologischen Vorversuchen möglichst exakt abzubilden.

Abhängig von den Vorgaben an das Bauteil ist auch durch die Auswahl des Blechwerkstoffes eine Beeinflussung der Prozessgrenzen möglich. Unter Berücksichtigung der Design- und Sicherheitsanforderungen kann der Bereich zur Erzielung von Gutteilen durch die Verwendung von Werkstoffen mit hoher mittlerer senkrechter Anisotropie sowie hohem Verfestigungsexponenten erweitert werden [8]. Eine hohe mittlere senkrechte Anisotropie bedeutet einen frühen Fließbeginn unter Zugdruckbeanspruchung und einen späten Fließbeginn unter Zugzugbeanspruchung. Dieses Werkstoffverhalten ist vorteilhaft beim Tiefziehen, da gerade im Flansch ein Nachfließen des Materials erwünscht und im Bereich der Zarge unter Einwirkung eines zweiachsigen Zugspannungszustands unerwünscht ist. Ein hoher Verfestigungsexponent bewirkt, dass der Widerstand gegen weitere Umformung im bereits plastifizierten Bereich steigt und somit die Gefahr lokaler Ausdünnung oder Einschnürung reduziert wird. Torkar et al. [35] untersuchten den werkstückseitigen Einfluss des Kohlenstoffgehalts auf die Tiefziehbarkeit von feuerverzinkten Stählen. Bei einer Erhöhung des Kohlenstoffgehalts von 0,010 auf 0,047 Gew.-% wurde eine verstärkte Rissneigung aufgrund gesteigerter Härte und gesunkener Duktilität durch die Bildung von Zementit ermittelt. Eine Erzielung höherer Ziehverhältnisse ist auch durch eine gezielte Wahl der globalen Gefügeeigenschaften der Halbzeuge möglich. Dies zeigten Iwanaga et al. [36] am Beispiel der Magnesiumlegierung AZ-31 durch eine Anpassung der Gleitsysteme durch unterschiedliche Halbzeugherstellungsverfahren. Eine weitere Möglichkeit, die Grenze der Formänderung zu erweitern, stellt die Erhöhung der Blechdicke dar. Kumar [37] wies nach, dass eine Erhöhung der Blechdicke bei Tiefziehstählen von 0,8 auf 2,0 mm zu einem deutlichen Anstieg der erreichbaren Haupt- und Nebenumformgrade in Nakajimaversuchen führt. Höhere Blechdicken sind jedoch aufgrund von Leichtbaubestrebungen meist unerwünscht. Um den Einfluss der Blechdicke gezielt zu nutzen, und gleichzeitig dem Leichtbaugedanken Rechnung zu tragen, kommen häufig sogenannte Tailored Blanks zum Einsatz. Dabei handelt es sich um eine maßgeschneiderte Halbzeugherstellung, bei der die globalen oder lokalen Eigenschaften der Platinenzuschnitte entsprechend des Umformprozesses und der gewünschten

späteren Bauteileigenschaften adaptiert werden. Einen Überblick zu den Varianten der maßgeschneiderten Halbzeugherstellung und -verarbeitung liefern Merklein et al. in [38]. Eine lokale Erhöhung der Blechdicke an geometrisch anspruchsvollen Bereichen trägt zur Erweiterung der Prozessgrenzen beim Tiefziehen bei, was bei sogenannten Tailor Welded Blanks, Patchwork Blanks und Tailor Rolled Blanks genutzt wird. In den vergangenen Jahrzehnten wurden zunehmend Tailor Welded Blanks und Patchwork Blanks erfolgreich für Karosserie- und Strukturbauteile in der Automobilindustrie eingesetzt [39]. Chan et al. [40] ermittelten jedoch auch Grenzen dieses Lösungsansatzes, da ein zu großer Unterschied der Ausgangsdicke bei Tailor Welded Blanks zu einem verringerten Grenzziehverhältnis führt. Anders als bei herkömmlichen Blechen treten bei rotationssymmetrischen Bauteilen Risse verstärkt am Bauteilboden der Tailor Welded Blanks parallel zur Schweißnaht auf [40]. Grund dafür ist die ungleichmäßige Übertragung der plastischen Verformung, welche zu einer erhöhten Ausdünnung des dünneren oder weicheren Materials führt [41]. Hingegen verfügen Tailor Rolled Blanks durch ihren kontinuierlichen Übergang von dicken zu dünneren Halbzeugbereichen über eine homogenere Spannungs- und Dehnungsverteilung, was zu einer verbesserten Umformbarkeit führt [38]. Einen weiteren Ansatz stellen die sogenannten Tailor Heat Treated Blanks (THTB) dar. Hierbei erfolgt eine lokale Wärmebehandlung des Platinenzuschnitts vor dem Tiefziehen, um gezielt an umformtechnisch anspruchsvollen Bereichen das Formänderungsvermögen zu erweitern [42]. Neben einem lokalen Entfestigen zur Erhöhung der Umformbarkeit, erfolgt bei Tailor Heat Treated Blanks auch eine lokale Verfestigung, um die am Stempelboden übertragbaren Kräfte zu erhöhen, und die Gefahr der Faltenbildung durch eine höhere Steifigkeit des Werkstoffs zu reduzieren [43].

Zusätzlich zur Anpassung der Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften der Halbzeuge bietet die Verbesserung des Platinenzuschnitts eine Möglichkeit, um die Prozessgrenzen zu erweitern. Park et al. [44] wiesen durch den Vergleich der Dehnpfade verschiedener Geometrien nach, dass ein prozessangepasster Zuschnitt bei sonst gleichen Bedingungen zu einem reduzierten Rissrisiko beiträgt. Weiterhin kann auch die Zipfelbildung, deren Ausprägung von der Anisotropie des Blechwerkstoffes abhängt, durch eine Optimierung des Zuschnitts reduziert werden [44]. Auf den ersten Blick scheint eine Verringerung der Zipfelbildung weniger bedeutend, da sie primär zu einer unregelmäßigen Gestalt des Flanschbereiches führt, welcher zumeist in einer dem Tiefziehen nachgeschalteten Beschnittoperation entfernt wird. Die Zipfelbildung bewirkt jedoch auch

variierende Blechdicken im Zargenbereich, was das Prozessfenster einschränken kann. Um den optimalen Platinenzuschnitt zu ermitteln, stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Neben dem auf Erfahrungswerten basierten Trial-and-Error-Verfahren haben sich vor allem rechnergestützte Ansätze etabliert. Kishor und Kumar [45] zeigten am Beispiel von 1 mm dickem Tiefziehstahl, dass eine mittels numerischer Simulationen durchgeführte Modifizierung des Platinenzuschnitts, welche die Anisotropie des Blechs berücksichtigt, zu kleineren Zipfeln in einem einstufigen Tiefziehprozess führt. Eine numerisch basierte Verbesserung des Zuschnitts für das Tiefziehen von Rechtecknäpfen mit hohem Aspektverhältnis führte in [46] auch für einen mehrstufigen Prozess zu reduzierter Zipfelbildung, weniger Reibverlusten und dadurch zu verringerten Spannungen. Neben den Möglichkeiten die Prozessgrenzen durch eine gezielte Wahl der Werkstückeigenschaften zu erweitern, gibt es verschiedene Ansätze einer angepassten Werkzeugauslegung.

2.1.3.2 Werkzeugbezogene Maßnahmen

Die Gestaltung der Werkzeuge, insbesondere die Wahl des Werkzeugwerkstoffes und der Oberflächeneigenschaften, bestimmt ebenso die tribologischen Bedingungen wie die Eigenschaften der Werkstücke. Zusätzlich werden die auftretenden Spannungen und Umformkräfte durch die geometrische Auslegung der Werkzeugaktivteile und die Werkzeugsystemtechnik bestimmt. Konkrete Maßnahmen, die zu einem vergrößerten Prozessfenster führen, werden im Folgenden vorgestellt.

Die Oberfläche der Werkzeuge beeinflusst durch ihre Topografie sowie ihre chemischen und mechanischen Eigenschaften die Interaktion mit dem Schmierstoff und dem Werkstück. Da das manuelle Polieren der Werkzeugoberflächen vergleichsweise teuer ist, gibt es zahlreiche Bestrebungen, diesen Bearbeitungsschritt durch alternative Verfahren zu ersetzen. Der Einfluss unterschiedlich bearbeiteter Werkzeugoberflächen auf die tribologischen Bedingungen beim Tiefziehen von hochfesten Stählen wurde in [47] in Laborversuchen ermittelt. Es wurde gezeigt, dass anisotrope Werkzeugoberflächen mit senkrechter Orientierung der durch Fräsen entstandenen Riefen zur Ziehrichtung zu einer Verringerung der Reibung führen und dass bei geeigneter Wahl der Fräsparameter ähnliche Reibzahlen erreichbar sind, wie für manuell polierte Werkzeugoberflächen. Eine gezielte Einstellung der topografischen Eigenschaften zur Reduzierung der notwendigen Umformkraft wurde in [48] untersucht. Die Matrizenoberfläche wurde in dieser Studie durch eine Kombination

aus Hartdrehen und Polieren bearbeitet. Die Vorschubgeschwindigkeit beim Drehen wurde variiert, um unterschiedliche Abstände zwischen den Drehriefen einzustellen. Anschließend wurden die Polierparameter so variiert, dass auf den Drehriefen Plateaus mit unterschiedlicher Breite entstehen. Eine Referenzprobe wurde bis zum vollständigen Entfernen der Drehriefen poliert. Für das Tiefziehen von Edelstahlblechen konnte gezeigt werden, dass, außer bei sehr schmalen Plateaus mit tiefen Tälern, sämtliche Werkzeugoberflächen mit Tälern und Plateaus zu niedrigeren Umformkräften führten als polierte Oberflächen mit vollständig entfernten Riefen. Als ursächlich für die niedrigeren Umformkräfte bei raueren Werkzeugoberflächen werden die reduzierte reale Kontaktfläche sowie die Möglichkeit zum Zurückhalten von Schmierstoff in der Wirkfuge gesehen.

Steitz et al. [49] erforschten den Einfluss maschinell gehämmelter Werkzeugoberflächen auf das tribologische Verhalten unter Tiefziehbedingungen. Durch die Variation der Prozessparameter beim Hämmern können Schmierstofftaschen mit variierender Form, Größe und Flächendeckungsgraden eingebracht werden. Im Vergleich zu polierten Oberflächen wurde eine Reduzierung der Reibung für eine Flächendeckung von etwa 20 % erreicht. Besonders vorteilhaft wirken die Schmierstofftaschen der gehämmerten Oberflächen bei hochviskosem Schmierstoff und erhöhten Kontaktnormalspannungen zwischen Werkzeug und Blech. Detaillierte Untersuchungen von gehämmerten Oberflächen mit variierender Strukturdicke und -geometrie sowie Schmierbedingungen für Tiefziehwerkzeuge sind in [50] dargestellt. Der erfolgreiche Einsatz maschinell gehämmelter Tiefziehwerkzeuge am Beispiel von rechteckförmigen Edelstahlstäben ist in [51] im industriellen Feldversuch mit 3.500 Hüben gezeigt. Beide Arbeiten kommen zu dem Schluss, dass durch das Einbringen einer gehämmerten Struktur auf den Werkzeugen eine Reduzierung von Reibung und Verschleiß realisierbar ist.

Einen weiteren Ansatz zur werkzeugseitigen Verbesserung der tribologischen Bedingungen stellt das Beschichten der Aktivteile dar. Sresomroeng et al. [52] analysierten die werkzeug- und werkstückseitigen Oberflächeneigenschaften nach dem Umformen von bis zu 1000 Näpfen aus hochfestem Stahl in Abhängigkeit der Werkzeugbeschichtung. Das Nitrieren und anschließende Beschichten der Matrize mit Titanitrid führte zu einem ähnlichen Verschleißverhalten wie bei unbeschichteten Werkzeugen. Das Aufbringen von Chromnitrid- sowie nitrierten Chromnitridschichten bewirkte hingegen eine erhöhte Standzeit der Werkzeuge, da erst bei einer größeren Anzahl von Hüben die Rauheit der umgeformten Näpfe deutlich

anstieg. Abe et al. [53] untersuchten den Einfluss von Titanitrid- und Vanadiumkarbidsschichten auf das erreichbare Ziehverhältnis für hochfeste Stähle unter Tiefzieh- und Streckziehbeanspruchung. Für beide Schichten wurde im Vergleich zu unbeschichteten Matrizen eine Reduzierung von Kaltverschweißungen festgestellt. Während bei hohen Geschwindigkeiten, welche zu einer Erwärmung des Bauteils führten, die Titanitridschichten die Kaltverschweißungen nicht vollständig verhindern konnte, zeigte die Verwendung der Vanadiumkarbidsschicht bei allen Prozessparametern eine erfolgreiche Erweiterung des Prozessfensters. Eine Ursache könnte in der weniger stark gestiegenen Reaktionsfreudigkeit der Vanadiumkarbidsschicht im Vergleich zur Titanitridschicht bei erhöhten Temperaturen liegen.

Zusätzlich zu den tribologischen Maßnahmen bieten neue Entwicklungen in der Werkzeugsystemtechnik eine Möglichkeit, das Prozessfenster zu erweitern. In konventionellen Tiefziehwerkzeugen wird eine konstante Niederhalterkraft während des gesamten Tiefziehprozesses aufgebracht. Dies bewirkt mit zunehmendem Flanscheinzug einen Anstieg der zwischen Niederhalter und Blech vorliegenden Flächenpressung. Zudem ist keine lokale Variation der Flächenpressung zur Stoffflusssteuerung möglich. Eine Möglichkeit, den Materialfluss zu steuern, Falten entgegen zu wirken und trotzdem eine Rissbildung zu unterdrücken, stellt die Verwendung von segmentierten Niederhaltern dar. Gerade beim Tiefziehen von nicht rotationssymmetrischen Bauteilen ist dieser Ansatz erfolgversprechend, da es im Eckbereich durch tangentielle Druckspannungen zu einer Blechaufdickung kommt. Dies führt dazu, dass der Kontakt zwischen Niederhalter und Blech entlang der geraden Kanten verloren geht. Durch die Integration von einzeln ansteuerbaren Niederhaltersegmenten kann dieser Kontakt lokal wiederhergestellt und somit der Faltenbildung direkt entgegengewirkt werden. Bei einem segmentierten Niederhalter werden die einzelnen Segmente über Hydraulikzylinder mit lokal angepassten Kräften beaufschlagt. Da sich die Trennfuge zwischen den Segmenten auf den umgeformten Bauteilen abzeichnet, werden starre Niederhaltersegmente jedoch für industrielle Prozesse und besonders für die Herstellung von Sichtbauteilen als nachteilig angesehen [14]. Diesem Nachteil wird durch die Verwendung von segmenthydroelastischen [54] oder segmentelastischen Niederhaltersystemen [55] entgegengewirkt. Bei segmentelastischen Systemen besteht der Niederhalter aus einem Kunststoffguss mit Stahleinsätzen, welche über eine Vielpunktzieheinrichtung einzeln angesteuert und mit unterschiedlichen Normalkräften beaufschlagt werden können [55]. Aufgrund der komplexen Bedienung von

Vielpunktzieheinrichtungen mit segmentelastischem Niederhalter stoßen diese bislang nur auf geringe Akzeptanz [56]. Segmenthydroelastische Niederhalter verhalten sich in Bereichen geringer Blechaufdickung quasi starr und in Bereichen erhöhter Aufdickung elastisch [57]. Eine lokal angepasste Druckbeaufschlagung dient neben der Unterdrückung von Falten der Stoffflusssteuerung. Im Vergleich zu starren Niederhaltern konnte das Prozessfenster für Gutteile vergrößert werden. Zudem werden bei segmenthydroelastischen Niederhaltern die hohen Investitionskosten für beispielsweise Vielpunktzieheinrichtungen vermieden. Obwohl Niederhalter mit elastischen Segmenten eine Reihe von Vorteilen bieten, findet diese Technologie aufgrund ihrer erhöhten Komplexität sowie der hohen Kosten kaum industriell Anwendung [8].

Einen weiteren Ansatz zur Adaption des Niederhaltersystems untersuchten Gavas und Izciler am Beispiel des Tiefziehens von Rechteckknäpfen aus einer Aluminiumlegierung [58]. Sie verwendeten Spiralfedern in der Kontaktfläche zwischen Niederhalter und Blech. Dadurch wurde die wahre Kontaktfläche reduziert und der Materialfluss verbessert. Zudem bieten die Spiralfedern die Möglichkeit, Schmierstoff zwischen den Windungen einzulagern. Insgesamt führten diese Aspekte zu einer Reduzierung der Reibung und einer homogeneren Verteilung der Blechdicke im umgeformten Bauteil. Nachteilig es jedoch der erhöhte Aufwand für die Herstellung und Montage der Spiralfedern. Zudem kann es bei höheren Hubzahlen zum Verschleiß der Federn kommen, was ein vollständiges Austauschen der Federn bedeutet. Bei herkömmlichen Niederhaltern ist hingegen häufig ein Überarbeiten der Oberfläche ausreichend.

Einen praktisch angewandten Ansatz zur Stoffflusssteuerung von nicht rotationssymmetrischen Bauteilen stellt die Verwendung von Ziehsicken im Flanschbereich dar [55]. Dabei werden im Niederhalter und der Matrize Wulste respektive Vertiefungen vorgesehen, entlang derer das Blech eine Wechselbiegung erfährt [59]. Bei prozessangepasster Auslegung der Ziehsicken führt die Vorbeanspruchung des Blechs zu einer Kaltverfestigung, was in [60] am Beispiel von DCo4 und DP800 gezeigt wurde. Diese Kaltverfestigung erhöht die in der Zarge übertragbaren Stempelkräfte und führt somit zu einer Erweiterung der Formgebungsgrenzen.

Während die bisher genannten Anpassungen im Flansch primär die Verhinderung der Faltenbildung bewirken, wird durch eine Verfahrensvariante mit Nachschieben im Flansch vor allem der Rissbildung entgegengewirkt. Durch die Integration von Nachschiebestempeln in das Tiefziehwerkzeug in der Blechebene wird der Stofffluss in Ziehrichtung

unterstützt und die Ausdünnung des Blechs reduziert. Eine ausführliche Beschreibung des Tiefziehens mit Nachschieben von Werkstoff und definiertem Werkstofffluss ist in [23] gegeben. Im Vergleich zum Tiefziehen ohne Nachschieben wurden Bodenreißer vermieden und auch das Umformen von hochfesten und weniger zum Tiefziehen geeigneten Werkstoffen wurde durch ein Nachschieben im Flansch ermöglicht. Die Grenze dieser Verfahrensvariante wird jedoch bei zu hohen tangentialen Druckspannungen erreicht, da diese die Bildung von Falten hervorrufen.

Neben Maßnahmen im Flanschbereich gibt es Bestrebungen, die Prozessgrenzen auch durch Modifikationen am Matrizenlauf zu realisieren. In numerischen Analysen zeigten Eriksen [61] und Jensen et al. [62], dass die Verwendung von traktrix-förmigen und elliptischen Ziehkanten zu Verschleißreduktion und gleichmäßigerer Verteilung der Wandstärke des umgeformten Bauteils führt. Dhaiban et al. [63] untersuchten das Einsatzverhalten einer konischen Ziehmatrize für das Tiefziehen von elliptischen Messingblechen. Durch das konische Matrizen-Design konnte in diesem Anwendungsfall gänzlich auf einen Niederhalter verzichtet werden. Dies reduzierte die durch Reibung entstehenden Rückhaltekräfte im Bereich vor dem Matrizenlauf. Für Blechdicken zwischen 1,9 und 3,0 mm konnten somit höhere Ziehtiefen als mit konventionellen Werkzeugkonzepten erreicht werden. Konische Matrizen mit einer Traktrix-Kurve im Einlaufbereich erwiesen sich als vorteilhaft für das Tiefziehen von Tailor Welded Blanks aus Aluminiumblechen unterschiedlicher Legierungszusammensetzung bei gleicher Blechdicke und gleicher Zusammensetzung bei variierender Blechdicke [64]. Das Ziehverhältnis wurde für Tailor Welded Blanks unterschiedlicher Legierungen durch die Verwendung konischer Matrizen um 27 % und die Ziehtiefe um 40 % erhöht. Für das Verschweißen unterschiedlicher Blechdicken konnte lediglich eine Erhöhung des Ziehverhältnisses um 14 % erzielt werden. Neben den werkzeugbezogenen Ansätzen stellt eine gezielte Anpassung der Schmierbedingungen einen weiteren Stellhebel zur Erweiterung der Prozessgrenzen beim Tiefziehen dar.

2.1.3.3 Zwischenstoffbezogene Maßnahmen

In konventionellen Tiefziehprozessen werden Schmierstoffe eingesetzt, um den direkten Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück zu vermeiden. Dies reduziert die Reibung sowie die notwendige Umformkraft und trägt somit zur Verschleißreduktion bei. Eine Grundbeölung wird bereits im Walzwerk auf die Bleche aufgetragen. Diese dient neben der

Schmierung im späteren Umformprozess primär als Korrosions- und Transportschutz. Abhängig von der Komplexität des Bauteils kann direkt vor dem Umformvorgang eine Zusatzbeölung im Presswerk notwendig sein. Schmierstoffe, welche für die Grund- und Zusatzbeölung in Frage kommen, werden in flüssige Schmieröle, Emulsionen, Schmierfette und Fest- bzw. Trocken-schmierstoffe unterteilt [65]. Für das Tiefziehen werden konventionelle Schmieröle und seit einigen Jahren zunehmend Trockenschmierstoffe eingesetzt [65]. Das Einsatzverhalten von polymerbasierten Schmierstoffen, Emulsionen und Schmierölen untersuchten Kim et al. [66] am Beispiel von verzinktem DP590. Die Beurteilung von Stempelkräften, maximal einstellbaren Niederhalterkräften, Zinkabrieb und Flanscheinzug belegt, dass die beiden polymerbasierten Schmierstoffe mit Extreme-Pressure-Additiven (EP-Additiven) zu geringeren tribologischen Beanspruchungen führen als Schmieröle und Emulsionen.

Der Einfluss unterschiedlicher Schmierstoffe auf die tribologischen Bedingungen wurde weiterhin in [67] für das Tiefziehen des Edelstahl 1.4301 untersucht. Eine erfolgreiche Substitution konventioneller chlorhaltiger durch chlorfreie Öle konnte für herkömmliche Werkzeugaktivflächen aus dem Kaltarbeitsstahl 1.2379 nicht erreicht werden, da es bei chlorfreien Ölen zu adhäsivem Verschleiß auf den Werkzeugoberflächen kam. Erst die Verwendung von keramischen Werkzeugoberflächen führte dazu, dass die chlorfreien Öle ihr Potential einer erhöhten Umweltfreundlichkeit und einfacheren Entsorgung entfalten. Da die keramischen Werkstoffe chemisch inert sind, können sie der Adhäsion auch bei kurzzeitigem Abreisen des Schmierfilms entgegenwirken. Keramische Werkzeuge werden jedoch aufgrund ihrer hohen Sprödigkeit nur selten in herkömmlichen industriellen Umformprozessen eingesetzt.

Den Einfluss der Schmierstoffmenge untersuchten Kirkhorn et al. [68] für das Umformöl Sellcleaner 1350 in adaptierten Streifenziehversuche anhand von DP600. Bei einer Erhöhung der Schmierstoffmenge von trocken bis zu $4,0 \text{ g/m}^2$ wurde ein kontinuierlicher Abfall der Reibzahl ermittelt. Neben der Dicke des Schmierfilms ist auch die Viskosität des Schmierstoffs für die resultierenden tribologischen Bedingungen entscheidend. Je höher die Viskosität des Schmierstoffs, desto niedriger ist die maximale Ziehkraft, wie Balbach am Beispiel der Aluminiumlegierung AlMg5Mn darlegte [69].

Die aufgeführten Untersuchungsergebnisse zeigen, dass sich die Prozessgrenzen des Tiefziehens gezielt durch die Wahl eines geeigneten Schmierstoffs, die Erhöhung der Schmierstoffmenge, die Verwendung von

Schmierstoffen mit höherer Viskosität sowie die Beimengung von Additiven erweitern lassen. Neben der Variation des Schmierstoffs selbst und der applizierten Menge gibt es Bestrebungen einer maßgeschneiderten Beölung zur Erhöhung der erreichbaren Ziehtiefen. Durch eine lokale Variation des Schmierstoffauftrags kann in Bereichen höhere tribologischer Beanspruchungen gezielt eine geringere Reibung realisiert werden. Am Stempelradius hingegen kann bewusst eine hohe Reibung zum Übertragen der notwendigen Umformkräfte eingestellt werden [65]. Untersuchungen zur Variation der Platinenbefettung zur Stoffflusssteuerung bei nicht-axialsymmetrischen Tiefziehprozessen [70] haben gezeigt, dass eine Kombination unterschiedlicher Schmierstoffe auf einer Platine nur geringfügig zu verbesserten Ziehergebnissen beiträgt. Zudem besteht die Gefahr der Unverträglichkeit der Öle zueinander. Die lokale Variation der Schmierstoffmenge führte hingegen zu vielversprechenden Ergebnissen bezüglich einer Erweiterung der Prozessgrenzen.

2.1.4 Forschungstrends beim Tiefziehen

Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, gibt es eine Vielzahl von Ansätzen, um die Prozessgrenzen beim Tiefziehen zu erweitern. Bei der Auswahl geeigneter Maßnahmen gilt es heutzutage jedoch, neben wirtschaftlichen und qualitätsorientierten Kriterien auch die Anforderungen durch veränderte gesetzliche Vorschriften und Ansprüche der Gesellschaft zu berücksichtigen. Vor dem Hintergrund eines zunehmenden Umweltbewusstseins und strengerer gesetzlicher Vorgaben wachsen daher in der blechumformenden Industrie die Bestrebung zur Verbesserung der Nachhaltigkeit und Umweltfreundlichkeit der Prozesse. Da konventionelle Schmierstoffe umweltschädliche Substanzen enthalten und nachgeschaltete Reinigungs- und Trocknungsprozesse mit dem Einsatz gefährdender Chemikalien und einem erhöhten Wasserverbrauch in Verbindung stehen, stellen schmierstoffseitige Entwicklungen einen zentralen Stellhebel zur Realisierung nachhaltigerer Umformprozesse dar. Im Fokus steht die Reduzierung der Schmierstoffmenge, das Recyceln von Schmierstoffen sowie die Verwendung biologisch abbaubarer Schmierstoffe. Eine Methode zur Einstellung einer möglichst geringen Schmierstoffmenge ohne Verlust der notwendigen Schmierleistung wurde in [71] in Abhängigkeit der Blechtopografie sowie der Beanspruchung im Prozess gezeigt. Diese Methode beruht auf der Bestimmung des Volumens vorhandener Schmierstoffreservoirs durch eine Charakterisierung der Blechoberfläche vor der Umformung. Anhand dieses Volumens, welches gefüllt werden muss, um einen geschlossenen Schmierfilm zu realisieren, wird die mini-

mal notwendige Schmierstoffmenge abgeleitet. Bay et al. geben in [72] einen umfassenden Überblick über verschiedene tribologische Maßnahmen zur Realisierung von umweltfreundlicheren Tiefziehprozessen. Einen Ansatz stellt die Substitution herkömmlicher Schmieröle mit Trockenschmierstoffen dar. Trockenschmierstoffe werden in wasserlösliche und wasserfreie – so genannte Hotmelts – unterschieden. Vorteil der Trockenschmierstoffe ist die Sicherstellung eines homogeneren Schmierstofffilms, eine Reduzierung der notwendigen Schmierstoffmenge sowie ihre im Vergleich zu häufig verwendeten, erdölbasierten Schmierstoffen erhöhte Umweltverträglichkeit [73]. Den Einsatz sogenannter Trockenschmierstoffe untersuchten Meiler et al. [74] am Beispiel der Aluminiumlegierung AlMg_{4.5}Mn_{0.4}. Im Vergleich zur herkömmlichen Tiefziehöl wie KTL N 16 und dem für Aluminiumlegierungen entwickelten Tiefziehöl ALG 17 führte das Hotmelt E₁ bedingt durch eine reduzierte Reibung zu homogenerer Blechdickenverteilung, erhöhten Formgebungsgrenzen und geringerer Streuung der Ergebnisse. Das Einsatzverhalten der Trockenschmierstoffe E₁ und C₁ wurde im Vergleich zu KTL N 16 in [75] im Kontakt zu den Aluminiumlegierungen AA5182 und AA6014 getestet. Für beide Trockenschmierstoffe konnte ein höheres Ziehverhältnis als für den Flüssigschmierstoff erreicht werden. Als nachteilig erwies sich jedoch die Ablagerung größerer Mengen Trockenschmierstoff am Werkzeug bereits nach dem Ziehen von 15 Bauteilen. Diese Schmierstoffrückstände müssten im industriellen Prozess manuell entfernt werden, da es sonst zu Oberflächenfehlern oder aufgrund zu geringer Rückhaltekräfte im Flansch zur Faltenbildung kommen könnte. Kim et al. [76] untersuchten vier verschiedene Trockenschmierstoffe und einen Flüssigschmierstoff in unterschiedlichen Laborversuchen. Sie wiesen nach, dass die Trockenschmierstoffe beim Tiefziehen von warmgewalzten, hochfesten Stahl generell zu niedrigerer Reibung führten als der verwendete Flüssigschmierstoff. Zudem konnten sie zeigen, dass zwei der untersuchten Trockenschmierstoffe nur unter moderaten Bedingungen bei niedrigeren Niederhalterkräften und geringeren Umformgeschwindigkeiten effizient wirken. Ein weiterer Trockenschmierstoff verfügte trotz ähnlicher Schichtdicke der Schmierstoffauflage über ein ähnlich schlechtes Einsatzverhalten wie der Flüssigschmierstoff. Trockenschmierstoffe führen demnach nicht pauschal zu besseren tribologischen Bedingungen, sondern müssen entsprechend des Beanspruchungskollektivs ausgewählt werden.

Neben der Verwendung von Trockenschmierstoffen, welche durch die Reduzierung der notwendigen Schmierstoffmenge zu einer erhöhten Nachhaltigkeit beitragen, gibt es Ansätze, die auf biologisch abbaubare,

pflanzliche Schmierstoffe zurückgreifen. Lovell et al. [77] untersuchte in tribologischen Laborversuchen mit verzinktem Stahlblech die Eignung von reinem Canola-Öl und Canola-Öl mit Borsäure. Das Canola-Öl führte zu ähnlichen Reibzahlen wie konventionelles Öl. Mit einem Zusatz von 5 Gew.-% Borsäure konnten die tribologischen Beanspruchungen deutlich reduziert werden. Somit konnte das prinzipielle Potential eines rapsöl-basierten Schmiersystems für Blechumformprozesse aufgezeigt werden, wobei die Beimengung der Borsäure aus Umweltsicht kritisch zu bewerten ist. Schmierstoffe auf pflanzlicher Basis führen ebenso im Kontakt mit Magnesiumlegierungen zu geringen Reibzahlen und eignen sich daher auch für die Umformung von Magnesium [78]. Einen Überblick über die Einsatzmöglichkeiten von biologisch abbaubaren Schmierstoffen in der Automobilindustrie wird in [79] gegeben. Dort wird ein Anstieg des Marktanteils von biologisch abbaubaren Schmierstoffen auf durchschnittlich 15 % in den nächsten 10 bis 15 Jahren prognostiziert. Zur weiteren Verbesserung der Nachhaltigkeit der industriellen Fertigungsprozesse gibt es Untersuchungen zur Wiederaufbereitung von Schmierstoffen. Durch Recyclen der Schmierstoffe kann die Menge an umweltbelastenden Abfällen reduziert werden, jedoch sind die verfügbaren Technologien der Wiederaufbereitung häufig für eine breite Anwendung zu teuer [80].

2.2 Schmierstofffreies Tiefziehen

Neben einigen Ansätzen, die Schmierstoffmenge zu reduzieren, biologisch abbaubare Schmierstoffe zu verwenden oder gebrauchte Schmierstoffe wiederaufzubereiten, gibt es Bestrebungen eine gänzlich schmierstofffreie Umformung zu realisieren. Die Forschung an sogenannten trockenen Umformprozessen wird durch ein wachsendes Umweltbewusstsein sowie steigenden Kostendruck motiviert. Die durch den Verzicht auf Schmierstoffe mögliche Verkürzung der Prozesskette liefert ein erhebliches Kostensenkungspotential. In der Zerspanungstechnik werden durch Trockenbearbeitung in Abhängigkeit von der jeweiligen Prozesscharakteristik 2 bis 17 % der Kosten eingespart [81]. Zusätzlich wird die Nachhaltigkeit verbessert, da auf umwelt- und gesundheitsschädliche Stoffe in den Schmierstoffen sowie Reinigungsmitteln verzichtet wird. Da das Tiefziehen im Fokus dieser Arbeit steht, wird im Folgenden primär auf das Trockentiefziehen eingegangen.

2.2.1 Verfahren, Chancen und Herausforderungen

Anders als in der Zerspanungstechnik, in der es nach DIN 69090-1 genormte Definitionen für konventionelle Nassbearbeitung, Minimalmengenschmierung und Trockenbearbeitung gibt [82], existiert keine standardisierte Definition für das schmierstofffreie Tiefziehen. Im Rahmen dieser Arbeit gilt die prozessorientierte Definition nach Vollertsen und Schmidt [10], die besagt, dass bei Trockenumformung die Reinigung nach der Umformung entfallen muss. Aus dieser Definition resultiert, dass Trockenschmierstoffe zur Realisierung des Trockentiefziehens nicht geeignet sind, da diese vor weiteren Verarbeitungsschritten wie dem Fügen oder dem Lackieren von der Blechoberfläche zu entfernen sind. Weiterhin gilt aber auch, dass die Anwendung flüchtiger Schmierstoffe einen möglichen Lösungsansatz darstellt. Diese prozessorientierte Definition zielt somit auf die ökologischen und ökonomischen Chancen des Trockentiefziehens ab. Aus ökologischer Sicht bewirkt der Verzicht auf häufig umweltschädliche Schmierstoffe sowie Reinigungsmittel in den Waschstraßen eine Verbesserung der Nachhaltigkeit und eine effizientere Ressourcennutzung. Aus wirtschaftlicher Sicht führt der Wegfall von Reinigungs- und Trocknungsschritten zu einer Kürzung der Prozesskette und somit auch zu einer kürzeren Produktionszeit. In Abhängigkeit von den jeweiligen Umformprozessen, den vorherrschenden Umweltschutzauflagen sowie der Losgröße resultieren bei der Realisierung des Trockentiefziehens unterschiedlich hohe Kosteneinsparungspotentiale. Der Verzicht auf Schmierstoffe führt jedoch zu einer Vielzahl von Herausforderungen. Die direkte Berührung von Werkzeug und Werkstück verursacht chemische und mechanische Wechselwirkungen der Kontaktpartner, welche mit einer Erhöhung von Reibung und Verschleiß einhergehen [83]. Je nach Beanspruchungskollektiv und tribologischen System wird durch den Verzicht auf Schmierstoffe die Neigung zu adhäsivem oder abrasivem Verschleiß verstärkt. Diese Verschleißmechanismen führen zu veränderten Oberflächeneigenschaften der Werkzeuge, einer Herabsetzung der Standmenge sowie in Extremfällen zum Ausfall der Tiefziehwerkzeuge. Die veränderten tribologischen Bedingungen verursachen eine Verschlechterung der Oberflächenqualität der umgeformten Bauteile sowie eine Verkleinerung des Prozessfensters zur Realisierung von Gutteilen [10]. Daher sind Anpassungen des konventionellen Tiefziehprozesses obligatorisch. Ähnlich wie bei der Erweiterung der Prozessgrenzen im konventionellen Prozess konzentrieren sich die Lösungsansätze auf werkzeug-, werkstück- oder schmierstoffbezogene Maßnahmen. Für die

komplexere Gestaltung der Tiefziehwerkzeuge und –prozesse sowie durch frühzeitigere Überarbeitung der Werkzeuge entstehen beim Trockentiefziehen erhöhte Aufwendungen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese überproportional durch das Kosteneinsparungspotential des Trockentiefziehens kompensiert werden [10]. Der Verzicht auf Produktion, Transport, Auftrag, Entfernung und Entsorgung von Schmierstoffen bietet umfassende Möglichkeiten Energiekosten zu sparen, sodass im Trockenumformen eine erfolgsversprechende „grüne“ Technologie gesehen wird.

2.2.2 Bisherige Maßnahmen zur Realisierung des schmierstofffreien Tiefziehens

Einen Ansatz zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß im direkten Werkzeug-Werkstück-Kontakt stellt die Verwendung flüchtiger Schmiermedien dar. In [84] wurde anhand von Streifenziehversuchen nachgewiesen, dass der Einsatz von flüssigem CO₂ und N₂ als flüchtigen Schmiermedium zu einer erfolgreichen Reibungsreduktion zwischen DCo₄ und dem Kaltarbeitsstahl 1.2379 als Werkzeugwerkstoff beiträgt. Die flüssigen Schmiermittel werden über Mikrobohrungen im Werkzeug unter hohem Druck in die Wirkfuge eingebracht. Beim Übergang zum Atmosphärendruck ändern die Schmiermedien ihren Aggregatzustand von flüssig zu gasförmig und verdampfen rückstandslos. Die Übertragbarkeit dieses Ansatzes auf Tiefziehwerkzeuge wurde anhand der Umformung von U-Profilen nachgewiesen [85]. Im Vergleich zum trockenen Kontakt, bei dem keine U-Profile umgeformt werden konnten, gelang unter Verwendung von flüchtigem CO₂ eine deutliche Verbesserung des Nachfließens des Blechs aus dem Flanschbereich. Die Verwendung flüchtiger Schmiermittel besitzt somit das Potential zur Reibungsreduktion.

Während flüchtige Schmiermedien die kontaktflächentrennende Funktion von konventionellen Schmierstoffen substituieren, zielt die Spannungsüberlagerung in der Wirkfuge auf die Reduktion der Adhäsionsneigung im direkten Kontakt ab. Während der Umformung kommt es zur Umwandlung der Umform- und Reibarbeit in Wärme. Dadurch entstehen in Bereichen mit hohen Umformgraden oder hohen tribologischen Beanspruchungen lokale Temperaturspitzen, welche die Adhäsion begünstigen. Die erhöhten Temperaturen führen zu thermoelektrischen Strömen und Spannungen zwischen Werkzeug und Werkstück. Töber et al. [86] konnten nachweisen, dass das Anlegen eines externen Stromes und die Richtung des Stromflusses einen entscheidenden Einfluss auf das

Adhäsionsverhalten besitzt. Ein Stromfluss vom Werkstück zum Werkzeug bewirkte eine Verringerung der Materialanhaftung. Darüber hinaus ist es möglich, die Adhäsionsneigung durch eine passende Wahl von Werkzeug- und Werkstückmaterialien zu beeinflussen. In [87] wurde gezeigt, dass möglichst ähnliche thermoelektrische Eigenschaften von Werkzeug und Werkstück zu einer Reduktion des adhäsiven Verschleißes beitragen.

Die Wahl von Werkzeugwerkstoffen mit günstigen thermoelektrischen Eigenschaften stellt einen leicht umsetzbaren Ansatz dar. Nachteilig können jedoch ein höherer Preis oder schlechtere mechanische Eigenschaften solcher Werkzeugwerkstoffe sein.

Neben diesen schmierstoff- bzw. prozesseitigen Maßnahmen wird in einer Vielzahl von Studien der Einfluss bestimmter Werkzeug- und Werkstückeigenschaften untersucht. Ein leicht in der Praxis umzusetzender Ansatz durch eine angepasste Werkzeuggestaltung wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB442 „Umweltverträgliche Tribosysteme“ [88] untersucht. Dort wurde das Potential von Lamé- an Stelle von Kreiskurven für die Gestaltung des Matrizen-einlaufs im trockenen Fall nachgewiesen. Diese veränderte Form der Werkzeuggeometrie gewährleistet einen harmonischen Anstieg der Kontaktnormalspannungen am Matrizenradius mit homogenerer Verteilung. Dies reduziert lokal die Werkzeugbeanspruchung und kann somit den Verschleiß am Matrizenradius verringern. Mit dieser Methode ist es jedoch nicht möglich, die tribologischen Bedingungen im Flanschbereich, welche entscheidend für den Werkstofffluss sind, zu beeinflussen.

Wie bereits für das konventionelle Tiefziehen erwähnt, kann das Prozessfenster auch durch die Werkstoffauswahl erweitert werden. In der Regel sind die Möglichkeiten, den Werkstückwerkstoff zu ändern, aufgrund von Bauteilanforderungen stark begrenzt. Bezogen auf das Werkzeug besteht ein deutlich größerer Spielraum. Kataoka et al. [89] untersuchten den Einsatz verschiedener Keramiken in Referenz zu einem Werkzeugstahl für schmierstofffreie Tiefziehprozesse. Als Blechwerkstoffe wurden Titan, ein weicher Tiefziehstahl, Aluminium und Garkupfer verwendet. Bei Titanblechen resultierte für alle Werkzeugwerkstoffe im trockenen Kontakt das gleiche Grenzziehverhältnis. Für die anderen drei Blechwerkstoffe konnte das Grenzziehverhältnis durch den Einsatz keramischer Werkzeuge erhöht werden. Das größte Potential zeigte sich bei Aluminium- und Kupferblechen, da hier das Grenzziehverhältnis von 1,8 bzw. 1,7 auf fast 2,0 erhöht wurde. Eine bessere Tiefziehbarkeit zeigte sich auch für den

weichen Tiefziehstahl, wenn auch mit einer Erhöhung des Grenzziehverhältnisses um 0,1 in einem geringeren Ausmaß. Das Potential keramischer Werkzeuge hängt demnach in hohem Maße von den Werkstoffeigenschaften des Gegenkörpers ab. Dies wurde ebenfalls in [89] durch die Bestimmung der Grenzziehverhältnisse für Edelstahlbleche und verzinkte Bleche nachgewiesen. Für Edelstahlbleche wurde bei Werkzeugen aus SiC und Si₃N₄ nur eine minimale Erweiterung der Ziehgrenzen im Vergleich zum Werkzeugstahl erreicht. Für Werkzeuge aus ZrO₂ resultierte sogar eine Verringerung des Grenzziehverhältnisses. Das tribologische Verhalten von Keramikwerkzeugen hängt demnach stets von der Kombination aus Werkzeug- und Werkstückeigenschaften ab. Für alle Bleche wurde das größte Potential für SiC und Si₃N₄ ermittelt. Nachteilig bei der Verwendung von Keramiken ist deren im Vergleich zu Werkzeugstählen schlechte Bearbeitbarkeit zur Erzeugung der gewünschten Werkzeugkontur und Rauheit. Daher wurde weiterführend das Einsatzverhalten von elektrisch leitenden Keramiken, welche mittels Erodieren bearbeitbar sind, für das Trockentiefziehen untersucht. Tamaoki et al. in [90] ermittelte deren tribologischen Verhalten am Beispiel des schmierstofffreien Umformens von weichem Tiefziehstahl. Besonders für die zirkoniumbasierte Keramik ZrO₂-WC wurde eine Verbesserung der tribologischen Bedingungen erreicht. Mit diesem Werkzeugwerkstoff gelang es, ähnliche Grenzziehverhältnisse zu realisieren wie für Aktivteile aus Werkzeugstahl im geschmierten System. Der trockene Kontakt von Edelstahlblechen mit der Nichtoxidkeramik Siliziumnitrid wurde in [91] mittels Stift-Scheibe-Versuchen analysiert. Aufgrund von Rissen, welche durch lokal hohe Beanspruchungen induziert wurden, kam es zur Adhäsion des Blechmaterials an den geschädigten Stellen, was zu vorzeitigem Verschleiß und hoher Reibung führte.

Bedingt durch die Herausforderungen keramischer Werkzeuge sowie durch die Weiterentwicklung der Beschichtungstechnik in den vergangenen Jahrzehnten wurden zahlreiche Untersuchungen zum Einsatzverhalten von Beschichtungen für das Trockentiefziehen durchgeführt. Horiuchi et al. [92] ermittelten das Potential einer Werkstückbeschichtung. In [92] wurde eine diamantähnliche Kohlenstoffschicht („diamond like carbon“ kurz DLC) auf die Aluminiumlegierung A5052 aufgebracht. In tribologischen Laborversuchen und Rundnapfversuchen wurde nachgewiesen, dass das Beschichten der Aluminiumlegierung A5052 zu einer Reduzierung der Reibung und somit der notwendigen Umformkraft führt.

Als weiterer Ansatz wird die Beschichtung der Werkzeugoberflächen untersucht. Die generelle Eignung von kohlenstoffbasierten Schichten zur Reibungs- und Verschleißreduktion im trockenen Kontakt wurde in [93] dargestellt. Taube [94] gelang es, in Kugel-Scheibe-Versuchen nachzuweisen, dass im Kontakt von Aluminium zu DLC-Schichten geringere Reibzahlen gemessen werden als für herkömmliche Hartstoffschichten wie TiN. Besonders nicht dotierte wasserstoffhaltige amorphe Kohlenstoffschichten (a-C:H) erwiesen sich als vorteilhaft. In einem ähnlichen Versuchsaufbau verglichen Murakawa und Takeuchi [95] das tribologische Verhalten von reinen und Si-dotierten DLC-Schichten in Kontakt zu Aluminiumblechen. Sie wiesen nach, dass im direkten Werkzeug-Werkstück-Kontakt DLC-Schichten ohne Si Dotierung zu geringeren Reibzahlen führen. Den Untersuchungen fehlten jedoch Referenzen zu unbeschichteten und beölten Bedingungen.

Podgornik et al. [96] untersuchten den Einfluss verschiedener Beschichtungen und Rauheitszustände im trockenen Kontakt zu einem austenitischen Edelstahl innerhalb von Tribometerversuchen. Ihre Untersuchungen belegen, dass kohlenstoffbasierte Schichten wie die Tantalschicht TaC und W-dotierte DLC-Schichten (WC/C) im Vergleich zu Hartstoffschichten wie TiN und TiB₂ zu weniger Materialübertrag und geringerer Reibung führen. Während die Reibung für die TiN- und TiB₂-Schichten durch Polieren um 50 bis 100 % gesenkt werden kann, besteht für die kohlenstoffbasierten Schichten lediglich ein Potential von bis zu 15 %. In Kratztests zeigte sich jedoch eine bessere Haftfestigkeit und Abrasionsbeständigkeit der Hartstoffschichten im Vergleich zu den TaC- und WC/C-Schichten. Weitere in Tribometerversuchen ermittelte Einflüsse untersuchten Podgornik und Hogmark in [97]. Während die Reibzahlen für unbeschichtete und TiN beschichtete Werkzeuge in einem ähnlichen Bereich lagen, wurde mittels einer DLC Schicht eine um 40 % geringere Reibzahl realisiert. Weiterhin wurde nachgewiesen, dass eine Reduzierung der Werkzeugrauheit im trockenen Kontakt ebenso zu einer deutlichen Verringerung der Reibzahlen führt. Der Einfluss von Topografie und Rauheit wurde detailliert in [98] für beölte und trockene Kontakte untersucht. Gedrehte Oberflächen führten ohne Schmierstoff in der Wirkfuge zu einem ähnlichen Adhäsionsverhalten wie geschliffene Oberflächen jedoch bewirkten sie auch eine deutlich höhere Reibzahl. Ein nachgeschaltetes Polieren von geschliffenen Werkzeugoberflächen verursacht eine weitere Reduktion der Adhäsionsneigung und der Reibung. Für beschichtete Oberflächen hängt der Einfluss der Topografie von den Schichteigenschaften ab. Für keramische Hartstoffschichten wurde ein

größeres Potential durch Veränderung der Rauheit festgestellt als für die W-dotierten und daher weicheren DLC-Schichten. Die hohe Sensitivität der Reibung gegenüber der Rauheit der Kontaktpartner wird auch in [99] bestätigt. Nyberg et al. [100] belegten anhand von Kugel-Scheibe-Versuchen ebenso den Einfluss der Rauheit auf das Reibverhalten. Während die Rauheit des Gegenkörpers aus pulvermetallurgischem Schnellarbeitsstahl die tribologischen Bedingungen kaum verändert, so konnte durch eine Reduktion der Rauheit der ta-C/aC beschichteten Siliziumwafer eine verminderte Reibung erzielt werden. Aufgrund der verwendeten Materialien und der Kontaktbedingungen in Tribometerversuchen wie dem Kugel-Scheibe-Aufbau sind diese Ergebnisse jedoch nur bedingt auf die Blechumformung übertragbar.

Azushima et al. [101] charakterisierten das tribologische Einsatzverhalten von TiN-Schichten im trockenen Kontakt in Tribometerversuchen. Bei hochkohlenstoffhaltigen Stahlkugeln als Gegenkörper wurde nachgewiesen, dass TiN-Schichten mit höherer Härte und Orientierung entlang der Raumdiagonalen (111) durch die Bildung einer Titanoxidschicht über bessere Schmiereigenschaften verfügen. Ghiotti und Bruschi wiesen in, im Vergleich zu Tribometern, anwendungsnäheren Streifenziehversuchen nach, dass DLC-Schichten zu einer stärkeren Verbesserung der tribologischen Bedingungen im trockenen Kontakt führen als TiAlN und CrN [102]. Im schmierstofffreien Kontakt zu Edelstahlblechen resultierte eine Reibzahl von unter 0,2 für DLC-Schichten im Vergleich zu Reibzahlen von über 0,4 für die Hartstoffschichten. In Streifenziehversuchen mit Umlenkung wurde in [83] nachgewiesen, dass durch den Einsatz von tetraedisch amorphen Kohlenstoffschichten (ta-C) ähnliche Reibzahlen und Verschleißbeständigkeiten erreicht werden wie für konventionelle Werkzeugoberflächen im geschmierten Zustand. Diese Ergebnisse konnten durch Versuche mit zwei Aluminiumlegierungen der 5000er Serie auch für das schmierstofffreie Clinchen bestätigt werden. Eine Übertragbarkeit auf Trockenumformprozesse mit großen Gleitwegen wie beim Tiefziehen wurde in [83] jedoch nicht aufgezeigt. Sresomroeng et al. [103] untersuchten das Einsatzverhalten verschiedener Hartstoffschichten und einer DLC-Schicht beim Biegen von U-Profilen aus kaltgewalztem Kohlenstoffstahl. Sämtliche Schichten führten zu einer Verringerung der Adhäsionsneigung. Jedoch kam es bei den TiN und DLC-Schichten zu Delaminationserscheinungen aufgrund der geringen Haftfestigkeit am Substratmaterial. Das erfolgsversprechende tribologische Einsatzverhalten der DLC-Schichten wurde in [94] hinsichtlich der Übertragbarkeit auf Trockentiefziehprozesse untersucht. Beim Tiefziehen von Näpfen aus

einer Aluminiumlegierung der 6000er Serie konnte jedoch auch mit beschichteten Werkzeugen keine zufriedenstellende Qualität der Werkzeug- und Werkstückoberflächen erzielt werden. Das Trockentiefziehen von Edelstahlnapfen gelang durch das Beschichten mit harten a-C:H-Schichten für einige Hübe [94]. Jedoch zeigte sich auch hier die Notwendigkeit der Verbesserung der Schichteigenschaften wie Haftfestigkeit und Verschleißbeständigkeit. Vielversprechendere Ergebnisse wurden hingegen beim schmierstofffreien Tiefziehen von Edelstahlnapfen mit titandotierten Zirkoniumkarbid (ZrCg) beschichteten Matrizen erzielt [104].

Die oben aufgeführten Forschungsarbeiten belegen, dass zu Beginn dieser Forschungsarbeit bereits eine Vielzahl an Untersuchungen zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen im schmierstofffreien Kontakt durch die Applikation von unterschiedlichen Beschichtungssystemen existiert. Ein Großteil der oben aufgeführten Studien analysierte das tribologische Verhalten jedoch in Tribometerversuchen. Diese stellen meist ein geschlossenes Tribosystem dar und verfügen über Punkt- oder Linienkontakte und bilden somit nicht die Kontaktbedingungen eines Tiefziehprozesses ab.

Neben dem Beschichten stellt die Erzeugung von Makro- und Mikrostrukturierungen einen weiteren Lösungsansatz zur Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse dar. Makrostrukturen beschreiben geometrische Erhebungen oder Vertiefungen im Bereich einiger Millimeter, wohingegen Mikrostrukturen Veränderungen der Topografie im Mikrometerbereich darstellen. Bowden und Tabor [105] wiesen bereits nach, dass die Reibung bei direkt in Kontakt stehenden Metallen signifikant durch die Interaktion der Rauheitsspitzen der Kontaktkörper beeinflusst wird. Ohne den Einsatz von Schmierstoffen kommt es beim direkten Kontakt der Spitzen zu einem Verhaken, was beim Überschreiten der kritischen Scherspannung zur Materialtrennung im weicheren Kontaktkörper führt. Durch das Einbringen von Strukturen wird im schmierstofffreien Fall eine angepasste Gestalt der Rauheitsspitzen angestrebt, welche Verhakungen verhindert. Die Beeinflussung der Neigung zum Verhaken durch Mikrostrukturen unterschiedlicher Periodizität und Ausrichtung wurde in [106] untersucht. Die Proben wurden mittels Laserinterferometrie strukturiert. Anschließend wurde das Einsatzverhalten ohne die Verwendung von Schmierstoffen in einem Nano-Tribometer mit einem Kugel-Scheibe-Aufbau analysiert. Als Werkstoffe kamen der Edelstahl 1.4301 und ein 100Cr6 Stahl zum Einsatz. Gachot et al. [106] wiesen nach, dass die Mikrostrukturierung beider Kontaktkörper zu geringerer Reibung

führt als die polierten Referenzflächen. Eine 90° Orientierung der linienförmigen Strukturen auf Körper und Gegenkörper zueinander führte zu den geringsten Reibzahlen. Eine Ursache wird in der durch die Orientierung veränderten realen Kontaktfläche gesehen, was in [107] modelliert und analysiert wurde. Die Kombination aus Beschichtungen und Mikrostrukturierungen untersuchten Petterson und Jacobson [108] im trockenen Kontakt mittels Kugel-Scheibe-Tribometer. Sie strukturierten TiN- und DLC-Schichten mit linienförmigen sowie quadratischen Strukturen bei einem Flächendeckungsgrad von 25 % und verglichen das tribologische Einsatzverhalten in Referenz zu nicht strukturierten Beschichtungen. Im Kontakt zu Stahlkugeln resultierte für strukturierte TiN-Schichten eine leichte Reduzierung der Reibung im Vergleich zu nicht strukturierten Oberflächen, wohingegen für DLC-Schichten die Strukturen eine Erhöhung der Reibung verursachten. Die Untersuchungen von Petterson und Jacobson machen deutlich, dass der Einfluss von Mikrostrukturen nicht allgemeingültig hergeleitet werden kann sondern stark von dem jeweiligen Beanspruchungskollektiv des tribologischen Systems abhängt.

Die Laserstrukturierung von a-C:H-Schichten mit kreisförmigen Vertiefungen wurde in [109] analysiert. Zu Beginn der tribologischen Laborversuche wurde für strukturierte und nicht strukturierte Oberflächen ein ähnliches Reibverhalten ermittelt. Durch die Funktion der Mikrostrukturen Verschleißpartikel aufzunehmen und somit aus der Wirkfuge zu entfernen, wurden für strukturierte Oberflächen über jeden einzelnen Versuchsverlauf konstantere und im Mittel geringere Reibzahlen ermittelt. Der tribologische Einfluss von lasergenerierten Mikrostrukturen auf ta-C beschichteten Oberflächen wurde von Roch et al. [110] ebenfalls in Kugel-Scheibe-Versuchen untersucht. Das Einbringen von punktförmigen Strukturen bewirkte eine geringere Reibung. Bei linienförmigen Strukturen wurde eine Abhängigkeit von der Laserleistung und der Orientierung der Strukturen festgestellt. Eine zu geringe Laserleistung führte dazu, dass eine Graphitisierung der ta-C Schicht stattfand, was deren Härte herabsetzte. Erst bei ausreichend hoher Laserleistung war der Ablationseffekt dominant, welcher zu einer Verminderung der Reibzahl im trockenen Kontakt durch das Einbringen von Linienmustern in die Topografie beigetragen hat. Anders als Gachot et al. stellten Roch et al. jedoch einen positiven Einfluss der Orientierung der Linien in Gleitrichtung fest. Die Kombination aus Beschichtungen und Mikrostrukturen wurden ebenso in [111] für a-C:H:Si beschichtete Werkzeugoberflächen untersucht. Hierbei wurden Kalotten mit einem Durchmesser von 500 µm in den gehärteten

Werkzeugstahl 1.2379 eingebracht und anschließend beschichtet. Reibung und Verschleiß wurden in trockenen Streifenziehversuchen mit Blechen aus AA5182 untersucht. Über einen Ziehweg von 500 mm wurde für strukturierte Oberflächen mit einem Flächendeckungsgrad der Strukturen von 12,5 und 25 % eine etwas geringere Reibung als für nicht strukturierte Flächen erreicht. In sämtlichen Fällen kam es jedoch zu einer deutlichen Adhäsion und Reibzahlen größer als 0,57, was auf lokale plastische Deformationen hindeutet. Einen Überblick zu weiteren Strukturierungsansätzen zur Realisierung von schmierstofffreien Tiefziehprozessen geben Mousavi et al. in [112]. Neben der bereits erwähnten Mikrostrukturierung der Werkzeugoberflächen werden ebenso eine Mikrostrukturierung der Werkstücke sowie eine Makrostrukturierung der Werkzeuge diskutiert. Direkte Laserinterferometrie (DILP) wurde zum Mikrostrukturieren von ta-C beschichteten Oberflächen genutzt. Die Laserleistung wurde so gewählt, dass die Strukturierung zu einer lokalen Graphitisierung der ta-C Schicht führt. Die Graphitisierung wurde mit einer Tiefe von 1 µm, einem Abstand von 10 µm und in 0° zur Ziehrichtung durchgeführt. In Streifenziehversuche mit Umlenkung wurde durch die ta-C-Schichten eine Reduktion der Reibung um 25 % im Vergleich zum trockenen und unbeschichteten Fall realisiert. Ein signifikanter Einfluss der Graphitisierung wurde im Kontakt zu DC₀₄ jedoch nicht festgestellt. Mit der Makrostrukturierung von Niederhalter und Matrize im Flanschbereich soll eine Materialflusssteuerung und eine Reduzierung der Faltenbildung bei gleichzeitiger Reduktion der Reibung sichergestellt werden. In numerischen Analysen konnte gezeigt werden, dass eine Makrostrukturierung zur Verringerung der gesamten verrichteten Arbeit und damit auch der Reiarbeit führt. Ein Ansatz zur numerischen Auslegung der Makrostrukturierungen für das Trockentiefziehen sowie ein experimenteller Abgleich ist in [113] gegeben. Die Wellenlänge der Makrostrukturen und die Eindringtiefe des Niederhalters, welche über Distanzringe eingestellt wird, sind entscheidend für das Potential zur Erweiterung der Prozessgrenzen durch die Strukturierung. Bei zu groß gewählten Eindringtiefen wird der Stofffluss so stark gehemmt, dass es zu Bodenreißen kommt [113].

2.3 Zusammenfassende Bewertung

Aus konventionellen Tiefziehprozessen sind halbzeug-, werkzeug- und zwischenstoffseitige Maßnahmen zur Erweiterung der Prozessgrenzen bekannt. Die halbzeugseitigen Maßnahmen sind nur bedingt für die Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse geeignet. Über die Werk-

stoffauswahl könnten bewusst Blechwerkstoffe mit geringer Adhäsionsneigung gewählt werden, dies steht jedoch häufig im Konflikt mit Desgin- und Leichtbauanforderungen. Durch einen prozessangepassten Platinzuschnitt sind auch im trockenen Kontakt höhere Ziehtiefen und geringere tribologische Beanspruchungen realisierbar. Diese Maßnahme kann jedoch erst wirksam eingesetzt werden, wenn das Auftreten von Verschleiß bereits beim erstmaligen Werkzeug-Werkstück-Kontakt verhindert wird. Zu Beginn erscheint daher eine Adaption der halbzeugseitigen Oberflächeneigenschaften zielführender. Dem steht eine Verlängerung der Fertigungsprozesskette entgegen, die durch das Trockentiefziehen verkürzt werden soll. Wenig Übertragungsmöglichkeiten zur Prozessgrenzenerweiterung gibt es für die schmierstoffseitigen Ansätze des konventionellen auf den trockenen Prozess. Hier bieten lediglich flüchtige Schmierstoffe einen Ansatzpunkt. Erfolgsversprechendere Maßnahmen können aus den werkzeugseitigen Methoden gewonnen werden. Die in Abschnitt 2.1.3.2 beschriebenen Strategien zur Entwicklung adaptierbarer oder elastischer Niederhaltersysteme sind generell geeignet, die tribologischen Beanspruchungen zu verringern. Jedoch wären auch hier zusätzlich Ansätze zur Minderung der Adhäsionsneigung nötig und die Werkzeugsystemtechnik würde deutlich komplizierter werden. Aufgrund der mangelnden Reduzierung der Adhäsionsneigung im Flanschbereich wird auch der Ansatz durch geometrisch angepasste Matrizen einlaufadien als weniger zielführend eingeordnet. Ebenso ist die Verwendung von Zieh-sicken zur gezielten Stoffflusssteuerung für den Einsatz im trockenen Kontakt ungeeignet, da dadurch Reibung und Verschleiß lokal deutlich erhöht wären. Im Gegensatz dazu bieten Modifikationen der Werkzeu-oberflächen einige Ansatzmöglichkeiten, wie das Aufbringen von Beschichtungen oder die Adaption der topografischen Eigenschaften, welche besonders für das Trockentiefziehen geeignet sind. Gerade im unmittelbaren Kontakt von Werkzeug und Werkstück kann durch eine geschickte Wahl der Oberflächeneigenschaften ein direkter Beitrag zur Reibungs- und Verschleißreduktion geleistet werden. Bisherige Forschungsarbeiten zur Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse sind daher besonders auf angepasste Eigenschaften der Oberflächen fokussiert.

Eine Übersicht zu den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Ansätzen für das Trockentiefziehen sowie eine Bewertung dieser ist in Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1: Bewertung bekannter Maßnahmen zur Reibungs- und Verschleißreduktion im trockenen Kontakt

Ansätze zur Reibungs-/ Verschleißreduktion	Potential für unterschiedliche Bleche	Anwendung in Serienprozessen	Wesentliche Herausforderung
Flüchtige Schmiermedien	unklar	↓	Korrosion
Spannungsüberlagerung	unklar	↓↓	Übertragbarkeit auf Tiefziehen
Keramische WZ-Aktivteile	je nach Keramik	o	WZ-Versagen
WS-Beschichtungen	unklar	↓↓	Umformbarkeit der Schichten
WZ-Beschichtungen	je nach Schicht	↑↑	Schichtauswahl Strukturdesign
WZ-Strukturierungen	unklar	↑	

Legende ↓↓ stark negativ ↓ negativ o neutral ↑ positiv ↑↑ stark positiv

Die Bewertungskriterien wurden in Hinblick auf ein möglichst breites Anwendungsfeld und einen späteren Einsatz in industriellen Prozessen ausgewählt. Eine weitere Erforschung von Ansätzen, welche von vornherein kaum für einen Serienprozess in Frage kommen, scheint zur Erreichung der mit dem Trockentiefziehen verbundenen Nachhaltigkeitsziele wenig sinnvoll. Erstrebenswert ist zudem eine mögliche Anwendbarkeit des Lösungsansatzes unabhängig vom Blechwerkstoff.

Die Anwendung zwischenstoffseitiger Lösungsansätze ist auf die Verwendung von flüchtigen Schmiermedien begrenzt. Bislang wurde der erfolgreiche Einsatz nur für die verzinkten Werkstoffe DCo5 und DCo4 nachgewiesen. Es wurde nicht gezeigt, ob die Methode nach [84] auf adhäsionsanfällige Materialien wie Aluminiumlegierungen übertragbar ist und welche Reibung bei komplexen Tiefziehprozessen resultiert. Zudem bleibt

offen, wie sichergestellt wird, dass Korrosionsvorgänge an Werkzeugen und Halbzeugen durch Feuchtigkeitsrückstände verhindert werden. Die Notwendigkeit der Prozessgase wie CO_2 und N_2 während des Tiefziehens schmälert zudem die Kosteneinsparungsmöglichkeiten und gefährdet die angestrebte Nachhaltigkeit im Rahmen der Trockenumformung.

Das Anlegen von Strömen entgegen der Adhäsionsrichtung erwies sich in [87] ebenso als vielversprechender Ansatz, welcher bislang am Beispiel des Durchsetzens untersucht wurde. Damit das Anlegen von Strömen oder das Erden der Werkzeuge und Werkstücke einen wirksamen Einfluss auf die Adhäsion besitzt, müssen jedoch in lokalen Bereichen sehr hohe Umformgrade vorliegen, welche zu großen Temperaturunterschieden zwischen den Kontaktpartnern führen. Eine Übertragbarkeit auf Umformvorgänge mit großer Relativbewegung wie dem Tiefziehen wurde bislang nicht untersucht. Da beim Tiefziehen auch das mechanische Verhalten der Rauheitsspitzen einen erheblichen Einfluss auf die Triologie besitzt, ist davon auszugehen, dass das Potential dieser Methode nur begrenzt eine Verbesserung der tribologischen Bedingungen bewirkt. Gerade im Flanschbereich, in dem lange Gleitwege vorliegen, dürften mechanische und chemische Mechanismen die Bildung der Adhäsion dominieren. Zudem ist die Anwendung in Serienprozessen kritisch zu sehen, da strengere Sicherheitsvorschriften für unter Strom stehende Werkzeuge zu beachten sind und das Erden Bleche zusätzlichen Aufwand in der Prozessvorbereitung generieren würde.

Die Verwendung keramischer Werkzeuge führte in einigen Studien zu einer deutlichen Reduzierung der Reibung im trockenen Kontakt [90]. Das Potential zur Reibungsminderung hängt nach [91] jedoch stark von den Materialeigenschaften der Kontaktkörper ab. So führt nicht jede Keramik in Kontakt mit jedem Blechwerkstoff zu günstigen tribologischen Bedingungen. Der industrielle Einsatz keramischer Tiefziehwerkzeuge ist mit einer Vielzahl von Herausforderungen verbunden. Keramiken besitzen ein hohes Ausfallrisiko bei der Beaufschlagung mit Zugspannungen aufgrund ihrer geringen Bruchdehnung [91]. Diese negativen Eigenschaften können durch eine keramikgerechte Auslegung der Werkzeuge wie durch die Verwendung von Armierungssystemen zur Überkompensation von Zugspannungen ausgeglichen werden [67]. Aufgrund der schlechten Bearbeitbarkeit in Verbindung mit hohen Materialkosten ist der Einsatz keramischer Werkzeuge als nachteilig für industrielle Anwendungen anzusehen.

Das größte Potential wird hingegen im Einsatz von Beschichtungen zur Reibungs- und Verschleißreduktion gesehen. Das Abscheiden einer DLC-Schicht auf ein Blechhalbzeug führte zu niedrigerer Reibung im trockenen Kontakt [92]. Im Hinblick auf die Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse für Großserien scheint dieser Ansatz jedoch wenig geeignet. Denn der Zeit- und Kostenaufwand zur Beschichtung jeder einzelnen Platine wäre sehr hoch. Außerdem ist fraglich, bis zu welchem Umformgrad ein Abplatzen der Schichten sicher ausgeschlossen werden kann. Zudem könnten durch die veränderten Oberflächeneigenschaften die nachfolgenden Prozessschritte wie Fügen oder Lackieren negativ beeinflusst werden.

Im Gegensatz dazu wird die Anwendung beschichteter Werkzeuge als vielversprechender eingestuft, da diese direkt in bestehende Werkzeugkonzepte integriert werden könnten. In Abschnitt 2.2.2 wurde das reibungs- und verschleißmindernde Potential diverser Hartstoff- und DLC-Schichten aufgezeigt. Besonders die DLC-Schichten führten oft zu signifikant verbesserten tribologischen Bedingungen im trockenen Kontakt. Meist wurden die tribologischen Bedingungen jedoch in abstrakten Laborversuchen ermittelt. Es existieren nur wenige anwendungsnahe Untersuchungen wie durch Streifenziehen mit Umlenkung [83] und Tiefziehen von Näpfen aus Aluminium [94] und Stahl [104]. Zudem wurde die Eignung diverser Schichten häufig nur beispielhaft im Kontakt zu einem bestimmten Blechmaterial untersucht, ohne die Übertragbarkeit der Ergebnisse aufzuzeigen. Ähnliches gilt für das Einsatzverhalten von Mikrostrukturen in Kombination mit Beschichtungen. Einige wenige Studien, die sich mit der Strukturierung von a-C:H [109], ta-C [110] und a-C:H:Si [111] befassten, zeigen, dass Strukturen auch im trockenen Kontakt die Tribologie beeinflussen können. In Abhängigkeit vom tribologischen System und den Struktureigenschaften konnten erhöhte und reduzierte Reibzahlen realisiert werden, weshalb diese Maßnahme auch zur Stoffflusssteuerung geeignet scheint. Zudem bieten die Strukturen das Potential Verschleißpartikel aus der Wirkfuge fernzuhalten. Jedoch fehlen auch hier ganzheitliche Untersuchungen, welche unter prozessnahen Bedingungen das tribologische Einsatzverhalten für unterschiedliche Kontaktpaarungen analysieren.

In zukünftigen Forschungsarbeiten gilt es daher, anwendungsnahe Versuche zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen im trockenen

Kontakt zu verwenden und eine Übertragbarkeit der ermittelten Ergebnisse auf Tiefziehprozesse aufzuzeigen. Zudem fehlen bislang grundlegende Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten im trockenen Kontakt in Abhängigkeit des Werkstückwerkstoffs und der Prozessparameter im Vergleich zu beöhlten Prozessen. Nur so ist ein tiefergehendes Verständnis über die tribologischen Wirkmechanismen im direkten Werkzeug-Werkstück-Kontakt zu erlangen und ableitbar, welche Maßnahmen sinnvoll zu einer Verbesserung der tribologischen Bedingungen beitragen können. Den bisherigen Studien fehlt häufig eine Analyse der Ursache-Wirkzusammenhänge als Erklärung für die resultierenden Reibungs- und Verschleißverhältnisse in Abhängigkeit der untersuchten Lösungsansätze. Nur selten wurden die ermittelten Reibzahlen oder Umformkräfte durch eine umfassende Charakterisierung der werkzeug- und werkstückseitigen Oberflächeneigenschaften vor und nach den Versuchen komplementiert. Dies ist jedoch für ein vollumfängliches Prozessverständnis notwendig, da die Ausgangstopografie einen entscheidenden tribologischen Einfluss besitzt.

3 Zielsetzung und methodisches Vorgehen

Die Automobilindustrie steht unter zunehmendem Druck, einen Beitrag zum Umweltschutz und zur Ressourcenschonung zu leisten. Der im Stand der Technik beschriebene Ansatz der Trockenumformung stellt eine Möglichkeit dar, den Anforderungen an nachhaltige Umformprozesse gerecht zu werden. Trockentiefziehen führt neben der Einsparung von häufig umweltschädlichen Schmierstoffen und Reinigungsmitteln zu einer Verkürzung der Prozesskette und bietet somit das Potential, Kosten zu senken. Bevor diese Vorteile des schmierstofffreien Tiefziehens in der industriellen Praxis genutzt werden können, gilt es zunächst, die negativen Konsequenzen des direkten Werkzeug-Werkstück-Kontakts auf ein Minimum zu reduzieren. Aufbauend auf Maßnahmen zur Erweiterung der Prozessgrenzen in konventionellen Tiefziehprozessen, welche in Abschnitt 2.1.3 beschrieben wurden, wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl an Ansätzen zur Realisierung schmierstofffreier Umformprozesse (Abschnitt 2.2.2) entwickelt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden jedoch meist in abstrakten Laborversuchen gewonnen, deren Übertragbarkeit auf reale Tiefziehprozesse nur bedingt gegeben ist. Zudem wurden die Maßnahmen häufig nur für einzelne Materialpaarungen analysiert.

Motiviert durch die Unzulänglichkeiten bisheriger Studien ist das primäre Ziel dieser Arbeit daher das Trockentiefziehen unter prozessrelevanten Bedingungen materialübergreifend zu realisieren. Dabei gilt es typische Prozessfehler wie Risse und Falten sowie Schäden an der Oberfläche umgeformter Bauteile zu verhindern. Sekundäre Ziele stellen die Bewertung des Einsatzverhaltens verschiedener werkzeugseitiger Oberflächenmodifikationen sowie die Erweiterung des Verständnisses tribologischer Wirkzusammenhänge unter trockenen Bedingungen dar. Aus dem Stand der Forschung wird als Arbeitshypothese abgeleitet, dass schmierstofffreies Tiefziehen durch eine gezielte Adaption chemischer, mechanischer und topografischer Randschichteigenschaften der Werkzeuge möglich ist. Zudem wird angenommen, dass ein anwendungsnaher Laborversuch wie der Flachbahnstreifenziehversuch eine hinreichend genaue Abbildung der tribologischen Bedingungen ermöglicht, um eine Vorauswahl an geeigneten Modifikationen zu treffen und Wechselwirkungen abzuleiten. Durch die Qualifizierung verschiedener Oberflächenmodifikationen für das Trockentiefziehen und die Untersuchung der Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Streifenziehversuchen auf Tiefziehversuche sollen die

genannten Hypothesen belegt werden. Das methodische Vorgehen, welches zur Erreichung der Ziele dieser Arbeit genutzt wird, ist in Bild 2 dargestellt. Das tribologische Prozessverständnis beim Trockentiefziehen wird durch experimentelle und numerische Untersuchungen vertieft.

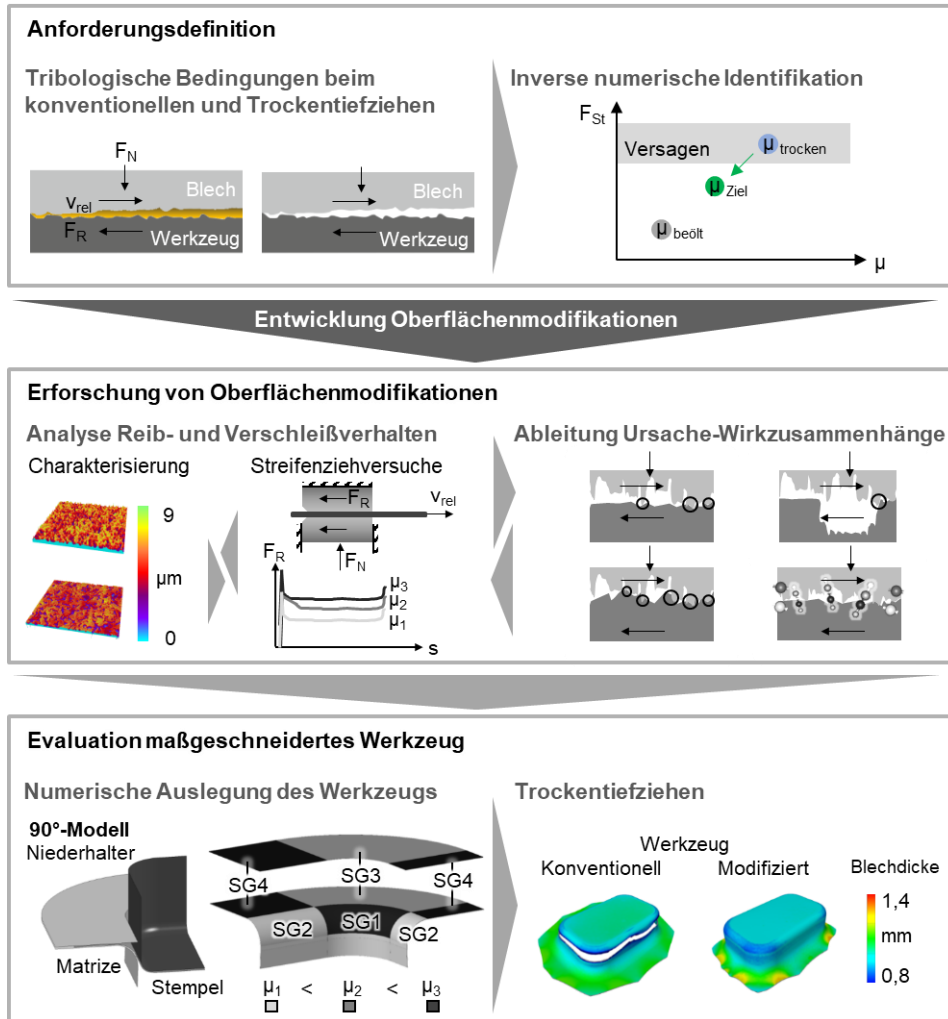


Bild 2: Methodisches Vorgehen der vorliegenden Arbeit

Zu Beginn werden die tribologischen Bedingungen beim konventionellen und schmierstofffreien Tiefziehen in Streifenziehversuchen und im Rechtecknapfzug analysiert. Der Rechtecknapf wurde als Demonstrator gewählt, um das Trockentiefziehen anhand einer anspruchsvollen Geometrie zu realisieren und somit dessen Potential auch für praxisnahe

Anwendungen zu untersuchen. Mithilfe einer Finite Elemente (FE) Simulation werden die Herausforderungen, welche aus dem Verzicht auf Schmierstoff beim Tiefziehen resultieren, näher beschrieben und die notwendige Reibzahlreduzierung invers ermittelt. Aus diesen Ergebnissen werden die Anforderungen an die zu entwickelnden Oberflächenmodifikationen abgeleitet. Basierend auf der Bewertung vorhandener Lösungsansätze zur Reibungs- und Verschleißreduktion (Abschnitt 2.3) wurden werkzeugseitige DLC-Schichten als vielversprechendste Maßnahme identifiziert. Ergänzend zu den Schichten werden lasergenerierte Mikrostrukturen untersucht. Anschließend wird das Reib- und Verschleißverhalten der modifizierten Werkzeuge in Streifenziehversuchen erforscht. Mithilfe der Oberflächencharakterisierung vor und nach den Versuchen werden Wirkzusammenhänge zwischen Oberflächeneigenschaften und tribologischem Einsatzverhalten abgeleitet. Geeignete Modifikationen werden in der Simulation eines schmierstofffreien Rechtecknapfzugs genutzt, um ein für das Trockentiefziehen maßgeschneidertes Werkzeug numerisch auszulegen. Abschließend wird die Eignung der ausgewählten Oberflächenmodifikationen durch experimentelle Trockentiefziehversuche verifiziert.

4 Werkstoffe und Versuchsmethoden

Um Oberflächenmodifikationen für das Trockentiefziehen zu entwickeln und zu qualifizieren, ist eine Auswahl an zu untersuchenden Werkzeug- und Werkstückwerkstoffen sowie Schmierstoffen für Referenzversuche zu treffen. Zusätzlich werden verschiedene Mess- und Prüfmethode zur Ermittlung der Eigenschaften der Modifikationen sowie deren tribologischen Einsatzverhalten benötigt. Im folgenden Kapitel werden diese Methoden erläutert.

4.1 Verwendete Werkstoffe und Schmierstoffe

Die tribologischen Beanspruchungen werden in großem Maße von den chemischen sowie mechanischen Eigenschaften der im Kontakt befindlichen Körper bestimmt. Im Folgenden werden daher die wesentlichen Eigenschaften der Kontaktpartner Werkzeug, Werkstück und Zwischenmedium dargestellt.

Werkstückwerkstoffe

Zur Gewährleistung einer späteren Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf praxisrelevante Umformprozesse wurden in der Industrie häufig eingesetzte Blechwerkstoffe verwendet. Um die Realisierung des Trockentiefziehens für ein möglichst breites Anwendungsfeld zu analysieren, werden sowohl Stahlwerkstoffe als auch Aluminiumlegierungen untersucht. Als Stahlgüte kommt der weiche Tiefziehstahl DCo4 mit einer verzinkten Oberfläche zum Einsatz. Dieser wird üblicherweise für nicht sicherheitsrelevante und umformtechnisch anspruchsvolle Bauteilgeometrien verwendet [114]. Ein häufiges Anwendungsgebiet ist die Herstellung von Außenhautteilen wie Seitenwandkomponenten für den Karosseriebau [8]. Die chemische Zusammensetzung des DCo4 laut Spezifikation ist in Tabelle 2 gezeigt. Ergänzend dazu sind die wesentlichen Legierungselemente der Werkstoffe DCo6 und DP600 dargestellt, welche in stichprobenartigen Versuchen hinsichtlich ihres Reibungs- und Verschleißverhaltens im trockenen Kontakt untersucht wurden. Auf den verwendeten DCo4 wurde laut Lieferantangaben durch Feuerverzinken beidseitig eine Zinkschicht mit einer Dicke von $57,83 \text{ g/m}^2$ aufgebracht. Dies entspricht nach Norm einer Z-60 Beschichtung [117]. In der Zinkschicht sind insgesamt maximal 1,5 Gew.-% Begleitelemente wie Cu, Pb, Cd und Al ausgenommen Fe und Sn enthalten, welche entsprechend

DIN EN ISO 1461 für Verzinkungen in Summe unterhalb von 2,0 Gew.-% liegen müssen [118].

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung von DCo4 und DCo6 [115] sowie DP600 [116]

Max. Gew.-%	C	P	S	Mn	Ti (+Nb)	Si	Al	Cr + Mo	V	B
DCo4	0,08	0,030	0,030	0,40	-	-	-	-	-	-
DCo6	0,02	0,020	0,020	0,25	0,30	-	-	-	-	-
DP600*	0,14	0,085	0,015	2,20	(0,15)	1,00	0,1	1,40	0,20	0,005

Da Aluminiumlegierungen je nach chemischer Zusammensetzung durch eine hohe Adhäsionsneigung geprägt sind, wurden aus dieser Werkstoffklasse zwei Legierungen analysiert. Ausgewählt wurde je ein Werkstoff aus der 5xxx-er und der 6xxx-er Serie, da diese besonders häufig in der Automobilindustrie verwendet werden. Die gewählte Legierung AA5182 wird aufgrund ihrer Neigung zu Fließfiguren primär für nicht sichtbare Karosseriebauteile genutzt [119]. Im Gegensatz dazu wird die Legierung AA6014 aufgrund ihrer guten Tief- und Streckziehbarkeit bei gleichzeitig geringer Rückfederung häufig für Anbauteile und Klappen im Automobilbau eingesetzt [114]. Die chemische Zusammensetzung der Aluminiumlegierungen ist in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Hauptlegierungselemente der aushärtbaren Legierung AA6014 sind Mg und Si, wohingegen die naturharte Legierung AA5182 ausschließlich Mg als primäres Legierungselement aufweist. Weiterhin sind die Hauptlegierungselemente des Werkstoffs AA6016 aufgeführt, welcher stichprobenartig zur Charakterisierung des Reibungs- und Verschleißverhaltens unter trockenen Bedingungen eingesetzt wurde.

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung von AA6014, AA5182 und AA6016 [120]

Gew.-%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	V
AA6014	0,3-0,6	0,35	0,25	0,05-0,2	0,4-0,8	0,2	0,10	0,10	0,05-0,2
AA5182	0,20	0,35	0,15	0,20-0,5	4,0-5,0	0,1	0,25	0,10	-
AA6016	1,0-1,5	0,70	0,20	0,2	0,25-0,6	0,1	0,20	0,15	-

Sämtliche verwendete Blechsorten besitzen eine Blechdicke von 1,0 mm und eine EDT Oberflächentextur. Diese Textur wird häufig für Tiefziehprozesse in der Automobilindustrie eingesetzt, da deren raue Struktur mit einem hohen Anteil an geschlossenem Leervolumen als Schmierstoffreservoir dient und zudem die Lackierbarkeit der umgeformten Bauteile

erhöht. Die Topografien der Bleche im Anlieferungszustand sind in Bild 3 gegenübergestellt.

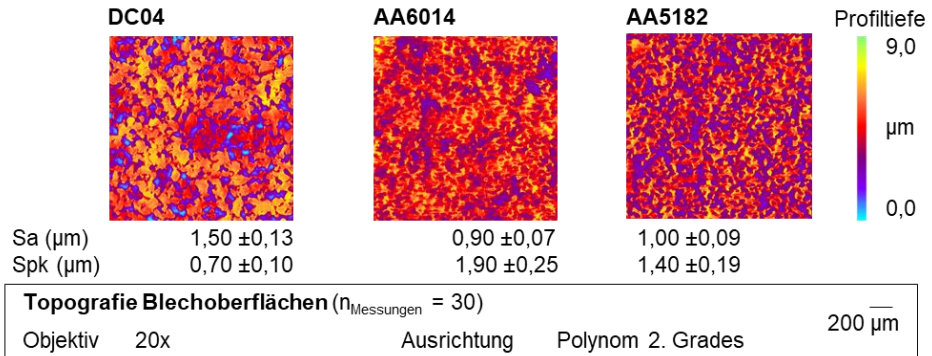


Bild 3: Topografien der Blechwerkstoffe DC04, AA6014 und AA5182 im Ausgangszustand

Die Oberflächen sind durch ein stochastisch verteiltes Muster aus Rauheitshügeln und -tälern charakterisiert. DC04 verfügt über eine im Vergleich zu den beiden Aluminiumlegierungen plateauartigere Textur mit weniger ausgeprägten einzelnen Rauheitsspitzen, was auch durch einen Vergleich der reduzierten Spitzenhöhe (Spk) deutlich wird.

Die Ergebnisse des Trockentiefziehens werden neben den chemischen und topografischen Eigenschaften auch durch die mechanischen Kenngrößen der Werkstoffe bestimmt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher eine umfassende Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften in Form von uniaxialen Zug-, Kreuzzug- und Nakajima-Versuchen durchgeführt. Die Zugversuche wurden entsprechend der Prüf- und Dokumentationsrichtlinien der Stahl-Eisen-Prüfblätter für Aluminiumwerkstoffe [121] und Stahlwerkstoffe [122] vorgenommen. Für die Zugversuche wurde die genormte Probengeometrie mit einer Prüflänge von 80 mm (A80) verwendet. Die Proben wurden mittels Laserstrahlschneiden gefertigt und anschließend auf Endmaß gefräst, um die thermisch beeinflusste Randzone zu entfernen. Die Entnahme der Proben erfolgte in 0°, 45° und 90° zur Walzrichtung (WR), da aufgrund der durch den Walzprozess eingebrachten Anisotropie ein unterschiedliches Fließverhalten zu erwarten ist. Die Versuche wurden auf der Universalprüfmaschine Z100 der Firma Zwick & Roell unter Verwendung eines taktilen Längen- und Breitenextensometers zur Bestimmung der Formänderung durchgeführt. Die aus den Zugversuchen in 0° zur WR gewonnenen Fließkurven, welche die wahre, rein plastische Dehnung darstellt, sind in Bild 4 zu sehen. Die experimentelle

Bestimmung der Fließkurven erfolgte bis zu Beginn der lokalen Einschnürung der Proben bei einem Umformgrad von etwa 0,2. Da in den Umformprozessen jedoch wesentlich größere Umformgrade auftreten, werden die Fließkurven durch den Ansatz nach Hockett-Sherby approximiert [123]. Für alle drei Werkstoffe wird eine hohe Übereinstimmung der approximierten mit den experimentell ermittelten Werten erzielt. Der Fließbeginn von DCo4 liegt mit 163 MPa etwa 8 MPa höher als jener von AA6014 und 20 MPa höher als der von AA5182.

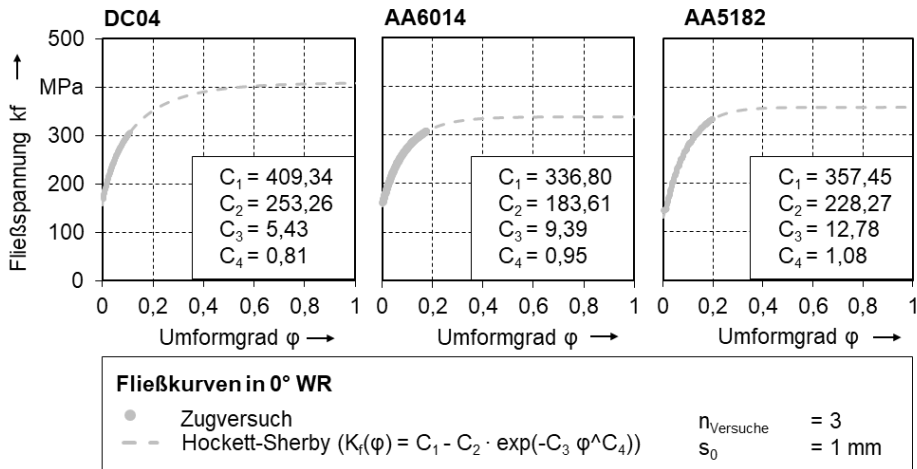


Bild 4: Fließkurven aus uniaxialen Zugversuchen in 0° zur WR

Neben den uniaxialen Zugversuchen wurde auch das plastische Verhalten unter biaxialer Zugbeanspruchung in Kreuzzugversuchen ermittelt. Die Kenntnis über das Werkstoffverhalten bei einem zweiachsigen Zugspannungszustand ist notwendig, um das Fließverhalten im Bereich der Zarge beim Tiefziehen zu analysieren. Der in [124] näher beschriebene Versuchsaufbau wurde gewählt, da er keine Reibungseinflüsse aufweist und einen rein biaxialen Spannungszustand abbildet. Die Stege der kreuzförmigen, mittels Laserstrahlschneiden und Fräsen hergestellten Proben sind in 0° und 90° zur WR orientiert. Die Proben werden an den vier Enden des Kreuzes fest eingespannt. Die beweglich gelagerten Einspannungen verfahren gleichzeitig und bringen somit einen zweiachsigen Zugspannungszustand auf. Die Probe wird solange gedehnt bis es in der Probenmitte zum Versagen kommt. Die Rissdetektion erfolgte mittels optischer Dehnungsmessung unter Verwendung eines Aramis-Systems der Firma GOM. Die in Zug- und Kreuzzugversuchen erfassten mechanischen

Kenngößen sind in Tabelle 4 für alle drei Blechwerkstoffe zusammengefasst. Die mittels Zug- und Kreuzzugversuch ermittelten Kenngößen dienen primär der Beschreibung des plastischen Verhaltens während der Umformung.

Tabelle 4: Mechanische Kenngößen aus uniaxialen und biaxialen Zugbeanspruchungen

Uniaxiale Kennwerte (n = 3)	DCo4	AA6014	AA5182
R_m in 0° zur WR in MPa	$287,6 \pm 0,4$	$256,7 \pm 0,2$	$275,0 \pm 0,4$
σ_o in MPa	$163,7 \pm 0,1$	$155,3 \pm 0,1$	$143,6 \pm 0,3$
σ_{45} in MPa	$174,5 \pm 0,2$	$150,6 \pm 0,3$	$142,3 \pm 0,5$
σ_{90} in MPa	$173,6 \pm 0,3$	$150,9 \pm 0,7$	$143,4 \pm 0,3$
r_o	$1,98 \pm 0,07$	$0,83 \pm 0,03$	$0,79 \pm 0,01$
r_{45}	$1,66 \pm 0,02$	$0,49 \pm 0,01$	$0,69 \pm 0,01$
r_{90}	$2,47 \pm 0,15$	$0,76 \pm 0,02$	$0,74 \pm 0,02$
Biaxiale Kennwerte (n = 5)			
σ_x in MPa	$217,1 \pm 13,3$	$165,2 \pm 1,3$	$149,3 \pm 0,8$
σ_y in MPa	$208,9 \pm 5,2$	$161,2 \pm 3,1$	$141,8 \pm 3,4$
σ_b in MPa	$213,0 \pm 10,9$	$163,2 \pm 3,1$	$145,6 \pm 1,6$
r_b	$0,94 \pm 0,05$	$1,01 \pm 0,02$	$0,95 \pm 0,12$

Zur Beschreibung der Prozessgrenzen ist es notwendig die Grenzformänderungskurven – auch unter dem englischsprachigen Begriff forming limit curve (FLC) bekannt – zu bestimmen. Dazu wurden im Rahmen dieser Arbeit Nakajima-Versuche mit halbkugelförmigem Stempel nach DIN EN ISO 12004 durchgeführt. Die Blechproben wurden mittels Laserstrahlschneiden hergestellt. Ein Fräsen auf Endmaß wurde nicht durchgeführt, da der prüfungsrelevante Bereich im Zentrum und nicht am Rand der Probe liegt. Die Schnittkante hat keinen Einfluss auf die Ergebnisse des Nakajima-Versuchs. Um das Versagensverhalten bei unterschiedlichen Spannungszuständen zu ermitteln, wird die Probengeometrie variiert. Mit einer kreisförmigen Vollprobe wird biaxiales Streckziehen modelliert. Durch zunehmend größer werdende Ausklinkungen werden weitere Formen des Streckziehens bis hin zum ebenen Dehnungszustand realisiert. Während des Versuchs werden die Bleche von einem Niederhalter im Flanschbereich vollständig geklemmt. Der Stempel fährt weggesteuert solange senkrecht zur Blechebene, bis es zum Versagen der Proben kommt. Die maximale Dehnung zum Zeitpunkt der Rissentstehung wird

mittels eines Aramis-Systems optisch aufgezeichnet. Zur Reduzierung von Reibungseinflüssen wird auf den Proben eine alternierende Kombination aus fettbasiertem Schmierstoff, Teflonfolien und Mipolam aufgebracht. Weitere Informationen zum Versuchsaufbau und -ablauf sind in [125] dargestellt. Die Grenzformänderungskurven sind in Bild 5 gegenübergestellt. Die Kurven beschreiben die maximale Dehnung bis zum Werkstoffversagen durch Risse. Oberhalb der Grenzformänderungskurve tritt Versagen des Werkstoffes auf, unterhalb der Kurve ist eine prozesssichere Umformung möglich. Während beide Aluminiumlegierungen ihre Versagensgrenze in einem ähnlichen Bereich aufweisen, verfügt der untersuchte DC04 über eine deutlich nach oben verschobene Grenze der Formänderung.

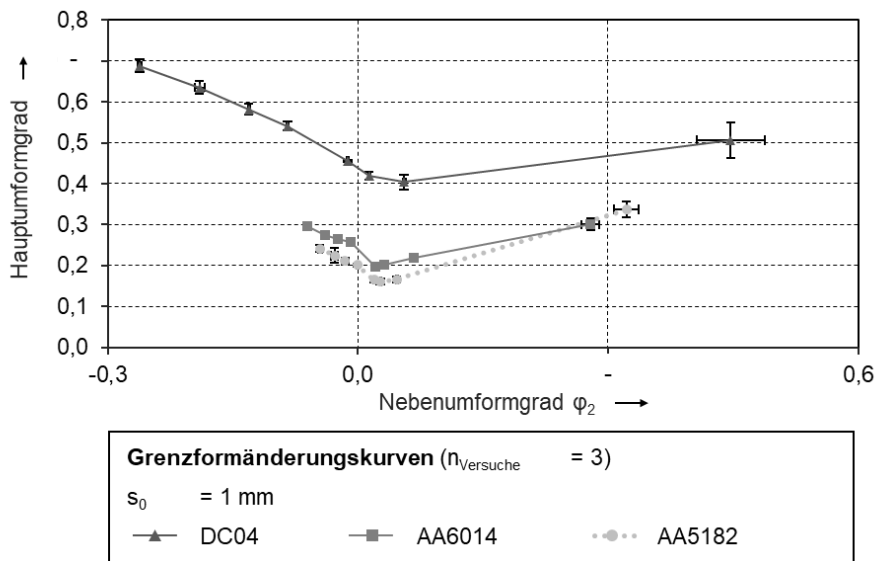


Bild 5: Grenzformänderungskurven der Blechwerkstoffe aus Nakajima-Versuchen

Werkzeugwerkstoff

Als Werkzeugwerkstoff wurde der Kaltarbeitsstahl X153CrMoV12 (1.2379) im gehärteten Zustand verwendet. Das Härten wurde durchgeführt, um auch bei beschichteten Varianten eine ausreichende Stützwirkung des Substrats zu gewährleisten. Eine Härte von $60 \text{ HRC} \pm 1$ liegt im typischen Bereich der Arbeitshärte von 1.2379. Um die gewünschte Härte auch nach dem Beschichtungsvorgang zu gewährleisten, wurde ein beschichtungsgerechtes Härteverfahren gewählt. Hierbei wird der Werkstoff mehrfach oberhalb der späteren Beschichtungstemperatur angelassen, um einen

Verlust der Härte oder Maßänderungen während des Beschichtungsprozesses zu vermeiden. Die Werkzeugoberflächen wurden durch Schleifen und ein anschließendes Läppen bearbeitet. Nach diesen Bearbeitungsschritten werden gemittelte Rautiefen (Rz-Werte) von 0,80 bis 1,00 µm und reduzierte Spitzenhöhen (Rpk-Werte) von 0,10 bis 0,14 µm erreicht. Abhängig von der nachgeschalteten Modifizierung erfolgte optional ein Polieren der Oberflächen. Die chemische Zusammensetzung ist Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung von X153CrMoV12 (1.2379) [126]

Gew.-%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
Min.	1,45	0,10	0,20	-	-	11,00	0,70	0,70
Max.	1,60	0,60	0,60	0,03	0,03	13,00	1,00	1,00

Zwischenmedium

Zur Analyse des tribologischen Verhaltens im trockenen Kontakt wurden als Referenz Versuchsreihen mit beölenen Blechen durchgeführt. Für sämtliche Versuche mit Beölung wurde der Schmierstoff KTL N 16 der Firma Zeller+Gmelin gewählt. Dieser Schmierstoff wurde speziell für die Umformung von Stahl und Aluminiumwerkstoffen entwickelt und besitzt eine Viskosität von 160 mm²/s bei 40° C. Vor dem Schmierstoffauftrag wurden die Proben in einem Acetonbad gereinigt, um die inhomogen verteilte Grundbeölung aus dem Walzwerk sowie Staub- und Schmutzpartikel zu entfernen. Die Beölung erfolgte manuell mit einer Schaumstoffwalze. Die erwünschte Schmierfilmdicke von 2,0 ± 0,1 g/m² wurde mit Hilfe eines In-frarotsensors punktuell an mindestens fünf Stellen auf Menge und homogene Verteilung überprüft.

4.2 Messmittel zur Charakterisierung von Werkzeug- und Werkstückeigenschaften

Zur Bewertung des tribologischen Einsatzverhaltens verschiedener Oberflächenmodifikationen wurden die Werkzeug- und Werkstückeigenschaften vor und nach den Laborversuchen charakterisiert. Wie in Kapitel 2 dargestellt, werden Reibung und Verschleiß entscheidend von den Oberflächeneigenschaften der Kontaktpartner beeinflusst, daher wurden Topografie und Rauheit mit taktilen und optischen Messverfahren erfasst. Um den Verschleiß zu bewerten, wurde mittels eines Rasterelektronenmikroskops (REM) die Elementverteilung durch Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) exemplarisch an Blechproben und für unter-

schiedliche Modifikationen der Werkzeugoberfläche ermittelt. Die mechanischen Eigenschaften wurden über Mikrohärtmessungen erfasst. Für umgeformte Bauteile erfolgte zur Validierung des Simulationsmodells ein dreidimensionaler Scan der Napfgeometrie. Details zur Durchführung der genannten Analysemethoden sind im folgenden Abschnitt dargestellt.

Charakterisierung der Oberflächenrauheit und Topografie

Die Modifikation der Werkzeugoberflächen führen zu Veränderungen der oberflächennahen Eigenschaften, welche mit unterschiedlichen Messmitteln erfasst werden. Zudem gibt die Analyse der Topografie von Blech- und Werkzeugoberflächen vor und nach den Experimenten Aufschluss über die vorherrschenden Verschleißmechanismen. Zur quantitativen Bestimmung von zweidimensionalen Rauheitskenngrößen wurden taktile Messungen mit einem Perthometer Mahr Surf GD 120 der Firma Mahr durchgeführt. Bei diesem Messverfahren wird ein Taster mit einer Diamantspitze mit definierter Vorschubgeschwindigkeit über die Oberfläche bewegt, wobei Rauheitsspitzen und -täler zu vertikalen Ausschlägen des Tasters führen, welche in ein elektrisches Signal umgewandelt und anschließend mithilfe einer Software ausgewertet werden. Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse werden je Messung fünf Profillinien erfasst. Das Verhältnis von Einzel- zu Gesamtmessstrecke l_r/l_n und die Grenzwellenlänge λ_c wurden für die geläppten Oberflächen normgerecht nach [127] festgelegt. Trotz der unterschiedlichen Rauheit der Werkzeugoberflächen je nach Bearbeitungsstrategie wurden sämtliche Werkzeuge mit einer Einzelmessstrecke von 0,8 mm, einer Gesamtmessstrecke von 4,0 mm und einer Grenzwellenlänge von 0,8 mm charakterisiert, um eine Vergleichbarkeit der Messungen untereinander zu gewährleisten. Zur berührungslosen und flächenhaften Ermittlung der Topografien wurde das konfokale Weißlichtmikroskop μ Surf der Firma NanoFocus genutzt. Sämtliche Messungen wurden mit 20-facher Vergrößerung und einer Messfeldgröße von 0,8 mm x 0,8 mm für Einzelaufnahmen ausgeführt. Zur Bewertung größerer Bereiche wurden bis zu drei Aufnahmen in zwei Raumrichtungen aneinandergereiht, was zu einem Messfeld von 2,2 mm x 2,2 mm führt. Die Kombination aus zwei- und dreidimensionalen Messungen erlaubt eine umfangreiche Beschreibung der Oberflächeneigenschaften und der Verschleißerscheinungen. Als Kenngrößen werden neben den Rz-Werten und dem arithmetischen Mittenrauwert R_a entsprechend DIN 4287 [128] auch die Kernrauheitsgrößen zur Beschreibung des Kern- (R_k), Riefen- (R_{vk}) und des Spitzenbereichs (R_{pk}) der Materialanteilkurve entsprechend DIN 13565-2 [129] ausgewertet. Zusätzlich

werden die dazugehörigen flächenhaften Größen (Sa, Sk, Svk und Spk) der optischen Messungen ausgewertet. Eine ausführliche Beschreibung der Kenngrößen ist in [130] zu finden. Halbzeugseitig werden ergänzend zu den oben genannten Größen Änderungen der Oberflächeneigenschaften am Blech durch Volumen Kenngrößen wie dem offenen (Vop) und geschlossenen Leervolumen (Vcl) charakterisiert, welche sich aus dem mechanisch-rheologischen Modell ableiten lassen [131].

Charakterisierung oberflächennaher Eigenschaften

Zur Beurteilung der chemischen Zusammensetzung von für das Trockenziehen modifizierten Oberflächen sowie von Verschleißerscheinungen werden exemplarisch EDX-Analysen mit dem REM Merlin der Firma Zeiss durchgeführt. Die Untersuchung der Oberflächen mittels EDX kann helfen, besonders adhäsionsanfällige Elemente zu identifizieren. Bei diesem Verfahren werden die Atome der zu untersuchenden Probenoberfläche durch einen Elektronenstrahl angeregt und emittieren dadurch ein für jedes Element charakteristisches Röntgenspektrum [132]. Die Elementverteilung wird als integraler Wert über eine bestimmte Eindringtiefe der Messung ausgegeben. Die Eindringtiefe ist wiederum von der Dichte der Elemente und der verwendeten Beschleunigungsspannung abhängig [133]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde für beschichtete Oberflächen eine Beschleunigungsspannung von $U = 8 - 10$ kV gewählt, was bei einer Dichte der amorphen Kohlenstoffschichten zwischen $1,5$ und $6,0$ g/cm³ [134] zu einer Messtiefe von $0,35$ bis $1,40$ µm führt. Für nicht beschichtete Oberflächen wurde eine höhere Beschleunigungsspannung von $U = 20$ kV genutzt, was zu einer besseren Qualität des Messsignals mit höherem Signal-Rausch-Verhältnis führt. Die EDX-Analysen wurden in dieser Arbeit als Linienscan oder flächiges Mapping durchgeführt.

Die mittels EDX charakterisierten Eigenschaften der Elementkonzentration beeinflussen wesentlich die resultierenden mechanischen Eigenschaften der Schichten. Diese können wiederum Einfluss auf das tribologische Einsatzverhalten nehmen. Daher wurden die Härte und der Eindringmodul beschichteter und unbeschichteter Werkzeuge sowie exemplarischer Blechproben mit dem Universal- und Mikrohärtprüfgerät Fischerscope HM2000 der Firma Helmut Fischer GmbH & Co. KG und der Software WIN-HCU basierend auf dem Kraft-Eindringtiefeverfahren ermittelt. Als Eindringkörper wird nach Vickers eine Diamantpyramide mit einem Flächenwinkel von 136° verwendet. Die Vickershärte HV bezieht sich nach [135] auf die rein plastische Verformung der Probe nach Rücknahme

der Prüfkraft. Die Härte der beschichteten und unbeschichteten Werkzeuge wird über sieben Messpunkte gemittelt. Durch die direkte Messung auf der Kontaktfläche ergibt sich ein Konflikt zwischen den Vorgaben der ISO 14577, welche einerseits besagt, dass die Eindringtiefe mindestens das 20-fache der arithmetischen Mittenrauheit R_a betragen sollte, und andererseits empfiehlt, dass die Schichtdicke mindestens das zehnfache der Eindringtiefe (Bückle-Regel) bemessen sollte [136]. Bei R_a -Werten zwischen $0,015$ und $0,15 \mu\text{m}$ würde dies eine Eindringtiefe von mindestens $0,3$ bis $3 \mu\text{m}$ erfordern. Da die Funktionsschichten ohne Haftvermittlungs- und Zwischenschichten je nach Schichttyp nur $0,8$ bis $2,5 \mu\text{m}$ dick sind, wäre nach der Bückle-Regel jedoch nur eine Eindringtiefe zwischen $0,08$ und $0,25 \mu\text{m}$ erlaubt. In Vorversuchsreihen mit ta-C beschichteten Proben mit einer Funktionsschichtdicke von $0,8 \mu\text{m}$ wurde die Prüfkraft zwischen 10 und 30 mN stufenweise erhöht, was zu einem Anstieg der Eindringtiefe von $0,08$ auf $0,25 \mu\text{m}$ führte. Der Verlauf der Eindringtiefe im Verhältnis zur Prüfkraft zeigt einen annähernd linearen, flachen Anstieg bis 10 mN und eine Unstetigkeit mit einem Übergang zu einem exponentiellen Anstieg im Bereich zwischen 10 und 15 mN . Es ist daher davon auszugehen, dass ab einer Prüfkraft von 15 mN die Eindringtiefe einen Grenzwert überschreitet, ab dem das weichere Substratmaterial die Messung beeinflusst und zu einer geringeren gemessenen Härte führt. Für alle weiteren Härtemessungen an Werkzeugoberflächen wurde entsprechend dieser Voruntersuchung und zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit eine Prüfkraft von 10 mN gewählt. Neben der Vickershärte wurde zusätzlich der elastische Eindringmodul E_{IT} der Werkzeugoberflächen ausgewertet, welcher vergleichbar mit dem Elastizitätsmodul ist. Die Härte der Bleche wurde an plangeschliffenen und polierten Querschnitten untersucht, um die Härte sowohl in den Randschichten, welche im direkten Kontakt mit dem Werkzeug stehen, als auch in der Blechmitte zu untersuchen. Für alle Messungen erfolgte das Be- und Entlasten innerhalb von jeweils 10 s ohne Haltezeit. Die etwa $10 \mu\text{m}$ dicken Zinkschichten wurden mit einer Prüfkraft von lediglich 10 mN gemessen, da laut Norm ein Abstand von mindestens dem Dreifachen der Eindruckdiagonalen zu freien Oberflächen einzuhalten ist. Die Härte der Blechwerkstoffe selbst wurde bei einer Prüfkraft von 50 mN gemessen. Die Messwerte wurden jeweils über zehn Messpunkte gemittelt.

Charakterisierung der Gestalteigenschaften

Zur Analyse des Stoffflusses und zur Validierung der Simulation erfolgte im Rahmen dieser Arbeit eine Erfassung der Geometrie und Blechdickenverteilung tiefgezogener Bauteile. Mit Hilfe des topometrischen 3D-Scanners ATOS Core 300 (**A**dvanced **T**opometric **S**ensor) der Firma GOM mbH wurden die umgeformten Bauteile durch das Triangulationsverfahren optisch erfasst. Zur Bauteilcharakterisierung wird ein Streifenmuster auf ein Messvolumen von 300 mm x 230 mm x 230 mm projiziert. Zwei kalibrierte Kameras mit einer Auflösung von fünf Megapixeln erfassen dieses mittels schmalbandigem Licht erzeugte Muster aus einem bekannten Winkel. Die Ober- und Unterseite der zu scannenden Bauteile sind separat zu erfassen, um die Blechdicken messen zu können. Durch das Verwenden von mindestens drei gemeinsamen Referenzpunkten in den beiden Kamerabildern wird eine ausreichende Transformationsqualität beider Netze gewährleistet. Diese Referenzpunkte wurden vor dem 3D-Scan mittels ATOS durch die optische 3D-Koordinatenmessmaschine TRITOP erfasst und im Messprojekt hinterlegt. Bei einem Messbereich von 0,1 x 0,1 m² kann eine Messgenauigkeit von etwa 2 µm realisiert werden [137]. Zur Durchführung von Form- und Blechdickenanalysen sowie zum Abgleich der experimentellen mit den numerischen Daten wurde die 3D-Inspektions- und Netzbearbeitungssoftware GOM Inspect verwendet.

4.3 Methoden zur Ermittlung des tribologischen Einsatzverhaltens

Das tribologische Einsatzverhalten verschiedener Materialpaarungen und Oberflächenmodifikationen wurde in Laborversuchen sowie in anwendungsnahen Tiefziehversuchen analysiert. Vor der Versuchsdurchführung erfolgte eine Reinigung der Blechproben mit Hilfe von Aceton zur Gewährleistung einer schmierstofffreien Oberfläche. Anschließend wurden die Reibzahlen im Flachbahnstreifenziehversuch ermittelt. Vielversprechende Modifikationen, welche durch niedrige Reibzahlen sowie geringen Verschleiß gekennzeichnet sind, wurden in Tiefziehversuchen eingesetzt, um deren Einsatzverhalten auch unter praxisrelevanten Bedingungen zu evaluieren.

4.3.1 Probenvorbereitung

Um die Probengeometrie der Blechhalbzeuge flexibel variieren zu können und die Ebenheit der Bleche nicht zu beeinträchtigen, wurde das Laserschneiden als Herstellungsverfahren für die Versuchsproben gewählt. Das Schneiden der Proben erfolgte mittels eines CO₂-Lasers mit einer Leistung von 4 kW in der TruLaser Cell 7020 der Firma Trumpf. Da die Platinen mit einer Grundbeölung von 0,5 – 1,5 g/m² mit dem Korrosionsschutzöl Anticorit RP 4107LV der Firma Fuchs Europe Schmierstoffe GmbH angeliefert wurden, ist eine Reinigung sämtlicher Proben zur Durchführung schmierstofffreier Versuche notwendig. Wie bereits in Abschnitt 4.1 erwähnt, wurden auch die Proben für beölte Referenzversuche vorab gereinigt, um vergleichbare Bedingungen zu gewährleisten. In Vorversuchen wurde die Eignung verschiedener Reinigungsverfahren getestet und mittels Feinwaage (AET500-4, Fa. Kern) sowie infrarotbasierten Ölsensor, wie im Folgenden dargestellt, bewertet. Die acetonbasierte Reinigung in einem Ultraschallbad wird im Rahmen der Voruntersuchungen als Referenz mit dem bestmöglichen Reinigungsergebnis angesehen. Die bei diesem Verfahren erzielbare Gewichtsänderung vor und nach der Reinigung entspricht der angegebenen Menge der Grundbeölung. Entsprechend werden die bei dieser Reinigungsmethode mittels Ölsensor gemessenen Werte als Sollwerte definiert. Eine ausführliche Beschreibung zur Auswahl des Reinigungsverfahrens ist [138] zu entnehmen. Als zielführender und praktikabler Ansatz hat sich die Reinigung der Blechzuschnitte in einem Acetonbad bewährt. Nach einer Einwirkdauer von wenigen Minuten werden die Proben entnommen und mit Reinigungstüchern abgewischt. Anschließend wird die Schmierstoffauflage an mindestens fünf Stellen auf jeder Probenseite mit dem Ölsensor NG der Firma Infralytic GmbH mit einer Fläche von 38,5 mm² pro Messpunkt überprüft. Erreichen die Messwerte die in den Vorversuchen gravimetrisch festgelegten Sollwerte gilt die Probe als prüfbar. Der Richtwert für DC04 liegt bei 0,040 g/m² und bei 0,014 für AA6014 sowie 0,025 g/m² für AA5182. Liegen die Messwerte darüber, wird der Reinigungsvorgang wiederholt. Für die Überprüfung der Ölaufgabe wurden die voreingestellten Messprogramme „Feuerverzinkt“ sowie „Alu-EDT“ des Ölsensors verwendet. Die Messungen erfolgten im Kalibriermodus, welcher die Messung auf bis zu vier Nachkommastellen und die Anzeige negativer Messwerte ermöglicht. Die Infrarotspektroskopie basiert auf der Abhängigkeit des Absorptionsverhaltens von der Wellenlänge des einfallenden Lichts und dem Material und ermöglicht eine kontaktlose und zerstörungsfreie Messung der Schmierstoffauflage. Die Bleche werden dabei mit einer Halogenlampe im

nahinfrarot Bereich bestrahlt [139]. Über ein optisches Gitter und Filter wird das reflektierte Licht auf einen Bildsensor gelenkt, wo orts aufgelöst die wellenlängenabhängige Reflexion gemessen wird [140]. Die Auswertung der Schichtdicke von transparenten Stoffen basiert auf dem Beer-Lambert'schen Gesetz, welches die Lichtabsorption bei der Durchdringung eines Materials beschreibt [141]. Die Eignung dieser Reinigungs- und Messmethode sowie ein Vergleich zu anderen Vorgehensweisen ist in [138] beschrieben.

In stichprobenartigen Versuchen wurde der Einfluss der Zinkschicht analysiert. Um ein Entzinken ohne Veränderung der topografischen Eigenschaften zu realisieren, wurde auf ein mechanisches Entfernen der Zinkschicht verzichtet. Stattdessen erfolgte eine chemische Entzinkung mit Hilfe von Salzsäure. Eine anschließende Charakterisierung der Oberflächen zeigte keine Auffälligkeiten verglichen mit dem verzinkten Ausgangszustand.

Die Werkzeuge wurden vor der Versuchsdurchführung sowie vor jeder Charakterisierung der Oberflächen mit in Aceton getränkten Tüchern gereinigt, um einen Einfluss von Verunreinigungen oder als Korrosionsschutz aufgetragenen Schmierfilmen auszuschließen. Werkzeuge, auf denen nach der Versuchsdurchführung in geringem Maße Zink oder Aluminium anhaftete, wurden in der lehrstuhleigenen Metallografie mit 10 %-iger Zitronensäure ($C_6H_8O_7$) respektive je nach Ausprägung der Adhäsion mit 5 bis 10 %-iger Natronlauge (NaOH) gereinigt. Wurden die adhäsiven Rückstände vollständig entfernt und keine weiteren Schäden auf der Oberfläche im Rahmen einer erneuten Charakterisierung festgestellt, so wurden diese Proben für weitere Versuchsreihen eingesetzt.

4.3.2 Streifenziehanlage

Die tribologischen Bedingungen beim Trockentiefziehen sowie das Einsatzverhalten der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Oberflächenmodifikationen wurde in Flachbahnstreifenziehversuchen analysiert. Dieser Versuchsaufbau ist eine weit verbreitete Methode zur Ermittlung von Reibzahlen für die Blechumformung. Besonders der Flanschbereich, in dem der Stofffluss durch den Reibkontakt zwischen Niederhalter und Blech sowie zwischen Blech und Matrize beeinflusst wird, wird durch diesen Laborversuch realitätsnah abgebildet [142]. Die Versuche für diese Arbeit wurden auf einer am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie konstruierten und erbauten Streifenziehanlage durchgeführt. Der Aufbau der

Anlage sowie das Grundprinzip des Versuchs sind in Bild 6 schematisch dargestellt.

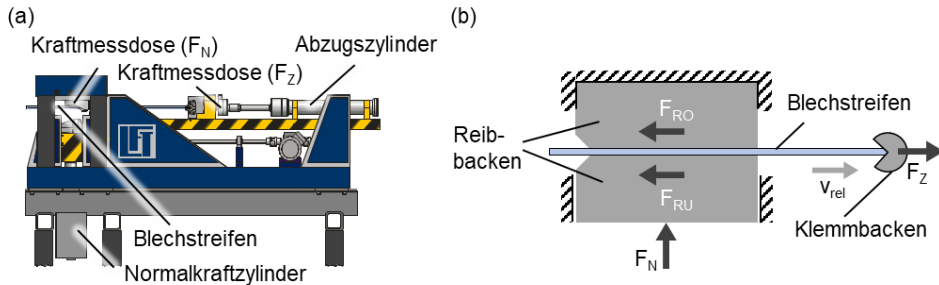


Bild 6: Schematischer Aufbau der Streifenzieh-anlage (a) und des Versuchsprinzips (b)

Ein Hydraulikzylinder ermöglicht die gesteuerte Aufbringung einer Normalkraft F_N von bis zu 240 kN, deren Wert über eine Kraftmessdose überprüft wird. Der Abzugszylinder wird über einen Glasmaßstab weg gesteuert und verfährt mit Geschwindigkeiten bis 150 mm/s und einer maximalen Ziehkraft F_Z von bis zu 20 kN. Eine weitere Kraftmessdose am Abzugszylinder dokumentiert den Verlauf der Ziehkraft. Zu Beginn des Versuchs wird ein Blechstreifen zwischen eine obere, fixierte und eine untere, bewegliche Reibbacke positioniert. Die untere Reibbacke ist zur Gewährleistung homogener Flächenpressungen auf einer Kugelkalotte gelagert. Der Blechstreifen wird einseitig über Klemmbacken fixiert. Die untere Reibbacke wird durch den Hydraulikzylinder nach oben bewegt, bis die eingestellte Normalkraft erreicht ist. Die benötigte Abzugskraft zum Hindurchziehen des Blechstreifens zwischen den Reibbacken entspricht der Summe der Reibkräfte zwischen dem Blech und der oberen (F_{RO}) sowie unteren Reibbacke (F_{RU}). Zur Berechnung der Reibzahl nach dem Coulomb'schen Reibgesetz darf daher nur die Hälfte der Ziehkraft berücksichtigt werden. Die Reibzahl μ wird direkt aus den doppelseitigen Flachbahnstreifenziehversuchen nach Gleichung (1) ermittelt.

$$\mu = \frac{F_{RO} + F_{RU}}{2 \times F_N} = \frac{F_Z}{2 \times F_N} \quad (1)$$

Im Rahmen dieser Arbeit wurden alle Versuche mit einem Ziehweg von 190 mm durchgeführt, wobei die Reibzahlen in einem Auswertebereich von 100 bis 170 mm gemittelt wurden. Dieser Bereich wurde entsprechend der Probengeometrie sowie Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge an der Anlage gewählt. Die Reibbacken verfügen über eine Kontaktfläche

von 55 mm x 100 mm sowie eine 45° Fase an der Einlaufkante des Blechstreifens. Da vor Versuchsbeginn die Normalkraft aufgebracht wird und erst danach die Relativbewegung einsetzt, werden die ersten 100 mm Ziehweg, in welchen auch die Überwindung der Haftreibung stattfindet, nicht zur Bestimmung der Reibzahl herangezogen. Gegen Ende des eingestellten Ziehweges beginnt der Abbremsvorgang des Abzugszylinders, weshalb hier die definierte Geschwindigkeit unterschritten wird und somit Einfluss auf die tribologischen Bedingungen nimmt. In konventionellen Versuchen mit Beölung wurden die Streifen bislang stets schmaler gewählt als die Reibbacken. In Vorversuchsreihen unter schmierstofffreien Bedingungen ergab sich jedoch ein signifikanter Einfluss der Schnittkanten des Blechs im direkten Kontakt zu den Reibbacken. Verschleiß in Form von Adhäsion und Abrasion konzentrierte sich stets auf diese Kantenbereiche. Da im Tiefziehversuch die Schnittkanten des Blechs nicht in Ziehrichtung, sondern nur senkrecht dazu laufen, wurde die Blechgeometrie für sämtliche Versuche dieser Arbeit mit den Abmessungen von 500 mm x 65 mm breiter als die Kontaktflächen der Reibbacken gewählt. Sofern kein Verschleiß vorlag, welcher zur plastischen Deformation der Streifen führte, wurden je Versuchsreihe mindestens drei Wiederholversuche durchgeführt. Bei Versuchen mit plastischer Deformation der Streifen wird durch die gemessene Abzugskraft nicht mehr ausschließlich eine Reibkraft, sondern auch eine Umformkraft gemessen. Dies verhindert eine zuverlässige Reibzahlermittlung. Sämtliche Versuche fanden bei Raumtemperatur und Umgebungsluft statt. Nach jedem Wechsel der Reibbacken wurde die Homogenität der Flächenpressung mittels Druckmessfolie in einer Leerfahrt ohne Blechstreifen überprüft. Die im Streifenziehversuch ermittelten Reibzahlen dienen neben der Beurteilung des tribologischen Einsatzverhaltens verschiedener Oberflächenmodifikationen zudem als wichtiger Eingabeparameter für die numerische Simulation des Tiefziehprozesses.

4.3.3 Tiefziehpresse und Versuchswerkzeug

Die Übertragbarkeit der Laborversuche auf einen Umformprozess wurde durch das Tiefziehen von Rechteckknäpfen untersucht. Die Tiefziehversuche wurden auf der hydraulischen Tiefziehpresse TSP100So der Firma Lasco durchgeführt, welche über eine maximale Pressenkraft von 1000 kN und eine maximale Ziehkissenkraft von 250 kN verfügt. Auf der Presse kann ein Stößelhub von 600 mm sowie ein Ziehkissenhub von 250 mm realisiert werden. Die Kraftereinleitung am Niederhalter erfolgt über ein

hydraulisches Vierpunktkissen, dessen rechteckig angeordnete Druckbolzen die Kraft im Eckbereich des Tiefziehwerkzeugs übertragen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Matrize stößelseitig montiert, wohingegen Führungsgestell, Niederhalter und Ziehstempel auf der Tischschonplatte befestigt wurden. Die Tiefziehversuche wurden weggeregelt durch das Festlegen des oberen und unteren Totpunkts des Stößels durchgeführt. Das für die Trockentiefziehversuche ausgelegte Werkzeug sowie der Aufbau der beiden Werkzeugaktivteile Niederhalter und Matrize sind in Bild 7 dargestellt.

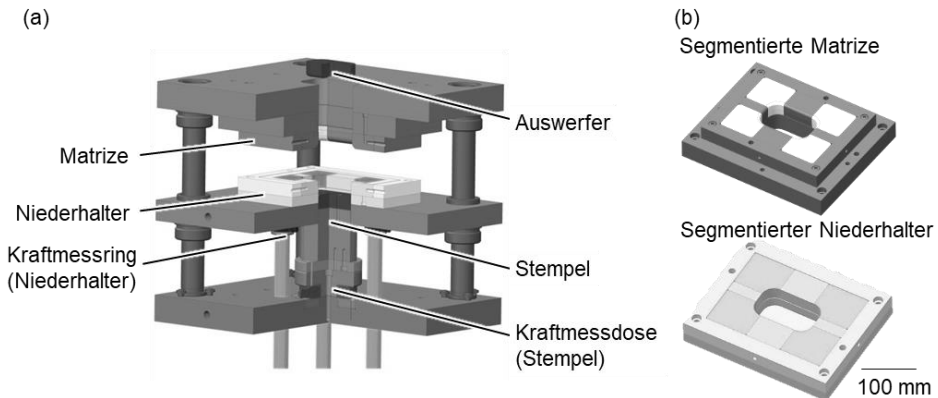


Bild 7: CAD-Modell des Gesamtwerkzeugs (a) und der Segmentierung (b)

Die Führung des Ober- und Unterwerkzeugs erfolgt über ein Viersäulenführungsgestell. Matrize und Niederhalter sind jeweils über einen Rahmen an einer oberen und unteren Grundplatte befestigt. Der Stempel verfügt über einen modularen Aufbau, sodass im Falle von Verschleiß lediglich der obere Aufsatz auszutauschen ist. Um den Verschleiß auch bei konventionellen Werkzeugoberflächen gering zu halten, wurden die Kontaktflächen von Niederhalter und Matrize manuell poliert. Aufgrund der geringen Relativbewegung zwischen Blech und Stempel wurde dieser in allen Versuchen unabhängig von der Modifikation von Matrize und Niederhalter im geschliffenen Zustand verwendet. Zur Versuchsdurchführung wird die lasergeschnittene Platine mit Hilfe eines Zentrierbleches auf dem Niederhalter positioniert. Anschließend fährt die Matrize nach unten, um die eingestellte Niederhalterkraft aufzubringen, welche über vier Kraftmessringe des Typs 1-KMR/100KN der Firma Kistler gemessen wird. Nach jedem Werkzeugwechsel wird eine homogene Verteilung der Flächenpressung im Flanshbereich mit Hilfe von Druckmessfolie überprüft.

Bei ungleichmäßiger Verteilung wird zum Ausgleich lokal unterschiedlicher Pressung Fühlerlehrenband zwischen Druckbolzen und Niederhaltergrundplatte gelegt. Nach Sicherstellung einer homogenen Flächenpressung bewegen sich Ziehkissen und Matrize im Verdrängerprinzip nach unten und ziehen die eingelegte Platine über den fixierten Stempel. Die zur Umformung benötigte Kraft wird über einen piezoelektrischen Kraftsensor des Typs 9081B der Firma Kistler aufgezeichnet.

4.4 Finite-Element Modellierung

Zur Auslegung und numerischen Analyse von Umformprozessen hat sich die Finite-Element-Methode (FEM) in der Fertigungstechnik etabliert. In dieser Arbeit wurde die kommerziell erhältliche FE-Software LS Dyna R7.1.2 der Firma Livermore Software Technology Corporation (LSTC) verwendet. Das Berechnungsprogramm, welches sowohl im industriellen als auch im akademischen Umfeld Anwendung findet [143], wird neben Crash- und Materialtests häufig für die Modellierung von Fertigungsprozessen genutzt [144]. Zur Modellerstellung und Auswertung der Simulationen wurde der Pre- und Postprozessor LS-PrePost 4.3 verwendet. Der Modellaufbau wird in LS Dyna über sogenannte Keywords (*KEYWORD) realisiert. Eine genaue Definition sämtlicher Keywords ist in [145] dokumentiert. Zur Validierung des numerischen Modells wird das Tiefziehen in einem 360° Modell abgebildet. Dies ist notwendig, um einen fehlerstellenfreien Abgleich der Blechdicken zwischen Modell und Experiment auch an den Symmetrielinien zu realisieren. Für die anschließende Variantensimulation werden unter Ausnutzung der Achsensymmetrie lediglich 90°-Ausschnitte der CAD-Daten als IGES-Datei in den Preprozessor importiert. Dies verringert die notwendige Rechenzeit, ohne die Vorhersagegenauigkeit einzuschränken, was durch den Abgleich der Kraft-Weg-Verläufe von Viertel- und Vollmodell in Abschnitt 5.2.1 überprüft wird. Die Verwendung der idealisierten CAD-Daten geht mit der Vereinfachung einher, dass Fertigungstoleranzen der Werkzeuge und Blechdickenschwankungen unberücksichtigt bleiben. Die Schwankungen der Ausgangsblechdicken, welche an je 40 Messstellen pro Charge an unterschiedlichen Blechproben ermittelt wurden, haben sich jedoch mit Werten von $s_{0-DC04} = 1,012 \pm 0,004$ mm, $s_{0-AA6014} = 1,005 \pm 0,010$ mm und $s_{0-AA5182} = 0,996 \pm 0,005$ mm als vernachlässigbar erwiesen. Die Integration der Zeitschritte wurde explizit durchgeführt, da dies im Vergleich zur impliziten Berechnung für Tiefziehprozesse zur stabileren und schnelleren Lösung des Gleichungssystems führt. Die Werkzeugkomponenten wurden als Starrkörper simuliert. Diese Vereinfachung ist anders als in

der Massivumformung für Blechumformprozesse zulässig, da die Werkzeuge verhältnismäßig geringen Beanspruchungen ausgesetzt sind. Die Vernetzung wurde an den Werkzeugradien so gewählt, dass der Radius durch mindestens acht Elemente modelliert wird. Die Vorhersagegenauigkeit des Modells hängt von der Elementgröße ab. Da eine zu feine Vernetzung mit einer deutlichen Erhöhung der Berechnungszeit einhergeht, wird nach der grundlegenden Validierung mit einem feiner vernetzten 360° -Modell auf eine gröbere Vernetzung gewählt und bei der Auswertung element- oder knotenbezogener Größen auf eine Mittelung statt Verwendung von Maximalwerten zurückgegriffen. Die Diskretisierung der Platine erfolgte durch quadratische Schalenelemente (*ELEMENT_SHELL) mit einer Kantenlänge von 1,14 mm bei den 90° -Modell und 0,5 mm bei den 360° -Modellen. An den Rändern der Platine wurde auf Dreieckselemente zurückgegriffen. Die Verwendung von Schalen- statt Volumenelemente, wie sie typischerweise in der Massivumformung eingesetzt werden, setzt voraus, dass die Dicke des zu vernetzenden Bauteils wesentlich geringer ist als dessen Länge und Breite, was bei Tiefziehprozessen der Fall ist. Schalenelemente berücksichtigen lediglich einen linearen Spannungsverlauf von Ober- zu Unterseite der Schale, was jedoch wegen der geringen Blechdicken hinreichend genaue Ergebnisse liefert. Zudem ermöglichen die Schalenelemente eine Berücksichtigung von Blechdickenänderungen, was aufgrund von lokaler Aufdickung und Ausdünnung zwingend zu berücksichtigen ist. Der Kontakt zwischen Blech und Werkzeugaktivteilen wurde durch die Kontaktbedingung *CONTACT_FOMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE definiert. Bei einseitigen Kontaktbedingungen (ONE_WAY) wird in der Regel der Starrkörper als Master und der deformierbare Körper, in diesem Fall das Werkstück, als Slave definiert. Dies führt dazu, dass lediglich die Knoten des Blechs auf eine Durchdringung durch das Werkzeug überprüft werden. Für Blechumformprozesse ist diese Kontaktdefinition üblich, da dadurch die Rechenzeit halbiert werden kann [146]. Die Reibung wird in jedem Kontakt-Keyword durch eine konstante Reibzahl μ vorgegeben, deren Wert im Rahmen dieser Arbeit in Flachbahnstreifenziehversuchen ermittelt wurde. Die Oberflächen von Werkzeugen und Werkstücken werden als ideal glatt abgebildet. Der Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf die Reibung wird indirekt über die Reibzahl berücksichtigt. Um die Segmentierung des realen Werkzeugs nach zuempfinden, werden im numerischen Modell unter dem Befehl *SET_SEGMENT die Knoten der einzelnen Werkzeugbereiche zu Segmenten zusammengefasst. Die Kontaktbedingungen zwischen Werkzeug und

Werkstück können anschließend für jedes Segment differenziert angegeben werden. Dies ermöglicht die Definition variierender Reibzahlen für unterschiedliche Werkzeugsegmente. Eine weitere Vereinfachung stellt die Annahme einer gleichbleibenden Temperatur an Werkzeug und Werkstück dar, was jedoch für die Umformung bei Raumtemperatur lediglich zu geringen Abweichungen zwischen Modell und Realität führt. Die elastischen und plastischen Materialeigenschaften des Blechs wurden mit Hilfe des Materialmodells *MAT_BARLAT_YLD2000 beschrieben. Die dafür notwendigen Kenngrößen wurden in Zug- und Kreuzzugversuchen ermittelt und sind Tabelle 4 zu entnehmen. Die daraus ermittelte Fließortkurve beschreibt den geometrischen Ort des Fließbeginns für mehrachsige Spannungszustände, welche für die Blechumformung als näherungsweise eben angesehen werden [14]. Aufgrund der durch den Walzprozess eingebrachten richtungsabhängigen Eigenschaften der Blechwerkstoffe ist die Modellierung der Fließortkurve unter Berücksichtigung der Anisotropie für die numerische Berechnung obligatorisch. Das Fließkriterium wird entsprechend der mathematischen Beschreibung von Barlat berechnet [147]. Neben den experimentellen Werkstoffkenngrößen aus Abschnitt 4.1 wird der Fließortexponent M benötigt. Dieser ermöglicht eine Anpassung der Fließortkurve im Plane-Strain- und Tiefziehbereich an das tatsächliche Materialverhalten, ohne die experimentell ermittelten Werte in der Fließortkurve zu verfälschen. Laut Literaturangaben liegt der Fließortexponent für Stahl aufgrund der unterschiedlichen Kristallstruktur bei bis zu $M = 6$ und für Aluminium bei bis zu $M = 8$ [8]. Die Fließortkurvenmodellierung ist für DCo4, AA6014 und AA5182 in Bild 8 dargestellt. Die Kurven für die beiden Aluminiumlegierungen besitzen eine charakteristische zitronenförmige Gestalt, wohingegen für DCo4 eine stark elliptische Form vorliegt. Die Streckung entlang der Winkelhalbierenden bei DCo4 ist durch den deutlich höheren Biaxpunkt von 213 MPa begründet. Durch die wesentlich niedrigeren Biaxpunkte von 163 MPa für AA6014 und 146 MPa für AA5182 verfügen beide über eine gedrungene Form. Der Übergang vom elastischen zum plastischen Verformungsbereich tritt für AA6014 und AA5182 bei geringeren Spannungen ein als bei DCo4, was an der niedrigeren Festigkeit des Aluminiumwerkstoffes liegt.

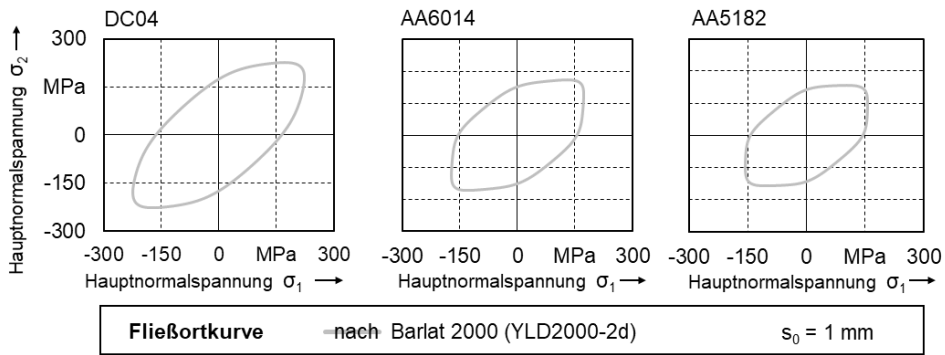


Bild 8: Fließortkurven nach Baralt (YLD_{2000-2d})

Nach der Definition der Keywords in LS-PrePost wird der Solver mit dem Startbefehl: „ls-dyna_mpp_s_7_1_2_95028_x64_suse102_pgi105_sse2-_plattformpi i=Dateiname.k s=intfor“ in der Shell gestartet. Es wird „Single-Precision“ als Präzisionsmodus gewählt, welcher für explizite Berechnung der hier vorliegenden Größenordnung ausreichend ist. Durch die Verwendung des Massivly Parallel Processing (MPP) Solvers wird eine gleichmäßige Auslastung der Hardwareressourcen gewährleistet. Neben dem D₃PLOT wird durch den Befehl „s=intfor“ eine weitere Ergebnisdatei generiert, welche die zwischen Werkzeug und Werkstück vorherrschenden Kontaktkräfte und -spannungen darstellt. Da das Modell wie oben aufgeführt diversen Vereinfachungen und Annahmen unterliegt, wird die Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse im späteren Verlauf der Arbeit mit den experimentellen Daten abgeglichen.

5 Definition von Anforderungen an Oberflächenmodifikationen für das Trockentiefziehen

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen des direkten Werkzeug-Werkstück-Kontakts auf Reibung und Verschleiß beim Verzicht auf Schmierstoff für verschiedene Blechwerkstoffe und Prozessparameter untersucht. Ein Vergleich zu Versuchsreihen mit beölten Proben ermöglicht eine Einordnung der tribologischen Bedingungen beim schmierstofffreien Kontakt des Kaltarbeitsstahls 1.2379 mit DCo4, AA6014 und AA5182. Die im schmierstofffreien Streifenziehversuch ermittelten Reibzahlen werden zur Beschreibung des tribologischen Verhaltens in einer Simulation des Rechtecknapfzugs eingesetzt. Das numerische Modell wird mit Hilfe von Kraft-Weg-Verläufen und Blechdickenvergleichen validiert. Anschließend werden die Reibzahlen in der Simulation in den Kontaktzonen Blech-Matrize und Blech-Niederhalter einheitlich stufenweise variiert, um daraus die notwendige Reibzahlreduktion abzuleiten, welche durch die zu entwickelnden Oberflächenmodifikationen zu erreichen ist. Dies erfolgt anhand der Analyse der rissfrei erreichbaren Ziehtiefe in Abhängigkeit der Reibzahlen und dient der späteren Bewertung der in Abschnitt 6 erforschten Modifikationen. Als untere Grenze wird die experimentell ermittelte Reibzahl aus den beölten Versuchsreihen und als obere Grenze die aus den trockenen Versuchsreihen verwendet.

5.1 Vergleichende Analyse der tribologischen Bedingungen im beölten und trockenen Kontakt

Die beölte und schmierstofffreie Kontaktsituation wird zunächst in Laborversuchen mithilfe von Streifenziehversuchen analysiert. Die Übertragbarkeit des tribologischen Verhaltens in den Laborversuchen auf das Verhalten in realen Umformprozessen wird durch das Tiefziehen von Rechtecknapfen mit trockenen und beölten Platinen aufgezeigt.

5.1.1 Analyse in Laborversuchen

Für die Laborversuche wurden mit Flächenpressungen p_N von 1 bis 4,5 MPa und Relativgeschwindigkeiten v_{rel} von 50 bis 150 mm/s für das Tiefziehen charakteristische Parameter festgelegt [8], um die tribologischen Bedingungen im Flanschbereich des Tiefziehens mit Hilfe des

Streifenziehversuchs realitätsnah abzubilden. Der Einfluss von Relativgeschwindigkeit und Flächenpressung wurde für die beiden Werkstoffe DC04 und AA6014 vollfaktoriell in drei Stufen analysiert, wohingegen für die andere Aluminiumlegierung AA5182 lediglich stichprobenartig das Reibverhalten untersucht wurde. Die Reibbacken wurden nicht modifiziert und verfügen über eine geläppte Oberfläche. Um die Bedingungen beim konventionellen Tiefziehen abzubilden und die Ergebnisse mit trockenen Streifen besser einordnen zu können, wurden als Referenz zu diesen Testreihen Versuche mit beölten Proben durchgeführt. Die Beölung mit KTL N16 erfolgte entsprechend der Angaben in Abschnitt 4.1. Die Reibzahlen, die für den geschmierten Kontakt ermittelt wurden, sind in Bild 9 dargestellt.

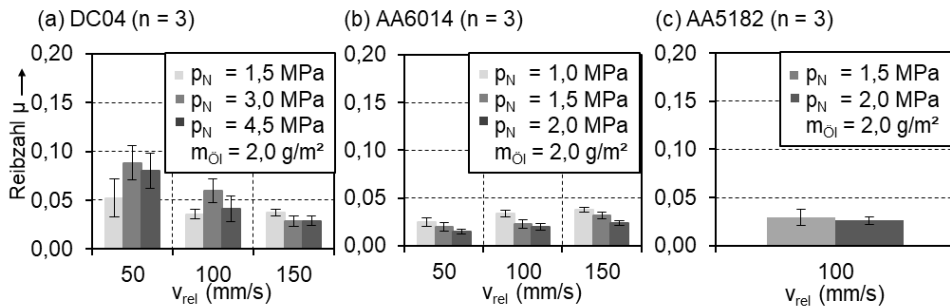


Bild 9: Reibzahlen der beölten Versuche für (a) DC04, (b) AA6014 und (c) AA5182

Für DC04 liegen die Reibzahlen in einem Bereich von 0,03 bis 0,09. Wie aus der Literatur bekannt ist, liegen für höhere Ziehgeschwindigkeiten niedrigere Reibzahlen vor [148]. Grund dafür ist, dass durch eine höhere Ziehgeschwindigkeit die Kontaktzeit und somit auch die Zeit, die dem Schmierstoff für ein Abfließen aus der Wirkfuge zur Verfügung steht, reduziert wird. Der Einfluss der Geschwindigkeit ist zudem von der Flächenpressung abhängig [148]. Bei 1,5 MPa ist der Anteil des aus der Wirkfuge gedrückten Schmierstoffs insgesamt geringer, sodass der Einfluss der Geschwindigkeit weniger ausschlaggebend ist als bei höheren Drücken. Deshalb unterscheiden sich bei einem niedrigen Druck von 1,5 MPa die Reibzahlen für 50 mm/s und 150 mm/s lediglich um 0,015, wohingegen bei einem höheren Druck von 4,5 MPa ein Unterschied von 0,051 vorliegt. Ein deutlicher Einfluss der Flächenpressung wurde nicht festgestellt, obwohl aus der Literatur bekannt ist, dass die Reibzahl im geschmierten Kontakt mit zunehmendem Druck sinkt. Eine Begründung dafür liegt in den von Beginn an plateauförmig ausgeprägten Rauheitsspitzen des DC04, bei

dem die Oberfläche zwischen 1,5 und 4,5 MPa ähnlich stark eingeglättet wird, wie in Bild 10 zu sehen. Das geschlossene Leervolumen V_{cl} für Streifen nach Versuchen mit 1,5 MPa liegt mit $654,7 \text{ mm}^3/\text{m}^2$ nur geringfügig über den Werten von $648,1 \text{ mm}^3/\text{m}^2$ bei 3,0 MPa und $623,1 \text{ mm}^3/\text{m}^2$ bei 4,5 MPa. Bestätigt wird die annähernd gleiche Einglättung auch durch den geringen Unterschied von $0,02 \text{ }\mu\text{m}$ für die Spk-Werte, welche bei 3 MPa einen Wert von $0,62 \text{ }\mu\text{m}$ und bei 4,5 MPa einen Wert von $0,64 \text{ }\mu\text{m}$ annehmen.

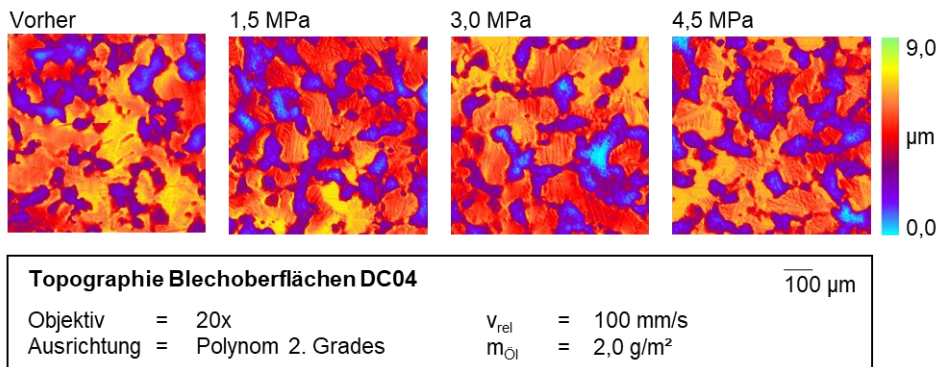


Bild 10: Topografie der DCo4 Oberfläche nach Streifenziehversuchen bei 100 mm/s

Eine weitere Ursache ist in den relativ geringen Druckunterschieden im Bereich weniger MPa zu sehen. Die Versuche wurden jedoch bewusst bei niedrigen Drücken durchgeführt, um im nachfolgend untersuchten trockenen Kontaktzustand zu hohe tribologischen Beanspruchungen, welche zum Versagen der Streifen führen, zu verhindern. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den beölten und schmierstofffreien Versuchsreihen zu gewährleisten, wurden die Streifenziehversuche je Werkstoff bei identischen Flächenpressungen durchgeführt. Die Wahl von 1,5 MPa als niedrigstes Lastniveau für DCo4 ermöglicht zusätzlich einen direkten Vergleich zu den Versuchen mit den Aluminiumlegierungen.

Im Vergleich zu DCo4 verfügen beide Aluminiumwerkstoffe, wie in Bild 9 (b) und (c) zu sehen, über deutlich niedrigere Reibzahlen von 0,015 bis 0,038. Das unterschiedliche Reibverhalten im geschmierten Kontaktzustand liegt in den unterschiedlichen topografischen Eigenschaften begründet. DCo4 verfügt im Ausgangszustand mit V_{cl} -Werten von $552 \text{ mm}^3/\text{m}^2$ über ein deutlich größeres geschlossenes Leervolumen als die beiden Aluminiumlegierungen mit $305 \text{ mm}^3/\text{m}^2$ und $456 \text{ mm}^3/\text{m}^2$ für AA6014 respektive AA5182. In den größeren Rauheitstälern wird daher bei

DCo₄ mehr Schmierstoff eingelagert. Je mehr Schmierstoff jedoch in den Schmierstofftaschen gesammelt wird, desto weniger Schmierstoff steht direkt an den sich berührenden Rauheitsspitzen zur Verfügung. Bei tribologischen Systemen mit ausgeprägter Einglättung der Werkstückoberflächen führt ein hoher Anteil des geschlossenen Leervolumens, welches als Schmierstoffreservoir fungiert, in der Regel zu niedrigeren Reibzahlen. Der Grund dafür ist, dass der Schmierstoff im Laufe des Umformprozesses in die Wirkfuge gedrückt wird. Ist die Einglättung aufgrund geringer Kontaktdrücke jedoch zu gering, wird der im geschlossenen Leervolumen angesammelte Schmierstoff nicht in ausreichender Menge in die Wirkfuge transportiert. In diesem Fall liegen weniger hydrostatische und hydrodynamische Traganteile vor, was zu größeren Reibzahlen als in tribologischen Systemen mit überwiegend hydrostatischen und hydrodynamischen Traganteilen führt [149]. Für die beiden Aluminiumlegierungen werden aufgrund der im Ausgangszustand geringeren Vcl-Werte im Reibkontakt demnach mehr hydrodynamische Druckanteile ausgebildet, was die deutlich niedrigeren Reibzahlen im Vergleich zu DCo₄ begründet. Das um etwa 33 % kleinere geschlossene Leervolumen von AA6014 führt zu einer um 21 % niedrigeren Reibzahl für 1,5 MPa und zu einer um 27 % niedrigeren Reibzahl für 2 MPa im Vergleich zu AA5182. In Übereinstimmung mit Untersuchungen von Stribeck [150] zur Abhängigkeit der Reibung von Prozessparametern in Lagerkontakten sinkt die Reibung für Systeme mit hydrodynamischen Anteilen bei Zunahme des Kontaktdrucks. Diese Tendenz ist für AA6014 in Bild 9 (b) zu erkennen. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung ist diese jedoch nicht als signifikant zu bewerten.

Die Auswirkungen des Verzichts auf Schmierstoffe wurden in weiteren Versuchsreihen bei identischen Prozessparametern wie für die geschmierten Versuche in Bild 9 analysiert. Wie in Bild 11 zu sehen, resultieren für alle drei Blechwerkstoffe im schmierstofffreien Kontakt bei sonst unveränderten Prozessbedingungen deutlich höhere Reibzahlen von etwa 0,15 bis 0,60. Bei Versuchen mit DCo₄ liegen die Reibzahlen in einem Bereich von 0,14 bis 0,18 und somit im Mittel um den Faktor 3,2 über den Reibzahlen aus den beölte Versuchsreihen. Für beide Aluminiumlegierungen liegt, wie in Bild 11 (b) und (c) dargestellt, ein noch deutlicherer Anstieg der Reibzahl um den Faktor 23 für AA6014 und den Faktor 10 für AA5182 vor. Eindeutige Zusammenhänge zwischen den ermittelten Reibzahlen und den variierten Prozessparametern Flächenpressung und Geschwindigkeit konnten nicht festgestellt werden.

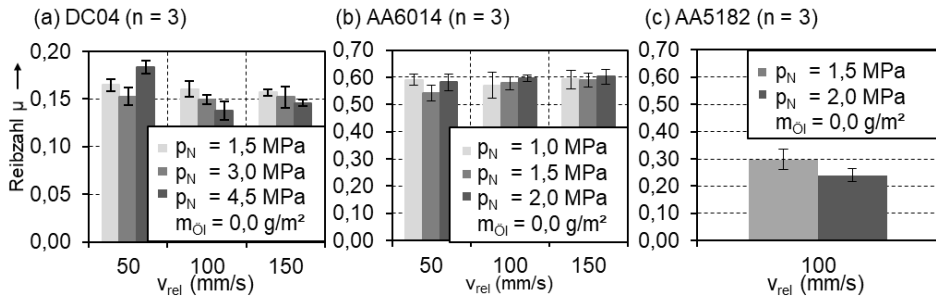


Bild 11: Reibzahlen der trockenen Versuche für (a) DC04, (b) AA6014 und (c) AA5182

Für DC04 führt eine Zunahme der Flächenpressung tendenziell zu einer Reduzierung der Reibzahl, wohingegen für AA6014 und AA5182 kein eindeutiger Einfluss der Flächenpressung zu erkennen ist. Ebenso ist - im Gegensatz zu Versuchsreihen mit Beölung - kein Einfluss der Relativgeschwindigkeit auf die ermittelten Reibzahlen zu erkennen. Auffällig sind die großen Unterschiede der Reibzahlen im trockenen Kontakt für die unterschiedlichen Blechwerkstoffe. Im direkten Kontakt von verzinktem DC04 mit den Werkzeugoberflächen wurde mit einer mittleren Reibzahl von 0,16 die geringste Reibkraft im Vergleich zu einer mittleren Reibzahl von 0,57 für AA6014 und 0,27 für AA5182 gemessen. Laut dem Fließkriterium nach von Mises verliert das Coulomb'sche Reibgesetz für $\mu > 1/\sqrt{3}$ seine Gültigkeit. Für die bei AA6014 ermittelten Reibzahlen oberhalb von 0,577 sei daher an dieser Stelle der Hinweis gegeben, dass bei diesen Werten nach von Mises nicht mehr von einer reinen Reibzahl gesprochen werden darf. Oberhalb dieser Grenze kann es zum lokalen Fließen und somit zu einer plastischen Deformation des Blechstreifens kommen, was dazu führt, dass die ermittelte Abzugskraft neben den Reibkräften auch Umformkräfte beinhaltet.

Hohe Reibzahlen deuten auf intensive Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und Werkstück hin, welche meist mit Verschleiß und einer Beschädigung der Blechoberfläche einhergehen. Um die Veränderungen an den Kontaktflächen und die vorherrschenden Verschleißmechanismen zu analysieren, wurden die Werkzeug- und Werkstückoberflächen nach beöhlten und trockenen Streifenziehversuchen vergleichend gegenübergestellt. Die Oberflächeneigenschaften der Reibbacken nach den Versuchen sind in Bild 12 zu sehen.

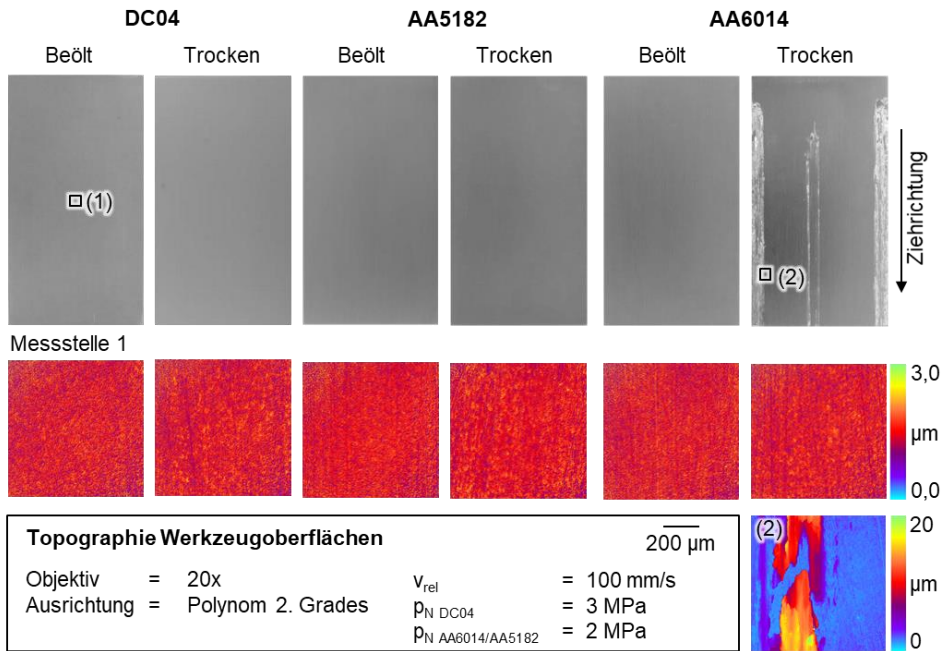


Bild 12: Fotografien der Reibbacken nach den Streifenziehversuchen und dazugehörige Topografien an ausgewählten Messstellen (1) und (2)

Für die Reibbacken im schmierstofffreien Test gegen AA5182 liegen mit $0,47 \pm 0,02 \mu\text{m}$ die niedrigsten Spk-Werte vor. Die höchsten Werte liegen bei den Reibbacken der beöhlten Versuchsreihen mit DC04 mit $0,54 \pm 0,01 \mu\text{m}$ vor. Die reduzierten Spitzenhöhen unterliegen an der Messstelle (1) nur geringen Schwankungen. Die Werkzeugrauheit stellt somit keinen Erklärungsansatz für die hohe Variation der Reibzahl in Abhängigkeit von Blechwerkstoff und Beölungszustand dar. In den Versuchsreihen mit DC04 wurden auf keiner Reibbacke Verschleißspuren detektiert. Bei Versuchen mit AA5182 wurde in manchen Testreihen geringer adhäsiver Verschleiß nachgewiesen, was in [151] ausführlicher dargestellt ist. Für AA6014 sind im trockenen Fall bei allen Versuchsreihen deutliche Veränderungen der Reibbackenoberflächen festzustellen. Die Reibbacken verfügen nach den Versuchen über deutliche Verschleißspuren in der Mitte und an den Rändern. Eine mikroskopische Analyse zeigt in Bild 12 an Messstelle (2), dass es sich dabei um Anhaftungen mit einer Höhe von bis zu $20 \mu\text{m}$ handelt, wodurch die sehr hohen Reibzahlen erklärbar sind. In den Bereichen ohne Adhäsion sind keine Unterschiede der Werkzeugoberflächen in Abhängigkeit des Beölungszustands oder des

Blechwerkstoffes zu erkennen. In Ergänzung zu den Reibbackenoberflächen wurden auch die Blechoberflächen vergleichend gegenübergestellt. Exemplarische Topografieaufnahmen der Streifen nach den tribologischen Versuchen sind in Bild 13 dargestellt. Für sämtliche Streifen wurde eine Messstelle in der Mitte der Kontaktzone analysiert. Für die beöhlten Versuche sowie für die trockenen Versuche mit DCo₄ und AA5182 liegen lokal keine signifikanten Unterschiede vor. Im Gegensatz dazu variieren die topografischen Eigenschaften der AA6014 Blechstreifen aus den trockenen Versuchen lokal deutlich, weshalb hier zusätzlich an einer exemplarischen verschlissenen Messstelle (x) gemessen wurde.

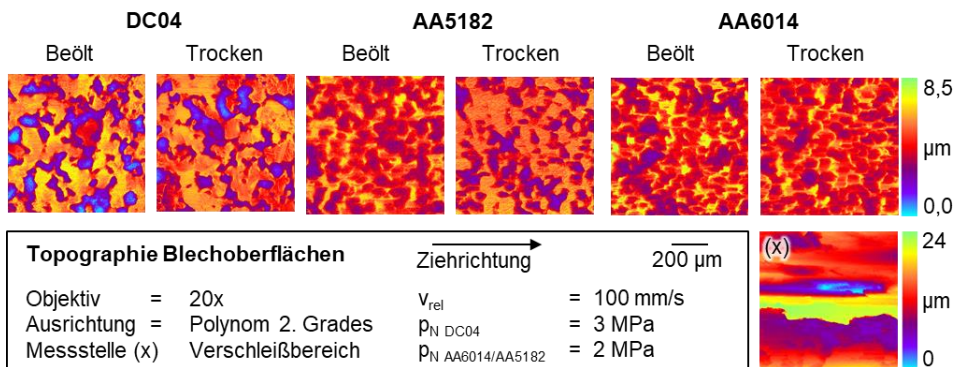


Bild 13: Topografien der verschiedenen Blechwerkstoffe nach den Streifenziehversuchen

Für den Werkstoff DCo₄ ergeben sich in Abhängigkeit vom Beölungszustand ähnliche topografische Eigenschaften, weshalb bei diesem Werkstoff auch die geringsten Reibzahlunterschiede ermittelt wurden. Unter trockenen Bedingungen ist die Einglättung aufgrund von lokal höheren Flächenpressungen ausgeprägter, als wenn ein geschlossener Schmierfilm für eine weitgehend homogene Verteilung des Kontaktdrucks sorgt. Ohne Schmierstoff wird daher ein Rückgang des Spk-Wertes um 38 % ermittelt. Bei schmierstofffreien Versuchen mit AA5182 wird die reduzierte Spitzenhöhe verglichen mit beöhlten Testreihen um 65 % verringert. Diese ausgeprägte Einglättung wird durch den Vergleich der beiden Topografien deutlich. Ähnlich wie bei den Reibbackenoberflächen resultieren auch für die Blechoberflächen von AA6014 lokal sehr deutliche Unterschiede. An unverschlissenen Stellen wird nach den trockenen Versuchen lediglich eine Reduktion der Spk-Werte um 11 % gemessen. Im Gegensatz dazu ist in den verschlissenen Bereichen die ursprüngliche Textur des Bleches nicht mehr zu erkennen und es entstehen lokale Höhenunterschiede

des Profils von bis zu 24 μm . Dies ist anhand der Topografieaufnahme an der Messstelle (x) veranschaulicht. Durch den Vergleich der beiden unterschiedlichen Messstellen wird deutlich, dass es bei AA6014 nach dem Übertrag von Blechmaterial auf die Werkzeugoberfläche nur noch lokal zu Kontakt kommt.

Erklärungsansätze für tribologisches Verhalten im trockenen Kontakt

Mit Hilfe weiterer Oberflächencharakterisierung und ergänzender Streifenziehversuche werden mögliche Ursachen für das tribologische Verhalten im direkten Werkzeug-Werkstück-Kontakt näher analysiert. Ein Erklärungsansatz für die niedrigere Reibung von verzinktem DCo4 im trockenen Kontakt ist in den chemischen und mechanischen Eigenschaften der Zinkbeschichtung zu sehen. Aufgrund der niedrigeren Härte der Zinkschicht von $83 \pm 4,2 \text{ HV}_1$ gegenüber dem Grundmaterial mit einer Härte von $98 \pm 7,1 \text{ HV}_1$ verfügt die Zinkschicht über einen geringeren Widerstand gegenüber Deformationen. Dies führt zum einen zu einer stärkeren Einglätten der Rauheitsspitzen und zum anderen zu einem Füllen der Rauheitstäler mit Zink. Das dadurch reduzierte Verhaken von Rauheitsspitzen trägt zu einem geringeren Widerstand gegenüber Relativbewegung und damit letztlich zu einer niedrigeren Reibung bei. Der Einfluss der Einglättung der Zinkschicht auf die Reibzahl wird auch an der tendenziell sinkenden Reibung für zunehmende Flächenpressung bei den Versuchsreihen mit 100 und 150 mm/s deutlich. Die fortschreitende Reduzierung von Rauheitsspitzen bei Erhöhung des Drucks von 1,5 auf 4,5 MPa wird in Bild 14 verdeutlicht. Im Vergleich zum Ausgangszustand ist für alle Drücke eine deutliche Einglättung zu erkennen, was durch einen 33 % niedrigeren Spk-Wert bei 1,5 MPa Flächenpressung im Vergleich zum Ausgangszustand bestätigt wird. Steigt der Druck, sinkt der Spk-Wert weiter auf 54 % des ursprünglichen Wertes bei 3,0 MPa und 51 % bei 4,5 MPa. Im trockenen Fall entsteht somit auch bei geringen Kontaktdrücken bis 4,5 MPa eine ausgeprägte Einglättung, welche in den beölten Versuchen nicht nachweisbar war. Im direkten Werkzeug-Werkstück-Kontakt treten lokal höhere Flächenpressungen durch die sich direkt berührenden Rauheitsspitzen auf. Im beölten Kontakt sind diese Rauheitsspitzen durch eine Schmierstoffschicht getrennt, die durch lokale Ausbildung hydrodynamischer Traganteile den Kontaktdruck auf eine größere Fläche verteilt.

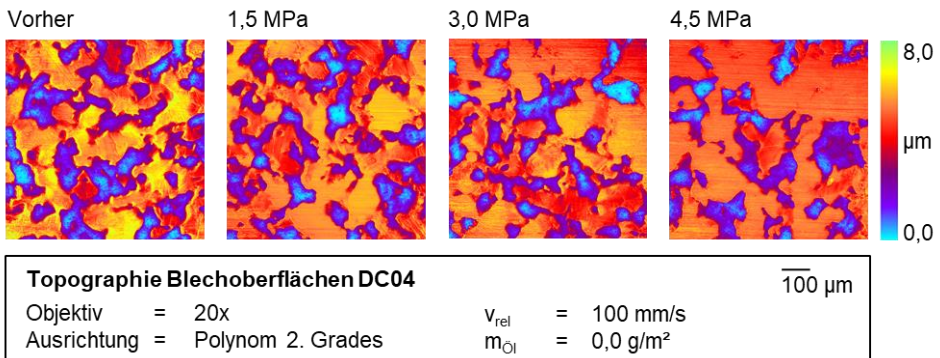


Bild 14: Topografie der DC04 Oberfläche nach trockenen Streifenziehversuchen bei 100 mm/s

Neben der positiven Auswirkung der Einglättung auf die resultierende Reibung fungiert eine geringe Menge an Zinkpartikeln in der Wirkfuge als Festschmierstoff [152], was durch eine reduzierte Reibzahl beim Ziehen des zweiten Streifens im Vergleich zum ersten Streifen verdeutlicht wird (Bild 15). Im Mittel sank die Reibzahl für den zweiten Versuch um 5,7 %.

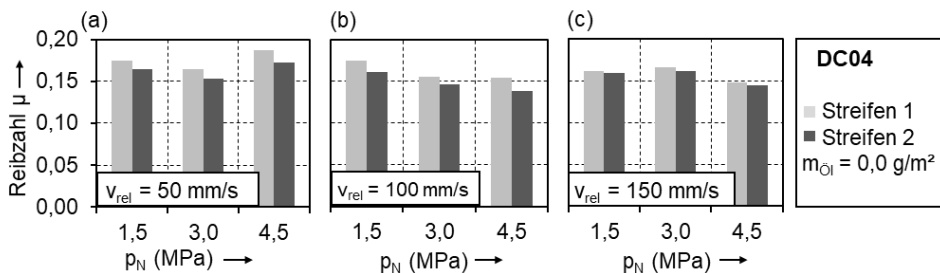


Bild 15: Reibzahlentwicklung über die ersten beiden Streifen für DC04

Der reibungsmindernde Einfluss von Zinkbeschichtungen wurde in stichprobenartigen Versuchen sowohl für DC04 als auch für weitere Stahlsorten durch einen Vergleich von verzinkten und unverzinkten Streifen nachgewiesen. Die Reibzahlentwicklung bei schmierstofffreien Bedingungen ist in Bild 16 über den Ziehweg für eine Flächenpressung von 1,5 MPa dargestellt. Für alle drei Stahlsorten resultieren deutlich niedrigere Reibzahlen bei Vorhandensein einer Zinkschicht.

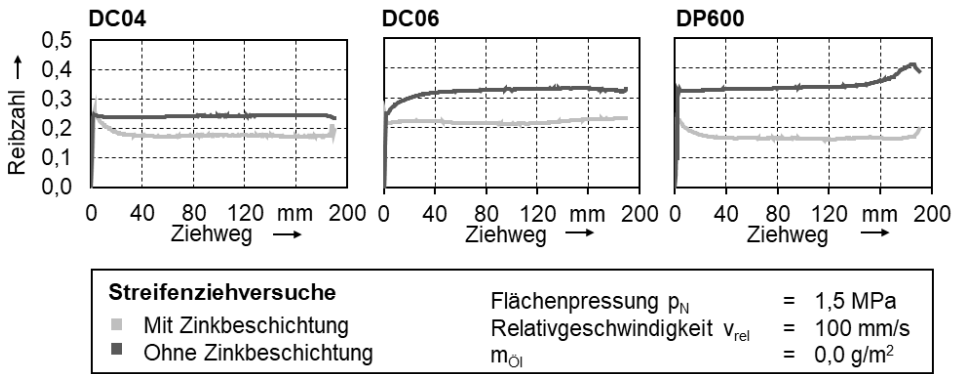


Bild 16: Reibzahlverlauf über den Ziehweg für verzinkte und unverzinkte Stahlbleche

Die Reibzahlen der verzinkten Blechstreifen liegen bei etwa 0,16 für DP600, bei 0,18 für DC04 und bei knapp über 0,20 für DCo6. Die Verläufe gleichen denen aus konventionell beölten Versuchen. Zu Beginn steigt die notwendige Ziehkraft an, bis die Haftreibung überwunden wurde. Danach fällt die Reibzahl auf ein annähernd konstantes Niveau, bis es beim Abbremsvorgang zum Versuchsende zu einem erneuten Anstieg der notwendigen Ziehkraft in Form einer Reibungserhöhung kommt. Diese Unterschiede zwischen dem anfänglichen Haft- und dem darauffolgenden Gleitreibungszustand sind bei den Versuchen mit unverzinkten Streifen nicht zu erkennen. Für DCo6 und DP600 kommt es über den Ziehweg zu einem Anstieg der Reibzahlen, was ein Anzeichen für Verschleiß darstellt, welcher die notwendige Abzugskraft erhöht. Die Reibzahl im unverzinkten Zustand liegt für DC04 mit knapp 0,25 etwas unter den Reibzahlen von etwa 0,33 für DCo6 und DP600. Die niedrigere Reibzahl von DC04 im Vergleich zu DCo6 könnte durch den vierfach höheren Kohlenstoffanteil im DC04 begründet sein, welcher zu einer Verringerung der Adhäsionsneigung beiträgt. Im Vergleich zu DC04 besitzt DP600 eine etwa doppelt so hohe Dehngrenze. Aufgrund dieser höheren Festigkeit sind größere Kräfte notwendig, um Rauheitsspitzen einzuglätten oder abzuscheren. Dieser erhöhte Kraftbedarf durch die veränderten mechanischen Eigenschaften des Blechwerkstoffs könnte den Grund für die höhere Reibzahl darstellen.

Die Ursache für die signifikante Verringerung der Reibung bei Vorhandensein einer Zinkschicht ist neben den bereits aufgeführten Gründen in den unterschiedlichen Oberflächenenergien und Gitterstrukturen zu sehen [153]. Zink besitzt eine hexagonal dichtest gepackte Gitterstruktur,

welche besonders resistent gegenüber Adhäsion ist, sowie eine fast vierfach geringere freie Oberflächenenergie als Stahl [154]. Aluminiumlegierungen verfügen hingegen über eine kubisch flächenzentrierte Gitterstruktur, welche stärker zur Adhäsion neigt als beispielsweise Zink. Im Vergleich zu den unverzinkten DCo6 und DP600 Blechen resultieren für die Aluminiumlegierung AA5182 ähnlich hohe Reibzahlen. Im Gegensatz dazu liegen für die Aluminiumlegierung AA6014 mit Abstand die höchsten Reibzahlen im direkten Werkzeug-Werkstück-Kontakt vor. Aufgrund dieser deutlichen Unterschiede zwischen den Aluminiumlegierungen der 5xxx-er und 6xxx-er Serie muss es neben der Gitterstruktur weitere adhäsionsbeeinflussende Faktoren geben. Um diese Vermutung zu bestätigen, wurden stichprobenartig weitere schmierstofffreien Streifenziehversuche mit Aluminiumlegierungen durchgeführt. Die ermittelten Reibzahlen sind in Bild 17 dargestellt. Analysiert wurde eine weitere Charge der Legierung AA6014 sowie die Legierung AA6016 im Vergleich zu den bereits untersuchten Werkstoffen AA6014 und AA5182.

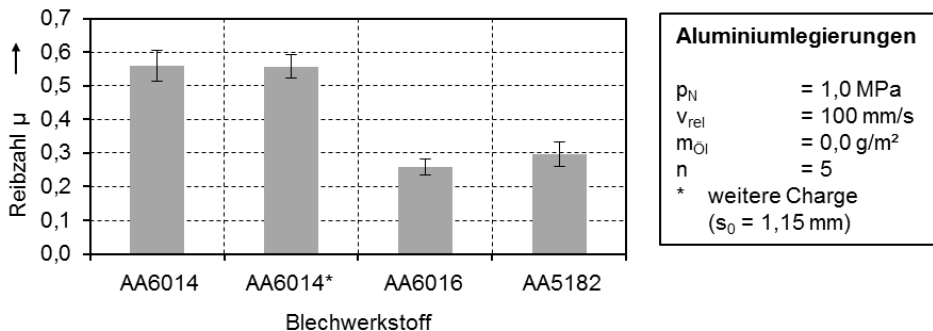


Bild 17: Reibzahlen trockener Versuche für verschiedene Aluminiumlegierungen

Die signifikant höheren Reibzahlen von AA6014 werden auch für die zweite Charge mit mittleren Reibzahlen von etwa 0,57 bestätigt. Für die Aluminiumlegierung AA6016 ergeben sich deutlich niedrigere Reibzahlen im Bereich um 0,26. Die unterschiedliche Adhäsionsneigung kann daher nicht über die Hauptunterscheidungsmerkmale wie Härtebarkeit und Hauptlegierungselemente erklärt werden. Die verschiedenen Aluminiumlegierungen wurden daher zusätzlich hinsichtlich ihrer Mikrohärtigkeit, Topografie und den Gefügeeigenschaften im Randbereich charakterisiert. Es wurden jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen AA6014 im Vergleich zu den Legierungen AA6016 und AA5182 festgestellt, welche die deutlichen Unterschiede im Reibverhalten erklären konnten. Die Gegenüberstellung der genormten chemischen Zusammensetzung hinsichtlich

Gemeinsamkeiten zwischen AA6016 und AA5182 bei gleichzeitigen Unterschieden zu AA6014 ergab die größten Diskrepanzen bei den Anteilen von Cr, Zn und V. Im Vergleich zu AA5182 und AA6016 besitzt AA6014 einen doppelt so hohen Cr-Anteil, einen halb so hohen Zn-Anteil und 0,05 – 0,20 Gew.-% V, welches in den anderen beiden Legierungen nicht enthalten ist.

Die oben dargestellten Versuche mit weiteren Stahl- und Aluminiumlegierungen zeigen, dass das Reibungs- und Verschleißverhalten im trockenen Kontaktzustand äußerst sensitiv auf Änderungen der chemischen Zusammensetzung reagiert [155]. Die Übertragbarkeit des tribologischen Verhaltens auf weitere Werkstoffklassen sowie innerhalb einer Werkstoffklasse ist daher nur begrenzt möglich. Die grundlegenden tribologischen Analysen in Form von Streifenziehversuchen haben verdeutlicht, dass ein Verzicht auf Schmierstoff werkstoffübergreifend zu einem deutlichen Anstieg der Reibzahl führt. Das Ausmaß des Reibungsanstieges ist abhängig von den chemischen und mechanischen Eigenschaften der Kontaktpartner. Während bei DCo₄ nur ein moderater Anstieg der Reibung im trockenen Fall vorliegt, steigt die Reibzahl für beide Aluminiumlegierungen wesentlich stärker an. Eine Ursache für die niedrigeren Reibzahlen von DCo₄ im trockenen Fall ist die Zinkschicht, welche durch ihre niedrigere Festigkeit einen geringeren Widerstand gegenüber mechanischem Verhaken von Rauheitsspitzen darstellt und außerdem über eine geringere Adhäsionsneigung verfügt. Nach den Versuchen mit trockenen Streifen aus den untersuchten Aluminiumlegierungen weisen die Reibbacken zum Teil deutliche Kaltaufschweißungen auf. Auch die Blechoberflächen sind nach den Streifenziehversuchen stellenweise beschädigt. Ursache dafür ist die deutlich höhere Adhäsionsneigung von Aluminiumlegierungen [156]. Zusammenfassend gilt es festzuhalten, dass, anders als in beölten Versuchen, die Prozessparameter Flächenpressung und Geschwindigkeit einen wesentlich geringeren Einfluss auf die Reibung besitzen, Abweichungen in der chemischen Zusammensetzung jedoch einen starken Einfluss auf das Reibverhalten ausüben. Deutlich wird dies für AA6014 und AA5182 anhand sehr ähnlicher Reibzahlen im beölten und stark unterschiedlicher Reibzahlen im trockenen Fall. Da das tribologische Verhalten in Streifenziehversuchen nur unter Laborbedingungen abgebildet wird, gilt es, diese Ergebnisse bei typischen Spannungs- und Dehnungszuständen eines Tiefziehprozesses in anwendungsnäheren Versuchen zu verifizieren.

5.1.2 Analyse in Tiefziehversuchen

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf schmierstofffreie Tiefziehprozesse wird daher anhand des in dieser Arbeit definierten Demonstratorbauteils untersucht. Alle Werkzeugaktivflächen wurden für diese Versuchsreihen geschliffen. Die Kontaktflächen von Niederhalter und Matrize zum Blech wurden zusätzlich poliert. Die grundlegende Form des Platinenzuschnitts wurde entsprechend [157] unter Berücksichtigung des idealisierten Werkstoffbedarfs zur Napfausformung und dem Fließverhalten des Werkstoffs ausgelegt. Die Abmessungen des definierten Platinenzuschnitts sind in Bild 18 dargestellt. Um die Ergebnisse unterschiedlicher tribologischer Bedingungen zu vergleichen, wurde für alle experimentellen Versuche die gleiche Gestalt des Zuschnitts gewählt.

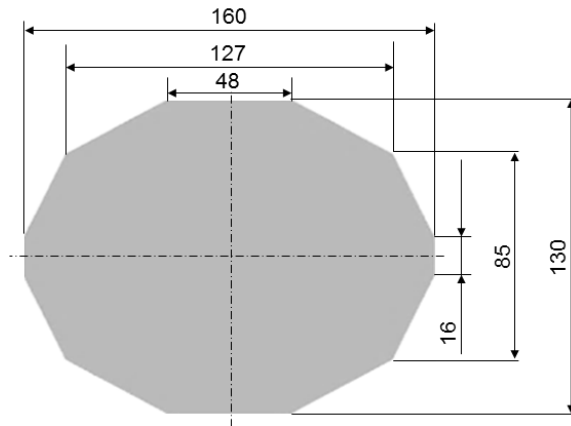


Bild 18: Verwendeter Platinenzuschnitt (Ausgangsblechdicke $s_0 = 1$ mm)

Bei Grundabmessungen des Stempels von etwa 100 mm x 60 mm und einer angestrebten Ziehtiefe von 30 mm wird durch die gewählte Geometrie ein Restflansch von einigen Millimetern sichergestellt. Der Einfluss von Platinengröße und Niederhalterdruck auf Umformkraft und Versagenszeitpunkt wurde in [158] numerisch untersucht. Da für den Tiefziehstahl deutlich geringere Reibzahlen ermittelt wurden als für die Aluminiumlegierungen, wurde dieser bei einem Niederhalterdruck von 4,5 MPa tiefgezogen, während für beide Aluminiumlegierungen ein niedrigerer Druck von 1,5 MPa definiert wurde. Da direkt aus den Tiefziehversuchen keine Reibzahlen ermittelt werden können, werden die Kraft-Weg-Verläufe analysiert. Eine erhöhte Reibung wird dabei durch eine zunehmende Stempelkraft impliziert. Die resultierenden Kraft-Weg-Verläufe der beölten und trockenen Napfzugversuche sind in Bild 19 dargestellt.

Zu Beginn steigt die Stempelkraft bedingt durch die Kaltverfestigung stark an. Der Kraftanstieg ist zunächst unabhängig vom Beölungszustand, da das Blech anfänglich um den Matrizen- und Stempelradius gebogen wird. Zu diesem Zeitpunkt liegt noch wenig Relativbewegung zwischen Werkzeug und Blech vor, sodass die tribologischen Bedingungen nur eine untergeordnete Rolle spielen. Erst wenn das Blech nahezu vollständig an den Werkzeugradien anliegt, beginnt der eigentliche Tiefziehprozess und der Unterschied zwischen den Beölungszuständen wird im Kraft-Weg-Verlauf sichtbar. Aufgrund der höheren Fließspannung von DC04 wird insgesamt eine höhere Stempelkraft zur Umformung benötigt. Bei nicht beölten Blechen steigt die maximale Umformkraft um circa 11 % an. Sowohl mit als auch ohne Schmierstoff tritt kein Versagen auf und für beide Fälle sinkt die notwendige Umformkraft nach einer Ziehtiefe von etwa 20 mm. Grund für die sinkende Kraft ist der verringerte Anteil der Reibkraft, welche bedingt durch die kleiner werdende Kontaktfläche im Flanshbereich mit zunehmender Ziehtiefe reduziert wird.

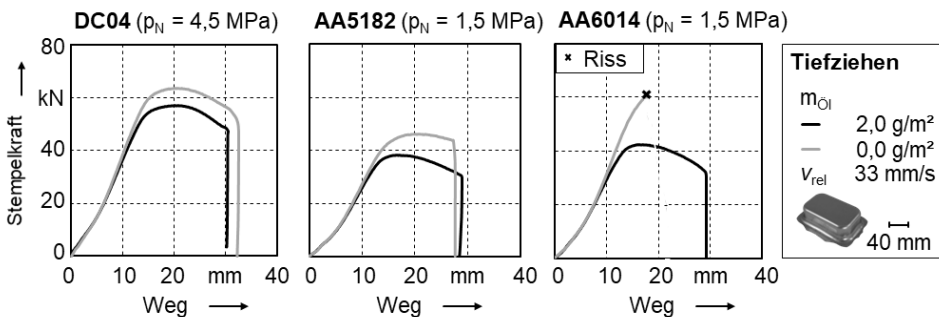


Bild 19: Kraft-Weg-Verläufe aus dem Rechtecknapfzug für unterschiedliche Blechwerkstoffe und Beölungszustände nach [159]

Entsprechend der Erwartungen aus dem Streifenziehversuch steigt die Maximalkraft bei AA5182 mit 15,4 % für den trockenen Fall deutlicher an als bei DC04. Entscheidend ist jedoch nicht nur der Wert der maximalen Stempelkraft, sondern der unterschiedliche Kurvenverlauf der beölten und trockenen Versuchsreihen. Ohne Schmierstoff bleibt die Umformkraft über den Ziehweg nahezu konstant auf dem Niveau der Maximalkraft, was ein Indiz für Verschleiß in der Wirkfuge darstellt. Erwartungsgemäß liegen die kritischsten tribologischen Bedingungen im direkten Kontakt von AA6014 mit der Werkzeugoberfläche vor. Die maximale Umformkraft steigt in den trockenen Versuchsreihen auf knapp über 60 kN, bis es zum Versagen des Blechs bei einem Ziehweg von 18 mm kommt. Die hohe Reibung hindert das Nachfließen des Werkstoffs im

Flanschbereich, sodass das Blech in der Zarge mit zunehmendem Stempelweg ausdünn, bis es zum Reißen kommt. Um den Werkstofffluss genauer zu analysieren, wurden neben den Kraft-Weg-Verläufen auch die Blechdicken der umgeformten Bauteile gemessen. Ein Vergleich der Blechdicken ist in Bild 20 für die unterschiedlichen Blechwerkstoffe und Beölungszustände dargestellt. Für DCo4 wird bezogen auf das gesamte Bauteil eine etwas höhere Ausdünnung von etwa 0,05 mm im Eckradius des Napfbodens ersichtlich. Im Flanschbereich liegt eine Aufdückung von etwa 0,05 bis 0,1 mm vor. Insgesamt sind die Schwankungen der Blechdicke für DCo4 jedoch sehr gering und der Vergleich zwischen den beölt und trocken tiefgezogenen Näpfen zeigt kaum Unterschiede. Deutlicher wird der Einfluss der variierenden Kontaktbedingungen auf den Werkstofffluss für beide Aluminiumlegierungen. Für beölte Platinen wird eine Tendenz zur Faltenbildung aufgrund der niedrigen Flächenpressungen im Flansch sichtbar. Die Niederhalterkraft wurde jedoch bewusst so gering gewählt, dass ein Tiefziehen im trockenen Kontakt möglich ist.

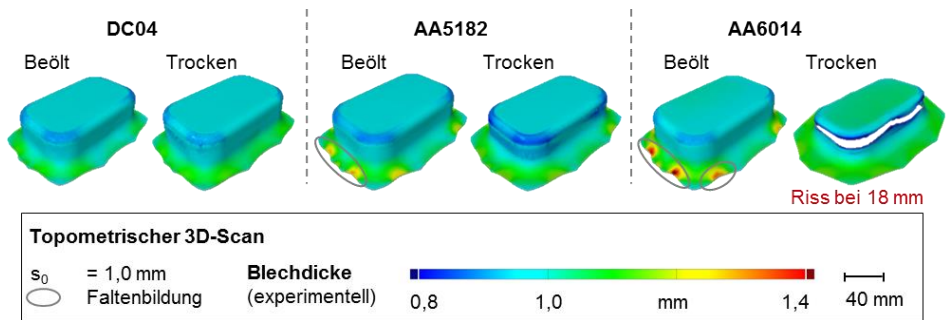


Bild 20: Blechdicken der Rechtecknäpfe in Abhängigkeit von Blechwerkstoff und Beölungszustand

Für die Aluminiumlegierung AA5182 wird eine deutliche Blechdickenreduktion auf bis zu 0,82 mm im Eckradius des Napfbodens sichtbar. Gleichzeitig bleibt – wenn auch in geringerem Ausmaß als für beölte Platinen – eine Tendenz zur Faltenbildung erkennbar. Um die Ausdünnung im Eckbereich zu reduzieren, wäre es nötig, die Niederhalterkraft zu reduzieren. Dies würde jedoch eine zusätzliche Faltenbildung forcieren. Somit ist für den Werkstoff AA5182 im trockenen Kontakt kein sicheres Prozessfenster durch Anpassung der Niederhalterkraft möglich. Für den Werkstoff AA6014 ist die Ausdünnung im trockenen Fall so groß, dass es bereits ab 18 mm Ziehtiefe zum Riss kommt. Somit ist das schmierstofffreie Tiefziehen mit konventionellen Werkzeugoberflächen

für AA5182 nur bedingt und für AA6014 nicht realisierbar. Neben dem Versagen durch Reißen kommt es durch den direkten Werkzeug-Werkstück-Kontakt zu einer Beschädigung der Blechoberfläche in Form von Riefen. Die schlechte Oberflächenqualität wird in Bild 21 anhand der Fotografien der gezogenen Rechtecknäpfe sowie durch die Ergebnisse der taktilen Messung im Zargenbereich deutlich. Die Fotoaufnahme von DCo4 zeigt keine Riefen und auch der Anstieg des Rvk-Wertes ist mit Faktor zwei deutlich geringer als für die Aluminiumlegierungen. Für DCo4 resultieren hinsichtlich der reduzierten Riefentiefe keine signifikanten Unterschiede für den beölneten und schmierstofffreien Fall. Für die Aluminiumlegierungen sind unter trockenen Kontaktbedingungen bereits mit bloßem Auge deutliche Kratzer entlang des Ziehringradius und im Eckbereich zu erkennen. Dahingegen wird im beölneten Tiefziehen eine hohe Oberflächenqualität erreicht, was zusätzlich zur Sichtprüfung durch nur minimal höhere Rvk-Werte im Vergleich zum Ausgangszustand bestätigt wird. Im Trockentiefziehen ergibt sich eine Erhöhung der Rvk-Werte um den Faktor 4,5 für AA6014 und den Faktor 4 für AA5182 im Vergleich zum Ausgangszustand der Bleche. Somit ist mit konventionellen Werkzeugoberflächen das schmierstofffreie Tiefziehen von Bauteilen mit hoher Oberflächenqualität für keine der untersuchten Aluminiumlegierungen möglich.

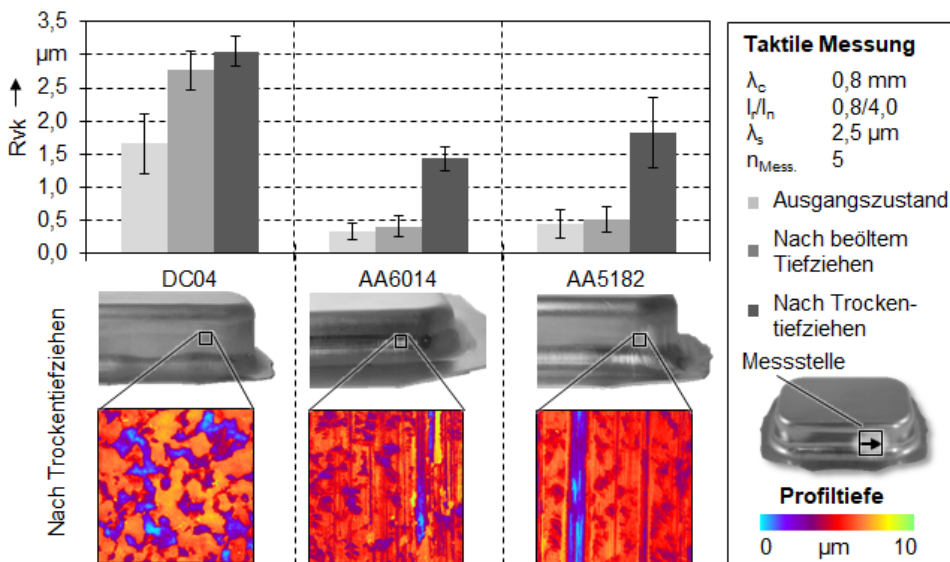


Bild 21: Reduzierte Riefentiefe für den Ausgangszustand und nach beölnetem sowie trockenem Tiefziehen und Oberflächenqualität der trocken tiefgezogenen Rechtecknäpfe

Der gezeigte Vergleich der tribologischen Bedingungen im beölten und schmierstofffreien Zustand für drei verschiedene Blechwerkstoffe im Kontakt zu konventionellen Werkzeugoberflächen hat die Herausforderungen des Trockentiefziehens demonstriert. In allen Testreihen führte der Verzicht auf Schmierstoffe zu einem ausgeprägten Anstieg der Reibung, was ein Vergleich von Bild 9 mit Bild 11 zeigt. In Übereinstimmung der tribologischen Laborversuche mit den Tiefziehversuchen resultieren im Kontakt zu verzinkten Blechen aus DCo₄ die geringsten Änderungen und kaum Verschleiß. Hingegen wurden für beide Aluminiumlegierungen deutlich höhere Reibzahlen ermittelt sowie die Adhäsion als wesentlicher Verschleißmechanismus identifiziert. In Streifenziehversuchen ohne Schmierstoff wurde, wie in Bild 11 gezeigt, kein signifikanter Einfluss von den Prozessparametern Flächenpressung und Ziehgeschwindigkeit auf die Reibzahlen festgestellt. Für weitere Streifenziehversuche im Rahmen dieser Arbeit wurden beide Parameter daher konstant gehalten. Dies gewährleistet zudem eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander. Für die Werkstoffe AA6014 und AA5182 wurde aus den Streifenzieh- und Napfzugversuchen ersichtlich, dass schmierstofffreies Tiefziehen ohne weitere Anpassungen nicht möglich ist. Anhand der Untersuchungen mit unverzinkten Stahlsorten, welche in Bild 16 dargestellt sind, wurde deutlich, dass auch diese zur Adhäsion neigen, wenn keine Zinkschicht vorhanden ist, welche einen direkten Stahl-Stahl-Kontakt verhindert. Da bei langen Gleitwegen in Kombination mit kleinen Ziehradien die Gefahr besteht, dass es lokal zu erhöhtem Zinkabrieb kommt, sind reibungs- und verschleißmindernde Maßnahmen jedoch auch für verzinkte Stahlwerkstoffe zu empfehlen.

5.2 Inverse numerische Identifikation tribologischer Anforderungen

In den Streifenzieh- und Rechtecknapfzugversuchen mit entölten Proben im Kontakt zu konventionellen Werkzeugoberflächen wurde der Bedarf zur Entwicklung von Oberflächenmodifikationen zur Realisierung des Trockentiefziehens verdeutlicht. Zur Abschätzung der mit Hilfe der Modifikationen zu erreichenden Reibzahlreduktion zur Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse wurde eine Variantensimulation durchgeführt, um anschließend gezielt Mechanismen und Maßnahmen zur Einstellung dieser kritischen Reibzahlen zu erforschen. Zunächst erfolgt eine Validierung des Simulationsmodells für schmierstofffreie Versuche anhand der experimentellen Daten aus dem vorherigen Abschnitt. Anschließend werden die Ergebnisse der Variantensimulation analysiert.

5.2.1 Validierung des FE-Modells

Der in Abschnitt 4.3.3 beschriebene Prozess zum Tiefziehen eines Rechtecknapfes wurde nachfolgend entsprechend der Randbedingungen und Eingabegrößen aus Abschnitt 4.1 und 4.4 numerisch abgebildet. Zur Validierung des Modells wurden identische Platinenzuschnitte und Flächenpressungen wie in den Experimenten in Abschnitt 5.1 gewählt. Als Vergleichskriterien wurden die Kraft-Weg-Verläufe sowie die Geometrie und Blechdickenverteilung der umgeformten Näpfe herangezogen. Zur grundlegenden Validierung wurde ein 360°-Modell des Tiefziehprozesses mit einer feinen Vernetzung des Blechs mit einer Kantenlänge von 0,5 mm genutzt. Dies ist notwendig, um die Blechdicken vergleichen zu können, da bei einem 90°-Modell die Elementreihen entlang der Symmetrieachsen zwar in der Simulation korrekt abgebildet werden, aber softwarebedingt nicht ohne Verzerrungen in ein CAD-Netz mit der Blechdicke überführt werden können. Zudem werden durch die feinere Vernetzung die Abweichungen in den Radienbereichen reduziert.

Die Reibzahlen wurden entsprechend der Ergebnisse aus den Streifenziehversuchen definiert. Zu beachten ist, dass Niederhalter und Matrize im Gegensatz zum Stempel vor den Tiefziehversuchen zusätzlich poliert wurden, was, wie in Bild 22 (a) veranschaulicht, zu variierenden Kontaktbedingungen führt. Dieser Poliervorgang ist für Matrize und Niederhalter notwendig, um eine Vergleichbarkeit zu Versuchen mit Beschichtungen zu gewährleisten, bei denen die Aktivflächen vor dem Beschichtungsprozess poliert wurden. Für die Reibung μ_S zwischen Stempel und Blech wurde der maximale Wert aus den gültigen schmierstofffreien Streifenziehversuchen ($\mu < 0,577$) im Kontakt zu den geläpften Reibbacken gewählt. Zur realitätsnahen Abbildung der Reibung $\mu_{M/N}$ an Niederhalter und Matrize wurden zusätzliche Streifenziehversuche mit polierten Reibbacken durchgeführt. Für DCo4 ergaben sich ähnliche Reibzahlen wie in den bereits in Abschnitt 5.1 dargestellten Versuchen.

Wie in Bild 22 (b) dargestellt, ergibt sich jedoch für die beiden Aluminiumwerkstoffe ein größerer Bereich möglicher Reibzahlen in Abhängigkeit des Verschleißes. So lag die Reibzahl für AA5182 bei etwa 0,20 für den ersten Streifen im Kontakt zu unbenutzten Reibbacken und stieg für den zweiten Streifen durch bereits vorhandenen Verschleiß auf 0,45 an. Ein ähnliches Verhalten resultierte für Versuche mit AA6014, bei denen die Reibzahlen des ersten Streifens von 0,25 bis zum Riss des Streifens bei einer theoretischen Reibzahl von etwa 0,70 anstiegen.

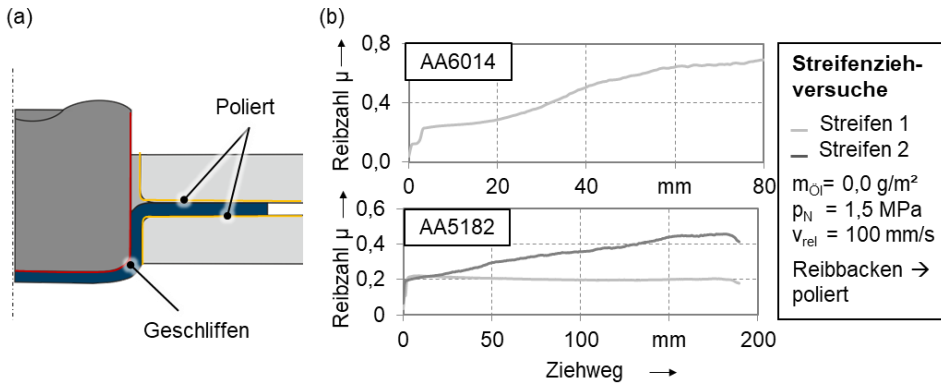


Bild 22: Reibzahlermittlung für Rechtecknapfsimulation: (a) Kennzeichnung Kontaktbedingungen durch variierende Oberflächenbearbeitung und (b) Reibzahlentwicklung für polierte Reibbacken in Kontakt zu AA6014 und AA5182

Für die beiden Aluminiumlegierungen wurden daher innerhalb des ermittelten Reibzahlbereichs zwei verschiedene Reibzahlen $\mu_{M/N}$ im Kontakt zu Niederhalter und Matrize in der Simulation untersucht, da das Modell keinen verschleißbedingten Reibungsanstieg berücksichtigt. Die verwendeten Reibzahlen je Simulationsmodell sind in Abhängigkeit des Blechwerkstoffs in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Verwendete Reibzahlen zur Validierung des 360°-Modells

Blechwerkstoff	Reibzahl $\mu_{M/N}$ (Matrize / Niederhalter)	Reibzahl μ_S (Stempel)
DC04-a	0,20	0,20
AA6014-a	0,35	0,57
AA6014-b	0,50	0,57
AA5182-a	0,20	0,30
AA5182-b	0,30	0,30

Die Stempelkräfte, welche aus der Berechnung der 360°-Modelle in Abhängigkeit der Reibzahlen aus Tabelle 6 ermittelt wurden, wurden mit den Kraft-Weg-Verläufen aus den experimentellen Versuchen verglichen. Eine Gegenüberstellung dieser Kurven ist in Bild 23 zu sehen. Auch in den Trockentiefziehversuchen kommt es verschleißbedingt zu variierenden Kraft-Weg-Verläufen. Die maximalen Stempelkräfte steigen bei fortschreitender Adhäsion mit zunehmender Anzahl an gezogenen Rechtecknapfen. Daher sind in Bild 23 jeweils die experimentellen Verläufe mit den niedrigsten und höchsten gemessenen Stempelkräften dargestellt. Die

Unterschiede sind für DCo4 aufgrund des nicht vorhandenen Verschleißes sehr gering. Für AA6014 liegen die experimentell ermittelten Verläufe ebenfalls nah bei-einander, was in diesem Fall jedoch nicht durch das Fehlen von Verschleiß, sondern durch das aufgrund der sehr hohen Reibzahlen frühzeitig eintretende Werkstoffversagen zu erklären ist. Die experimentell ermittelten Kraft-Weg-Verläufe unterscheiden sich bei den Näpfen aus AA5182 aufgrund lokaler Verschleißerscheinungen deutlich. So liegen die maximalen Stempelkräfte beim ersten Napf bei 45 kN und steigen für den dritten gezogenen Napf auf 54 kN. Dieses Verhalten deckt sich, wie in Bild 22 zu sehen ist, mit der Reibzahlentwicklung während der ersten beiden gezogenen Streifen.

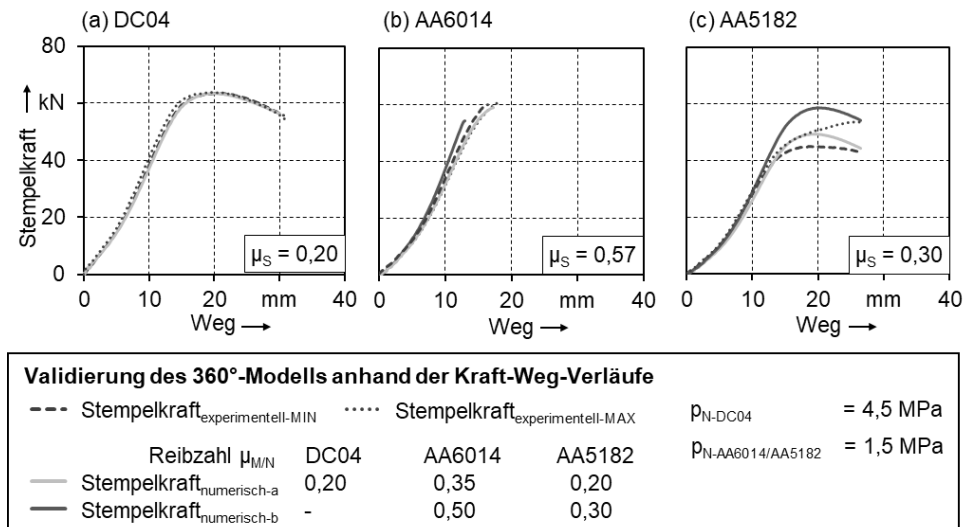


Bild 23: Gegenüberstellung der experimentell und numerisch ermittelten Kraft-Weg-Verläufe für (a) DCo4, (b) AA6014 und (c) AA5182

Für die trockenen Tests mit DCo4 bildet die Simulation mit den Reibzahlen aus Tabelle 6 den experimentell ermittelten Kraft-Weg-Verlauf exakt ab, da für verzinktes DCo4 auch im schmierstofffreien Kontakt bei geringen Hüben und Pressungen kein Verschleiß auftritt. Somit ist es für DCo4 gelungen, sowohl das Materialverhalten als auch die tribologischen Bedingungen numerisch hinreichend genau abzubilden. Im Gegensatz dazu ergeben sich größere Abweichungen für beide Aluminiumlegierungen. Eine Reduzierung der Reibzahl von 0,50 auf 0,35 für AA6014 und von 0,30 auf 0,20 für AA5182 führte zu einer Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit. Die Wahl dieser Reibzahlen erscheint sinnvoll, da diese Werte den in Streifenziehversuchen ermittelten Reibzahlen vor Beginn des

adhäsiven Verschleißes entsprechend. Für AA6014 liegt die Abweichung der maximalen Stempelkraft bei 2,8 %. Das Simulationsmodell für AA5182 berechnet bei einer Reibzahl von 0,20 eine 9,8 % zu hohe Maximalkraft des Stempels bezogen auf die experimentelle Kurve mit der minimalen Stempelkraft. Bezogen auf die experimentelle Kurve mit der maximalen Stempelkraft wird eine 8 % zu niedrige Maximalkraft berechnet. Somit liegt die Vorhersagegenauigkeit dieser Simulationen nach den Angaben in [160] unterhalb bzw. innerhalb der üblichen Abweichungen von 7 – 10 % vom realen Verhalten. Die größeren Abweichungen bei den Versuchen mit den Aluminiumlegierungen resultieren aus den lokalen Verschleißerscheinungen, welche im Streifenziehversuch auftraten und somit zu höheren ermittelten Reibzahlen führten. Da die Simulation die Verschleißerscheinungen nicht darstellt, werden die Kraft-Weg-Verläufe nicht exakt abgebildet.

Zur weiteren Validierung der Simulationen wurden die Blechdicken von Simulation und Realbauteil für DC04 und AA5182 gegenübergestellt. Ein Vergleich für AA6014 ist aufgrund der aufgetretenen Risse nicht zielführend, da das Versagen in der Simulation nicht realitätsnah abgebildet wird, was jedoch auch nicht das Ziel der vorliegenden Arbeit ist. Die Abweichungen der Blechdicken zwischen Realbauteil (Ist) und Simulationsbauteil (Soll) sind in Bild 24 dargestellt. Das jeweilige Histogramm an den Farbskalen kennzeichnet die Verteilung der Abweichung der Blechdicke.

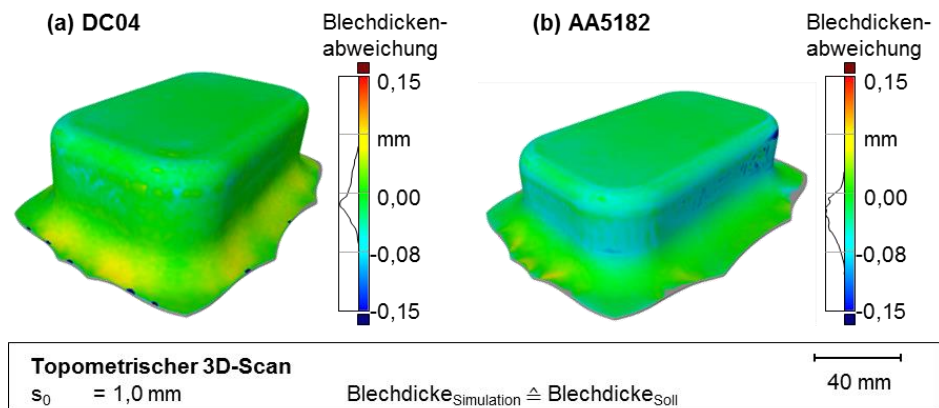


Bild 24: Gegenüberstellung der experimentell und numerisch ermittelten Blechdickenverteilung für (a) DC04 und (b) AA5182

Entsprechend der Abbildungsgenauigkeit der Kraft-Weg-Verläufe resultiert für DCo4 ebenso eine hohe Übereinstimmung der Blechdickenverteilung. Das Maximum des Histogramms liegt bei lediglich $-0,02$ mm und die Halbwertsbreite bei $0,04$ mm. Da die Blechdicken der experimentellen Bauteile von der Simulation abgezogen werden, bedeutet ein negatives Vorzeichen, dass die experimentellen Bauteile über eine geringere Blechdicke verfügen als die numerisch berechneten Rechtecknäpfe. Die erhöhte Ausdünnung tritt insbesondere in der Zarge und im Eckbereich des Napfes auf. Die maximalen Abweichungen liegen in einem Bereich von ± 5 %. Auch für AA5182 resultiert eine insgesamt hohe Übereinstimmung der Blechdickenverteilung zwischen Simulation und Realbauteil. Das Histogramm erreicht sein Maximum bei $-0,03$ mm, was eine stärkere Blech- ausdünnung im Experiment im Vergleich zur Simulation kennzeichnet. Die Halbwertsbreite des Histogramms liegt mit $0,06$ mm etwa 50 % höher als für DCo4. Im Realversuch traten beim eingescannten Bauteil höhere Stempelkräfte auf als in der Simulation, was ein Vergleich der gepunkteten und hellgrauen Linien in Bild 23 (c) verdeutlicht. Dies stellt einen Grund für die erhöhte Blech- ausdünnung dar. Weitere Ursachen für die Abweichungen hinsichtlich der Blechdicke liegen in Blechdickenschwan- kungen, Messungenauigkeiten beispielsweise durch den manuellen Lack- auftrag sowie Nichtberücksichtigung von Oberflächenveränderungen wie Einglättung oder Zinkabrieb im numerischen Modell begründet. Zudem können Abweichungen durch ein nicht exaktes Positionieren des Platin- zuschnitts im Realversuch entstehen, was durch die vereinzelt grau dargestellten Bereiche am Rand des Flansches in Bild 24 zu erkennen ist. Diese grauen Bereiche kennzeichnen Stellen, an denen aufgrund von Ver- netzungsfehlern oder nicht vorhandenem Material kein Abgleich von Ist- zu Soll-Netz möglich ist. Die Histogramme der Blechdickenabweichungen beider Werkstoffe zeigen jedoch, dass trotz dieser Unzulänglichkeiten eine hohe Abbildungsgenauigkeit mit dem entwickelten numerischen Modell realisierbar ist.

Durch die Validierung des 360° -Modells anhand eines Abgleichs von Kraft-Weg-Verläufen und Blechdickenverteilung konnte aufgezeigt werden, dass Trockentiefziehprozesse unter Berücksichtigung der für die Blechumformung üblichen Annahmen und Vereinfachungen mit einer hohen Genauigkeit abgebildet werden können. Schwierigkeiten bei der exakten Abbildung des realen Bauteilverhaltens sind nur zu erwarten, wenn eine ausgeprägte Adhäsion von Blechmaterial am Werkzeug auf- tritt, welche in der Simulation nicht abgebildet wird. Dies ist im Rahmen

der vorliegenden Arbeit jedoch als unkritisch anzusehen, da die entwickelten Oberflächenmodifikationen den initialen Verschleiß bereits nach wenigen Hüben verhindern sollen. Oberflächenmodifikationen, die die Adhäsion im Streifenziehversuch nicht über mindestens drei Streifen verhindern, scheiden von vorneherein für den Einsatz auf Tiefziehwerkzeugen aus. Für die Variantensimulationen in dieser Arbeit wird zur Einsparung von Rechenzeit auf ein 90°-Modell mit einer Elementkantenlänge von 1,14 mm zurückgegriffen. Um auch die Validität dieser Modelle zu gewährleisten, wurden die Kraft-Weg-Verläufe exemplarisch für jeweils eine Reibzahlkombination pro Werkstoff in Bild 25 gegenübergestellt. Für alle drei Werkstoffe wurde nachgewiesen, dass die Reduzierung auf einen 90°-Ausschnitt des Modells mit einer maximalen Abweichung von 0,7 kN bei AA5182 zu keinen nennenswerten Änderungen der Stempelkraft führt.

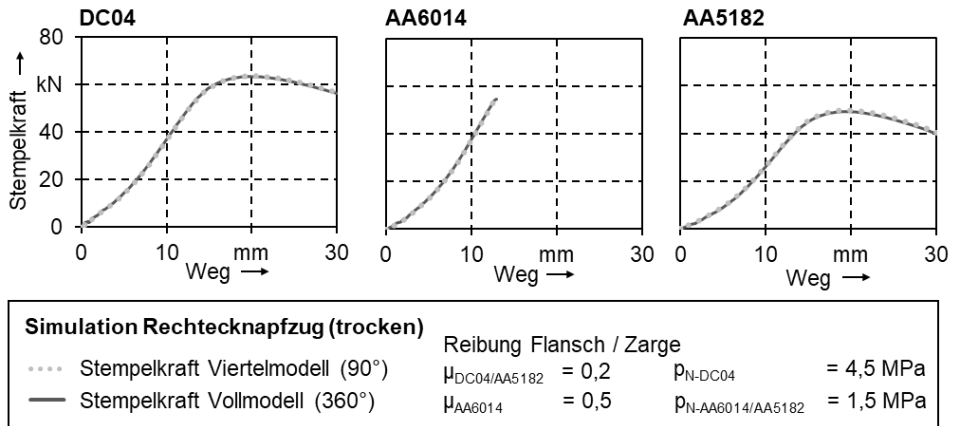


Bild 25: Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe des 360°-Modells mit dem 90°-Modell für (a) DC04, (b) AA6014 und (c) AA5182

Solang auf einen Abgleich der Blechdicke entlang der Symmetrielinien verzichtet werden kann, ist die Anwendung des 90°-Modells somit ohne wesentliche Datenverluste möglich. Ein Abgleich der Blechdicken für das 90°- und das 360°-Modell bei unterschiedlichen Elementkantenlängen ist in Bild 26 dargestellt. Die Gegenüberstellung der numerisch ermittelten Blechdicken verdeutlicht, dass es keine wesentlichen Abweichungen der Blechdicke in Abhängigkeit von der Kantenlänge im untersuchten Bereich zwischen 0,5 und 1,14 mm gibt. Auch die Reduktion auf einen 90°-Ausschnitt bewirkt keine nennenswerte Veränderung der errechneten Blechdicken.

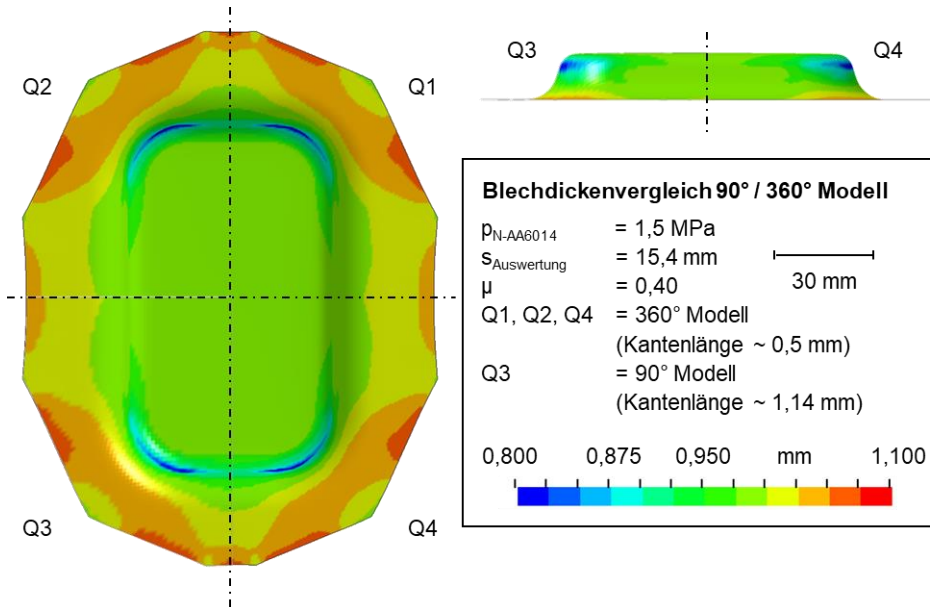


Bild 26: Numerisch ermittelte Blechdicken in Abhängigkeit von der Vernetzung und der Auslegung als 90°- oder 360°-Modell

5.2.2 Ableiten von Anforderungen an Oberflächenmodifikationen

Die Reibung zwischen Blech und Niederhalter sowie zwischen Blech und Matrize wurde in den validierten Modellen im Bereich zwischen den Reibzahlen für beölte und trockene Versuchsreihen in 0,05-er Schritten variiert. Die konstant belassenen Reibzahlen im Kontakt zwischen Blech und Stempel sind Tabelle 6 zu entnehmen. Als untere Grenze wurde für alle drei Werkstoffe eine Reibzahl von 0,05 stellvertretend für den beölte Kontaktfall festgelegt, welche entsprechend der Streifenziehversuche einer realistischen Reibzahl entspricht. Für DCo4 wurde die Reibung anschließend bis 0,20 erhöht, während die Reibung für AA5182 bis zu 0,35 und für AA6014 bis zu 0,55 erhöht wurde. Diese Reibzahlen entsprechen den in den trockenen Versuchsreihen maximal erreichten Werten für die untersuchten Werkstoffe, welche noch unterhalb der größtmöglichen Reibzahl von 0,577 liegen. Die Variantensimulationen wurden in Abhängigkeit von der jeweiligen Reibzahl hinsichtlich der maximalen Stempelkräfte und der Kraft-Weg-Verläufe ausgewertet, die in Bild 27 (a) für alle drei Blechwerkstoffe dargestellt sind.

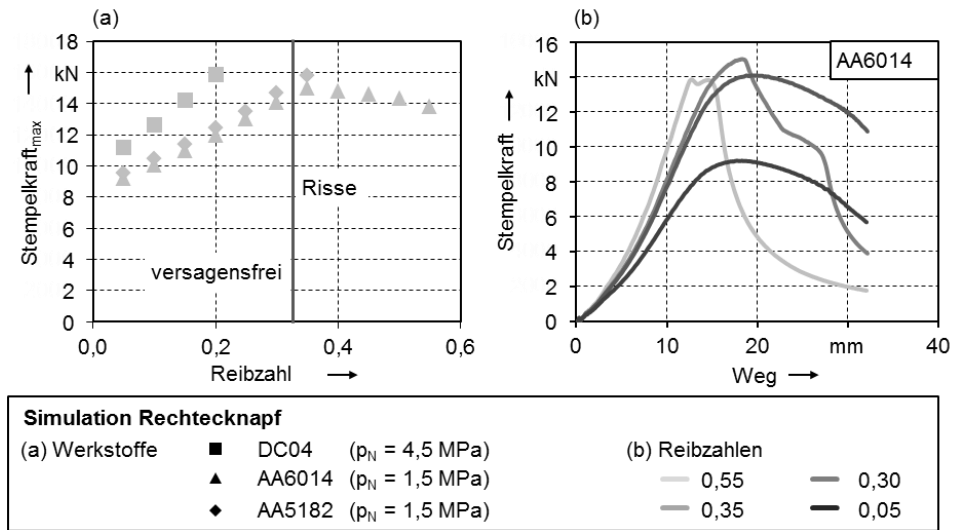


Bild 27: Gegenüberstellung von (a) der maximalen Stempelkräfte in Abhängigkeit von der Reibzahl für DC04, AA6014 und AA5182 und von (b) den Kraft-Weg-Verläufen in Abhängigkeit ausgewählter Reibzahlen für AA6014

Für den Blechwerkstoff DC04 entstehen bei gleicher Reibung höhere Maximalkräfte aufgrund der höheren Fließspannung des Tiefziehstahls gegenüber den beiden Aluminiumlegierungen, welche auf einem annähernd identischen Niveau liegen. Bis zu einer Reibzahl von 0,35 ist ein linearer Anstieg der maximalen Stempelkräfte zu verzeichnen. Wird die Reibung weiter erhöht, sinken die Maximalkräfte. Was zunächst widersprüchlich erscheint, kann anhand der ausgewählten Kraft-Weg-Verläufe in Bild 27 (b) begründet werden. Ab einer Reibzahl von 0,35 kommt es lokal zu einer so starken Verzerrung der Finiten Elemente, dass die Simulation ein Versagen des Blechs berechnet, wodurch es zu einem schlagartigen Abfall der Stempelkraft kommt. Je höher die Reibung wird, desto weniger Material fließt aus dem Flansch in die Zarge. Daraus resultiert ein verstärktes Ausdünnen des Blechs in der Zarge und die übertragbare Kraft sinkt mit steigender Reibzahl. Da die Versagensermittlung in der Simulation jedoch auf numerischen Effekten und nicht auf einer physikalischen Modellierung des Versagensverhaltens beruht, ist ein zusätzlicher Vergleich der Dehnpfade mit der experimentell ermittelten FLC notwendig. Liegen die Dehnungen unterhalb der werkstoffspezifischen FLC, kann ein Versagen ausgeschlossen werden. In Bild 28 sind exemplarisch die Dehnpfade aller drei Werkstoffe für die jeweils niedrigste und höchste Reibzahl zum Zeitschritt 310 dargestellt, was einer Ziehtiefe von knapp über 27 mm

entspricht. Für beide Aluminiumlegierungen ist zusätzlich der Dehnpfad aus dem Simulationsmodell mit der größtmöglichen Reibzahl dargestellt, bei der die Dehnpfade zum Zeitschritt 310 gerade noch unterhalb der FLC liegen. Diese maximal zulässige Reibzahl liegt für beide Aluminiumlegierungen bei 0,30. Ab einer Reibzahl von 0,35 würde für beide Aluminiumlegierungen ein Versagen durch Risse eintreten, was durch die Lage der Dehnpfade oberhalb der FLC deutlich wird.

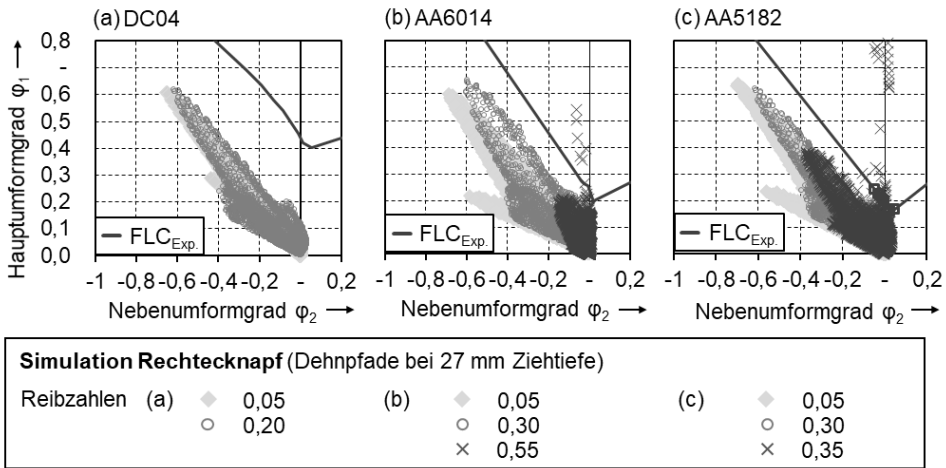


Bild 28: Dehnpfade bei einer Ziehtiefe von 27 mm für (a) DC04, (b) AA6014 und (c) AA5182 bei variierenden Reibzahlen

Die Haupt- und Nebenumformgrade für den Tiefziehstahl liegen für Reibzahlen von 0,05 und 0,20 unterhalb der FLC, weshalb für DC04 in Übereinstimmung mit den experimentellen Versuchen aus Abschnitt 5.1 auch ohne Schmierstoff kein Versagen zu erwarten ist. Liegt bei beiden Aluminiumlegierungen eine Reibzahl von 0,30 oder weniger vor, können die Rechtecknäpfe rissfrei tiefgezogen werden, da die maximalen Dehnungen unterhalb der FLC liegen. Bei den maximalen Reibzahlen von 0,55 für AA6014 und 0,35 für AA5182 steigen die Hauptumformgrade deutlich an, während die Nebenumformgrade nahe Null liegen. Dies bedeutet, dass überwiegend Zugspannungen in der Blechebene vorliegen, welche zu einem Fließen des Materials aus der Blechdicke führen. Das Fließen aus der Blechdicke verursacht ein zunehmendes Ausdünnen bis hin zum Versagen durch Riss. Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, dass die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Oberflächenmodifikationen Reibzahlen von unter 0,35 für beide Aluminiumlegierungen ermöglichen müssen, um zielführend für das Trockentiefziehen eingesetzt werden zu können. Dies

ist besonders für den Werkstoff AA6014 relevant, welcher im direkten Kontakt zu konventionellen Werkzeugoberflächen deutlich höhere Reibzahlen aufweist und daher vorzeitig zu Rissen führt. Für DCo4 ist anzustreben, dass die Oberflächenmodifikationen Reibzahlen unterhalb von 0,20 ermöglichen, um in jedem Fall niedrigere Reibzahlen als im Kontakt zu konventionellen, nicht modifizierten Werkzeugoberflächen zu gewährleisten. Da die FLC lediglich das Versagen bei linearen Dehnpfaden abbildet und auch Chargenschwankungen einen Einfluss auf die Versagensgrenze besitzen, ist es in der Praxis üblich, einen Sicherheitsfaktor von 10 bis 20 % zu berücksichtigen [161]. Bei einer Reibzahl von 0,30 und einem Ziehweg von 27 mm lagen die maximalen Dehnungen bereits nahe an der Grenze der Formänderung. Für die gewählten Prozessparameter und den Platinenzuschnitt wird bei Verbleib eines Restflansches eine maximale Ziehtiefe von 32 mm erreicht. Um sicherzugehen, dass mit den Oberflächenmodifikationen diese maximale Napfhöhe unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors erreicht wird, werden die Simulationen für beide Aluminiumlegierungen erneut bei einer Ziehtiefe von 32 mm für Reibzahlen von 0,30 und kleiner ausgewertet. Die Lage der Dehnpfade im Vergleich zur 80 %-Grenze der FLC ist in Bild 29 dargestellt. Für beide Werkstoffe wird die FLC unter Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors bei Reibzahlen von 0,30 überschritten. Demnach sind zur Erzielung der maximalen Ziehtiefe niedrigere Reibzahlen erforderlich. Wird die Reibung auf 0,20 reduziert, liegen die Dehnpfade für den Werkstoff AA6014 unterhalb der 80 %-Grenze der FLC. Für die Aluminiumlegierung AA5182 ist aufgrund der geringeren Grenzformänderung eine weitere Reduktion der Reibzahl auf 0,15 notwendig, um auch bei einer Ziehtiefe von 32 mm im prozesssicheren Bereich zu liegen. Bezogen auf das rissfreie Trockentiefziehen von Rechteckknäpfen werden Oberflächenmodifikationen benötigt, welche die Reibung für AA5182 auf weniger als 0,20 und für AA6014 auf weniger als 0,30 reduzieren.

Für den Tiefziehstahl DCo4 kann aus der Simulation keine minimal erforderliche Reduzierung der Reibzahl abgeleitet werden, da auch für die maximal erreichten Reibzahlen von 0,20 im direkten Kontakt zu konventionellen Oberflächen ein versagensfreies Tiefziehen möglich war. Neben den Zielwerten für die Reibzahl ist zu berücksichtigen, dass der Verschleiß reduziert werden muss, um eine deutliche Verbesserung der Oberflächenqualitäten gegenüber den in Abschnitt 5.1 gezeigten zu erreichen.

5 Definition von Anforderungen an Oberflächenmodifikationen für das Trockentiefziehen

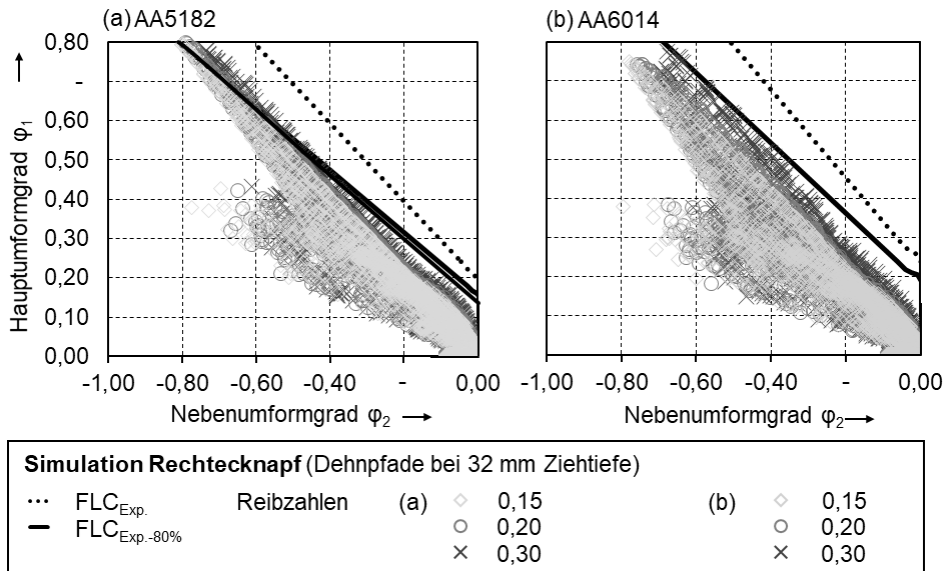


Bild 29: Dehnpfade bei einer Ziehtiefe von 32 mm unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors von 20 % für (a) AA5182 und (b) AA6014

6 Erforschung der Oberflächenmodifikationen im Labormaßstab

Die Ergebnisse der tribologischen Laborversuche und des schmierstofffreien Tiefziehens von Rechtecknägeln mit konventionellen Werkzeugen haben den Bedarf zur Entwicklung von Oberflächenmodifikationen für die Realisierung des Trockentiefziehens aufgezeigt. Die Werkzeugoberflächen wurden im Rahmen dieser Arbeit durch Beschichtungen sowie lasergenerierte Mikrostrukturen modifiziert. Das tribologische Einsatzverhalten der werkzeugseitigen Modifikationen wird in Streifenziehversuchen analysiert. Erkenntnisse über das Verschleißverhalten werden durch eine Charakterisierung der Werkzeug- und Werkstückoberflächen gewonnen. Abschließend erfolgt die Bewertung und Auswahl der Modifikationen anhand des Potentials zur Reibungsbeeinflussung und Verschleißreduktion.

6.1 Entwicklung von Oberflächenmodifikationen

Zunächst gilt es, Maßnahmen zu entwickeln, welche die Reibung reduzieren und den dominierenden, adhäsiven Verschleiß verhindern. Wie im Abschnitt 2.2.2 dargelegt, gelten amorphe Kohlenstoffschichten als besonders vielversprechende Werkzeugbeschichtungen für schmierstofffreie Kontaktbedingungen. Weitere Ansätze zur Beeinflussung von Reibung und Verschleiß bieten laserbasierte Modifikationen der Werkzeugoberflächen. Durch Mikrostrukturen, welche in einem Laserbearbeitungsprozess erzeugt werden, ist es beispielsweise möglich, den Werkstofffluss durch eine Reibungserhöhung oder -reduzierung zu steuern. Die in dieser Arbeit entwickelten Oberflächenmodifikationen werden im Folgenden näher erläutert.

6.1.1 Amorphe Kohlenstoffschichten

Amorphe Kohlenstoffschichten, auch DLC-Schichten genannt, sind chemisch inert gegenüber Metallen und verfügen über eine hohe Härte [134]. Diese Eigenschaften sind für den Einsatz im Trockentiefziehen entscheidend, da sie die adhäsiven Bindungskräfte zwischen den Kontaktkörpern reduzieren und die Verschleißbeständigkeit erhöhen. Im Nachfolgenden wird die Auswahl der in dieser Arbeit untersuchten DLC-Schichten erläutert.

Schichtauswahl anhand tribologisch relevanter Schichteigenschaften

Amorphe Kohlenstoffschichten besitzen – anders als beispielsweise kristalline Festkörper – keine Fernordnung der Moleküle. Es liegt also keine gleichmäßige Anordnung der Moleküle über eine große Anzahl an Teilchen vor. Im Gegensatz dazu existieren für die Nahordnung, welche eine regelmäßige Gruppierung der in der Nähe des Bezugsteilchens liegenden Moleküle beschreibt, zwei verschiedene Hybridisierungszustände (sp^2 , sp^3), welche die mechanischen Eigenschaften der Schicht beeinflussen. Entsprechend der Hybridisierung werden DLC-Schichten in einem ternären Phasendiagramm nach ihrem Graphit- (sp^2) und Diamantanteil (sp^3) sowie nach ihrem Wasserstoffgehalt klassifiziert [162]. Eine ringförmige Anordnung von jeweils vier Atomen in einer Ebene beschreibt eine sp^2 -Hybridisierung, bei der die Kohlenstoffatome in Form von Graphit vorliegen. Bildet jedes Atom mit vier benachbarten Atomen eine tetraedische Anordnung mit gleichbleibend geringem Abstand zwischen den Atomen aus, besitzt die Schicht eine sp^3 -Hybridisierung, in welcher der Kohlenstoff in Diamantform vorliegt. Ein überwiegender Graphitanteil führt zu einer weicheren Schicht, da die Bindung zwischen den ringförmig angeordneten Atomlagen aufgrund des größeren Abstands zwischen den einzelnen Lagen geringer ist. Beim Anlegen von äußeren Kräften können diese Lagen mit geringem Widerstand gegeneinander verschoben werden, woraus die schmierende Wirkung von Graphit resultiert. Bei der tetraedischen Anordnung der sp^3 -Hybridisierung bestehen hingegen hohe Bindungskräfte in allen Raumrichtungen, woraus eine hohe Härte resultiert. Neben der Hybridisierung der Atome ist der Wasserstoffanteil entscheidend für die Schichteigenschaften. Da alle amorphen Kohlenstoffschichten über einen gewissen Wasserstoffanteil verfügen, wird erst ab 3 At-% von einer wasserstoffhaltigen DLC-Schicht gesprochen. Ein hoher Wasserstoffanteil verringert den Grad der Vernetzung durch die Unterbrechung des Kohlenstoffgefüges sowie ein Herabsetzen der Dichte und bewirkt somit eine geringere Härte der Schicht. DLC-Schichten werden häufig mit zusätzlichen Elementen wie Wolfram dotiert, um die Schichthaftung zu verbessern, die Eigenspannungen in den Schichten zu reduzieren und deren Duktilität zu erhöhen [163]. Aus diesem Grund wurden W-dotierte Schichten in den vergangenen Jahren zur Anwendung auf Werkzeugoberflächen für die Massivumformung sowie Blechmassivumformung weiterentwickelt. Ihr erfolgreicher Einsatz bei geschmierten Kontaktbedingungen wurde unter anderem in [164] nachgewiesen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden wasserstofffreie ta-C-Schichten ($H \leq 3 \text{ At-}\%$) untersucht, welche einen hohen sp^3 -Anteil besitzen, und wasserstoffhaltige a-C:H:W- sowie a-C:H-Schichten ($H > 35 \text{ At-}\%$), welche deutlich geringere sp^3 -Anteile aufweisen. Somit wird ein breites Eigenschaftenspektrum der DLC-Schichten auf ihre Eignung für den direkten Werkzeug-Werkstück-Kontakt untersucht. Die Einordnung der untersuchten Schichten innerhalb des ternären Phasendiagramms ist in Bild 30 (a) und deren Aufbau in Bild 30 (b) dargestellt.

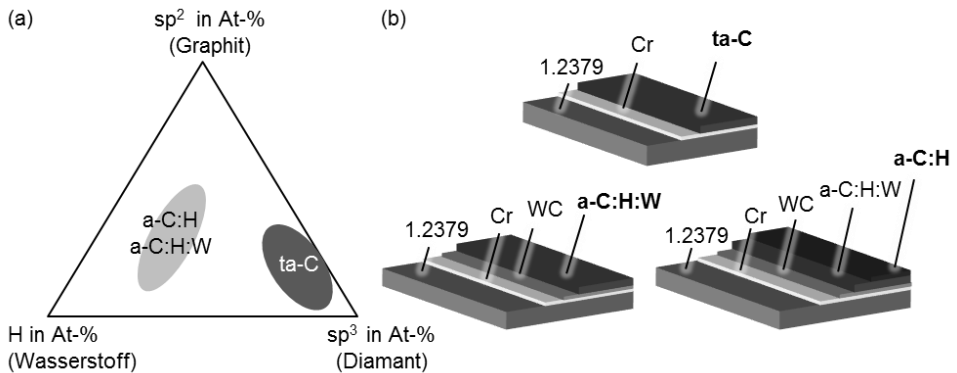


Bild 30: (a) Klassifizierung untersuchter DLC-Schichten und (b) Schichtaufbau nach [165]

Durch die Untersuchung des tribologischen Verhaltens von DLC-Schichten mit unterschiedlichen chemischen und mechanischen Eigenschaften können Rückschlüsse auf die Wechselwirkung zwischen Schichteigenschaften und tribologischen Bedingungen gezogen werden. Der Einfluss mechanischer Eigenschaften kann durch Vergleiche von ta-C und a-C:H analysiert werden. Durch das Dotieren von a-C:H mit Wolfram wird evaluiert, ob neben der chemischen Struktur auch die Schichtzusammensetzung das tribologische Verhalten beeinflusst.

Schichtherstellungsprozess und resultierende Schichteigenschaften

Zur Gewährleistung einer hohen Haftfestigkeit der Schichten am Substrat wurde nach dem Plasmaätzprozess eine 100 bis 200 nm dünne Chromhaftvermittlungsschicht auf den Werkzeugstahl abgeschieden. Zwischen den verschiedenen Schichtlagen existieren verfahrensbedingt jeweils gradierte Übergänge im Bereich weniger Nanometer, welche jedoch einen untergeordneten Einfluss auf die tribologisch relevanten Schichteigenschaften besitzen.

Das ta-C-Schichtsystem besteht aus einer gesputterten Chromhaftvermittlungsschicht, um eine möglichst niedrige Rauheit der Funktionsschicht zu gewährleisten. Die ta-C-Funktionsschicht wurde durch Verwendung der Laser-Arc-Technologie erzeugt. Durch einen Laserpuls wird eine Vakuumbogenentladung an der Graphitkathodenwalze gezündet, wodurch ein Plasma aus ionisierten, hochenergetischen Kohlenstoffteilchen erzeugt wird. Sämtliche ta-C-Schichten wurden in einer Forschungsanlage der Firma HOT bei gleichbleibenden Beschichtungsparametern abgeschieden. Geändert wurde lediglich die Beschichtungsdauer in zwei Stufen, um die Schichtdicke zu variieren. Die resultierenden Schichteigenschaften hinsichtlich Härte und Dicke sind in Tabelle 7 angegeben.

Tabelle 7: Eigenschaften der ta-C-Schichten nach dem Beschichten (MW = Mittelwert)

Funktionsschicht	Schichtdicke ta-C in μm	Vickershärte HV _{0,001}		
		Min.	Max.	MW
ta-C	0,6 - 0,8	3.000	6.000	4.000
ta-C (dick)	1,3	3.500	6.450	4.900

Die standardmäßig verwendeten ta-C-Schichten verfügen über eine Schichtdicke zwischen 0,6 μm und 0,8 μm . Für die Forschungsaktivitäten dieser Arbeit werden zusätzlich circa 1,3 μm dicke ta-C-Schichten genutzt, welche mit dem Zusatz „(dick)“ gekennzeichnet sind. Aufgrund der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Herausforderungen bei den Härtemessungen resultiert ein großer Streubereich der Härte zwischen 3.000 HV_{0,001} und 6.450 HV_{0,001}.

Die a-C:H:W und a-C:H-Schichten wurden am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik in der Physical Vapour Deposition/Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition (PVD/PACVD) Beschichtungsanlage TT-300 der Firma HOT erzeugt. Für diese beiden Schichtvarianten wurde die Cr-Schicht durch das PVD-Verfahren Lichtbogenverdampfen abgeschieden. Die WC-Zwischenschicht wurde durch das PVD-Verfahren Unbalanced-Magnetronsputtern erzeugt. Dabei beschränkt sich das Sputtermagnetfeld nicht auf den kathodennahen Bereich, sondern reicht weit in den Beschichtungsraum hinein. Dies bewirkt, dass verstärkt höherenergetische Ionen des Sputtergases auf die zu beschichtenden Proben gelenkt werden. Anschließend wurde für beide Varianten eine a-C:H:W-Schicht abgeschieden, auf welche zur Untersuchung des Einflusses der Dotierungselemente in einigen Versuchsreihen eine a-C:H-Funktionsschicht abgeschieden wurde. Die a-C:H:W-Funktionsschicht wurde durch reaktives

Magnetronspütern in einer Argon-Acetylen-Atmosphäre (Ar, C₂H₂) unter Verwendung eines binderfreien Wolframkarbid-Targets hergestellt. Die optionale a-C:H-Funktionsschicht wurde ebenso durch ein PACVD-Verfahren mit C₂H₂ als Präkursorgas abgeschieden. Während der Herstellung der a-C:H-Schicht wurde die Leistung des Wolframkarbid-Targets auf 0 kW gesetzt, da es sich um einen reinen PACVD-Prozess ohne physikalische Gasphasenabscheidung handelt. Die a-C:H:W-Funktionsschichten wurden bei einer Biasspannung von 130 und 203 V abgeschieden. Durch die Variation der Targetleistung zwischen 1,2 und 1,6 kW und des C₂H₂-Gasflusses zwischen 30 und 60 sccm wurde der Wolframanteil in drei Stufen niedrig, mittel und hoch (Tabelle 8) variiert. Je niedriger die Targetleistung und je höher der C₂H₂-Gasfluss ist, desto niedriger wird der Wolframanteil in der Schicht. Die Entwicklung einer geeigneten a-C:H-Schichtvariante für das Trockentiefziehen ist in [166] ausführlich dargestellt. Für die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit wurden die a-C:H-Schichten bei einer Biasspannung von 550 V, einer Temperatur von 80 °C und einem Gasfluss von 260 sccm in einem Verhältnis von C₂H₂/Ar = 5,5:1 abgeschieden, da sich dieses Schichtrezept in schmierstofffreien Tribometerversuchen als vorteilhaft erwiesen hat. Die Eigenschaften der untersuchten a-C:H:W und a-C:H-Schichten sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Eigenschaften der a-C:H:W- und a-C:H-Schichten nach dem Beschichten (MW = Mittelwert)

Funktions- schicht	Schichtdicke gesamt in µm	W-Anteil in Gew.-%	Vickershärte HV _{0,001}		
			Min.	Max.	MW
a-C:H:W (niedrig)	1,4	12	550	1.300	840
a-C:H:W (mittel)	5,9	63	810	1.180	990
a-C:H:W (hoch)	2,2	81	740	1.420	1.050
a-C:H	2,3	-	1.050	2.600	1.850

Die Schichtdicken wurden durch die jeweiligen Beschichter ermittelt. Die variierende Dicke des gesamten Schichtsystems ist bedingt durch unterschiedliche Beschichtungsdauern und -parameter, die die Abscheiderate beeinflussen. Mit sinkendem Diamant- und steigendem Graphitanteil wird die Schichthärte deutlich reduziert. Daher ist die Härte der a-C:H-Schichten nur etwa halb so groß wie die der ta-C-Schichten. Ein weiteres Halbieren der Härte im Vergleich zu a-C:H resultiert aus dem Dotieren mit Wolfram für die a-C:H:W-Schichten.

Weitere Schichteigenschaften wie die Haftfestigkeit wurden durch den jeweiligen Schichthersteller gemessen und dokumentiert. Gemäß der Haftfestigkeitsklassen nach VDI Richtlinie [167] wurden für alle Schichtvarianten Haftfestigkeiten zwischen 1 – 4 HF erreicht, sodass die Haftung am Substrat für die tribologischen Untersuchungen gewährleistet wurde. Da ein Versagen der Schicht durch eine zu geringe Haftung am Substrat ausgeschlossen werden kann, wird kein Einfluss der Haftfestigkeit auf die Reibung erwartet.

Untersuchte Einflussgrößen bezogen auf das tribologische Einsatzverhalten

Die entwickelten Schichten wurden nach einer Charakterisierung des Ausgangszustandes auf ihr Reibungs- und Verschleißverhalten im schmierstofffreien Kontakt untersucht. Neben dem prinzipiellen Einsatzverhalten der ausgewählten DLC-Schichten wird der Einfluss einer metallischen Dotierung, der Rauheit und der Prozessparameter untersucht. Es wird erwartet, dass die Variation des W-Gehaltes Einfluss auf das Adhäsionsverhalten der direkt im Kontakt stehenden Blechoberflächen nimmt. Aus Abschnitt 2.2.2 ist bekannt, dass die Rauheit beschichteter Oberflächen besonders unter trockenen Bedingungen einen entscheidenden Einfluss auf das Reibverhalten besitzt. Daher wird untersucht, inwiefern unterschiedliche Rauheitszustände vor und nach dem Beschichten zu einer Veränderung der tribologischen Bedingungen führen. Der Ausgangszustand wurde durch Läppen und Polieren der Oberflächen variiert. Nach dem Beschichten wurde ein manueller mechanischer Nachbehandlungsprozess in Form von Bürsten und Polieren durch den Beschichter vorgenommen. Zur Anpassung der Rauheit nach dem Beschichten erfolgte in einigen Versuchsreihen keine Nachbehandlung der Schichten. In Abschnitt 5.1.1 wurde nachgewiesen, dass die Parameter Flächenpressung und Relativgeschwindigkeit die Reibbedingungen im beölten Fall beeinflussen, wohingegen im trockenen Fall mit konventionellen Werkzeugen keine deutliche Variation der Reibzahlen gemessen werden konnte. Um zu überprüfen, ob die Prozessparameter auch bei beschichteten Werkzeugen eine untergeordnete Rolle spielen, werden diese stichprobenartig variiert. Einige Schichtvarianten wurden außerdem in einem weiteren Bearbeitungsschritt mit den im Nachfolgenden beschriebenen laserbasierten Maßnahmen modifiziert.

6.1.2 Lasergenerierte Oberflächenmodifikationen

Neben den Werkzeugbeschichtungen werden im Rahmen dieser Arbeit laserbasierte Modifikationen an beschichteten und unbeschichteten Werkzeugoberflächen untersucht. Ein Vorteil der Laserbearbeitung stellt das hohe Maß an Flexibilität dar, welches es ermöglicht, Umformwerkzeuge für den späteren Einsatz in der Trockenumformung lokal begrenzt zu modifizieren. Eine Maßnahme zur lokalen Reibungsbeeinflussung stellt die Mikrostrukturierung der Werkzeugoberflächen dar. In beöhlten Prozessen dienen Mikrostrukturen häufig als Schmierstoffreservoir und tragen somit unmittelbar zu einer Reibungsreduzierung bei [168]. Der Reibungseinfluss von Strukturen im trockenen Kontakt hängt jedoch in hohem Maße von den jeweiligen Kontaktbedingungen ab.

Auswahl der Mikrostrukturen anhand tribologisch relevanter Eigenschaften

Einige Ansätze zur gezielten Einstellung der Reibbedingungen mittels Mikrostrukturen im schmierstofffreien Kontakt wurden in Abschnitt 2.2.2 dargestellt. Eine übersichtliche Zusammenfassung der dort untersuchten Strukturmerkmale, welche im direkten Werkzeug-Werkstück-Kontakt analysiert wurden, ist Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Übersicht zu bereits untersuchten Struktureigenschaften im trockenen Kontakt

Quelle	Strukturformen	Flächendeckung	Dimension in μm	Tiefe in μm	Orientierung*	Laborversuch	Tribologisches Verhalten
Gachot [106]	Linien	Abstand: 5 / 9 / 18 μm	5	1,0	$0^\circ / 90^\circ$	Nano-tribometer	$\mu\downarrow$ (Orientierungsabhängig)
Segu [169]	Kreise Dreiecke Quadrate	7 / 12 / 15 / 20 %	\emptyset 500 250 250	5,5	- - -	Tribometer	$\mu\downarrow$ (mit \uparrow Flächen- deckung)
Roch [110]	Linien Kreise	Abstand: 5 μm	5	5,0	$0^\circ/90^\circ$	Tribometer	$\mu\downarrow\uparrow$ (Laserfluenz-, Orientierungsab- hängig)
Petters on [108]	Linien Quadrate	25 % 25 %	5 / 20 / 50 5 / 20 / 50	5,0 5,0	90°	Tribometer	$\mu\uparrow$ (bei DLC) $\mu\downarrow$ (bei TiN)

Beschichtung: *vorhanden* / *keine*; *: zur Relativbewegung; $\mu\downarrow\uparrow$: im Vgl. zu Proben ohne Strukturen

Die Wahl der Struktureigenschaften für die vorliegende Arbeit orientierte sich an Eigenschaften, für welche in der Literatur bereits eine Reibungsbeeinflussung nachgewiesen wurde. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass die bereits vorhandenen Ergebnisse direkt übertragbar sind, da die oben aufgeführten Strukturen in geschlossenen Tribosystemen mit sehr kleinen bis punktförmigen Kontaktflächen untersucht wurden. Um ein möglichst breites Spektrum an Formen zu berücksichtigen, wurden linien- und rechteckförmige Elemente analysiert, da diese in den bisherigen Untersuchungen ein vielversprechendes Einsatzverhalten aufwiesen. So ist es gelungen, mit linienförmigen Strukturen auf ta-C-Schichten eine knapp 30 %-ige Reibungsreduktion zu erzielen [110]. Damit der Einfluss der Strukturform vergleichbar bleibt, wurden ähnliche Dimensionen für Rechtecke und Linien definiert. Die Rechtecke besitzen eine Länge von 500 μm und eine variierende Breite von 100 und 200 μm . Die Breite der Linien wird auf 200 μm mit einer Orientierung von 0° zur Ziehrichtung festgelegt, da diese Ausrichtung im Vergleich zu 90° laut [110] ein größeres Potential zur Reibungsminderung besitzt. Segu et al. [169] wiesen nach, dass ein steigender Flächendeckungsgrad im trockenen Kontakt zu einer Reibungsminderung führt. Deswegen wird auch der Einfluss des Flächendeckungsgrads näher untersucht. Da bisherigen Studien ein direkter Vergleich der Tiefe der Strukturen fehlt, wurde die Strukturtiefe im Rahmen dieser Arbeit in zwei Stufen variiert. Zur Einstellung der genannten Struktureigenschaften werden die im Nachfolgenden beschriebenen Laserbearbeitungsparameter genutzt.

Laserbearbeitungsprozess zur Herstellung der Mikrostrukturen

Zur Herstellung der Strukturen wurde die Pikosekundenlaserstrukturierung gewählt, da diese eine hohe räumliche Genauigkeit bei vernachlässigbarem Wärmeeintrag gewährleistet [170]. Der Strukturierungsprozess wurde am Lehrstuhl für Photonische Technologien (LPT) mittels eines Ultrakurzpulslasers (System Fuego, Firma Time-Bandwidth Products AG) durchgeführt. Dieses System verfügt über eine Pulsdauer von 10 ps, eine maximale Durchschnittsleistung von 50 W bei einer Pulsfrequenz von 8,2 MHz und eine Wellenlänge von 1064 nm. Mit Hilfe des Galvanometerscanners hurryScan 14 (Firma Scanlab GmbH) wird der Laserstrahl auf der Probenoberfläche abgelenkt. Der Strahltaillendurchmesser mit gaußförmigen Intensitätsprofil beträgt 32 μm . Die tribologische Wirkung von Mikrostrukturen im trockenen Kontakt wurde mit blanken und beschichteten Werkzeugen untersucht. Je nach Oberfläche sind unterschiedliche

Parameter zur Erzeugung der Strukturen einzustellen. Die Laserbearbeitungsparameter sind in Abhängigkeit der Werkzeugoberfläche und Tiefe der Strukturen in Tabelle 10 dargestellt. Aufgrund der Rauheit am Strukturboden resultieren für die Angabe der Strukturtiefe gewisse Schwankungen und Streubreiten. Zur Erzeugung rechteckförmiger Strukturen auf unbeschichteten Reibbacken wird das Parameterset RE₀ verwendet. Auf beschichteten Oberflächen werden flache, rechteckförmige Strukturen innerhalb der Schicht durch das Set RE₁ hergestellt. Sollen auf den beschichteten Werkzeugen Strukturen der Tiefe 5 bis 6 µm erzeugt werden, erfolgt nach der Bearbeitung mit Set RE₁ eine weitere Bearbeitung mit Set RE₂. Linienförmige Strukturen mit einer Tiefe von 0,6 bis 0,8 µm innerhalb der Schicht werden durch das Set LI₀ realisiert. Für rechteckförmige Strukturen, welche auf ta-C-Schichten mit einer Dicke von 1,3 µm abge-schieden wurden, wurden in Abhängigkeit der erwünschten Struktur-tiefe die Sets RE₃ oder die Kombination aus RE₃ und RE₄ genutzt. Weitere Details zur Struktur-erzeugung auf beschichteten Oberflächen sind in [171] dargestellt.

Tabelle 10: Laserbearbeitungsparameter zur Struktur-erzeugung (Pulsfrequenz 200 kHz)

Set*	Schicht	Wellenlänge in nm	Spitzenfluenz in J/cm ²	Pulsabstand Vorschub-richtung in µm	Lateraler Bahnabstand in µm	Anzahl Überfahrten	Fokusbildungsdurchmesser in µm	Tiefe in µm
RE ₀	-	1064	0,8	0,5	5	2	32	5,0-6,0
RE ₁	ta-C	1064	0,6	7	12	1	32	0,6-0,8
RE ₂	ta-C	1064	2,6	1,4	10	5	32	5,0-6,0
RE ₃	ta-C	355	1,3	4	6	2	26	~0,5
RE ₄	ta-C	355	1,5	4	6	1	26	~0,9
LI ₀	ta-C	355	1,2	5	8	2	32	0,6-0,8
RE ₅	a-C:H	1064	1,9	5	6	1	24	~0,5

*Strukturform: RE = Rechteckförmig / LI = Linienförmig

Untersuchte Einflussgrößen bezogen auf das tribologische Einsatzverhalten

Da bislang nur wenige Erkenntnisse über das tribologische Verhalten mikrostrukturierter Werkzeuge im schmierstofffreien Fall unter Blechumformbedingungen vorliegen, wird der Einfluss möglichst unterschiedlicher Faktoren untersucht. Um den Versuchsaufwand in einem realisierbaren Rahmen zu halten und gleichzeitig eine Vielzahl an Einflussgrößen zu analysieren, wird nach der One-Factor-at-a-Time-Methode vorgegangen. Die untersuchten Einflussfaktoren sind in Bild 31 zusammengefasst. Die grundlegende Wirkung der Strukturen wird stets im Kontakt zu DCo4 untersucht und, sofern dies verschleißfrei möglich ist, ebenfalls exemplarisch für die Aluminiumlegierung AA5182.

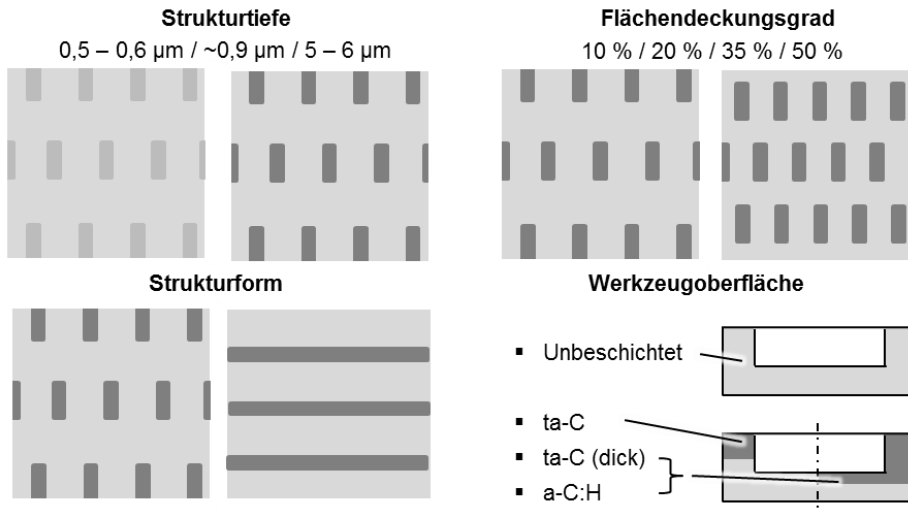


Bild 31: Untersuchte Einflussgrößen mikrostrukturierter Werkzeuge

6.2 Tribologisches Einsatzverhalten

Im folgenden Abschnitt wird das Reibungs- und Verschleißverhalten der mit Beschichtungen und laserbasierten Maßnahmen modifizierten Werkzeugeoberflächen im Laborversuch analysiert. Die Reibzahlen der Oberflächenmodifikationen werden in schmierstofffreien Streifenziehversuchen ermittelt.

6.2.1 Einsatzverhalten amorpher Kohlenstoffschichten

Bezogen auf die amorphen Kohlenstoffschichten wird zunächst der Einfluss der Schichtzusammensetzung durch einen Vergleich von a-C:H- und unterschiedlich stark dotierten a-C:H:W-Schichten analysiert. Anschließend wird die generelle Eignung von ta-C-Schichten sowie der Einfluss der Prozessparameter auf das tribologische Verhalten beschichteter Werkzeuge untersucht. Der Einfluss der Schichtrauheit wird durch unterschiedliche Oberflächenfeinbearbeitung anhand von ta-C- und a-C:H-Schichten evaluiert.

Einfluss der W-Dotierung in a-C:H(:W)-Schichten

Die Auswirkung von wasserstoffhaltigen DLC-Werkzeugbeschichtungen mit und ohne W-Dotierung auf die Reibung wurde zunächst ohne weitere Modifikation der Schichten untersucht. In Streifenziehversuchen wurden die Reibzahlen im trockenen Kontakt zu allen drei ausgewählten Blechwerkstoffen analysiert. Ein Vergleich der wasserstoffhaltigen DLC-Schichten mit und ohne W-Dotierung ist in Bild 32 dargestellt.

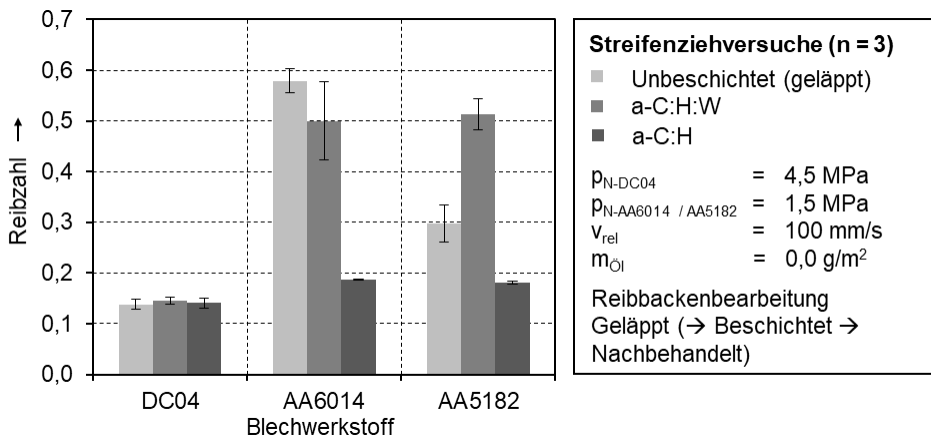


Bild 32: Reibzahlen von a-C:H:W- und a-C:H-beschichteten Reibbacken in Abhängigkeit vom Blechwerkstoff

Für den Werkstoff DCo₄ resultieren unabhängig von der Beschichtung Reibzahlen in einem Bereich um 0,15. Ein Einfluss der W-Dotierung auf die Reibung ist im Kontakt zu DCo₄ nicht zu erkennen. Diese Ergebnisse sind ein weiterer Indikator für die reibungs- und verschleißmindernde Wirkung der Zinkbeschichtung. Da die Zinkschicht bereits für eine Trennung des Werkzeugstahls vom Tiefziehstahl sorgt, bewirkt eine Beschichtung sowie die Variation der chemischen Zusammensetzung keine signifikante Änderung der tribologischen Bedingungen. Hingegen

sind für beide Aluminiumwerkstoffe deutliche Unterschiede erkennbar. Unter Verwendung von a-C:H:W beschichteten Reibbacken sind die Reibzahlen ähnlich hoch und für AA5182 sogar höher als im unbeschichteten Fall. Bei den Versuchen mit einer Reibzahl von über 0,5 fand ein lokales Aufschweißen des Aluminiumwerkstoffs auf den Werkzeugoberflächen statt. Die so ermittelten Reibzahlen enthalten demnach auch Anteile einer lokalen plastischen Verformung an der Blechoberfläche. Da die Adhäsion nicht gleichmäßig auftritt, ergibt sich in diesen Versuchsreihen zudem eine höhere Standardabweichung. Wird auf die a-C:H:W-Schichten eine a-C:H-Funktionsschicht appliziert, wird die Reibzahl für AA6014 und AA5182 von circa 0,5 auf 0,18 deutlich reduziert. Die durch die W-Dotierung eingebrachte metallische Phase in der Schicht scheint die Adhäsionsneigung der Aluminiumwerkstoffe nicht ausreichend zu reduzieren.

Um einen Zusammenhang zwischen Wolframanteil in der Schicht und resultierender Reibung abzuleiten, wurde zunächst versucht, Maßnahmen zu ergreifen, die insgesamt zu einem niedrigeren Reibungsniveau ohne makroskopisch sichtbare Kaltaufschweißungen führen. Dazu wurde die Bearbeitung der Reibbacken um einen Polierschritt vor dem Beschichtungsprozess ergänzt. Am Beispiel von AA5182 konnte gezeigt werden, dass eine Reduzierung der Rpk-Werte von $0,096\ \mu\text{m}$ auf $0,035\ \mu\text{m}$ eine Halbierung der Reibzahlen bewirkt, wie in Bild 33 (a) zu sehen. Für die weiteren Versuche wurde eine niedrigere Werkzeugrauheit verwendet, um den Einfluss der W-Dotierung ohne sofortige Kaltaufschweißungen oder plastische Deformation der Aluminiumstreifen zu analysieren. Die Rpk-Werte der Reibbacken mit variierendem W-Anteil liegen in einem Bereich von $0,022 - 0,040\ \mu\text{m}$. Durch die Variation der Targetleistung und des Gasflusses ist es am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik gelungen, den Wolframanteil in einem großen Bereich zu variieren und einzustellen. In Bild 33 (b) sind die Reibzahlen für Schichten mit einem hohen Wolframanteil von $81 \pm 3\ %$ und einem niedrigen Anteil von $12 \pm 4\ %$ im Vergleich zu a-C:H-Schichten dargestellt.

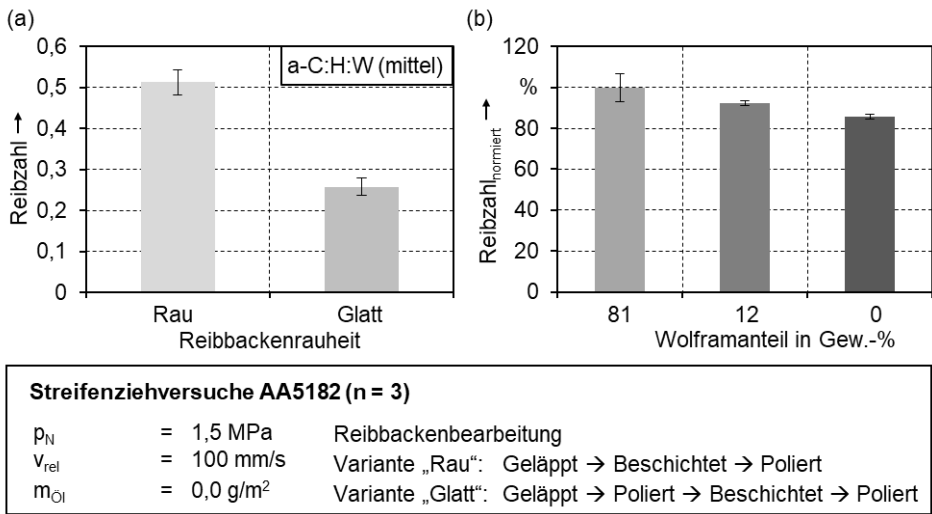


Bild 33: Reibzahlen in Abhängigkeit von (a) der Werkzeugrauheit und (b) dem Wolframanteil in der Funktionsschicht am Beispiel von AA5182

Eine Reduzierung des Wolframanteils führt zu einer Reibungsminderung um 8 % und einer deutlichen Verringerung der Standardabweichung. Ohne Wolfram in der Funktionsschicht ist die Reibung 15 % niedriger als bei einem hohen Wolframanteil. Auch für den Blechwerkstoff DCo4 bewirkte ein niedriger W-Anteil eine über 20 % geringere Reibzahl als ein hoher W-Anteil. Ein direkter Vergleich der a-C:H:W-Schichtvarianten „mittel“ (~ 63 Gew.-% W) mit den Varianten „niedrig“ (~ 12 Gew.-% W) und „hoch“ (~ 81 Gew.-% W) ist aufgrund unterschiedlicher Beschichtungszeiten und Schichtdicken nicht zielführend. Die Schichten mit einem mittleren Wolframanteil, welche auf polierten Substraten abgeschieden wurden, verfügen über eine etwa doppelt so große Schichtdicke und eine etwa um 0,1 höhere Reibzahl bei vergleichbarer Rauheit im Kontakt zu AA5182. Die längere Beschichtungsdauer erhöht die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Wachstumsfehlern, welche als lokale Fehlstellen zu einer Verringerung der Haftfestigkeit und einer unebeneren Schichtoberfläche führen. Aus der Literatur ist bekannt, dass das tribologische Einsatzverhalten bis zu einer kritischen unteren Grenze mit abnehmender Schichtdicke verbessert wird [172]. Niedrigere Reibzahlen und geringere Verschleißraten wurden ebenso in [173] für dünnere DLC-Schichtsysteme nachgewiesen. Ein Grund für das schlechtere Einsatzverhalten bei größerer Schichtdicke wird in den zunehmenden Eigenspannungen gesehen [174].

Strondl et al. belegten in Tribometerversuchen mit beschichteten Siliziumwafern im Kontakt zu Al_2O_3 -Kugeln, dass W-dotierte DLC-Schichten für den schmierstofffreien Kontakt weniger geeignet sind als nicht-dotierte a-C:H-Schichten [175]. Entsprechend der Ergebnisse aus den anwendungsnäheren Streifenziehversuchen gilt dieser Zusammenhang auch im trockenen Kontakt zu Aluminiumlegierungen. Dies verdeutlicht zum einen der Vergleich zwischen a-C:H- und a-C:H:W-Schichten in Bild 32 sowie die positive Korrelation eines steigenden W-Anteils mit der Reibzahl in Bild 33 (b). Da die Werkzeuge in der Blechumformung geringen Beanspruchungen ausgesetzt sind, wird in weiteren Untersuchungen zugunsten niedrigerer Reibzahlen auf duktilitätserhöhende metallische Dotierungen verzichtet.

Einsatzverhalten von ta-C-Schichten und Einfluss der Prozessparameter

Neben den a-C:H-Schichten, deren vorteilhaftes Einsatzverhalten im schmierstofffreien Kontakt bereits in Bild 32 gezeigt wurde, wurde das tribologische Verhalten von wasserstofffreien ta-C-Schichten näher analysiert. Die in Streifenziehversuchen ermittelten Reibzahlen im direkten Kontakt von ta-C-beschichteten Werkzeugoberflächen mit DCo₄ sowie AA6014 und AA5182 sind in Bild 34 dargestellt. Für DCo₄ resultieren, wie bereits bei den wasserstoffhaltigen DLC-Schichten festgestellt, mit und ohne Beschichtungen ähnliche Reibverhältnisse. Dies bestätigt die Annahme, dass durch die Zinkbeschichtung der DCo₄-Streifen bereits eine ausreichende Trennung von Werkzeugstahl und Werkstückwerkstoff realisiert wird.

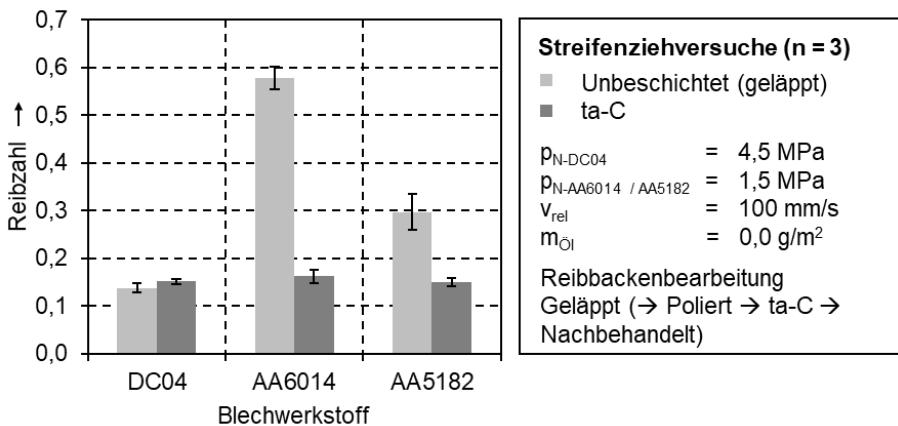


Bild 34: Reibzahlen von ta-C-beschichteten Reibbacken in Abhängigkeit vom Blechwerkstoff

Im Vergleich zu unbeschichteten Werkzeugoberflächen liegt beim Kontakt von AA6014 mit ta-C-Schichten eine Reibungsreduktion um den Faktor 3,5 und für AA5182 um den Faktor 2 vor. Unabhängig vom Blechwerkstoff bewirken ta-C-beschichtete Reibbacken Reibzahlen um 0,15 bei einer hohen Wiederholgenauigkeit mit Standardabweichungen zwischen 0,005 und 0,013. In Abschnitt 5.1 wurde mit unbeschichteten Reibbacken festgestellt, dass die Prozessparameter Flächenpressung und Relativgeschwindigkeit im schmierstofffreien Kontakt keinen signifikanten Einfluss auf die Reibzahl besitzen. Um dies zu bestätigen, wurden stichprobenartig für ta-C-beschichtete Werkzeuge pro Blechwerkstoff drei verschiedene Flächenpressungen bei konstanter Relativgeschwindigkeit und drei verschiedene Relativgeschwindigkeiten bei konstanten Flächenpressungen untersucht. Die Flächenpressungen und Geschwindigkeiten liegen in einem für Tiefziehprozesse typischen Bereich. Die Reibzahlen für variierende Flächenpressungen und variierende Geschwindigkeiten sind in Bild 35 dargestellt.

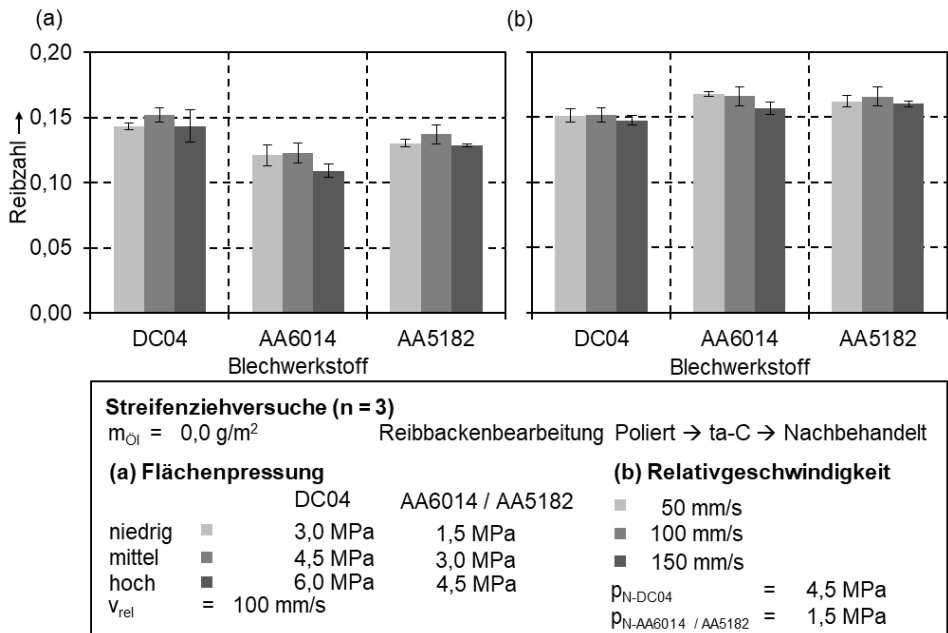


Bild 35: Reibzahlen von ta-C-beschichteten Reibbacken in Abhängigkeit des Blechwerkstoffes und (a) der Flächenpressung sowie (b) der Relativgeschwindigkeit

Unabhängig vom Blechwerkstoff wird kein signifikanter Einfluss von Flächenpressungen im Bereich von 1,5 bis 6,0 MPa und Relativgeschwindigkeit zwischen 50 und 150 mm/s auf die Reibzahl festgestellt. Für AA6014

und AA5182 werden bei der höchsten untersuchten Flächenpressung von 4,5 MPa für Aluminiumlegierungen die niedrigsten Reibzahlen ermittelt. In beiden Fällen liegt die Standardabweichung jedoch im Bereich der Reibzahlen für 3,0 und 1,5 MPa. Bei Relativgeschwindigkeiten von 150 mm/s werden für alle drei Blechwerkstoffe die geringsten Reibzahlen festgestellt, jedoch liegt die Variation der Reibung auch hier im Bereich der Standardabweichung. Diese Ergebnisse bestätigen die in Abschnitt 5.1 abgeleitete Erkenntnis über eine geringere Beeinflussung der tribologischen Bedingungen durch die Prozessparameter Flächenpressung und Geschwindigkeit im schmierstofffreien Fall. In weiteren Versuchsreihen zur Analyse des tribologischen Einsatzverhaltens von modifizierten Werkzeugoberflächen wird daher auf eine Variation von Flächenpressung und Relativgeschwindigkeit verzichtet. Ein Vergleich der Reibzahlen in Bild 35 (a) und (b) zeigt, dass bei der Variation der Flächenpressung für AA6014 und AA5182 mit Reibzahlen zwischen 0,11 und 0,14 deutlich niedrigere Werte erreicht wurden als in (b) mit Reibzahlen um 0,16. Bei den drei verwendeten Reibbackenpaaren in Bild 35 (a) und (b) handelt es sich um Beschichtungen aus unterschiedlichen Chargen, wobei die Reibbackenpaare der Charge in Bild 35 (b) vor den Streifenziehversuchen einen mindestens 10 % höheren Rpk-Wert aufwiesen. Somit wird auch in diesen Versuchsreihen eine Beeinflussung der Reibzahlen durch die Werkzeugrauheit deutlich. Eine gezielte Untersuchung des Rauheitseinflusses erfolgt im nächsten Abschnitt.

Einfluss der Werkzeugrauheit für ta-C- und a-C:H-Schichten

Der Einfluss der Oberflächenrauheit der modifizierten Werkzeugoberflächen wurde gezielt in weiteren Testreihen mit unterschiedlichen Oberflächenbearbeitungen analysiert. Die Feinbearbeitung der Oberflächen wurde für die ta-C-Schichten in drei Stufen variiert, wodurch unterschiedliche Rpk-Werte auf den beschichteten Reibbacken realisiert wurden. Erfolgt ein zusätzliches Polieren vor dem Beschichten und ein Bürsten nach dem Beschichten, resultierten mit Rpk-Werten von unter $0,05 \mu\text{m}$ die geringsten Rauheitswerte. Werden die Schichten direkt auf den geläppten Ausgangsoberflächen abgeschieden und nach dem Beschichtungsprozess gebürstet, liegen die Rpk-Werte in einem Bereich zwischen $0,13$ und $0,16 \mu\text{m}$. Bei einem Abscheiden der ta-C-Schichten auf polierten Oberflächen ohne Nachbehandlung wurden die höchsten reduzierten Spitzenhöhen mit Werten zwischen $0,29$ und $0,34 \mu\text{m}$ ermittelt. In Abhängigkeit der Rauheit der ta-C-beschichteten Reibbacken resultiert ein variierendes Reibverhalten, welches in Bild 36 (a) dargestellt ist. Es ist eine positive Korrelation zwischen der Rauheit - abgebildet durch Rpk -

und der Reibzahl zu erkennen. Dieser Zusammenhang ist für AA6014 und AA5182 im untersuchten Rauheitsbereich nahezu linear. Die Reibzahlen steigen mit zunehmender Rauheit für beide Aluminiumlegierungen von etwa 0,14 auf 0,27 für Rpk-Werte zwischen 0,13 und 0,16 μm und bei einer weiteren Erhöhung der Rauheit auf Reibzahlen oberhalb von 0,4. Für DCo4 liegt bis zu Rpk-Werten von etwa 0,15 μm ein rauheitsunabhängiges Reibverhalten vor. Steigt die Rauheit der Werkzeugoberflächen jedoch weiter an, ist auch im Kontakt zu DCo4 ein deutlicher Anstieg der Reibzahlen auf bis zu 0,4 zu erkennen. Ursachen für die niedrigen Reibzahlen um 0,15, auch bei rauerer ta-C-beschichteten Werkzeugen in Kontakt zu DCo4, stellen die plateauförmige Topografie der Blechoberfläche, welche in Bild 3 in Abschnitt 4.1 veranschaulicht ist, sowie die weiche Zinkbeschichtung dar. Beides trägt zu einem geringeren Verhaken der Rauheitsspitzen zwischen Werkzeug und Werkstück bei.

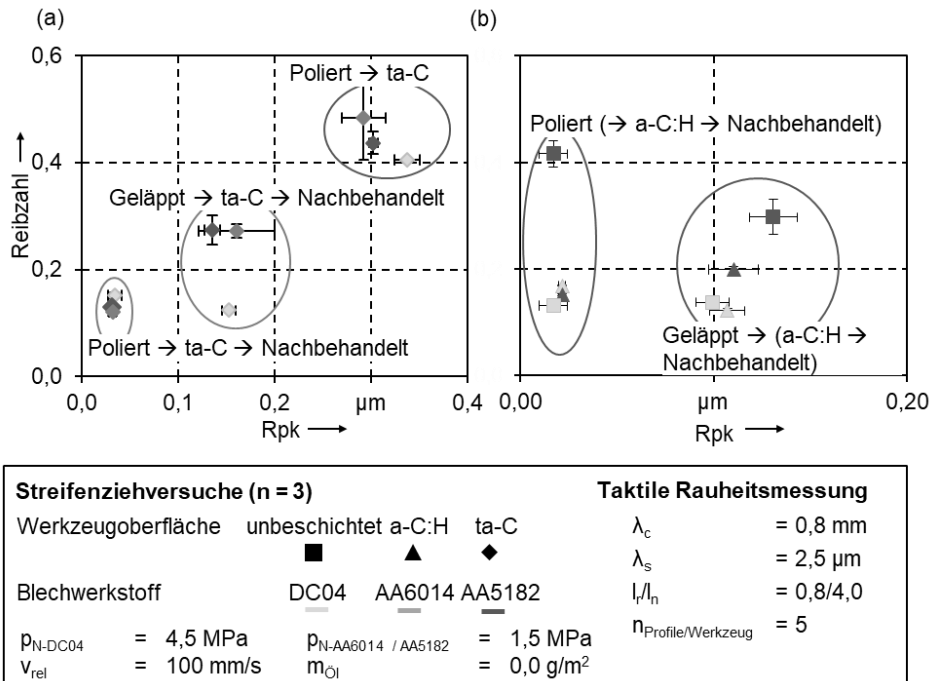


Bild 36: Reibzahlen in Abhängigkeit der Werkzeugrauheit (a) für ta-C-beschichtete Reibbacken nach [159] sowie (b) für a-C:H-beschichtete und unbeschichtete Reibbacken

Zur Überprüfung dieser Ergebnisse wurden auch für a-C:H-beschichtete sowie für unbeschichtete Reibbacken, welche als Referenz dienen, Streifenziehversuche zur Reibungsermittlung durchgeführt. Die resultierenden

Reibzahlen sind in Bild 36 (b) zusammengefasst. Die Rauheit wurde durch zwei verschiedene Ausgangszustände der Oberflächen vor dem Beschichten variiert. Bei den Varianten mit den geringen Rpk-Werten um $0,03\ \mu\text{m}$ wurden polierte Oberflächen verwendet. Für die raueren Varianten mit Rpk-Werten zwischen $0,1$ und $0,14\ \mu\text{m}$ kamen geläppte Reibbacken zum Einsatz. Bei den Reibbacken mit a-C:H-Beschichtung erfolgte in beiden Fällen eine mechanische Nachbehandlung. Im Kontakt zu a-C:H-beschichteten Oberflächen resultiert für AA5182 bei einem Anstieg des Rpk-Wertes von $0,022$ auf $0,11\ \mu\text{m}$ eine Zunahme der Reibung um 33 %. Die Streifen aus DCo₄ verfügen auch bei a-C:H-Schichten über ein weniger sensitives Verhalten gegenüber Rauheitsänderungen, weshalb bei einer reduzierten Spitzenhöhe knapp über $0,1\ \mu\text{m}$ wie bei den ta-C-Schichten kein Anstieg der Reibzahl zu erkennen ist. Dieser Zusammenhang gilt bei DCo₄ auch für unbeschichtete Reibbacken. Im Gegensatz dazu führt eine glattere, unbeschichtete Reibbackenoberfläche im Kontakt zu AA5182 tendenziell zu einem Anstieg der Reibzahl. Eine mögliche Ursache für dieses zunächst widersprüchlich erscheinende Verhalten liegt in der Zunahme der realen Kontaktfläche begründet, welche stärkere Bindungskräfte und somit eine erhöhte Adhäsion hervorruft.

6.2.2 Einsatzverhalten lasergenerierter Oberflächenmodifikationen

Die mit dem in Abschnitt 6.1.2 beschriebenen Laserbearbeitungsprozess erzeugten Mikrostrukturen werden im Folgenden hinsichtlich ihres tribologischen Einsatzverhaltens charakterisiert. Die tribologischen Wechselwirkungen werden dabei für unbeschichtete sowie beschichtete Oberflächen analysiert.

6.2.2.1 Einfluss von Mikrostrukturen auf unbeschichteten Werkzeugoberflächen

Das Reibungs- und Verschleißverhalten von Mikrostrukturen auf unbeschichteten Reibbacken wurde in Streifenziehversuchen ermittelt. Die resultierenden Reibzahlen im schmierstofffreien Kontakt sind für DCo₄ und die beiden Aluminiumlegierungen in Bild 37 (a) im Vergleich zu nicht strukturierten Werkzeugen dargestellt. Die eingestellten Normalkräfte wurden in diesen Versuchsreihen nicht in Abhängigkeit des Flächendeckungsgrades angepasst, um die prinzipielle Eignung der Mikrostrukturen auch bei zunehmender Flächenpressung zu analysieren. Die angegebenen Flächenpressungen beziehen sich daher auf die nominelle Kontaktfläche

von 55 x 100 mm unabhängig vom Vorhandensein und der Anzahl der Strukturen. Für DCo4 sind die Reibzahlen bei einer Flächendeckung von 10 % vergleichbar mit nicht strukturierten Reibbacken. Für die Legierung AA6014 liegen bei strukturierten und blanken Varianten ähnliche Reibzahlen vor, jedoch insgesamt auf einem deutlich höheren Niveau. Zudem bewirken die Strukturen eine größere Streuung der Reibzahlen, was auf Verschleißerscheinungen hindeutet. Im Kontakt zu AA5182 steigt die Reibung von 0,3 auf etwa 0,5 beim Einsatz von Reibbacken mit Mikrostrukturen. Die im Anschluss an die Streifenziehversuche durchgeführte Charakterisierung der Blechstreifen zeigt, dass für beide Aluminiumlegierungen tiefe Riefen und Materialausbrüche aufgrund der Adhäsion des Aluminiums an der Werkzeugoberfläche resultieren. In diesen Bereichen ist die ursprüngliche Textur der Blechoberfläche vollständig zerstört. Lediglich für DCo4 sind keine signifikanten Änderungen der Blechtopografie zu erkennen. Aufgrund der hohen Reibzahlen in Kombination mit Verschleißerscheinungen ab dem ersten Streifenziehversuch und dem lokalen Aufreißen der Blechoberfläche im Kontakt zu unbeschichteten, mikrostrukturierten Werkzeugoberflächen wird von weiteren Untersuchungen mit AA5182 und AA6014 abgesehen.

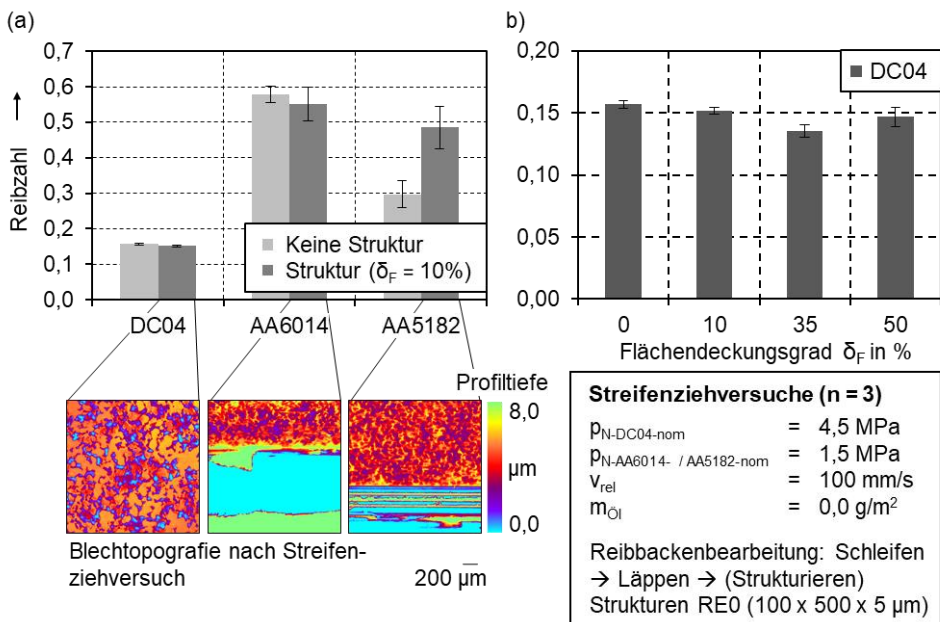


Bild 37: Reibzahlen für (a) blanke und strukturierte Reibbacken im Kontakt zu DCo4, AA6014 und AA5182 sowie (b) Reibzahlen in Abhängigkeit des Flächendeckungsgrads für DCo4

Für DC₀₄ wurde in einem nächsten Schritt der Einfluss des Flächendeckungsgrads durch eine Variation der Anzahl von Strukturelementen analysiert. Wie in Bild 37 (b) zu sehen, sinkt die Reibzahl bis zu einem Flächendeckungsgrad von 35 %. Wird der Flächendeckungsgrad auf 50 % erhöht, so steigt die Reibzahl wieder an und erreicht fast das Niveau für nicht strukturierte Oberflächen. Da diese Versuchsreihen mit einer konstanten Normalkraft durchgeführt wurden, bedeutet ein zunehmender Flächendeckungsgrad auch eine Zunahme der real wirkenden Flächenpressung. Dies führt zu einem verstärkten Einglätten der Rauheitsspitzen, was den Bewegungswiderstand und somit die Reibung reduziert. Dieser Zusammenhang wurde bereits bei den trockenen Versuchen ohne Mikrostrukturen bei zunehmender Flächenpressung ermittelt und in Abschnitt 5.1 dargelegt. Weiteres Potential zur Reibungsminderung besteht bei Mikrostrukturen durch die sinkende Anzahl an in Kontakt befindlichen Rauheitsspitzen, welche unter trockenen Bedingungen durch ein Verhalten zu einem erhöhten Bewegungswiderstand beitragen. Da es ab einer Flächendeckung von 50 % zu einem Anstieg der Reibung kommt, bewirken die Strukturen jedoch auch reibungserhöhende Mechanismen. Eine Ursache dafür liegt möglicherweise in einem verstärkten Abscheren von Rauheitsspitzen an den Strukturkanten.

6.2.2.2 Einfluss von Mikrostrukturen auf beschichteten Werkzeugoberflächen

Eine Kombination der lasergenerierten Mikrostrukturen mit weiteren Modifikationen ist zur Realisierung eines möglichst breiten Anwendungsgebiets notwendig, da sonst der Einsatz im Kontakt zu adhäsionsanfälligen Blechwerkstoffen, wie Aluminiumlegierungen, ausgeschlossen ist. Daher wurde in einem nächsten Schritt das tribologische Einsatzverhalten von beschichteten und anschließend strukturierten Werkzeugoberflächen unter schmierstofffreien Bedingungen analysiert. Da ta-C-Schichten unabhängig vom Blechwerkstoff zu niedrigen Reibzahlen führten und erfolgreich die Adhäsion verhinderten, wird zunächst anhand der ta-C-Schichten die Kombination von Beschichtung und Mikrostrukturierung untersucht. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Schichtarten wird abschließend anhand von mikrostrukturierten a-C:H-beschichteten Reibbacken aufgezeigt.

Einfluss von Strukturtiefe und Flächendeckungsgrad im Kontakt zu DCo₄

Da aus den Versuchsreihen mit unbeschichteten und mikrostrukturierten Werkzeugen bekannt ist, dass das tribologische Verhalten stark vom jeweiligen Blechwerkstoff abhängt, werden die Einflussfaktoren für die verschiedenen Werkstückwerkstoffe getrennt analysiert. Der Einfluss des Flächendeckungsgrades auf die Reibzahl beim Kontakt von DCo₄ mit ta-C-beschichteten Oberflächen ist in Bild 38 dargestellt. Um eine Beeinflussung aus Schwankungen der Rauheit oder der Schichteigenschaften auszuschließen, wurden die Reibzahlen der ta-C-beschichteten Reibbacken zunächst im nichtstrukturierten Zustand im Kontakt zu DCo₄ ermittelt. Anschließend wurden diese Reibbacken laserstrukturiert und erneut im Streifenziehversuch eingesetzt. Die Reibzahlen, welche aus den Versuchsreihen mit strukturierten Oberflächen resultieren, wurden auf die Reibzahlen der Experimente mit nichtstrukturierten Werkzeugen normiert.

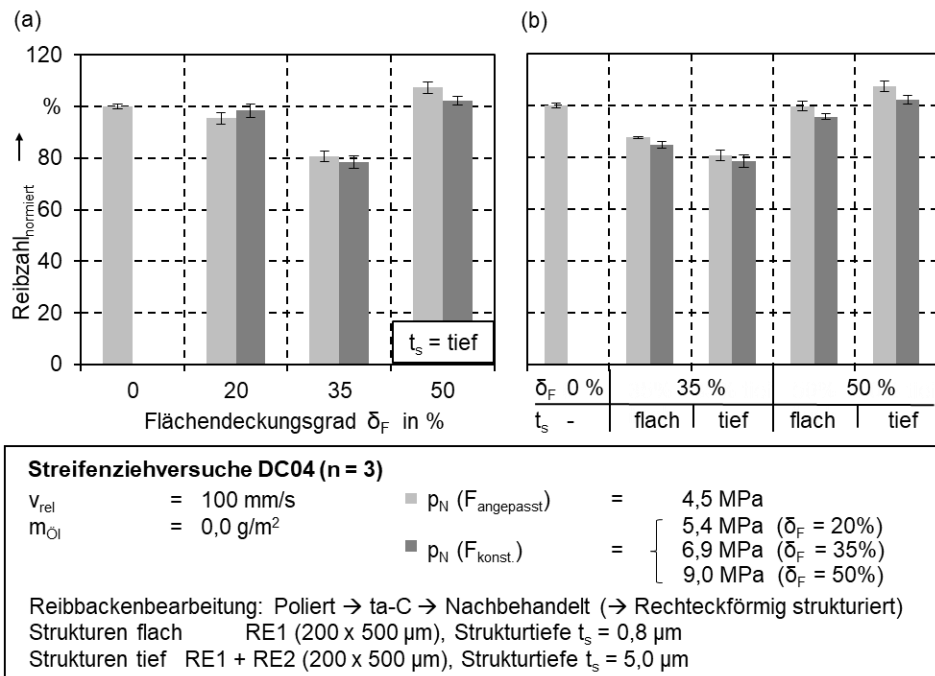


Bild 38: Reibzahlen von ta-C-beschichteten und mikrostrukturierten Reibbacken im Kontakt zu DCo₄ in Abhängigkeit (a) des Flächendeckungsgrads und (b) der Strukturtiefe nach [176]

Der Einfluss des Flächendeckungsgrades wurde für 20, 35 und 50 % bei variierender Flächenpressung untersucht. Die hellgrauen Balken in Bild 38 (a) repräsentieren die Reibzahlen bei einer Anpassung der Normalkraft entsprechend des Flächendeckungsgrades zur Realisierung einer konstanten nominellen Pressung von 4,5 MPa. Die Versuchsreihen, welche durch die dunkelgrauen Balken visualisiert sind, wurden bei einer konstanten Normalkraft durchgeführt, sodass die tatsächlich anliegende Flächenpressung mit dem Flächendeckungsgrad und der damit einhergehenden Reduzierung der Kontaktfläche steigt. Bei einem Flächendeckungsgrad von 20 % sinken die Reibzahlen lediglich um 2 bis 5 %. Wird der Flächendeckungsgrad auf 35 % erhöht, resultiert eine Verringerung der Reibzahl auf etwa 80 %. Bei einem weiteren Anstieg des Flächendeckungsgrads auf 50 % werden die Reibzahlen um 2 bis 7 % erhöht. Diese Ergebnisse zeigen eine ähnliche Abhängigkeit der Reibung vom Flächendeckungsgrad wie bei den Versuchen mit unbeschichteten strukturierten Reibbacken. Im Falle einer Mikrostrukturierung im direkten Werkzeug-Werkstück-Kontakt wirken reibungserhöhende sowie reibungsmindernde Mechanismen, deren jeweilige Dominanz vom Flächendeckungsgrad bestimmt wird. Höhere Flächenpressungen führen tendenziell auch bei strukturierten Oberflächen zu einer reduzierten Reibzahl. Bei einer Erhöhung der Flächenpressung um 2,4 MPa sinkt die Reibzahl um 2,2 %. Bei einer Verdopplung der Flächenpressung ergibt sich eine Senkung der Reibzahl um 5 %. Diese Tendenz wird auch in den weiteren Versuchsreihen in Bild 38 (b) zur Untersuchung des Einflusses der Strukturtiefe durch einen Vergleich der hellgrauen und dunkelgrauen Balken bestätigt. Im untersuchten Bereich zwischen 0,8 und 5,0 µm spielt die Tiefe der Mikrostrukturen anders als unter beölten Kontaktbedingungen, wie beispielsweise Untersuchungen von [177] zeigen, eine untergeordnete Rolle. Bei der Verwendung von Schmierstoffen entscheidet die Strukturtiefe über die Menge des in den Mikrostrukturen eingelagerten Schmierstoffs und bei werkstückseitigen Strukturen über den zur Einglättung notwendigen Druck, um diesen in die Wirkfuge zu leiten. Ohne das Vorhandensein von Schmierstoffen ist dieses Strukturmerkmal weniger bedeutend für das tribologische Einsatzverhalten. Überwiegen die reibungsmindernden Mechanismen, welche in Abschnitt 6.2.3 näher erläutert werden, wie bei 35 % Flächendeckungsgrad, bewirken tiefere Strukturen eine 6 bis 7 % geringere Reibzahl. Dominieren reibungserhöhende Mechanismen, wie im Falle der 50 %-igen Flächendeckungsgrade, führen tiefere Strukturen zu etwa 7 % höherer Reibung. Es ist somit gelungen, auch im schmierstofffreien Kontakt eine Beeinflussung der Reibzahlen durch das Einbringen von Mikrostrukturen zu realisieren. Ob die Erweiterung des

einstellbaren Reibzahlbereiches von +7 bis -20 % auch für weitere Blechwerkstoffe möglich ist, wurde anhand von Streifenziehversuchen mit AA5182 untersucht.

Einfluss von Strukturtiefe und -form im Kontakt zu AA5182

Zur Untersuchung der Möglichkeiten zur Reibungsreduktion wurde zunächst ein Flächendeckungsgrad von 35 % gewählt. Es wurden rechteckförmige und linienförmige Mikrostrukturen in tiefer und flacher Ausführung auf ta-C-beschichtete Reibbacken appliziert. Die resultierenden Reibzahlen sind in Bild 39 gegenübergestellt. Entgegen der Erwartungen aus den Versuchen mit DCo4 führen rechteckförmige Strukturen auf ta-C-beschichteten Reibbacken bei einem Flächendeckungsgrad von 35 % im Kontakt zu AA5182 zu einer signifikanten Reibungserhöhung. Bereits nach dem Ziehen des ersten Streifens sind Materialanhaftungen entlang der Mikrostrukturen zu erkennen. Eine Verringerung der Strukturtiefe von 6,0 auf 0,6 μm bewirkte keine nennenswerte Veränderung der Reibzahl.

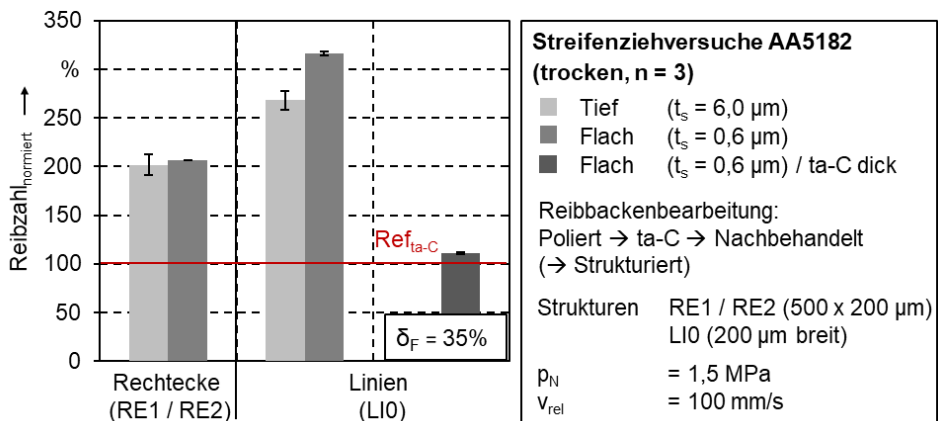


Bild 39: Reibzahlen von ta-C-beschichteten und mikrostrukturierten Reibbacken im Kontakt zu AA5182

Aufgrund der ausgeprägteren Rauheitsspitzen der Topografie von AA5182 im Vergleich zu DCo4 wurde zunächst vermutet, dass ein stärkeres Verhaken von Rauheitsspitzen entlang der Strukturkanten zur Verdoppelung der Reibzahlen führte. Zur Verhinderung von Strukturkanten in 90°-Orientierung zur Ziehrichtung wurden daher linienförmige Strukturen untersucht. Unabhängig von deren Tiefe führten diese jedoch zu einer weiteren Erhöhung der Reibzahl auf über 250 % und zu sofortigen Verschleißerscheinungen. Somit scheint der negative Einfluss der Strukturen nicht primär durch den negativen Einfluss der Strukturkanten begründet

zu sein. Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen den tribologischen Eigenschaften von DCo₄ und AA5182 ist die hohe Adhäsionsneigung der Aluminiumlegierung, welche ursächlich für den abweichenden Einfluss der Mikrostrukturen sein könnte. Die im Rahmen dieser Arbeit standardmäßig verwendeten ta-C-Schichten verfügen über eine Dicke der Funktionsschicht von 0,6 – 0,8 µm. Somit wird bei einer Strukturtiefe von 6 µm das Substrat aus 1.2379 freigelegt. Bei flachen Strukturen ist es denkbar, dass die Cr-Haftvermittlungsschicht durch den Strukturierungsprozess freigelegt wird. In beiden Fällen kann keine geschlossene Lage der ta-C-Schicht im Kontakt zu AA5182 garantiert werden. Um zu belegen, dass dies die Ursache für die hohen Reibzahlen von mikrostrukturierten beschichteten Reibbacken im Kontakt zu AA5182 ist, wurde für weitere Reibbackenpaare die Beschichtungsdauer erhöht. Somit wurden ta-C-Schichten mit einer Dicke der Funktionsschicht von etwa 1,3 µm abgedichtet. Die Reibbacken mit der dickeren ta-C-Schicht wurden mit linienförmigen und etwa 0,6 µm tiefen Mikrostrukturen versehen. Dadurch wird sichergestellt, dass die ta-C-Schicht trotz Mikrostrukturen vollständig geschlossen bleibt. Diese Maßnahme bewirkte Reibzahlen in einem ähnlichen Bereich wie für ta-C-beschichtete, nicht strukturierte Oberflächen, wie in Bild 39 zu sehen ist, und konnte das Anhaften von Aluminium in den Strukturen verhindern. Um Mikrostrukturen im schmierstofffreien Kontakt zu Aluminiumlegierungen anzuwenden, ist es daher obligatorisch, dass die Strukturtiefe deutlich kleiner gewählt wird als die Schichtdicke.

Einfluss der mikrostrukturierten Schichtart im Kontakt zu AA5182

Rechteckförmige Mikrostrukturen wurden auf Reibbacken mit einer 1,3 µm dicken ta-C-Schicht appliziert, um zu überprüfen, ob nicht nur für DCo₄, sondern auch für AA5182 eine Reibzahlreduktion bei einer Kombination aus Beschichtung und Mikrostrukturierung möglich ist. Der Einfluss von Flächendeckungsgrad und Strukturtiefe auf die normierte Reibzahl ist in Bild 40 (a) dargestellt. Die realisierbare Beeinflussung der Reibzahlen liegt in Abhängigkeit von den Struktureigenschaften in einem Bereich von +34 bis -6 %.

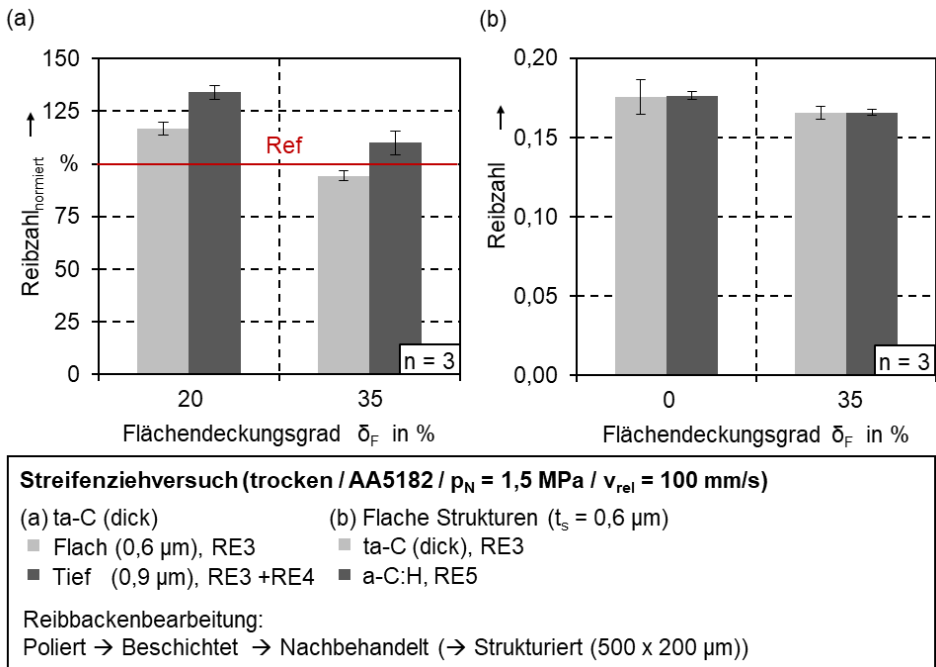


Bild 40: Einfluss von (a) Flächendeckungsgrad sowie Strukturtiefe bei ta-C-beschichteten Reibbacken und von (b) der Schichtart auf Reibzahlen mikrostrukturierter Reibbacken im Kontakt zu AA5182 nach [171]

Wie bei DCo4 werden auch bei AA5182 bei einer Flächendeckung von 35 % niedrigere normierte Reibzahlen als bei einem geringeren Flächendeckungsgrad von 20 % erreicht. Anders als bei DCo4, für welches keine signifikante Beeinflussung durch die Strukturtiefe ermittelt wurde, wirkt sich die Verwendung von 0,6 μm im Vergleich zu 0,9 μm tiefen Strukturen positiv auf das tribologische Einsatzverhalten aus. Jedoch besaßen die tiefen Strukturen bei DCo4 eine deutlich größere Tiefe von 5,0 μm , welche aufgrund der Adhäsionsneigung bei AA5182 nicht untersucht werden kann. Wie bei DCo4 dominiert jedoch auch bei AA5182 der Einfluss des Flächendeckungsgrades das tribologische Verhalten im Vergleich zum Einfluss der Strukturtiefe. Das Potential zur Reibungsreduzierung ist bei AA5182 insgesamt geringer als bei DCo4. Der Grund für dieses unterschiedliche tribologische Verhalten ist ein Abweichen der topografischen Eigenschaften. Da, wie in Abschnitt 6.2.1 gezeigt, neben den ta-C-Schichten auch a-C:H-Schichten im Kontakt zu den Aluminiumlegierungen zu einem vielversprechenden Einsatzverhalten führen, wurde der Einfluss von lasergenerierten Mikrostrukturen stichprobenartig für dieses

Schichtrezept untersucht. Die resultierenden Reibzahlen bei einer Flächendeckung von 35 % und einer Strukturtiefe von $0,6 \mu\text{m}$ sind in Bild 40 (b) dargestellt. Da die a-C:H-Schichten über $2 \mu\text{m}$ dick sind, wird durch die Wahl dieser flachen Strukturen eine geschlossene Funktionsschicht gewährleistet. Für die beiden hier verwendeten Reibbackenpaare werden - unabhängig von der Schichtart - annähernd identische Reibzahlen im Ausgangszustand sowie im mikrostrukturierten Fall erreicht. Somit scheint die Schichtart für die tribologische Wirkung der Strukturen eine untergeordnete Rolle zu spielen, solange sichergestellt ist, dass eine geschlossene Funktionsschicht die Adhäsionsneigung vermindert. Die Reibzahlen werden bei einer 35 %-igen Flächendeckung von etwa $0,176$ auf $0,166$ reduziert, was einer Reibungsminderung von etwa 6 % entspricht. Beide Versuchsreihen sind durch auffallend niedrige Standardabweichungen geprägt, was ein Anzeichen für die Zuverlässigkeit der Ergebnisse sowie eine erfolgreiche Verhinderung von adhäsivem Verschleiß ist.

Die obigen Untersuchungen haben aufgezeigt, dass die Reibung auch im schmierstofffreien Fall durch das Einbringen von Mikrostrukturen auf den Werkzeugoberflächen beeinflusst werden kann. Der Bereich der realisierbaren Reibzahlen hängt neben der Flächendeckung auch vom jeweiligen Blechwerkstoff ab.

6.3 Ursache-Wirkzusammenhänge zwischen Oberflächeneigenschaften und Einsatzverhalten

Im vorherigen Abschnitt wurde aufgezeigt, dass mit Hilfe der Modifikation der werkzeugseitigen Oberflächeneigenschaften eine Veränderung des tribologischen Verhaltens erreicht werden kann. Ob es im trockenen Kontaktfall zu einer Reibungserhöhung oder -minderung kommt, hängt von vielen verschiedenen Einflussfaktoren ab. In Abschnitt 6.2 wurden exemplarisch die tribologischen Bedingungen für unterschiedliche Kontaktpaarungen untersucht. Um jedoch allgemeingültige Aussagen abzuleiten, ist es notwendig, die konkreten Ursache-Wirkzusammenhänge zu verstehen. Daher werden im nachfolgenden Abschnitt die wesentlichen Wechselwirkungen zwischen den Oberflächeneigenschaften und dem resultierenden Reibungs- und Verschleißverhalten analysiert.

6.3.1 Ursache-Wirkzusammenhänge bei amorphen Kohlenstoffschichten

Es ist gelungen, mit Hilfe von Streifenziehversuchen das reibungs- und verschleißmindernde Potential von DLC-Schichten im direkten Werk-

zeug-Werkstück-Kontakt nachzuweisen, was in Bild 32 und Bild 34 dargestellt ist. Jedoch ist dieses Potential stark von den Schicht- und Oberflächeneigenschaften sowie den Eigenschaften des Gegenkörpers abhängig. Die grundlegende tribologische Wirkung der Schichten ist primär auf eine Beeinflussung der Adhäsionskomponente der Reibung zurückzuführen. Bei den a-C:H-Schichten trägt der Wasserstoff zu einer Passivierung der freien Bindungen bei und reduziert somit die Reaktivität der Schicht [178]. Wasserstoffhaltige DLC-Schichten bilden a-C:H-Zwischenschichten auf dem Gegenkörper aus, sodass zwei hydrophobe Flächen in Kontakt stehen, was zu einer niedrigen Reibung führt [179]. Im Gegensatz dazu verfügt die ta-C-Beschichtung über graphitische Transferschichten, welche als Festkörperschmierstoff fungieren können [180]. Mit zunehmender Luftfeuchtigkeit kann die Einlagerung von Wasser in wasserstofffreien ta-C-Schichten zu einer weiteren Reibungsminderung führen. Für das positive Einsatzverhalten der ta-C-Schichten ist somit entscheidend, dass die Versuche in dieser Arbeit bei Umgebungsluft und nicht wie häufig bei Laborversuchen aus der Literatur im Vakuum durchgeführt wurden.

Neben den Schichteigenschaften selbst nehmen auch die werkstückseitigen Eigenschaften Einfluss auf das Verschleißverhalten. Ein stark vereinfachtes Adhäsionsmodell nach Bowden und Tabor [181] besagt, dass der adhäsive Anteil der Reibung durch den Quotienten der Scherfestigkeit der Grenzfläche und den Fließdruck des weicheren Reibpartners – also dem Werkstück – bestimmt wird. Der Fließdruck entspricht der Kontaktdruckspannung, welche ein Fließen des örtlich weicheren Kontaktpartners hervorruft. Die Scherfestigkeit der Grenzfläche wird in der Blechumformung primär durch den stets wesentlich weicheren Blechwerkstoff im Vergleich zum deutlich härteren Werkzeugwerkstoff bestimmt. Da sich die oberflächennahen Werkstoffeigenschaften von denen des Grundkörpers unterscheiden, können Werte wie der Fließdruck nicht aus herkömmlichen Fließkurven entnommen werden. In guter Näherung wird der Fließdruck mit der Härte der Randschicht des Werkstoffs gleichgesetzt [182]. Unter der Annahme, dass für beide Aluminiumlegierungen ähnliche Scherfestigkeiten in der Grenzfläche vorliegen, würde dieses Modell zur Schlussfolgerung führen, dass sowohl für AA6014 mit einer Härte von $112 \pm 6 \text{ HV}_{0,005}$ als auch für AA5182 mit einer Härte von $104 \pm 7 \text{ HV}_{0,005}$ eine ähnliche Adhäsionskomponente der Reibung resultiert. Dem gegenüber stehen jedoch stark unterschiedliche Reibzahlen von etwa 0,30 für AA5182 und 0,57 für AA6014 im Kontakt zu konventionellen Werkzeugoberflächen. Zusätzlich würde dieses einfache Modell

zu der Schlussfolgerung führen, dass bei der Verwendung des gleichen Blechwerkstoffs unabhängig von den Oberflächeneigenschaften des Werkzeugs der gleiche Adhäsionsanteil vorliegt. Die Ergebnisse aus Abschnitt 5.1 und 6.2 zeigen jedoch, dass dies nicht der Fall ist. In erweiterten Modellen zur Beschreibung der Adhäsion in Reibkontakten werden zusätzlich die Ausbildung der Mikrokontakte und die Bildung von Adhäsionsbindungen berücksichtigt. Je größer die wahre Kontaktfläche ist – je mehr Rauheitsspitzen also tatsächlich in direktem Kontakt sind – desto mehr adhäsive Bindungen können entstehen [153].

Die Ausbildung der wahren Kontaktfläche hängt nach Czichos [153] neben der Flächenpressung auch von der Gitterstruktur der Kontaktpartner ab. Laut Czichos bildet sich die wahre Kontaktfläche unter der Annahme einkristalliner Rauheitshügel durch plastische Deformation entsprechend der Versetzungstheorie durch Abgleiten in kristallographischen Gleitsystemen aus. Je mehr Gleitebenen und -richtungen im Kristallgitter vorliegen, desto geringer ist der Widerstand gegenüber plastischer Deformation. Dies lässt vermuten, dass bei hexagonal dichtest gepackten Gitterstrukturen mit einer geringeren Anzahl an Gleitsystemen im Vergleich zu kubisch flächenzentrierten Gitterstrukturen mit einer größeren Anzahl an Gleitsystemen eine kleinere wahre Kontaktfläche ausgebildet wird. Eine kleinere wahre Kontaktfläche reduziert nach Czichos [153] die Adhäsionskomponente der Reibung. Da Zink im Gegensatz zu den kubisch flächenzentrierten Aluminiumlegierungen in hexagonal dichtest gepackter Gitterstruktur vorliegt, könnte der Einfluss des Kristallgitters auf die wahre Kontaktfläche als weiterer Erklärungsansatz für die bei Raumtemperatur geringeren Reibzahlen des verzinkten DCo4 im Vergleich zu den Aluminiumlegierungen dienen. Die Entstehung adhäsiver Bindungen wird bei gegebener wahrer Kontaktfläche weiterhin von der Oberflächenenergie und der Elektronenstruktur beeinflusst, welche letztlich von der chemischen Zusammensetzung der Kontaktpartner abhängen. Das Applizieren der DLC-Schichten im trockenen Kontakt verändert die Ausprägung der Adhäsion primär durch eine Änderung der Elektronenstruktur und der freien Oberflächenenergie in der Kontaktzone. Um die unterschiedliche tribologische Wirkung der Schichten besser nachzuvollziehen, ist es wichtig, zunächst die Unterschiede in den Schichteigenschaften zu analysieren.

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal stellt die Schichthärte dar, welche neben chemischen Eigenschaften, wie freier Oberflächenenergie und elektrochemischen Potentialen, die Adhäsionsneigung im Kontakt

beeinflusst [183]. Die Vickershärte liegt für a-C:H:W-Schichten in etwa im Bereich der unbeschichteten Reibbacken. Für a-C:H-Schichten liegt der Wert mit knapp unter 2000 HV_{0,001} etwa doppelt so hoch wie für a-C:H:W. Eine Härte von etwa 4000 HV_{0,001} wird für die ta-C-Schichten erzielt. Der Zusammenhang zwischen Schichthärte und resultierenden Reibzahlen ist exemplarisch in Bild 41 für DCo4 und AA5182 anhand der Werkzeugvarianten mit Rpk-Werten < 0,05 µm visualisiert. Für a-C:H:W ist nur der Datenpunkt für AA5182 dargestellt, da sich diese Schicht als weniger geeignet erwies und daher für DCo4 bei Rpk-Werten < 0,05 µm keine Werte vorliegen. Während für AA5182 eine zunehmende Härte scheinbar ein Sinken der Reibzahl bewirkt, kann für DCo4 kein Zusammenhang zwischen Härte der Werkzeugoberfläche und Reibzahlen abgeleitet werden. Zwischen a-C:H- und ta-C-Schichten ist auch für AA5182 der Härteunterschied nicht mehr ausschlaggebend für das Reibverhalten, da hier trotz doppelt so hoher Härte für ta-C-Schichten nur geringfügig niedrigere Reibzahlen resultieren. Generell gelten hohe Schichthärten jedoch als vorteilhaft, da Materialien mit höherer Härte über größere interne Bindungsenergien verfügen, was einen höheren Widerstand gegenüber Adhäsion bewirkt und somit zu weniger Bindungen mit dem Kontaktpartner führt [184]. Dies liefert, neben der erhöhten chemischen Affinität durch die metallische Phase, einen Erklärungsansatz, warum die a-C:H:W-Schichten mit ihrer deutlich geringeren Härte als a-C:H und ta-C nicht für den schmierstofffreien Kontakt zu Aluminiumlegierungen geeignet sind.

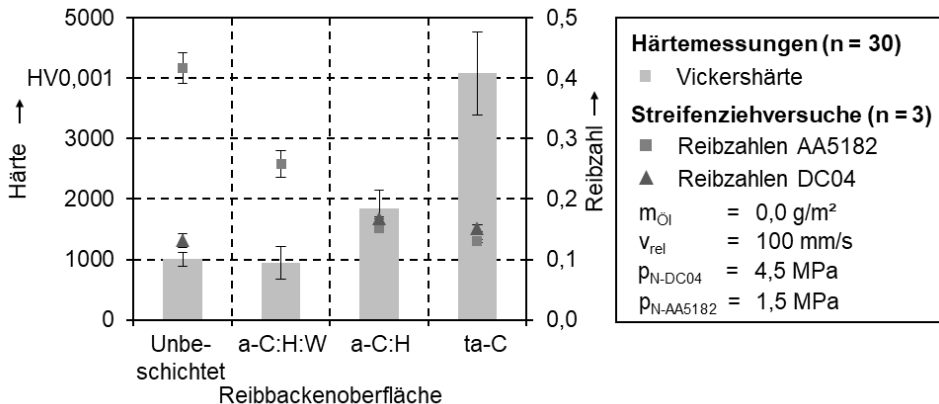


Bild 41: Wechselwirkung zwischen Härte und Reibzahl in Abhängigkeit von Blechwerkstoff und Werkzeugbeschichtung

Die hohen Reibzahlen, welche aus dem direkten Kontakt von Aluminiumlegierungen mit a-C:H:W-Schichten resultieren, gehen auch mit Verschleißerscheinungen auf der Werkzeugoberfläche einher. Ein Vergleich der resultierenden Werkzeugoberflächen nach Streifenziehversuchen mit AA5182 ist in Bild 42 gezeigt.

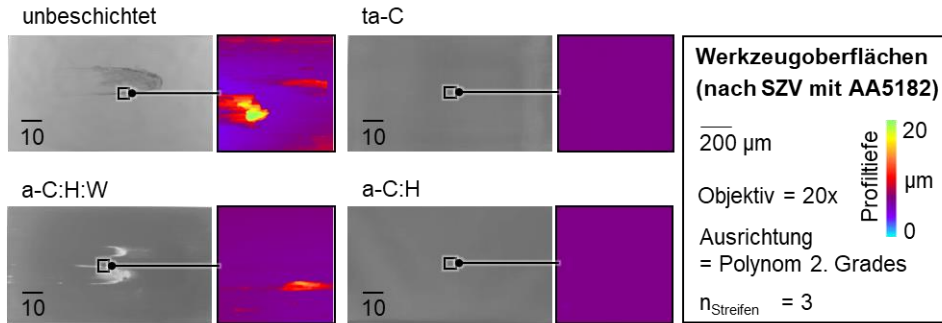


Bild 42: Fotografie und Topografie der Reibbacken nach Streifenziehversuchen mit AA5182

Sowohl für unbeschichtete als auch für a-C:H:W-beschichtete Reibbacken resultiert Adhäsion im makroskopisch sichtbaren Bereich bereits nach dem Ziehen weniger Streifen. Die Topografien sind durch lokale Erhöhungen des Rauheitsprofils von bis zu 20 µm gekennzeichnet. Lediglich für a-C:H- und ta-C-beschichtete Reibbacken sind weder makroskopisch noch mittels Konfokalmikroskopie Verschleißerscheinungen zu erkennen. Da die in Bild 42 gezeigten Reibbacken ähnliche Rauheitswerte besitzen, scheint die chemische Zusammensetzung ausschlaggebend für das unterschiedliche Verschleißverhalten. Die mittels EDX-Messung ermittelte Zusammensetzung der verschiedenen Schichtarten ist in Tabelle 11 zusammengefasst. Für ta-C- und a-C:H-Schichten resultieren ähnliche hohe Gewichtsanteile von C und O. Auffallend ist der erhöhte Cr-Anteil von 1,5 Gew.-% bei ta-C im Vergleich zum nicht messbaren Cr-Anteil bei a-C:H. Der gemessene Cr-Anteil resultiert aus der Haftvermittlungsschicht, deren Eigenschaften aufgrund der deutlich geringeren Dicke der ta-C-Schichten das gemessene Spektrum beeinflussen können. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass einzelne Droplets der gesputterten Cr-Schicht lokal zu Fehlstellen führen, an denen keine ta-C-Schicht abgeschieden wird oder die im mechanischen Nachbehandlungsschritt wieder entfernt werden.

Tabelle 11: Chemische Zusammensetzung der Schichten aus EDX-Messungen bei 8 kV (Mittelwert aus Linienscan mit 500 Messpunkten)

Gew.-%	C	O	Cr	W
ta-C	91,8	6,8	1,5	-
a-C:H	96,7	3,0	-	-
a-C:H:W - hoch	15,5	1,2	1,5	81,7
a-C:H:W - niedrig	83,5	4,5	0,9	11,1

Um den Einfluss dieser Fehlstellen und lokal erhöhter Cr-Anteile zu analysieren, wurden ta-C-beschichtete Reibbacken erneut nach den Streifenziehversuchen mittels EDX charakterisiert. Ein EDX-Mapping einer solchen Fehlstelle nach Streifenziehversuchen mit AA6014 ist exemplarisch in Bild 43 dargestellt.

ta-C beschichtete Reibbacke nach Streifenziehversuchen mit AA6014

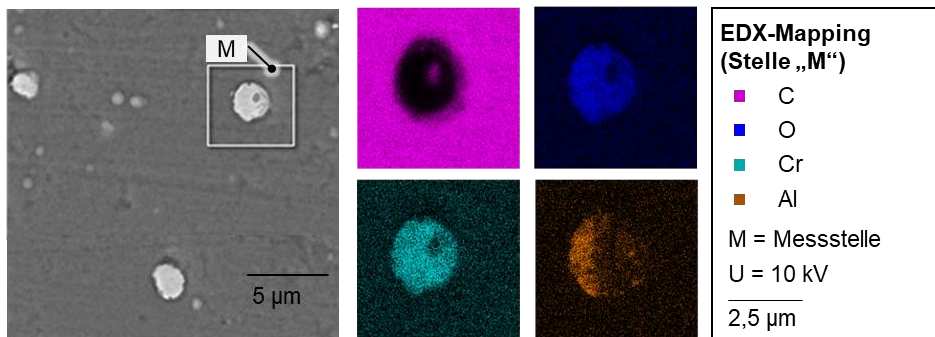


Bild 43: EDX-Mapping einer ta-C-beschichteten Reibbacken nach Streifenziehversuchen mit AA6014

An diesen Fehlstellen ist lokal kein C-Gehalt mehr nachweisbar, jedoch steigt die Cr-Konzentration deutlich an, was anhand der erhöhten Anzahl türkiser Bildbereiche deutlich wird. Solche Stellen sind potentiell der Ursprung für Adhäsionserscheinungen trotz DLC-Beschichtung, was durch einen lokal erhöhten Al-Gehalt, gekennzeichnet durch eine orange Färbung, bestätigt wird. Da diese Fehlstellen mit einer Größe unterhalb von 2 µm sehr klein sind und nur vereinzelt auftreten, wird trotzdem eine deutliche Reibungs- und Verschleißreduktion gegenüber konventionellen Oberflächen realisiert. Die Akkumulation des Blechwerkstoffs an vereinzelt Fehlstellen wurde in weiteren EDX-Messungen für ta-C-beschichtete Reibbacken nach Streifenziehversuchen mit DCo4,

AA5182 und AA6014 untersucht. In Bild 44 sind die zu den Spektren gehörigen Messstellen in den jeweiligen REM-Aufnahmen gekennzeichnet.

ta-C beschichtet Reibbacke nach Streifenziehversuchen

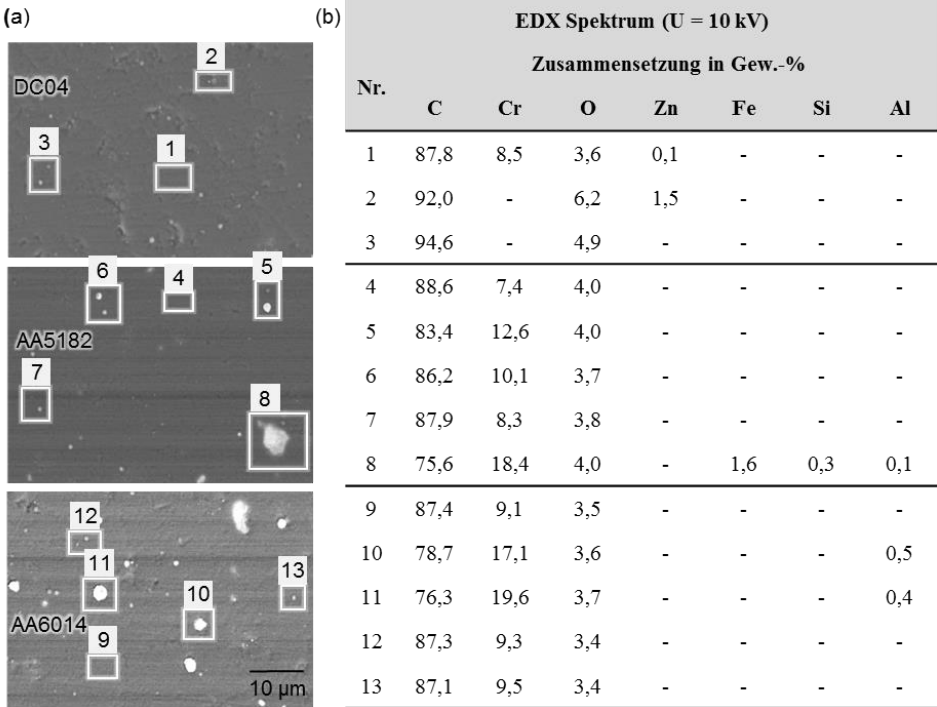


Bild 44: Analyse ta-C-beschichteter Reibbacken nach Streifenziehversuchen: (a) REM-Aufnahmen, (b) EDX-Spektren

Je Reibbacke wurde an drei bis fünf Stellen das Spektrum analysiert. Rückstände des jeweils in Kontakt gewesenen Blechwerkstoffs sind nur vereinzelt und in sehr geringer Konzentration bis maximal 1,5 Gew.-% für Zn nachzuweisen. Bei den Oberflächen, welche mit AA5182 und AA6014 in Berührung waren, fällt auf, dass Al-Rückstände stets an Stellen mit ebenfalls erhöhtem Cr-Anteil im Bereich von 17 bis 20 Gew.-% gemessen werden können. Die Spektren bestätigen die Schlussfolgerung aus dem EDX-Mapping in Bild 43, wonach eine erhöhte Adhäsionsneigung der Aluminiumlegierungen vorliegt, wenn Cr-Partikel freiliegen.

Neben dem Einfluss der chemisch bestimmten Schichteigenschaften wurde in Abschnitt 6.2.1 untersucht, inwiefern variierende Werkzeugrauheiten das tribologische Verhalten verändern. Die Topografien und jeweils ein exemplarisches Rauheitsprofil sind für ta-C- und a-C:H-beschichtete Reibbacken vor den Streifenziehversuchen in Bild 45 in Abhängigkeit der Oberflächenbearbeitung zu sehen.

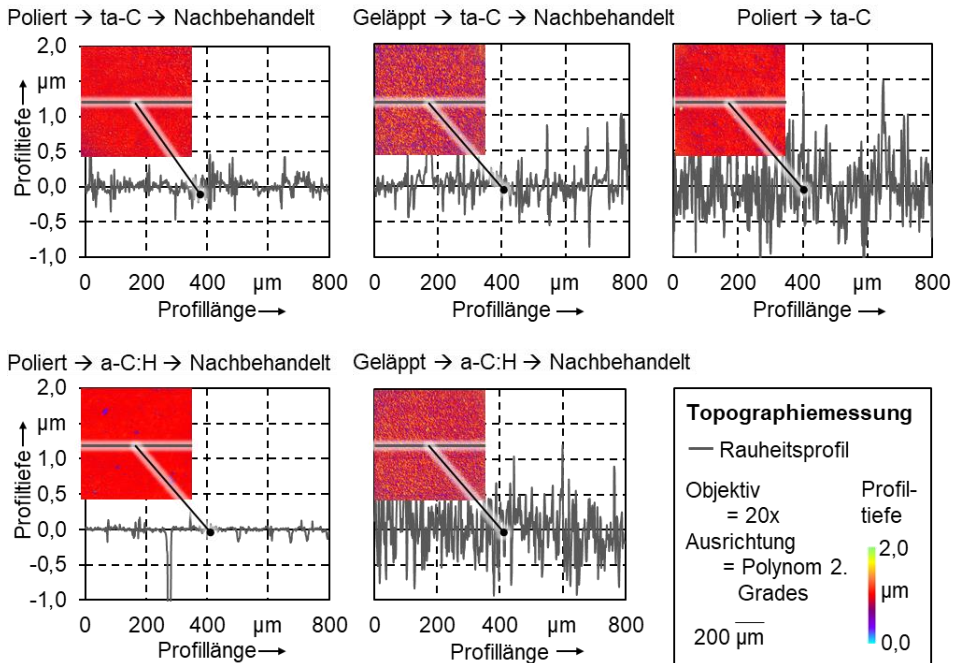


Bild 45: Topografie und Rauheit beschichteter Reibbacken in Abhängigkeit der Oberflächenfeinbearbeitung

Bei vor dem Beschichten geläpften statt polierten Oberflächen ist eine deutliche Zunahme der Anzahl und Höhe der Rauheitsspitzen nach dem Nachbehandeln zu sehen. Erfolgt keine Nachbehandlung, ist am Beispiel von ta-C zu erkennen, dass Anzahl und Höhe der Rauheitsspitzen im Vergleich zu beiden Varianten mit Nachbehandlung deutlich größer ist. Diese Erhöhung der Rauheitsspitzen wirkt sich generell negativ auf das Reibverhalten aus. Wie sensitiv die Reibung auf die Werkzeugrauheit reagiert, hängt auch vom Blechwerkstoff ab. Für DCo₄ bewirkt eine rauere Schichtoberfläche bis zu Rpk-Werten von 0,15 μm keine Zunahme der Reibzahl. Erst ab Rpk-Werten oberhalb von 0,30 μm steigt die Reibzahl deutlich an. Im Gegensatz dazu wurde für den Blechwerkstoff AA5182 in

Abschnitt 6.2.1 ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Zunahme von Reibzahlen und den werkzeugseitigen Rpk-Werten ermittelt. Ein Grund für das sensitivere Verhalten der Aluminiumlegierungen ist in deren topografischen Eigenschaften begründet.

Die Auswirkung erhöhter Werkzeugrauheit auf die Kontaktbindungen ist anhand der taktil gemessenen Primärprofile der Blechwerkstoffe sowie zweier unterschiedlich rauher ta-C-beschichteter Reibbacken in Bild 46 dargestellt. Die Rauheitsprofile wurden so ausgerichtet, dass sie den initialen Kontakt zwischen sich berührenden Rauheitsspitzen von Blech und Werkzeug veranschaulichen, bevor es zu einer Krafteinwirkung und Einglättung kommt.

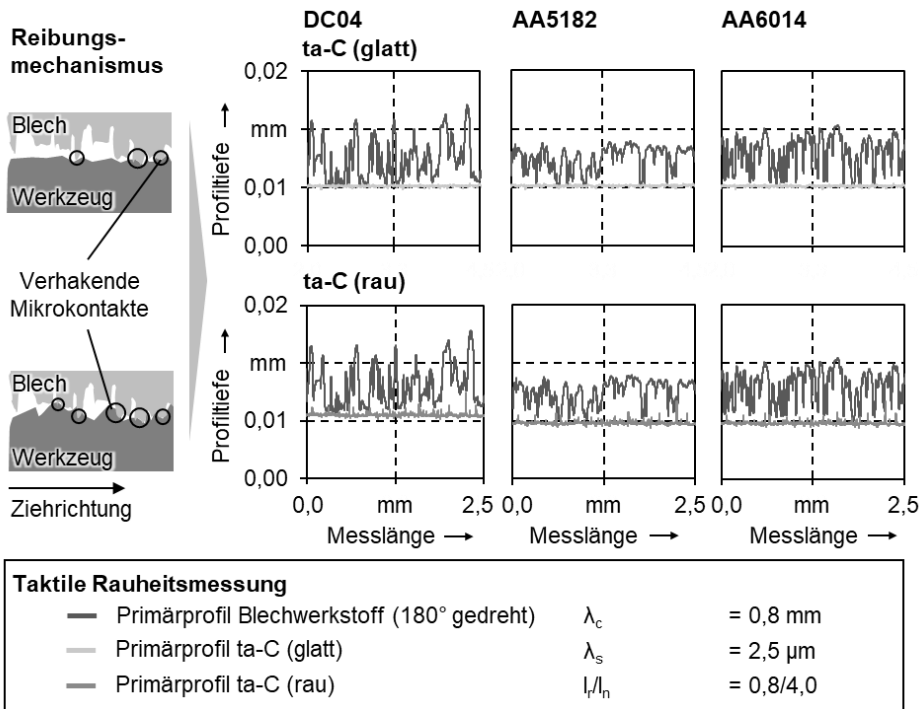


Bild 46: Initiale Kontaktbindungen zueinander ausgerichteter Primärprofile in Abhängigkeit von Blech- und Reibbackenrauheit

Für DCo₄ stehen mehrere plateauförmige Rauheitserhebungen in Kontakt, was zu einer initialen Berührlänge von etwa 0,14 mm mit den glatten ta-C-Schichten bezogen auf die Messlänge von 2,5 mm führt. Für beide Aluminiumlegierungen sind die Berührlängen mit 0,09 mm für AA5182 und 0,06 mm für AA6014 aufgrund des Vorhandenseins von vielen einzelnen Rauheitsspitzen deutlich kleiner. Der Kontakt mit nicht nachbehandelten ta-C-beschichteten Reibbacken führt für DCo₄ zu einer deutlichen Reduzierung der Länge der Mikrokontakte (circa 0,08 mm). Für beide Aluminiumlegierungen werden die Anzahl und Breite sich berührender Rauheitsspitzen nur geringfügig verringert (circa 0,06 mm). Die initial verringerte Menge sich berührender Rauheitsspitzen trägt zu lokal erhöhten Flächenpressungen bei. Zusätzlich wird durch die einzelnen hohen Rauheitsspitzen der Reibbacken, welche in die Rauheitstäler der Blechwerkstoffe hineinragen, ein weiterer reibungserhöhender Mechanismus aufgrund der gestiegenen Werkzeugrauheit deutlich. Die Gefahr von Verhakungen und Abscheren von Rauheitsspitzen des weicheren Kontaktpartners an den Spitzen des härteren Kontaktpartners wird signifikant erhöht. Je mehr Rauheitsspitzen vorhanden sind und je ausgeprägter diese sind, desto mehr Verhakungen entstehen, welche als mechanischer Widerstand der Relativbewegung entgegenwirken und somit die Reibkraft erhöhen. Diese Verhakungen führen, aufgrund der gegenüber den Beschichtungen deutlich niedrigeren Härte der Blechwerkstoffe, zu einer plastischen Verformung und einem Materialübertrag auf den härteren Kontaktpartner. Mit zunehmender Werkzeugrauheit steigt die Gefahr des Abscherens und Anhaftens von Rauheitsspitzen des Blechwerkstoffs, was in Bild 47 für die Reibbacken nach Streifenziehversuchen mit AA5182 gezeigt ist. Werden die Reibbacken vor dem Beschichten poliert und anschließend nachbehandelt, ist für keine der beiden Beschichtungen ein Verschleiß auf makroskopischer oder mikroskopischer Ebene sichtbar. Lediglich für die polierte, a-C:H-beschichtete und nachbehandelte Reibbacke sind vereinzelt Löcher zu erkennen, welche bereits vor den Streifenziehversuche erkennbar waren (Bild 45) und nicht verschleißkritisch sind. Steigt die Höhe und Anzahl der Rauheitsspitzen auf der beschichteten Werkzeugoberfläche, resultieren lokale Verschleißerscheinungen in Form von anhaftendem Blechwerkstoff. Wenn bei den ta-C-Schichten auf ein Nachbehandeln verzichtet wird, dann liegt nahezu vollflächig Adhäsionsverschleiß vor, welcher lokal zu Aufschweißungen mit einer Höhe von über 4 µm führt. Das reibungsmindernde Potential der a-C:H- und ta-C-Schichten kann demnach nur ausgeschöpft werden, wenn möglichst niedrige Rpk-Werte am Werkzeug realisiert werden.

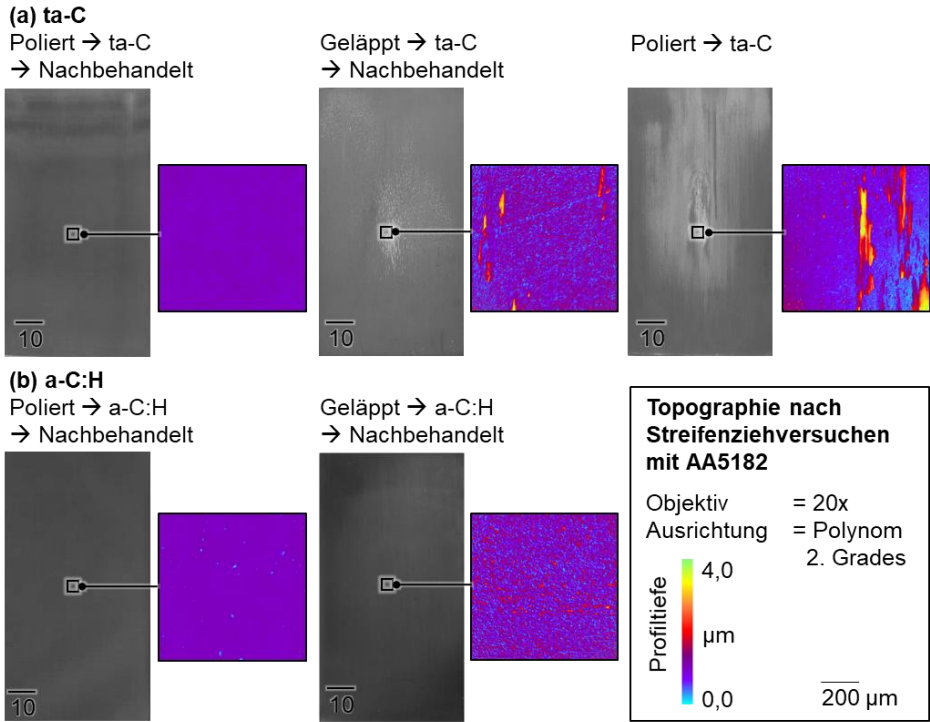


Bild 47: Oberflächeneigenschaften und Topografien der Reibbacken in Abhängigkeit der Rauheit nach Streifenziehversuchen mit AA5182

6.3.2 Ursache-Wirkzusammenhänge bei lasergenerierten Oberflächenmodifikationen

Das Einbringen von Mikrostrukturen mittels Laser führt in Abhängigkeit des Flächendeckungsgrades zu unterschiedlichem tribologischen Einsatzverhalten. Für eine Flächendeckung von 35 % wurde eine Reibungsminde- rung erzielt. Bei höheren Flächendeckungen von 50 % lagen die Reibzah- len über denen mit nicht strukturierten Reibbacken. Dieser grundlegende Trend wurde sowohl für unbeschichtete als auch für beschichtete Reib- backen im Kontakt zu DCo4 nachgewiesen. Dieses Verhalten wurde eben- so für AA5182 im Kontakt zu ta-C und a-C:H-beschichteten und struktu- rierten Reibbacken bestätigt, auch wenn die prozentualen Änderungen der Reibzahlen nicht identisch sind. Bezogen auf die Mikrostrukturen gibt es demnach im schmierstofffreien Kontaktzustand sowohl reibungs- mindernde als auch reibungserhöhende Mechanismen, welche je nach Flächendeckungsgrad mehr oder weniger stark zum Tragen kommen.

Die Reibungserhöhung lässt sich durch eine scherende Wirkung entlang der Strukturkanten erklären. An den Kanten, welche senkrecht zur Ziehrichtung ausgerichtet sind, kommt es zu einem verstärkten Verhaken von Rauheitsspitzen. Dies führt zu einem erhöhten Widerstand gegen die Relativbewegung und in Abhängigkeit der vorherrschenden Spannungen zu einem Abscheren der Rauheitsspitzen. Dieser reibungserhöhende Mechanismus ist in Bild 48 veranschaulicht.

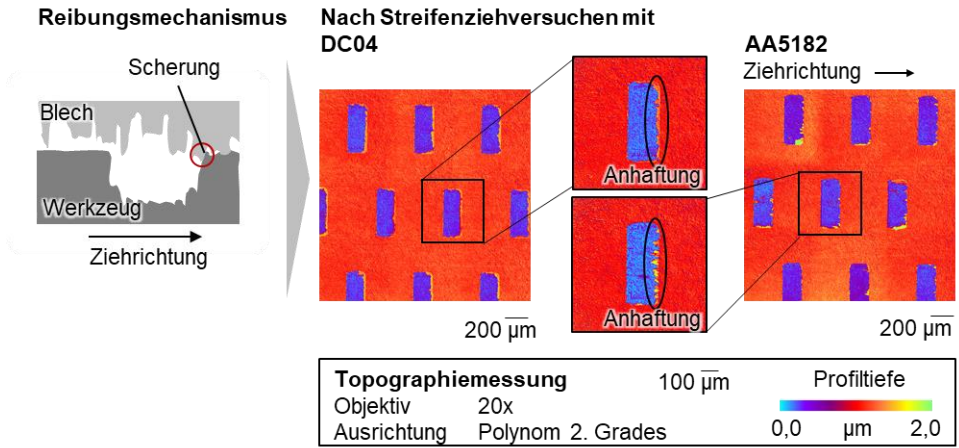


Bild 48: Reibungserhöhender Mechanismus bei Mikrostrukturen durch Scherung

Eine Analyse der Reibbackenoberflächen nach den Streifenziehversuchen verdeutlicht, dass es sowohl im Kontakt zu DC04 als auch zu AA5182 zu lokalen Anhaftungen entlang der gegen die Ziehrichtung ausgerichteten Strukturkanten kommt. Das Scheren an den Kanten ist bei AA5182 ausgeprägter als bei DC04, was durch das spitzenförmigere Rauheitsprofil des Aluminiumwerkstoffs erklärt werden kann. Der Anteil dieser Scherwirkung an der Gesamtreibung hängt davon ab, wie viele Kanten entgegen der Ziehrichtung durch das Blechmaterial überwunden werden müssen. Da der Flächendeckungsgrad über die Anzahl an Strukturen und nicht deren Größe variiert wurde, ergeben sich für höhere Flächendeckungsgrade auch proportional mehr Kanten, die in 90° zur Relativbewegung orientiert sind. Somit steigt der Anteil an reibungserhöhender Scherung mit zunehmender Flächendeckung. Dies dient daher als Erklärungsansatz für eine steigende Reibung bei der Erhöhung der Flächendeckung von 35 % auf 50 %, was in Bild 37 (b) und Bild 38 dargestellt ist.

Einen weiteren reibungserhöhenden Mechanismus bei beschichteten und anschließend strukturierten Reibbacken stellt die steigende Adhäsionsneigung nach dem Freilegen der Cr-Haftvermittlungsschicht oder des Substrats bei zu großen Strukturiefen oder zu geringen Schichtdicken dar. Dies wurde durch die erhöhten Reibzahlen von AA5182 im Kontakt zu beschichteten und strukturierten Oberflächen deutlich. Um die Elementkonzentration an der Werkzeugoberfläche in Abhängigkeit von Schichtdicke und Strukturtiefe zu prüfen, wurden EDX-Messungen entlang der Strukturen durchgeführt (Bild 49).

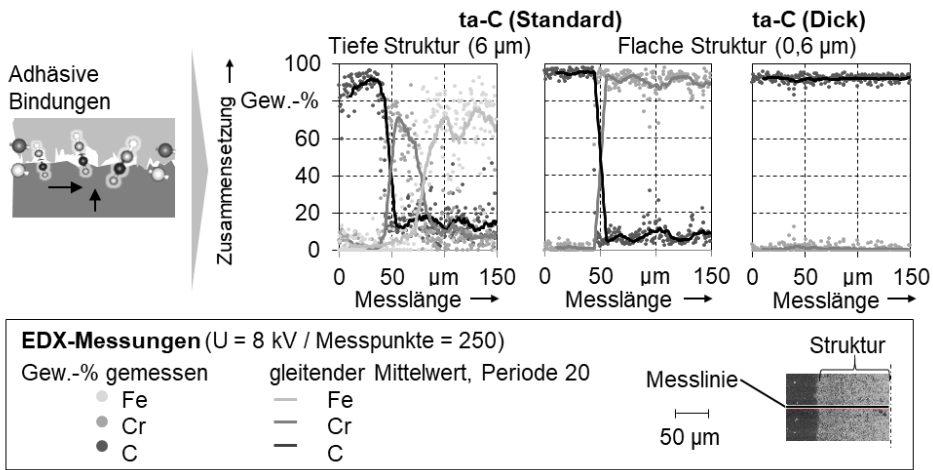


Bild 49: EDX-Linienscan entlang der Mikrostrukturen in Abhängigkeit von Strukturtiefe und Schichtdicke

Die Linienscans entlang des Strukturquerschnitts belegen, dass bei den ta-C-Schichten mit einer Dicke von etwa 0,6 µm im Falle tiefer Strukturen erst die Cr-Haftvermittlungsschicht und dann das Substrat freigelegt wird. Bei der Erzeugung von flachen Strukturen kann das Freilegen von 1.2379 gänzlich verhindert werden, was durch das Fehlen von Fe deutlich wird. Ab der Strukturkante sinkt jedoch der C-Gehalt von etwa 95 % auf nahe 0 %, während gleichzeitig der Cr-Gehalt auf über 90 % steigt. Erst wenn die Dicke der ta-C-Schicht auf 1,3 µm erhöht wird, kann eine vollständig geschlossene Funktionsschicht, bei der auch der Strukturboden innerhalb der Schicht liegt, gewährleistet werden. In den EDX-Messungen wird dies durch einen durchgehend hohen C-Gehalt von über 90 % belegt. Da DCo₄, wie in Abschnitt 5.1 gezeigt, aufgrund der Zinkschicht eine geringe Adhäsionsneigung aufweist, konnten versagensfreie und weitgehend verschleißfreie Streifenziehversuche trotz freigelegter Cr- und

Fe-Elemente durchgeführt werden. Für die zur Adhäsion neigenden Aluminiumlegierungen ist jedoch zwingend eine geschlossene DLC-Funktionsschicht notwendig, um sofortigen Verschleiß zu verhindern. Die Fotografien der Reibbacken nach den Streifenziehversuchen in Bild 50 bestätigen, dass die Adhäsionsneigung in Abhängigkeit der in Kontakt stehenden chemischen Elemente ausschlaggebend für das Reibungs- und Verschleißverhalten bei beschichteten und strukturierten Werkzeugoberflächen ist. Während die Reibbacken nach den Versuchen mit verzinktem DCo₄ keinen makroskopisch sichtbaren Verschleiß aufweisen, sind deutliche Materialanhaftungen nach den Versuchen mit AA5182 sichtbar. Um zu belegen, dass die Zinkschicht auch hier für die Verhinderung der Adhäsion bei freigelegtem Substrat an Strukturkanten und -boden entscheidend ist, wurde stichprobenartig ein Versuch mit DCo₄ ohne Zinkschicht durchgeführt. Hier werden bereits nach einem Streifenziehversuch Anhaftungen an den Strukturen sichtbar. Zudem liegen die ermittelten Reibzahlen mehr als 50 % über denen mit verzinktem DCo₄ im Kontakt zu ta-C-beschichteten und strukturierten Reibbacken.

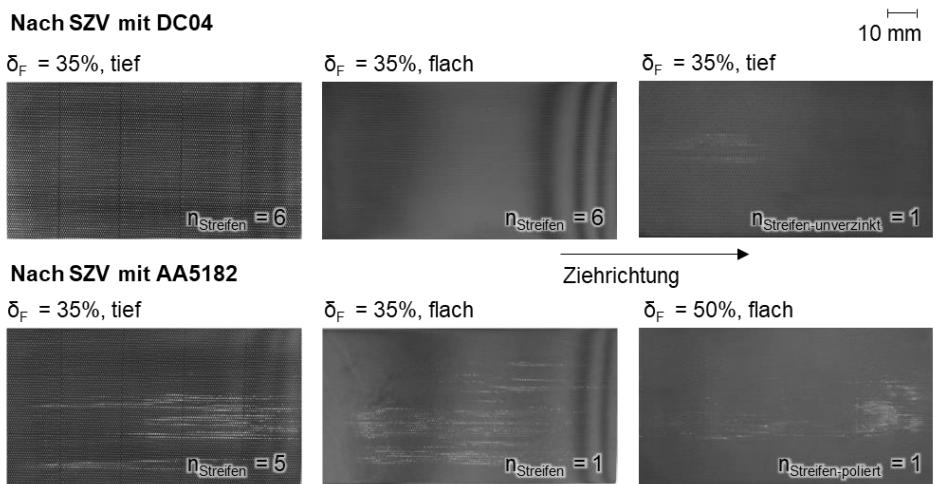


Bild 50: Oberflächen ta-C-beschichteter und strukturierter Reibbacken nach Streifenziehversuchen

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Eigenschaften von DCo₄ und AA5182 liegt, wie bereits erwähnt, neben der chemischen Zusammensetzung in den verschiedenen topografischen Eigenschaften. Um auszuschließen, dass das Anhaften von AA5182 an den Strukturen primär durch das verstärkte Scheren aufgrund des spitzeren Rauheitsprofils zustande

kommt, wurde ebenso ein stichprobenartiger Versuch mit einem polierten Streifen aus AA5182 durchgeführt. Jedoch zeigt sich auch hier bereits nach einem Streifenziehversuch makroskopisch sichtbarer Verschleiß. Diese Stichproben verdeutlichen erneut die Bedeutung der chemischen Zusammensetzung direkt in Kontakt stehender Oberflächen und das große Potential der DLC-Schichten zur Reduzierung der Adhäsionsneigung. Damit Mikrostrukturen verschleißfrei unter trockenen Bedingungen eingesetzt werden können, ist es empfehlenswert, stets eine geschlossene Funktionsschicht anzustreben. Um dies zu erreichen, wäre es für zukünftige Untersuchungen der Kombination aus Strukturen und Schichten denkbar, die Bearbeitungsreihenfolge zu ändern. Durch ein vorhergehendes Strukturieren und ein anschließendes Beschichten kann sichergestellt werden, dass weder die Haftvermittlungsschicht noch das Substrat freigelegt wird. Vorversuche dazu wurden durch eine Zusammenarbeit von LPT und KTMfk bereits durchgeführt.

Neben den reibungserhöhenden Mechanismen existieren im trockenen Kontakt zu mikrostrukturierten Oberflächen jedoch auch reibungsmindernde Mechanismen, welche in Abhängigkeit der Flächendeckung das tribologische Verhalten dominieren können. Wird die Normalkraft im Streifenziehversuch nicht an den Flächendeckungsgrad angepasst, so steigt die Flächenpressung mit zunehmenden Flächendeckungsgrad, was in Bild 38 untersucht wurde. Die erhöhte Flächenpressung bewirkt eine verstärkte Einglättung der Rauheitsspitzen. Dies wiederum führt zu einem reduzierten Verhaken von einzelnen sich berührenden Rauheitsspitzen, da deren Anzahl und Höhe reduziert wird. Der Zusammenhang zwischen wirkender Flächenpressung und Einglättung ist anhand von Topografieaufnahmen sowie der reduzierten Spitzenhöhe Spk in Bild 51 veranschaulicht. Die Einglättung der Blechoberfläche nimmt von 10 % bis 35 % deutlich zu. Der Spk-Wert sinkt gegenüber dem nichtstrukturierten Reibbacken um über die Hälfte von 0,5 auf etwa 0,2 μm . Der reibungsmindernde Einfluss einer höheren nominellen Flächenpressung wurde in Abschnitt 6.2 auch dadurch verdeutlicht, dass die Versuchsreihen, bei denen die Normalkraft entsprechend des Flächendeckungsgrades reduziert wurde, tendenziell zu höheren Reibzahlen führten als in Versuchsreihen, bei denen die Normalkraft nicht entsprechend der Flächendeckung reduziert wurde.

Auch bei den Versuchen mit angepasster Normalkraft bei einem Flächendeckungsgrad von 35 % wird ein deutliches Potential zur Reibungsminderung festgestellt (Bild 37 (b), Bild 38). In diesen Versuchsreihen ist

anzunehmen, dass die Einglättung der Streifen in Kontakt zu strukturierten und nichtstrukturierten Oberflächen aufgrund der gleichen wirkenden Flächenpressung ähnlich groß ist. Dies wiederum führt zu einer kleineren realen Kontaktfläche bei mikrostrukturierten Oberflächen, da die nominell in Berührung stehende Fläche um den Flächendeckungsgrad reduziert ist.

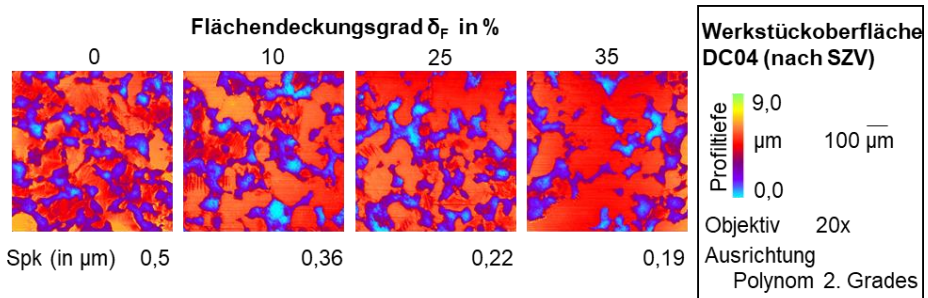


Bild 51: Topografien von DC04 nach Streifenziehversuchen mit strukturierten Reibbacken in Abhängigkeit des Flächendeckungsgrades

Laut einem von Karupannasamy et al. [185] für das Tiefziehen entwickelten Modells ist der Anteil der realen Kontaktfläche abhängig vom nominell wirkenden Druck, der Härte des Werkstücks in MPa und der Dehnung. Überschlägig ergibt sich bei einem nominellen Druck von 4,5 MPa und vernachlässigbarer Dehnung im Streifenziehversuch für DC04 eine anteilige reale Kontaktfläche von 0,1 bis 0,2. Bei nichtstrukturierten Reibbacken führt eine nominelle Kontaktfläche von 5500 mm² demnach zu einer realen Kontaktfläche von 550 bis 1100 mm². Im Vergleich dazu liegt beispielsweise bei 35 % Flächendeckung eine reduzierte nominelle Kontaktfläche von 3575 mm² vor, was zu einer realen Kontaktfläche von schätzungsweise 357,5 bis 715 mm² führt. In den Versuchsreihen mit angepasster Normalkraft unterscheidet sich die reale Kontaktfläche zwischen nicht strukturierten und strukturierten Reibbacken also lediglich um den Anteil der strukturierten Fläche. Diese um 192,5 bis 385 mm² kleinere reale Kontaktfläche bei strukturierten Reibbacken bewirkt bei gleicher Einglättung eine geringere Anzahl sich berührender Rauheitsspitzen, was wiederum eine Reduzierung des Bewegungswiderstands durch mechanisches Verhaken bedingt. Eine weitere Vermutung für einen reibungsmindernden Mechanismus beim Einsatz mikrostrukturierter Werkzeugoberflächen stellt die Möglichkeit des Auffangens und Sammeln von Verschleißpartikeln innerhalb der Strukturen dar. Durch das Vorhandensein der Strukturen könnten nach [169] Verschleißpartikel in

einem geschlossenen tribologischen System schneller aus der Wirkfuge transportiert werden. Innerhalb des offenen tribologischen Systems in der vorliegenden Arbeit konnte diese Vermutung jedoch nicht anhand der Oberflächencharakterisierung bestätigt werden. Es wurde keine Häufung von Verschleißpartikeln an den Strukturböden ermittelt. Zudem spielt Abrasiv- im Vergleich zu Adhäsionsverschleiß bei den untersuchten Kontaktbedingungen eine untergeordnete Rolle, weshalb diesem möglicherweise existierenden Mechanismus ohnehin eine geringere Bedeutung beizumessen wäre.

6.4 Eignung der Oberflächenmodifikationen für das Trockentiefziehen

In Abschnitt 5.2 wurde auf Basis der Simulation des Trockentiefziehens abgeleitet, dass die maximal zulässigen Reibzahlen für ein versagensfreies Umformen des Demonstratorbauteils für AA6014 bei 0,30 und für AA5182 bei 0,20 liegen. Für DCo₄ ist es auch ohne Modifikationen gelungen, Rechtecknäpfe ohne Risse und Schäden an der Napfoberfläche schmierstofffrei tiefzuziehen. Somit gilt es, für DCo₄ lediglich die Vorgabe mit den werkzeugseitigen Modifikationen Reibzahlen zu realisieren, welche unterhalb der für den trockenen Kontaktzustand zu konventionellen Werkzeugoberflächen ermittelten Reibzahlen liegen. Darüber hinaus müssen die Modifikationen Verschleiß verhindern und eine hohe Qualität der Blechoberfläche gewährleisten. Eine Übersicht zu den untersuchten Modifikationen und deren Eignung in Abhängigkeit des Blechwerkstoffes ist in Bild 52 gegeben. Im Kontakt zum Blechwerkstoff DCo₄ sind grundsätzlich alle untersuchten Modifikationen geeignet. Als Schichten sind sowohl ta-C und a-C:H als auch a-C:H:W einsetzbar. Aufgrund der nicht zur Adhäsion neigenden Zinkbeschichtung des DCo₄ führt selbst ein hoher W-Anteil zu niedrigen Reibzahlen von etwa 0,15. Auch der Einfluss der Schichtrauheit ist weniger ausgeprägt als bei den Aluminiumlegierungen, da erst bei einem Rpk-Wert von etwa 0,3 µm eine deutliche Reibungserhöhung messbar ist. Auch die Verwendung von Mikrostrukturen war im Kontakt zu DCo₄ sowohl ohne Beschichtung als auch in Kombination mit verschiedenen Schichtdicken und Strukturturen möglich. Im Gegensatz dazu sind deutlich weniger Modifikationen für den schmierstofffreien Kontakt zu Aluminiumlegierungen geeignet. Von einer Verwendung W-dotierter DLC-Schichten ist für Aluminiumlegierungen abzuraten, da durch die metallische Phase die Adhäsionsneigung nicht ausreichend verringert wird. Wird der W-Anteil stark reduziert und eine glatte Oberfläche mit Rpk-Werten unterhalb von 0,04 µm bereitgestellt,

kann eine sofortige Adhäsion im Kontakt zum ersten Streifen auf makroskopischer Ebene verhindert werden. Dennoch resultieren höhere Reibzahlen als im Kontakt zu a-C:H-Schichten, weshalb diese für das schmierstofffreie Tiefziehen zu präferieren sind. Für AA5182 und AA6014 wurden für a-C:H- und ta-C-Schichten bei Rpk-Werten von unter $0,05\ \mu\text{m}$ Reibzahlen im Bereich von etwa $0,15$ ermittelt. Bei erhöhten Rpk-Werten zwischen $0,10$ und $0,15\ \mu\text{m}$ resultieren Reibzahlen im Grenzbereich zu den Zielvorgaben von $0,20$ für AA5182 und $0,30$ für AA6014. Zudem kommt es auf mikroskopischer Ebene zur Adhäsion. Der Einsatz von Mikrostrukturen führt auf unbeschichteten Oberflächen im Kontakt zu beiden Aluminiumlegierungen zu hohen Reibzahlen und starker Adhäsion an den Strukturkanten. Werden die Mikrostrukturen auf beschichteten Oberflächen appliziert und ein Freilegen von Haftvermittlungsschicht und Substrat verhindert, wie unten in Bild 52 veranschaulicht, dann wäre ein Einsatz von Mikrostrukturen möglich.

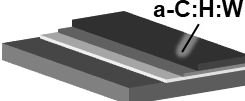

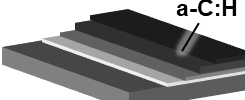

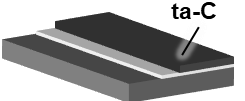

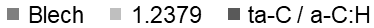
Modifikation Beschichtung	Eignung für			Modifikation Strukturen	Eignung für		
	DC04	AA5182	AA6014		DC04	AA5182	AA6014
 a-C:H:W	ja		nein		ja	nein	nein
	Wolfram $\uparrow \rightarrow$ Adhäsion $\uparrow \rightarrow \mu \uparrow$						
 a-C:H	ja	ja	ja		ja	nein	nein
	bis Rpk $\sim 0,1\ \mu\text{m}$						
 ta-C	ja	ja	ja		ja	ja	-
	bis Rpk $\sim 0,15\ \mu\text{m}$ $< 0,13\ \mu\text{m}$						
							

Bild 52: Bewertung der werkzeugseitigen Oberflächenmodifikationen

Da das Potential zur Reibungsminderung bei AA5182 im Kontakt zu mikrostrukturierten ta-C- und a-C:H-Schichten mit 6% sehr gering ausgefallen ist, wird hier keine messbare Beeinflussung der tribologischen Bedingungen beim Tiefziehen erwartet. Zudem könnten die steigenden Flächenpressungen im Flanschbereich mit fortschreitendem Blecheinzug zu einem zu starken Hineindrücken von weichem Blechmaterial in die Strukturen führen. Es ist daher zu empfehlen, zunächst weiterführende Untersuchungen mit strukturierten Oberflächen unter variierenden

Prozessparametern und im Kontakt zu Aluminiumwerkstoffen durchzuführen, bevor die Mikrostrukturen auf ein Tiefziehwerkzeug appliziert werden. Um die grundsätzliche Realisierbarkeit des Trockentiefziehens für Stahl- und Aluminiumlegierungen nachzuweisen, werden die untersuchten a-C:H- und ta-C-Schichten als erfolgsversprechendste Oberflächenmodifikation bewertet.

7 Auslegung und Erprobung eines maßgeschneiderten Werkzeugs für das Trockentiefziehen

Die Eignung der im vorherigen Abschnitt entwickelten Oberflächenmodifikationen für das Trockentiefziehen wird nachfolgend anhand des schmierstofffreien Tiefziehens von Rechteckknäpfen untersucht. Zunächst erfolgt eine numerische Auslegung des Trockentiefziehprozesses. Anschließend wird das Einsatzverhalten modifizierter Werkzeugoberflächen experimentell analysiert.

7.1 Numerische Auslegung des Referenzprozesses

Für das konventionelle Tiefziehen sind aus Abschnitt 2.1.3 verschiedene Maßnahmen zur Stoffflusssteuerung und Vergrößerung des Prozessfensters wie segmentierte Niederhaltersysteme oder lokal variierende Platinbefettung bekannt. Diese Maßnahmen führen zu unterschiedlichen tribologischen Bedingungen durch lokal variierende Flächenpressungen oder Schmierfilmeigenschaften. Im Trockentiefziehen ist es möglich, die tribologischen Bedingungen lokal durch die Applikation unterschiedlicher Oberflächenmodifikationen einzustellen. Ob eine solche Segmentierung für den in dieser Arbeit gewählten Demonstrator zielführend ist, wird mit Hilfe des in Abschnitt 5.2.1 validierten 90°-Modells numerisch analysiert. Um den Einfluss variierender Reibzahlen lokal zu untersuchen, wurde das Modell werkzeugseitig in verschiedene Segmente unterteilt. Die Reibzahl am Stempel wurde ebenso wie in Abschnitt 5.2 aufgrund der geringen Relativbewegung zwischen Blech und Stempel nicht variiert. Die Segmente an Niederhalter und Matrize wurden im Modell in entsprechende Segmentgruppen (SG), welche in Bild 53 dargestellt sind, zusammengefasst.

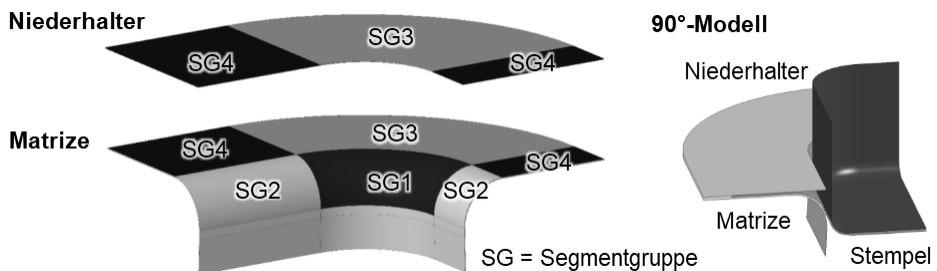


Bild 53: Einteilung von Niederhalter und Matrize in Segmente

7 Auslegung und Erprobung eines maßgeschneiderten Werkzeugs für das Trockentiefziehen

Die Einteilung der Segmente erfolgte entsprechend der unterschiedlichen Spannungszustände und unterschiedlichen Anforderungen an die Stoffflusssteuerung. So wurde der Flansch in den Eckbereich (SG₃) und den geraden Bereich (SG₄) unterteilt, da im Eckbereich besonders hohe tangentielle Druckspannungen vorliegen, die den Stofffluss hemmen, wohingegen im geraden Bereich überwiegend einachsige Zugspannungen vorherrschen. Somit könnten niedrigere Reibzahlen in SG₃ von Vorteil sein. Der Ziehringradius wurde ebenso segmentiert, da hier lokal stark unterschiedliche Kontaktnormal- und Scherspannungen vorliegen, deren Maximalwerte sich primär auf den Eckbereich des Radius konzentrieren. Für den Platinezuschnitt und den Niederhalterdruck wurden die Werte aus den experimentellen und numerischen Versuchen in Abschnitt 5.1.2 genutzt. In einem vollfaktoriellen Versuchsplan wurden die Reibzahlen in drei Stufen (μ_{niedrig} , μ_{mittel} , μ_{hoch}) für jede der vier Segmentgruppen variiert. Der Versuchsplan in Tabelle 12 wurde so sortiert, dass mit aufsteigender Versuchsnummer der Anteil der Segmente mit niedriger Reibzahl steigt.

		Versuch																										
SG		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2		+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3		+	+	+	0	0	0	-	-	-	+	+	+	0	0	0	-	-	-	+	+	+	0	0	0	-	-	-
4		+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-

		Versuch																																
SG		28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54						
1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
2		+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
3		+	+	+	0	0	0	-	-	-	+	+	+	0	0	0	-	-	-	+	+	+	0	0	0	-	-	-						
4		+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-						

		Versuch																													
SG		55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81			
1		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
2		+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-			
3		+	+	+	0	0	0	-	-	-	+	+	+	0	0	0	-	-	-	+	+	+	0	0	0	-	-	-			
4		+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-			

Legende: - μ_{niedrig} 0 μ_{mittel} + μ_{hoch}

Tabelle 12: Versuchsplan der Variantensimulation mit lokal variierenden Reibzahlen

Daher liegt bei Versuch Nummer 1 zwischen dem Blech und allen Segmentgruppen μ_{hoch} und bei Versuch Nummer 81 μ_{niedrig} vor. Aufgrund der gewählten Sortierung steigt die Reibung im Flanschbereich (SG₃, SG₄) alle neun Versuche von μ_{niedrig} auf μ_{hoch} .

Die verwendeten Reibzahlen sowie Niederhalterdrücke und Ziehtiefe zum Auswertzeitpunkt sind in Tabelle 13 dargestellt. Als obere Reibzahlgrenze μ_{hoch} wurde die Reibzahl aus dem schmierstofffreien Kontakt zu konventionellen Werkzeugoberflächen eingesetzt. Als mittlere und niedrigste Reibzahl wurden die mit Hilfe der Oberflächenmodifikationen erreichten Reibzahlen eingesetzt. Im Falle von DC04 entspricht die Reibzahl μ_{niedrig} einer ta-C-Schicht mit Mikrostrukturierungen mit einer Flächendeckung von 35 % und μ_{mittel} einer ta-C-Schicht ohne Mikrostrukturierung. Für die beiden Aluminiumlegierungen wurden die Reibzahlen für ta-C- (μ_{niedrig}) und a-C:H-beschichtete Oberflächen (μ_{mittel}) ohne Strukturierung gewählt, da mit den untersuchten Mikrostrukturierungen keine signifikante Reibungsbeeinflussung ohne ein erhöhtes Verschleißrisiko möglich war.

Tabelle 13: Parameter der segmentweisen Variantensimulation

Blechwerkstoff	μ_{niedrig}	μ_{mittel}	μ_{hoch}	Niederhalterdruck	Ziehtiefe S _{Auswertung}
DC04	0,115	0,152	0,200	4,5 MPa	28 mm
AA5182	0,140	0,190	0,300	1,5 MPa	25 mm
AA6014	0,121	0,186	0,570	1,5 MPa	25 mm

Um zu überprüfen, ob mittels einer an Niederhalter und Matrize lokal veränderlichen Reibzahl ein verbessertes Tiefziehergebnis realisierbar ist, wurden die Simulationen hinsichtlich der maximalen Stempelkraft, sowie den auftretenden Kontaktnormal- und Scherspannungen gemittelt über die 50 Maximalwerte analysiert. Zusätzlich wurde die Blechdickenverteilung ausgewertet. Die Variantensimulation dient der Bestimmung der notwendigen tribologischen Anpassungen der Werkzeugsegmente.

Bild 54 zeigt die maximale Stempelkraft der 90°-Modelle. Zur Übertragung der Umformkraft auf den realen Tiefziehversuch müssten die angegebenen Kräfte daher mit dem Faktor vier multipliziert werden. Für den Werkstoff AA6014 liegen bei einer Ziehtiefe von 25 mm für die Varianten mit einem nicht beschichteten Eckradius (SG 1, Versuch 1 – 27) ebenso wie bei einer Kombination aus nicht beschichtetem Eckflansch und Radius (SG 2 und SG 3, Versuch 55 – 57) bereits Risse vor. Insgesamt ist für alle drei Werkstoffe zu erkennen, dass die Maximalkraft mit steigendem

Anteil an beschichteten Segmenten und somit niedrigerer Reibzahl sinkt. Zudem ist nach jeweils neun Versuchen ein Sprung der maximalen Stempelkraft zu erkennen. Diese Versuche sind jeweils dadurch gekennzeichnet, dass der Flanschbereich unbeschichtet ist und somit die höchste untersuchte Reibzahl aufweist.

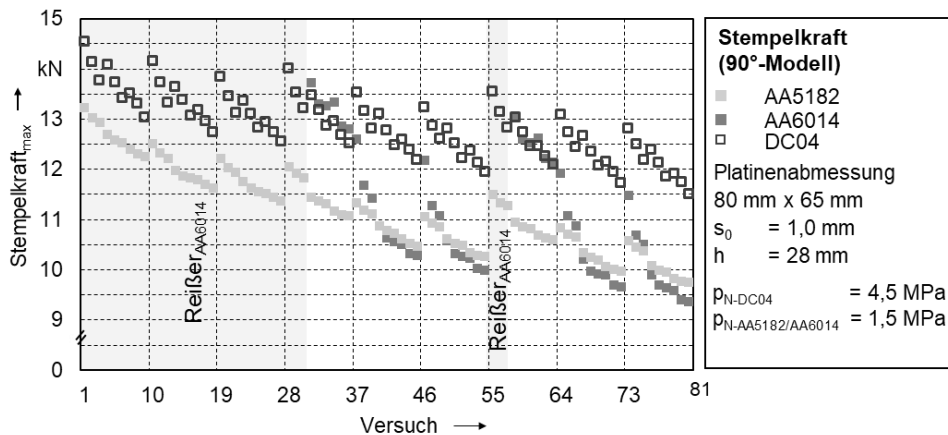


Bild 54: Maximale Stempelkräfte in Abhängigkeit der Werkzeugsegmentierung

Zu niedrigen Umformkräften führen alle Varianten in denen keinerlei unbeschichtete Segmente vorhanden sind. Erwartungsgemäß liegen jedoch werkstoffübergreifend die niedrigsten Maximalkräfte vor, wenn alle Segmente so modifiziert werden, dass einheitlich niedrige Reibzahlen realisiert werden. Bezogen auf die Stempelkraft, welche indirekt auch die Werkzeugbeanspruchung beeinflusst [186] sowie die notwendige Energie für den Umformprozess bestimmt, wären daher einheitlich Modifikation zur Erreichung minimal möglicher Reibzahlen erstrebenswert. Als weiteres Kriterium wurden die maximale Blechausdünnung und -aufdickung ausgewertet, da diese Kennwerte Hinweise auf ein Versagen durch Risse oder Falten geben. Zur Vermeidung der Riss- und Faltenbildung sind gegenläufige Maßnahmen zu ergreifen, da die Falten durch eine höhere Niederhalterkraft unterdrückt werden können, was jedoch gleichzeitig mit einer größeren Ausdünnung verbunden ist. Demnach verläuft die Blechdickenänderung in Bild 55 tendenziell gegenläufig, sodass Versuche mit geringer Ausdünnung zu einer erhöhten Aufdickung führen. Ähnlich wie bei der Entwicklung der Stempelkraft zeigt sich auch für die Blechausdünnung bei allen drei Werkstoffen der niedrigste Absolutwert bei Versuch Nummer 81. Bei dieser Variante liegt jedoch gleichzeitig die

größte Blechaufdickung vor. Für Varianten mit einer minimalen Blechaufdickung resultiert jedoch eine überproportionale Erhöhung der Blechausdünnung.

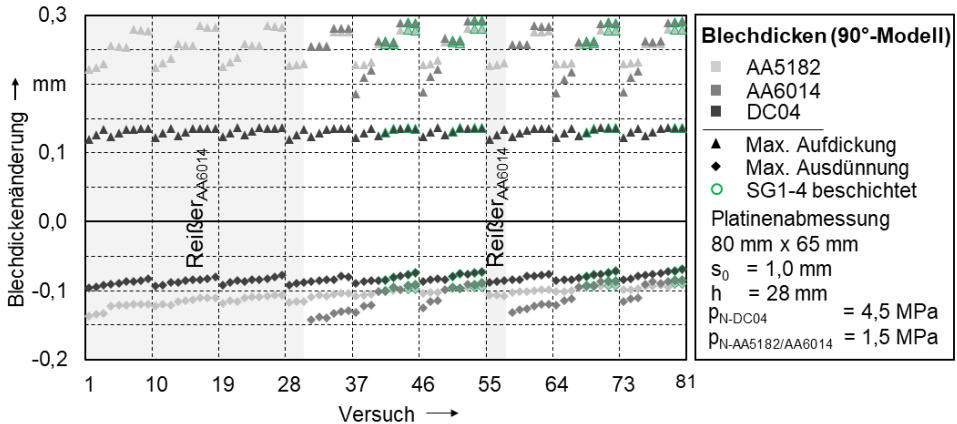


Bild 55: Blechkickenänderung in Abhängigkeit der Werkzeugsegmentierung

So führt für DC04 eine Reduzierung der Aufdickung um 15 % zu einer Erhöhung der maximalen Ausdünnung um 42 %. Ähnliches gilt für AA5182, bei dem eine um 19 % verringerte Aufdickung zu einer 30 % höheren Ausdünnung führt. Da beim Trockentiefziehen gerade die Blechausdünnung und das Rissversagen als kritisch anzusehen sind, sollte auf Segmentierungen verzichtet werden, welche eine Erhöhung der Ausdünnung bewirken. Möglich ist dies mit Segmentierungen, bei denen im Flanschbereich (SG₃, SG₄) die Reibzahl als μ_{niedrig} (Tabelle 13) definiert ist. Dies ist bei Versuch 9 und dessen Vielfachen der Fall. Zur Reduktion der Aufdickung und somit der Faltenbildungsgefahr sollten andere Maßnahmen wie eine Erhöhung des Niederhalterdrucks in Betracht gezogen werden. Der geringere Niederhalterdruck von 1,5 MPa bei den Aluminiumlegierungen im Vergleich zu 4,5 MPa bei DC04 ist auch der Grund, warum bei AA6014 und AA5182 die Aufdickung mit Werten zwischen 0,18 bis 0,28 mm höher ausfällt als bei DC04 mit Werten von etwa 0,13 mm. Es wurde hier jedoch bewusst ein niedriger Niederhalterdruck von 1,5 MPa gewählt, um die Vergleichbarkeit zu den Referenzversuchen mit konventionellen Werkzeugoberflächen aus Abschnitt 5.1.2 zu gewährleisten. Aus Abschnitt 6.2.1 ist ersichtlich, dass vor allem für die Aluminiumlegierungen eine Beschichtung der Werkzeuge zur Verhinderung von Adhäsion notwendig ist. Werden aufgrund dessen nur die Varianten berücksichtigt, welche keine unbeschichteten Segmente aufweisen, führt für beide

Aluminiumlegierungen jeweils Versuch 42 und für DCo4 Versuch 68 zur geringsten maximalen Blechaufdickung. Die Blechdickenverteilung dieser Versuche, gekennzeichnet als (1), sind in Bild 56 im Vergleich zur Variante (2) mit einer einheitlichen ta-C-Beschichtung aller Segmentgruppen (SG) gegenübergestellt.

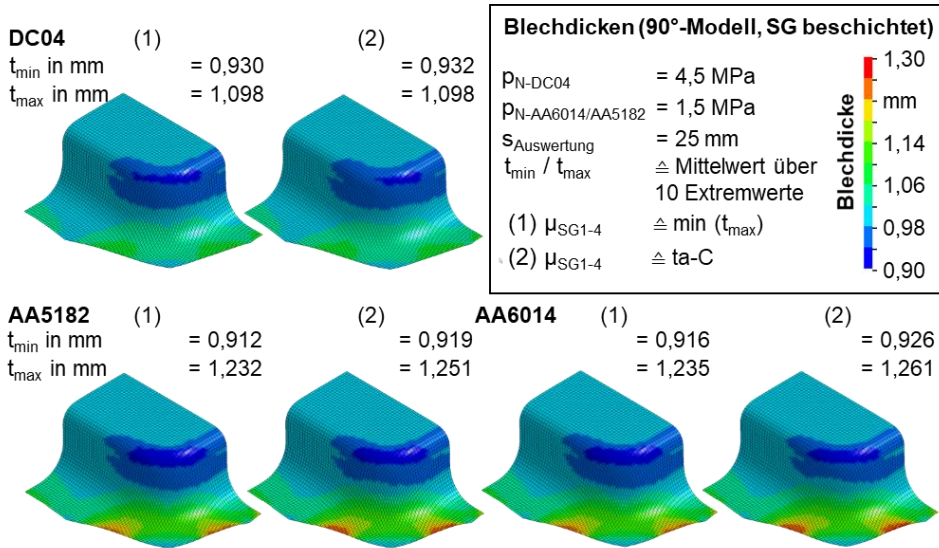


Bild 56: Blechdickenverteilung bei Segmentierung für minimale Blechaufdickung im Vergleich zu vollständiger ta-C-Beschichtung an Niederhalter und Matrize

Unabhängig vom Blechwerkstoff wird für (2) ersichtlich, dass die lokal erhöhte Ausdünnung im Eckbereich des Napfbodens im Vergleich zu (1) reduziert wird. Dies wird auch anhand der minimalen Ausdünnung t_{\min} gemittelt über die zehn am stärksten ausgedünnten Elemente deutlich. Die Elemente mit erhöhter Blechaufdickung erstrecken sich für (1) und (2) über einen ähnlichen Bereich. Jedoch weist in Variante (2) eine größere Elementanzahl die Maximalwerte von bis zu 1,27 mm auf, sodass gemittelt über zehn Elemente eine etwas größere Aufdickung resultiert. Insgesamt wird anhand der Gegenüberstellung in Bild 56 deutlich, dass durch die Segmentierung nur ein geringes Potential zur gezielten Stoffflusssteuerung vorliegt – zumindest, wenn die durch unterschiedliche Modifikationen experimentell ermittelten Reibzahlen eingesetzt werden.

Neben dem Einfluss variierender Reibzahlen auf die Blechdickenverteilung wurde die Entwicklung der Werkzeugbeanspruchung hinsichtlich Kontaktnormal- und Scherspannungen untersucht. Aufgrund der großen Relativbewegung und der erhöhten Spannungen im Radienbereich

werden in Bild 57 lediglich die Werkzeugbeanspruchungen an der Matrize dargestellt. Zur Vermeidung einer Verzerrung der Ergebnisse durch Singularitäten [187] wurden die Spannungen jeweils über die 50 Elemente mit den höchsten Werten gemittelt. Aufgrund der höheren Festigkeit von DC04 und der somit größeren notwendigen Umformkräfte liegen die maximalen Kontaktnormalspannungen für die Simulationen mit diesem Blechwerkstoff mit Werten zwischen 140 und 180 MPa etwa doppelt so hoch wie für beide Aluminiumlegierungen. Einen weiteren Grund für die höheren Kontaktnormalspannungen stellt der spätere Auswertezeitpunkt von DC04 dar, welcher mit einer höheren Kaltverfestigung des Werkstoffs einhergeht.

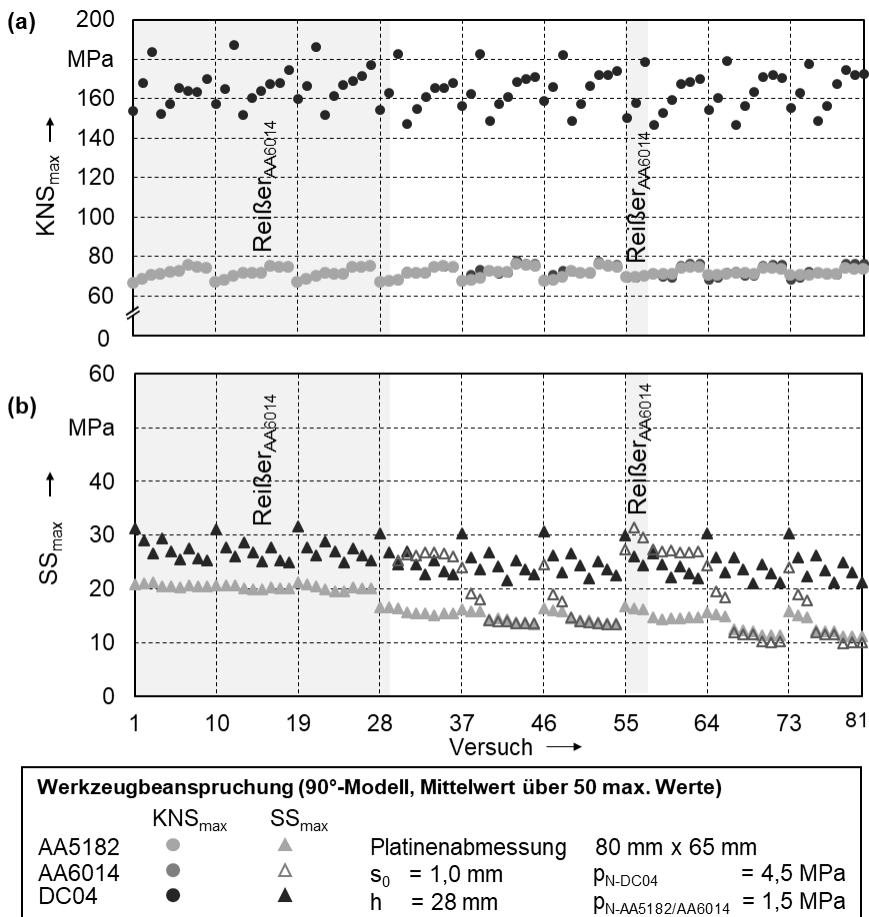


Bild 57: (a) Kontaktnormalspannungen (KNS_{max}) und (b) Scherspannungen (SS_{max}) an der Matrize in Abhängigkeit der Segmentierung

Die maximalen Scherspannungen an der Matrize liegen für alle drei Werkstoffe in einem Bereich zwischen 10 und 30 MPa. Die generellen Verläufe der Spannungen in Abhängigkeit der Werkzeugsegmentierung sind für DCo₄ und die beiden Aluminiumlegierungen ähnlich. Es ist zu erkennen, dass eine Verringerung der Reibzahl im Flanschbereich zu einem Anstieg der Kontaktnormalspannungen führt. Dies wird im Versuch 3 und dessen Vielfachen deutlich, da hier stets die Reibung an SG₄ von dem mittleren Niveau μ_{mittel} auf das niedrigere Niveau μ_{niedrig} reduziert wird und daraus ein deutlicher Anstieg der Kontaktnormalspannungen resultiert. Dieser Einfluss ist besonders ausgeprägt, wenn der Eckflansch höhere Reibzahlen aufweist als die restlichen Flanschsegmente. In diesem Fall wird der Stofffluss an SG₄ begünstigt und an SG₃ gehemmt. Dies führt zu erhöhten tangentialen Druckspannungen und letztlich zu einer erhöhten Blechaufdickung, aufgrund derer der Niederhalterdruck nur noch über eine geringere Anzahl von Elementen übertragen wird und somit zu lokal erhöhter Normalspannung führt. Obwohl die Kontaktnormalspannungen bei allen Varianten deutlich höher ausfallen als die Scherspannungen, sind diese insgesamt als unkritisch zu bewerten, da sowohl die Druckfestigkeit des Kaltarbeitsstahls [188] als auch die der Beschichtungen [163] deutlich oberhalb von 200 MPa liegt.

Aufgrund des Reibzahlmodells, welches die Reibzahl als Quotient aus Schub- und Normalspannung beschreibt, ist sowohl für die Kontaktnormalspannungen als auch für die Scherspannungen die Tendenz zu erkennen, dass mit zunehmender Anzahl an Segmenten mit niedrigen Reibzahlen die Maximalwerte sinken. Deutlich wird dies beispielsweise anhand der sinkenden Kontaktnormalspannungen der Versuche 12, 21, 30, 39, 48, 57, 66 und 75 für DCo₄, bei denen an SG₃ eine hohe Reibzahl und an SG₄ eine niedrige Reibzahl anliegt und mit fortlaufender Versuchsnummer die Reibung an den restlichen Segmentgruppen zunehmend reduziert wird. Ein Vergleich von Versuch 1 mit Versuch 81 belegt, dass das insgesamt niedrigere Reibzahlniveau bei Versuch 81 aufgrund der höheren Blechaufdickung jedoch einen negativen Einfluss auf die Kontaktnormalspannung besitzt. Aufgrund der Zusammenhänge aus dem Reibzahlmodell führt dies jedoch gleichzeitig zu einem überproportionalen Absinken der Scherspannungen. So nimmt die Kontaktnormalspannung in Versuch 81 um 12 % zu, gleichzeitig sinkt jedoch die Scherspannung um 32 %. Da erhöhte Scherspannungen insgesamt hinsichtlich Werkzeugverschleiß und möglichem Schichtversagen als kritischer zu bewerten sind, gilt es, Segmentierungen zu wählen, welche zu geringen Scherspannungen

führen. Geeignet sind daher besonders Varianten, welche im Flanschbereich einheitlich niedrige Reibzahlen aufweisen. Die aus Sicht einer möglichst geringen Blechaufdickung bereits in Bild 56 (1) beschriebene Variante führt bei allen drei Werkstoffen zu geringeren Kontaktnormalspannungen an der Matrize als die Variante mit einheitlicher ta-C-Beschichtung.

Zur Veranschaulichung sind in Bild 58 die Verteilung von Kontaktnormal- und Scherspannung an der Matrize exemplarisch für AA6014 gegenübergestellt. Die höchsten Spannungen treten am Beginn des Einlaufradius, im Eckbereich des Matrizenradius sowie lokal begrenzt im Flansch am Übergang vom Geraden- zum Eckbereich auf. Die Kontaktnormalspannungen unterscheiden sich in Höhe und Verteilung zwischen Bild 58 (1) und (2) kaum. Es wird jedoch deutlich, dass durch die einheitliche ta-C-Beschichtung eine überproportionale Reduzierung der Scherspannungen bewirkt werden kann, was durch den Vergleich der Scherspannungen in Bild 58 (1) und (2) zu erkennen ist. So steigt die Kontaktnormalspannung beispielsweise für AA6014 um 6,5 %, gleichzeitig sinkt die Scherspannung um 28,3 %.

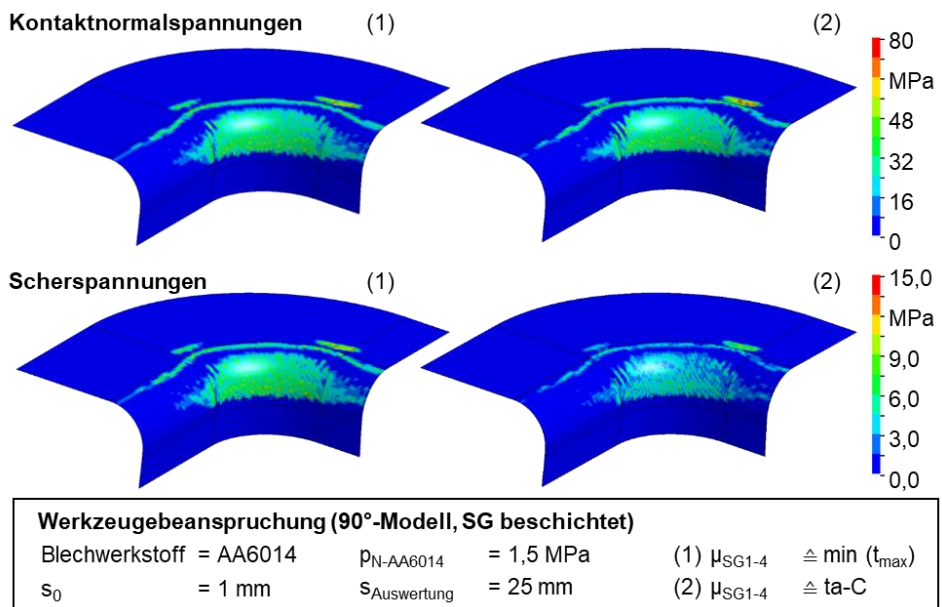


Bild 58: Kontaktnormal- und Scherspannung in Abhängigkeit der Segmentierung für AA6014

Abschließend gilt es, festzuhalten, dass durch eine lokale Variation der Reibzahlen eine Stoffflusssteuerung grundsätzlich möglich ist. Ein Vergleich der Stempelkräfte, Blechdickenverteilung und Werkzeugbeanspruchung zwischen vollständig ta-C-beschichtetem Niederhalter und gleichzeitig vollständig ta-C-beschichteter Matrize mit lokal modifizierten Varianten zeigt, dass lokal erhöhte Reibzahlen zur Stoffflusshemmung hilfreich sein können jedoch gleichzeitig einen negativen Einfluss auf die restlichen Auswertegrößen besitzen. So bewirkt eine lokal erhöhte Reibung, welche zur Steuerung des Werkstoffflusses notwendig ist, eine erhöhte Werkzeugbeanspruchung in Form von steigenden Scher- und Kontaktnormalspannungen sowie steigende Umformkräfte. Somit ist das Potential lokal variierender tribologischer Bedingungen für die in dieser Arbeit gewählte Demonstratorgeometrie begrenzt. Sollte es zukünftig durch zusätzliche Oberflächenmodifikationen gelingen, den Bereich der verschleißfrei einstellbaren Reibzahlen zu erweitern, wäre es denkbar, das Potential der lokalen Reibungsvariation erneut numerisch zu prüfen. Im Allgemeinen ist jedoch zu erwarten, dass das Potential für lokal variierende tribologische Bedingungen bei Geometrien mit komplexeren Spannungszuständen wie beispielsweise kreuzförmigen Näpfen besser ausgeschöpft werden kann. Um im Rahmen dieser Arbeit werkstoffübergreifend die Realisierbarkeit des Trockentiefziehens in anwendungsnahen Umformversuchen nachzuweisen, wird daher auf eine lokale Oberflächenmodifikation an Niederhalter und Matrize verzichtet.

7.2 Trockentiefziehen mit maßgeschneidertem Werkzeug

Für die experimentellen Versuche in diesem Abschnitt wird der gleiche Niederhalterdruck und Platinezugschnitt wie in Abschnitt 5.1.2 verwendet. Als vielversprechendste Modifikationen erwiesen sich nach der Bewertung in Abschnitt 6.4 die a-C:H- sowie die ta-C-Schicht. Für beide Schichtvarianten wurde jeweils ein Segmentsatz für Niederhalter und Matrize einheitlich beschichtet. Die ta-C- und a-C:H-beschichteten Reibbacken führten in Streifenziehversuchen für beide Aluminiumlegierungen zu einer deutlichen Reibungs- und Verschleißreduktion. Die Übertragbarkeit dieses vielversprechenden tribologischen Einsatzverhaltens auf Umformprozesse wird in diesem Abschnitt anhand von Trockentiefziehversuchen analysiert. Dazu wurden die Aktivflächen von Niederhalter und Matrize beschichtet. Der Stempel hingegen wurde aufgrund der geringen Relativbewegung zum Blech nicht modifiziert. Da die Werkzeugrauheit die Reibung negativ beeinflusst, was in Abschnitt 6.2.1 gezeigt und in

Abschnitt 6.3.1 näher erläutert wurde, wurden die Oberflächen vor dem Beschichten poliert und danach mechanisch nachbehandelt. Dies gewährleistet niedrigere Rauheitsspitzen als ohne Polieren und Nachbehandeln. Um den Einfluss der Werkzeugrauheit auch im Tiefziehen zu verifizieren, erfolgte die Nachbehandlung der beschichteten Segmente in zwei Stufen. Die nachfolgend als „rau“ bezeichnete Variante der ta-C-Schichten besitzt einen Rpk-Wert von $0,066 \pm 0,013 \mu\text{m}$ im Vergleich zu $0,056 \pm 0,009 \mu\text{m}$ für die Variante „glatt“. Für die a-C:H-beschichteten Segmente liegen die Rpk-Werte bei $0,09 \pm 0,030 \mu\text{m}$ im „rauen“ und $0,04 \pm 0,008 \mu\text{m}$ im „glatten“ Fall. Die konventionelle Werkzeugoberfläche, welche als Referenz aufgeführt ist, wurde poliert und weist Rpk-Werte von $0,04 \pm 0,01 \mu\text{m}$ auf. Die Rauheit ist daher vergleichbar mit den „glatten“ Varianten beider Beschichtungen. Die Kraft-Weg-Verläufe, die aus dem schmierstofffreien Tiefziehen für die verschiedenen Modifikationen resultieren, sind in Bild 59 gegenübergestellt.

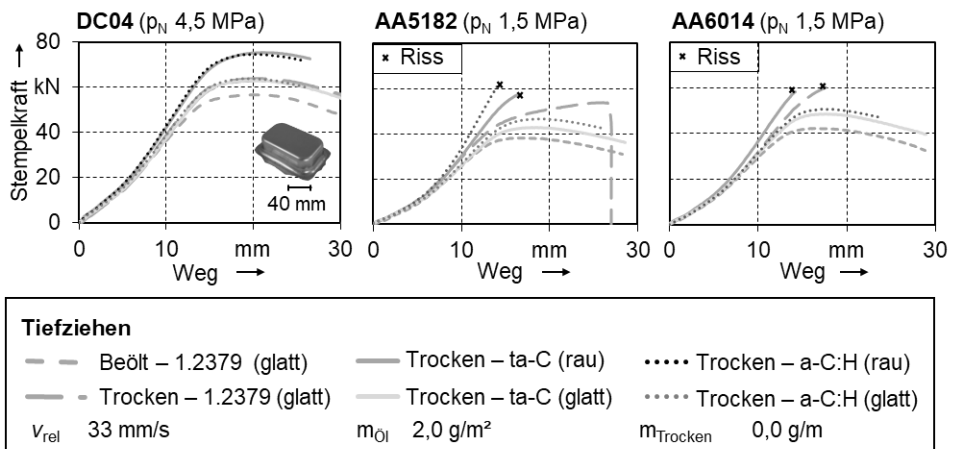


Bild 59: Kraft-Weg-Verläufe aus dem Rechtecknapfzug in Abhängigkeit der Werkzeugmodifikation

Beim Tiefziehen von DC04 ergeben sich unabhängig von Beölung und Oberflächenmodifikation ähnliche Kurvenverläufe mit unterschiedlichen Niveaus der Maximalkräfte. Die niedrigsten Umformkräfte liegen im beölte Fall vor. Bei der Verwendung von ta-C- und a-C:H-beschichteten Aktivflächen führt die rauere Variante beider Schichten zu den höchsten Stempelkräften mit maximalen Werten von etwa 75 kN. Eine Reduzierung der Rpk-Werte bewirkt für beide Schichten einen vergleichbaren Abfall der benötigten Stempelkraft. Ein Tiefziehen bis zur mit diesem Zuschnitt

maximalen Tiefe von 30 mm wird im schmierstofffreien Kontakt zu glatten ta-C und a-C:H-beschichteten Werkzeugen erreicht. Nach einem Ziehweg von etwa 20 mm sinkt wie im beölte Kontakt die Stempelkraft, was ein Indiz für einen verschleißfreien Tiefziehversuch darstellt. Die Kraft-Weg-Verläufe der glatten beschichteten Werkzeuge gleichen bei DC04 in etwa dem Verlauf mit glatten nicht beschichteten Werkzeugoberflächen. Der Grund dafür ist, dass bei DC04 auch bei direktem Kontakt zu 1.2379 kein Verschleiß auftrat und somit durch die Beschichtungen keine signifikante Reibungsreduktion erzielt wurde. Für die Aluminiumlegierungen führen die rauen ta-C-beschichteten Werkzeuge aufgrund zu hoher Reibung zu frühzeitigem Versagen durch Risse im Eckbereich des Napfbodens. Für AA5182 wurde ein ähnliches Verhalten für raue a-C:H-beschichtete Oberflächen gezeigt. Erst bei Rpk-Werten unterhalb von 0,06 μm bewirken die ta-C- und a-C:H-beschichteten Kontaktflächen eine ausreichende Reibungsreduktion. Für AA5182 und für AA6014 ist ab etwa 2/3 des Ziehwegs ein Sinken der Stempelkraft zu beobachten, was darauf hindeutet, dass Adhäsion auf makroskopischer Ebene durch die Schichten verhindert werden konnte. Die Entwicklung der Umformkraft in Abhängigkeit der Anzahl gezogener Näpfe wurde durch den Vergleich der Maximalkraft pro Hub erfasst. Diese sind für die verschiedenen Werkzeugmodifikationen und Blechwerkstoffe in Bild 60 dargestellt. Die horizontale Linie kennzeichnet jeweils die maximalen Stempelkräfte aus den beölte Versuchsreihen.

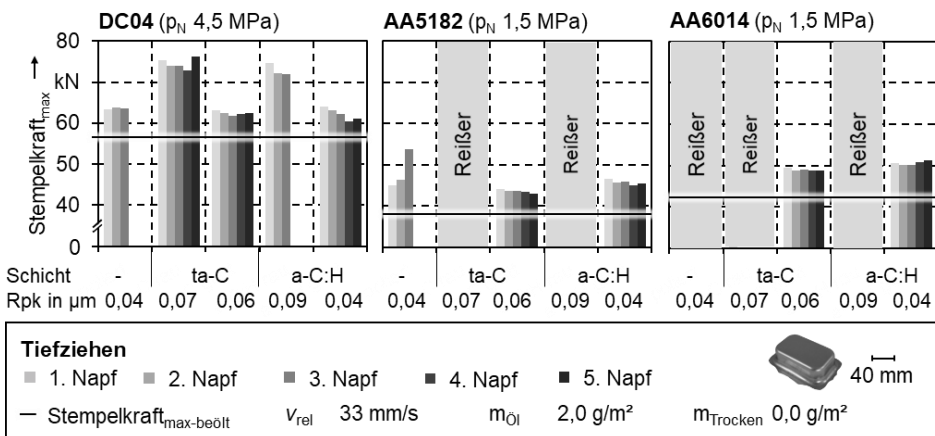


Bild 60: Maximale Stempelkräfte über Anzahl der gezogenen Näpfe in Abhängigkeit von Werkzeugmodifikation und Blechwerkstoff

Die Maximalkräfte liegen im trockenen Fall stets über den beölten Referenzwerten. Bei DCo₄ werden für polierte und unbeschichtete Werkzeuge ähnliche maximale Stempelkräfte erreicht wie für die glatten ta-C- und a-C:H-Schichten. Im Mittel liegen die Maximalkräfte für DCo₄ bei 63,5 kN im direkten Kontakt zu 1.2379 und bei den glatten beschichteten Oberflächen bei 62,4 kN für ta-C und 62,2 kN für a-C:H. Im Gegensatz zum unbeschichteten Fall ist bei den beschichteten Werkzeugen jedoch eine über die Anzahl der gezogenen Näpfe sinkende Stempelkraft zu verzeichnen. Beide Schichttypen scheinen für DCo₄ gleichermaßen geeignet, was durch einen Anstieg der Maximalkraft von lediglich 9 % im Vergleich zu beölten Versuchsreihen deutlich wird. Jedoch ist zwingend auf eine ausreichende Qualität der Oberfläche nach dem Beschichten zu achten. Für beide Aluminiumlegierungen wurden lediglich bei Versuchsreihen ohne Risse und makroskopischen Verschleiß fünf Wiederholversuche durchgeführt. Bei AA5182 wird im direkten Kontakt zu 1.2379 der zunehmende Verschleiß durch eine stetige Zunahme der maximalen Stempelkraft deutlich. Im Vergleich zum ersten Napf liegt die Stempelkraft beim dritten Napf um 20 % höher. Im Gegensatz dazu führen die ta-C- und a-C:H-beschichteten Oberflächen mit Rpk-Werten unterhalb von 0,06 µm zu einem tendenziell sinkenden Verlauf der maximalen Stempelkräfte. Im Kontakt zu ta-C sinkt die Maximalkraft vom ersten zum fünften Napf um etwa 3 % und im Kontakt zu a-C:H um etwa 2,5 %. Im Mittel liegen die Kräfte für a-C:H-beschichtete Werkzeuge im Kontakt zu AA5182 in etwa 5 % über denen für ta-C. Mithilfe der Werkzeugbeschichtungen wird die maximale Stempelkraft gemittelt über die Anzahl der gezogenen Näpfe um etwa 10 % reduziert im Vergleich zum direkten Kontakt zu 1.2379. Durch ta-C-Schichten kann der Anstieg der maximalen Umformkraft im Vergleich zu beölten Versuchen auf 14 % begrenzt werden. Auch im Kontakt zu AA6014 erweisen sich die ta-C-Schichten als vielversprechende Modifikation. Die maximale Stempelkraft sinkt auch hier vom ersten zum fünften Napf um etwa 2 %. Im Vergleich zu beölten Versuchen steigt die Maximalkraft im trockenen Kontaktfall bei der Verwendung von ta-C-Schichten mit niedriger Rauheit um 16 %. Die a-C:H-Schichten mit Rpk-Werten von 0,04 µm sind ebenso geeignet, um ein trockenes Tiefziehen von AA6014 zu ermöglichen. Jedoch liegen die Maximalkräfte mit Werten von etwa 50,6 kN etwas höher als bei ta-C-Schichten mit Werten von etwa 49 kN. Zudem ist ab dem dritten Napf eine geringfügige Zunahme der Maximalkräfte zu verzeichnen, was auf einen möglichen Verschleiß hindeutet.

Anhand der Auswertung der Kraft-Weg-Verläufe und maximalen Stempelkräfte über das Trockentiefziehen von fünf Näpfen wurde gezeigt, dass sowohl ta-C als auch a-C:H als Werkzeugbeschichtung für das schmierstofffreie Tiefziehen geeignet sind. Während für DCo₄ kein Unterschied zwischen beiden Schichtarten festzustellen ist, gilt es für AA5182 und AA6014 festzuhalten, dass die ta-C-Schichten trotz höherer reduzierter Spitzenhöhen von 0,056 µm im Vergleich zu 0,04 µm für a-C:H-Schichten zu geringeren Umformkräften führen. Um die Eignung der Schichten umfassend zu beurteilen, sind jedoch nicht nur die zur Umformung notwendigen Kräfte, sondern auch die Geometrie und resultierende Blechdicke der umgeformten Bauteile entscheidend. Diese Eigenschaften wurden daher mit Hilfe eines topometrischen 3D-Scanners erfasst. In Bild 61 sind die Blechdicken von Näpfen aus DCo₄ in Abhängigkeit der Oberflächenmodifikation des Werkzeugs dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die Unterschiede zwischen den rauen und glatten Varianten der beschichteten Werkzeugoberflächen.

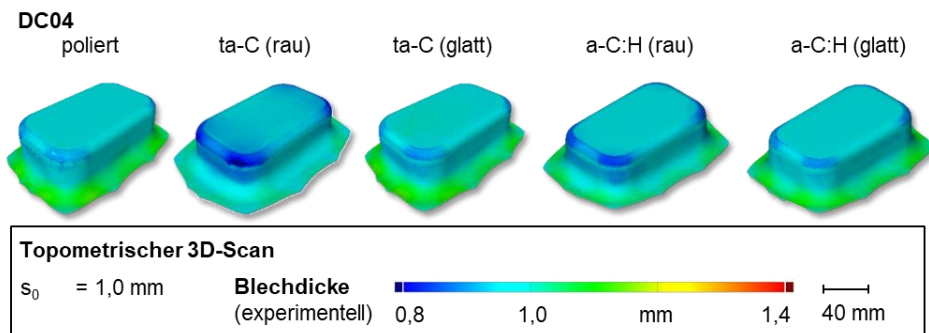


Bild 61: Blechdicken der trocken tiefgezogenen Rechtecknäpfe aus DCo₄ in Abhängigkeit der Oberflächenmodifikation

Rauere Oberflächen bewirken eine erhöhte Reibung und somit einen gehemmten Werkstofffluss aus dem Flanschbereich. Dies führt zu einer größeren Ausdünnung in der Zarge und im Radienbereich des Napfbodens. Für die übrigen Näpfe ist kein nennenswerter Unterschied der Blechdickenverteilung zu erkennen. Für die Aluminiumlegierungen wurden, aufgrund der Rissentstehung im Kontakt zu rauen beschichteten Werkzeugen, lediglich die Näpfe, welche mit den glatten Schichtvarianten gezogen wurden, gescannt. Die topometrisch erfassten Näpfe sind in Bild 62 gegenübergestellt.

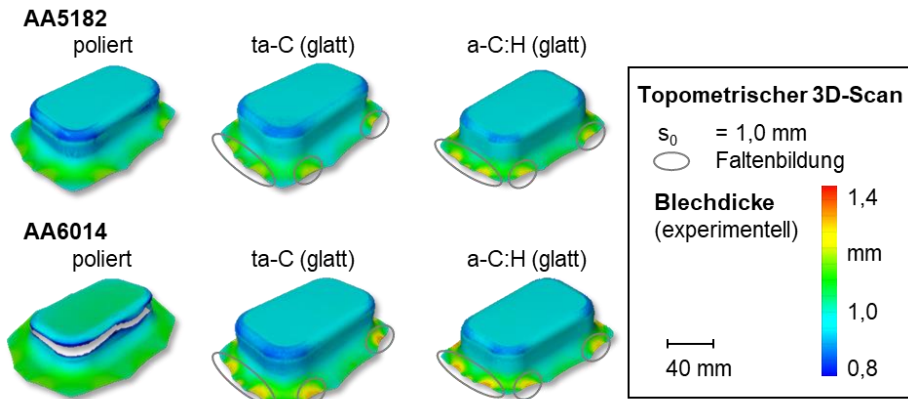


Bild 62: Blechdicken der trocken tiefgezogenen Rechtecknapfe in Abhängigkeit von Blechwerkstoff und Oberflächenmodifikation

Für AA5182 wird bei der Verwendung von unbeschichteten Matrizen und Niederhaltern eine starke Ausdünnung entlang des Stempelradius ermittelt, welche etwa 15 % größer ist als im unbeschichteten Fall bei DCo4. Bei ta-C- und a-C:H-beschichteten Werkzeugen wird für AA5182 eine deutlich geringere Blechdickenreduktion festgestellt. Die Napfgeometrien unterscheiden sich kaum in Abhängigkeit von der verwendeten Werkzeugbeschichtung. Für den Werkstoff AA6014 wird durch die ta-C- und a-C:H-Schichten die Reibung im Flanshbereich so stark verringert, dass Reißen verhindert werden können und die Ausdünnung in Radien- und Eckbereich deutlich reduziert wird. Auch für diesen Werkstoff fallen die Unterschiede zwischen den beiden Schichttypen gering aus. Für die Aluminiumlegierungen führt die Beschichtung im Flanshbereich zu einer ausgeprägten Verbesserung des Stoffflusses. Dies bewirkt jedoch eine erhöhte Gefahr für Faltenbildung, was an den Flanschrändern zu erkennen ist. Die Ursache für die Tendenz zur Faltenbildung bei den Aluminiumlegierungen liegt neben der geringeren Flächenpressung im Flansch in der niedrigeren senkrechten Anisotropie begründet. Dies erklärt auch, warum die Neigung zur Faltenbildung bei AA6014 ausgeprägter ist als bei AA5182, da die senkrechte Anisotropie von AA6014 niedriger ist als bei AA5182. Zur Unterdrückung der Faltenbildung wäre eine höhere Niederhalterkraft zu empfehlen.

Zunächst gilt es jedoch zu analysieren, ob im trockenen Kontakt zu beschichteten Werkzeugen eine ausreichende Oberflächenqualität der Napfe realisiert wird. Dies war, wie in Abschnitt 5.1.2 geschildert, im trockenen Tiefziehen mit konventionellen Werkzeugoberflächen nicht

der Fall. Die taktil ermittelten reduzierten Riefentiefen der Napfoberflächen sind als Indikator für die Entstehung von Kratzern und Riefen in Bild 63 zu sehen.

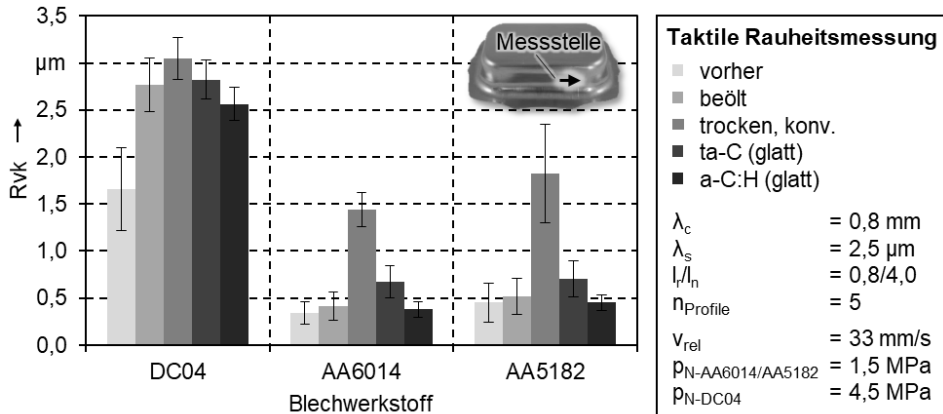


Bild 63: Reduzierte Riefentiefe in Abhängigkeit von Beölung sowie Werkzeugmodifikation der trocken tiefgezogenen Rechtecknäpfe

Für DC04 führen ta-C- und a-C:H-beschichtete Werkzeugoberflächen zu ähnlichen Rvk-Werten wie im beölten Fall. Auch anhand der Topografiebilder in Bild 64 sind für DC04 keine Schäden an der Werkstückoberfläche nach den schmierstofffreien Versuchen mit ta-C- und a-C:H-beschichteten Werkzeugen zu erkennen. Ähnlich vielversprechende Ergebnisse werden für beide Aluminiumlegierungen erzielt. Für AA6014 und AA5182 resultieren tiefe Riefen nach dem trockenen Tiefziehen mit konventionellen Werkzeugen. Die Tiefe der Riefen wird durch die Verwendung von beschichteten Werkzeugen deutlich reduziert.

Bei einem ta-C-beschichteten Werkzeug liegen die Rvk-Werte für AA6014 bei 0,67 μ m und für AA5182 bei 0,70 μ m. Die Riefentiefe konnte damit im Vergleich zu konventionellen Werkzeugoberflächen um den Faktor 2,1 für AA6014 und um 2,6 für AA5182 reduziert werden. Eine weitere Reduktion der Rvk-Werte wurde bei der Verwendung a-C:H-beschichteter Oberflächen erreicht. Die Riefentiefe erreicht hier ein ähnliches oder sogar niedrigeres Niveau als bei den beölten Versuchsreihen. Mit der geringeren Riefentiefe geht jedoch auch eine insgesamt höhere Einglättung einher, was anhand der Topografieaufnahmen der trocken tiefgezogenen Näpfe in Bild 64 deutlich wird. Nach dem Tiefziehen mit ta-C-beschichteten Niederhalter und Matrize sind im Vergleich zur Ausgangsoberfläche nur geringe Unterschiede zu erkennen. Wenn die Bleche hingegen mit a-C:H-beschichteten Werkzeugen tiefgezogen wurden, sind für beide

Aluminiumlegierungen deutlich größere Einglättungen zu erkennen. Dies ist für die Qualität der Oberflächen nicht zwangsläufig negativ, bedeutet jedoch eine intensivere Wechselwirkung mit der Werkzeugoberfläche. Diese intensivere Wechselwirkung in der Wirkfuge führt zu größeren Umformkräften und ist somit auch ein Erklärungsansatz für die geringfügig höheren Maximalkräfte bei der Verwendung von a-C:H im Vergleich zu ta-C.

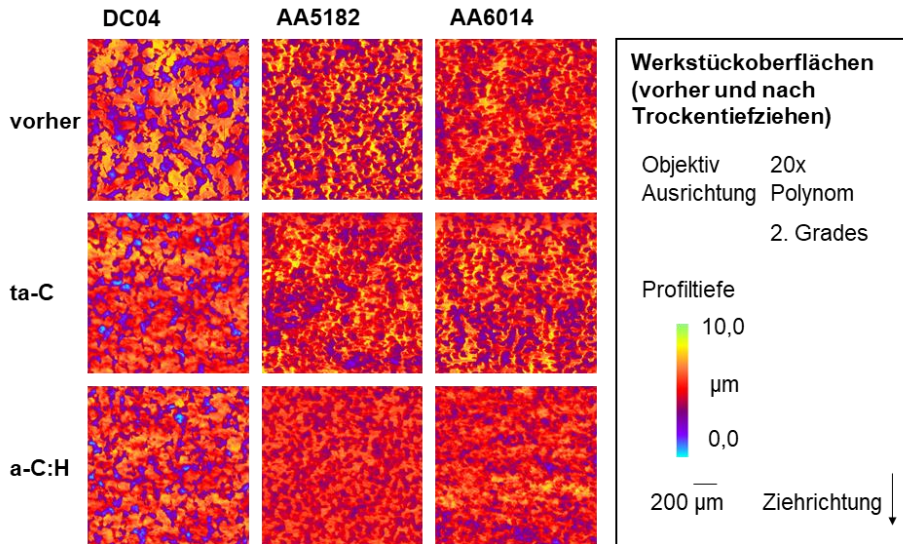


Bild 64: Topografien der tiefgezogenen Näpfe gemessen im Zargenbereich in Abhängigkeit der Werkzeugbeschichtung

Insgesamt führen bezogen auf die Oberflächenqualität der Werkstücke beide Schichtsysteme zu vielversprechenden Ergebnissen. Sowohl die Rauheitswerte als auch die Topografieaufnahmen verdeutlichen besonders für die beiden Aluminiumlegierungen eine deutliche Verbesserung der Oberflächeneigenschaften im Vergleich zu den Versuchsergebnissen, welche mit konventionellen Werkzeugoberflächen realisiert wurden. Nachteilig erschien, wie in Bild 62 gezeigt, die erhöhte Gefahr der Faltenbildung bei Verwendung beschichteter Werkzeuge für AA5182 und AA6014.

Um nachzuweisen, dass mit Hilfe von ta-C- und a-C:H-Schichten ein versagensfreies Trockentiefziehen ohne die Entstehung von Rissen und Falten auch für Aluminiumlegierungen möglich ist, wurden stichprobenartig Näpfe aus AA5182 und AA6014 bei 4,5 MPa trocken tiefgezogen. Die

resultierenden Kraft-Weg-Verläufe im Vergleich zu den Versuchen bei 1,5 MPa sind in Bild 65 dargestellt. Auch bei einem erhöhten Niederhalterdruck von 4,5 MPa ist es mit Hilfe der Beschichtungen möglich, Rechtecknäpfe aus AA5182 und AA6014 trocken tiefzuziehen, ohne dass Risse auftreten. Für beide Schichttypen liegen die Stempelkräfte bei 4,5 MPa oberhalb der Stempelkräfte bei 1,5 MPa Niederhalterdruck, wobei die maximalen Kräfte für a-C:H etwas höher liegen als für ta-C. Dies wird besonders bei AA5182 deutlich, wo der Kraft-Weg-Verlauf der Versuchsreihe mit ta-C-Beschichtung und einem Niederhalterdruck von 4,5 MPa in etwa der Versuchsreihe mit a-C:H-Beschichtung und einem Niederhalterdruck von 1,5 MPa gleicht. Wird der Niederhalterdruck für AA5182 bei a-C:H-beschichteten Werkzeugen auf 4,5 MPa erhöht, resultieren bis zu einer Ziehtiefe von 20 mm ähnlich hohe Stempelkräfte wie im unbeschichteten Fall. Jedoch ist der Kurvenverlauf bei beschichteten Werkzeugen stets durch einen sinkenden Verlauf ab einem Ziehweg von etwa 18 mm gekennzeichnet, wohingegen im unbeschichteten Fall ein stetiger Anstieg der Stempelkraft vorliegt. Für AA6014 liegen die maximalen Stempelkräfte bei einer Erhöhung des Niederhalterdrucks von 1,5 auf 4,5 MPa unabhängig vom Schichttyp um etwa 10 % höher.

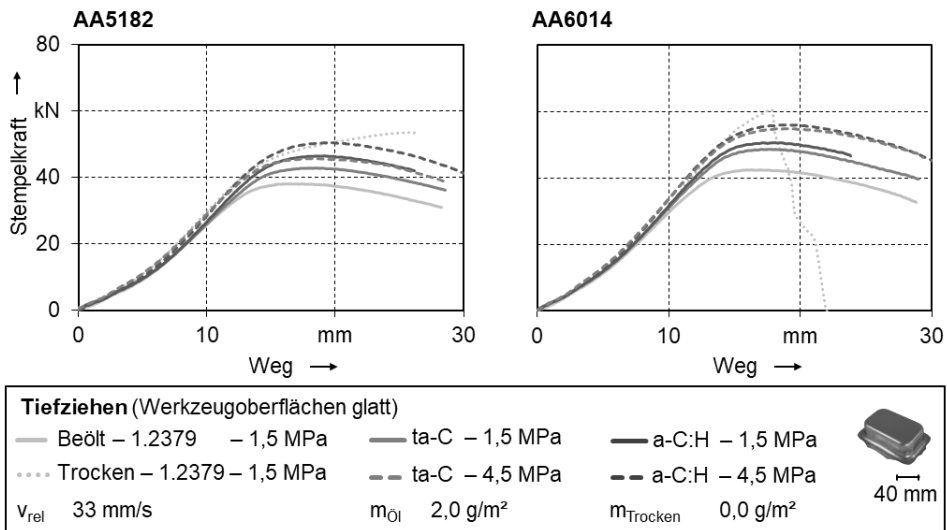


Bild 65: Kraft-Weg-Verläufe aus dem Rechtecknapfzug von AA5182 und AA6014 in Abhängigkeit der Werkzeugmodifikation und des Niederhalterdrucks

Nachdem auch bei erhöhten Niederhalterdrücken ein Versagen durch Risse ausgeschlossen werden kann, gilt es, den Einfluss auf die Faltenbildung zu bewerten. Dazu wurden die Näpfe, welche bei 4,5 MPa im

Kontakt zu ta-C- und a-C:H-beschichteten Werkzeugen trocken tiefgezogen wurden, topometrisch erfasst. Die gemessenen Blechdicken sind in Bild 66 gegenübergestellt. Sowohl für AA5182 als auch für AA6014 wird die Tendenz zur Faltenbildung durch den höheren Niederhalterdruck von 4,5 MPa reduziert. Gleichzeitig resultiert jedoch eine etwas höhere Ausdünnung im Bereich des Stempelradius, welche für a-C:H-beschichtete Werkzeuge größer ausfällt als für ta-C-beschichtete. Der Napf der bei 4,5 MPa mit a-C:H-beschichteten Werkzeugen tiefgezogen wurde, ist durch eine ungleichmäßige Verteilung der Blechdicke im Napfboden gekennzeichnet. Eine mögliche Ursache dafür liegt in einem außermittigen Einlegen der Platine. Dennoch kam es auch bei diesen Abweichungen nicht zu einem Riss am Napfboden, trotz der etwas größeren Ausdünnung. Die Tendenz zur Faltenbildung, welche für diesen Napf erkennbar ist, ist primär durch einen stärkeren Flansch-einzug auf der rechten Seite zu begründen. Dies führt dazu, dass die Platine lokal den Kontakt zum Niederhalter verliert und somit die Stützwirkung zum Unterdrücken der Falten fehlt. Insgesamt belegt die Blechdickenverteilung jedoch, dass es mit Hilfe der DLC-Beschichtungen möglich ist, falten- und rissfreie Bauteile auch aus Aluminiumlegierungen trocken tiefzuziehen.

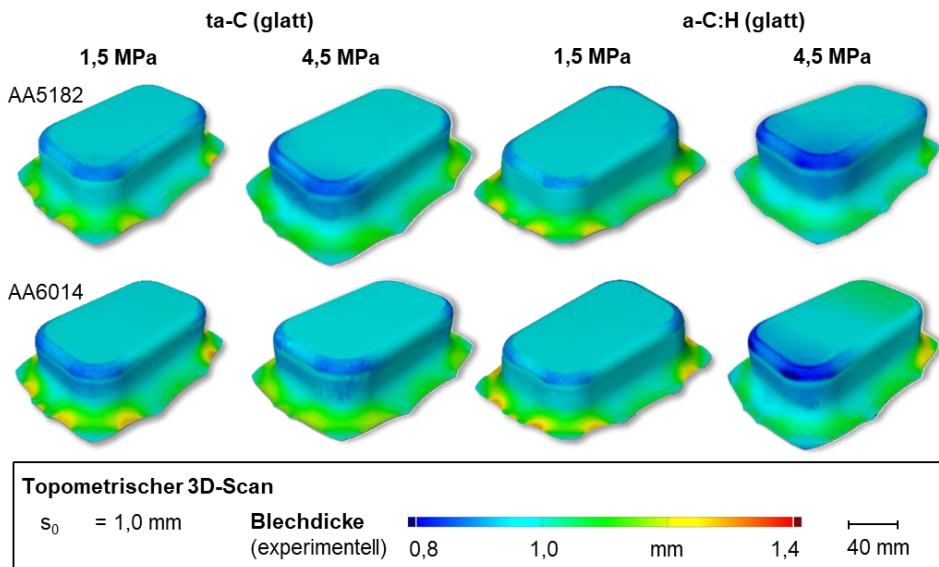


Bild 66: Blechdicken der trocken tiefgezogenen Rechtecknäpfe aus AA5182 und AA6014 in Abhängigkeit von Oberflächenmodifikation und Niederhalterdruck

Entscheidend für einen erfolgreichen Einsatz von ta-C- und a-C:H-Schichten für das Trockentiefziehen ist neben einer hohen Oberflächenqualität der umgeformten Bauteile und dem Verhindern von Rissen und Falten die Minimierung von werkzeugseitigem Verschleiß. Um den Einfluss der Schichten auf den Werkzeugverschleiß zu bewerten, wurden die Oberflächen vor und nach den Versuchen charakterisiert. In Bild 67 sind die Rpk-Werte für beschichtete Matrizen und Niederhalter im Flanschbereich nach den Versuchen mit den zur Adhäsion neigenden Aluminiumlegierungen dargestellt. Nach Versuchen mit DCo4 waren keine Verschleißerscheinungen ersichtlich, weshalb auf deren Darstellung verzichtet wird. Eine Erhöhung der Rpk-Werte wäre ein Anzeichen für Adhäsion, da an diesen Stellen lokal die Profilhöhe zunimmt. Für beide Schichten sind jedoch keine signifikanten Änderungen der reduzierten Spitzenhöhen zu erkennen. Im Kontakt zu ta-C-beschichteten Oberflächen sind auch zwischen den beiden Aluminiumlegierungen keine nennenswerten Unterschiede bezogen auf den Werkzeugverschleiß zu sehen.

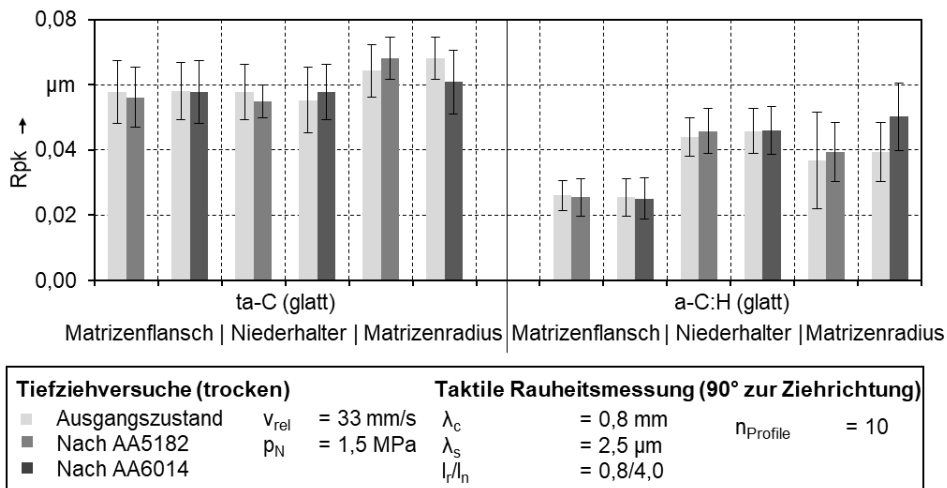


Bild 67: Reduzierte Riefentiefe der beschichteten Werkzeuge nach dem Trockentiefziehen der Aluminiumlegierungen

Bei den Versuchen mit a-C:H-beschichtetem Werkzeug haftet nach dem Trockentiefziehen von AA6014 eine geringfügige Menge des Blechwerkstoffes am Matrizenradius an. Dies wird durch den Anstieg der Rpk-Werte von 0,04 auf 0,05 μm deutlich. Durch das geringe Ausmaß der Anhaftungen sind jedoch die Änderungen der Rauheit nicht signifikant. Zusätzlich zu den taktilen Messungen wurden die Werkzeuge optisch charakterisiert. Exemplarische Topografien nach Versuchen mit dem verschleißkritischen AA6014 sind in Bild 68 gegenübergestellt.

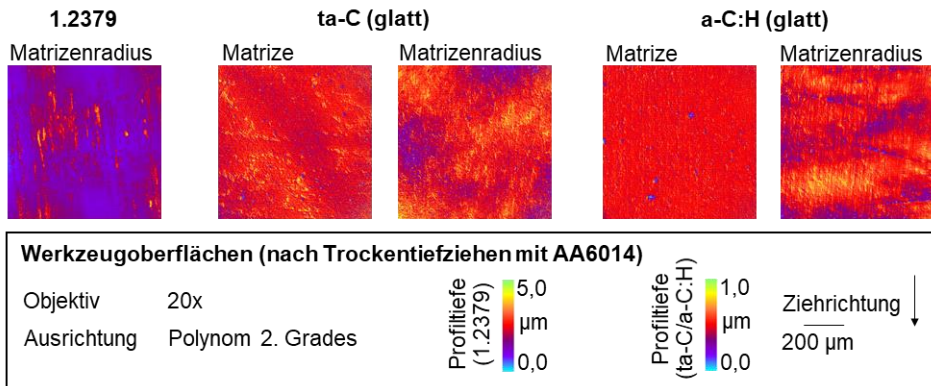


Bild 68: Topografien der Matrize nach dem Trockentiefziehen von Rechtecknägeln aus AA6014

Als Referenz sind die Topografien der unbeschichteten Matrize aus 1.2379 dargestellt. Auf den unbeschichteten Werkzeugoberflächen sind lokale Profilerhöhungen von bis zu 5 µm zu erkennen. Dargestellt ist für den unbeschichteten Fall lediglich eine Messstelle am Matrizenradius, da es aufgrund des vorzeitigen Versagens durch Risse im Flansch kaum zu Relativbewegung kam. Für die ta-C- und a-C:H-beschichteten Matrizen sind sowohl Messungen am Flansch als auch am Radius erfolgt. Die Topografien weisen im Radiusbereich lokale Erhöhungen von unter 1 µm auf, welche ein Indiz für lokal begrenzte Adhäsion in geringem Ausmaß sein können. Die Fläche und Höhe dieser Anhaftungen ist jedoch um ein Vielfaches geringer als bei den Versuchen mit unbeschichteten Werkzeugen.

7.3 Bewertung maßgeschneiderter Oberflächen für das schmierstofffreie Tiefziehen

Zur Realisierung von schmierstofffreien Tiefziehprozessen haben sich die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten ta-C- und a-C:H-Beschichtungen als wirksame Maßnahmen zur Reibungs- und Verschleißreduktion erwiesen. Die vielversprechenden Ergebnisse aus den Streifenziehversuchen konnten auf das Trockentiefziehen von Rechtecknägeln übertragen werden. Welche Oberflächenmodifikationen notwendig und geeignet sind, hängt stark vom umzuformenden Blechwerkstoff ab. Während für den verzinkten DCo₄ durch die Verwendung beschichteter Werkzeugoberflächen keine signifikante Reduzierung der Stempelkräfte und Verbesserung der Oberflächenqualität der umgeformten Bauteile ermittelt werden konnte, konnte für das Trockentiefziehen der Aluminiumlegierungen ein großes Potential der Werkzeugbeschichtungen nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse aus Abschnitt 7.2 haben jedoch auch gezeigt, dass allein das Aufbringen einer Beschichtung nicht ausreichend ist, um maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen für das Trockentiefziehen zu erhalten. Verfügen die beschichteten Oberflächen über zu viele und zu hohe Rauheitsspitzen, führen diese zu einem verstärkten mechanischen Verhaken mit den Rauheitsspitzen des Blechwerkstoffs. Dies führt zu einer Erhöhung der Reibung, welche den Materialfluss vom Flansch in die Zarge hemmt. Der begrenzte Stofffluss trägt letztlich zu einer verstärkten Ausdünnung und höheren Rückhaltekräften im Flansch bei, welche zu einer Erhöhung der notwendigen Umformkraft führen. Beim Trockentiefziehen der beiden Aluminiumlegierungen steigen bei der Verwendung von rauen beschichteten Werkzeugen die Stempelkräfte so stark, dass es zu einem frühzeitigen Versagen durch Risse am Napfboden kommt. Neben der Auswahl des Schichttyps ist demnach auch ein besonderes Augenmerk auf die Oberflächenfeinbearbeitung zu legen. Werkzeugoberflächen, welche für den Einsatz im Trockentiefziehen bestimmt sind, sollten daher vor dem Beschichtungsprozess poliert und nach dem Beschichten nachbehandelt werden. Die Nachbehandlung der beschichteten Oberflächen dient der Reduzierung der Rauheitsspitzen. Anzustreben sind Rpk-Werte von etwa $0,05\ \mu\text{m}$ mit einer möglichst geringen Streuung vor der Durchführung der Trockentiefziehversuche, um das Risiko eines lokalen Materialübertrags zu reduzieren. Werden für die ta-C-Schichten Rpk-Werte von $0,056\ \mu\text{m}$ und von $0,04\ \mu\text{m}$ für die a-C:H-Schichten realisiert, dann sind beide Schichttypen als Oberflächenmodifikationen für das Trockentiefziehen bei den in dieser Arbeit untersuchten Parametern geeignet.

Die durch die Beschichtungen und gezielte Einstellung der Werkzeugrauheit maßgeschneiderten Oberflächen ermöglichten für das Trockentiefziehen von AA5182 eine deutliche Reduzierung der maximalen Stempelkräfte, welche nur noch 14 % über denen für beölte Tiefziehversuche und 20 % unter dem Maximalwert für trockene Versuche mit unbeschichtetem Werkzeug liegen. Weiterhin wurde die maximale Blechausdünnung von etwa $0,2\ \text{mm}$ für konventionelle Werkzeugoberflächen mit Hilfe der maßgeschneiderten Aktivflächen auf etwa $0,1\ \text{mm}$ reduziert. Das rissfreie Trockentiefziehen von AA6014 wurde erst durch den Einsatz von modifizierten Werkzeugoberflächen ermöglicht. Auch hier liegen die Stempelkräfte lediglich 16 % über den in beölten Versuchen gemessenen Kräften. Durch die Verwendung der maßgeschneiderten Aktivflächen von Matrize und Niederhalter ist es für DCo4 und die beiden Aluminiumlegierungen gelungen, die Oberflächenqualität der umgeformte Nöpfe, im Vergleich zu den Oberflächen nach Trockentiefziehversuchen mit konventionellen

Werkzeugen, deutlich zu verbessern. Beiden Schichttypen ist somit ein hohes Potential bei der Implementierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse beizumessen. Da die Versuche mit ta-C-beschichteten Werkzeugoberflächen trotz der höheren Rpk-Werte zu tendenziell besseren Ergebnissen führten, wird das Potential der ta-C-Schichten im Vergleich zu den a-C:H-Schichten als etwas höher eingeschätzt.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In konventionellen Fertigungsprozessen werden vor der Umformung Schmierstoffe und nachfolgend Reinigungsmitteln eingesetzt, welche zu meist umweltschädliche Substanzen enthalten. Der Verzicht auf diese Stoffe führt zu einer effizienteren Nutzung von Ressourcen sowie umweltfreundlicheren Verfahren. Neben den ökologischen Vorteilen bietet die Trockenumformung auch ökonomische Vorteile, welche durch eine Verkürzung der Prozesskette erreicht werden. Der direkte Werkzeug-Werkstück-Kontakt, der sich aus dem Schmierstoffverzicht ergibt, führt jedoch zu vielen Herausforderungen. Im trockenen Kontakt steigt die Reibung, was zu einer Hemmung des Stofffluss und steigenden Umformkräften führt. Zudem bewirkt der direkte Kontakt eine intensive Interaktion zwischen den Reibpartnern, welche je nach Materialeigenschaften zu erhöhtem Verschleiß führen kann. Aufgrund dieser Herausforderungen sind Maßnahmen notwendig, um schmierstofffreie Umformprozesse realisieren zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher das Trockentiefziehen in Laborversuchen mittels Streifenziehen sowie in Umformversuchen analysiert. Zunächst wurde in Abhängigkeit des Werkstückwerkstoffs und der Prozessparameter untersucht, welche Konsequenzen der Schmierstoffverzicht verursacht. Während für den Tiefziehstahl DCo₄ im trockenen Fall nur ein moderater Anstieg der Reibzahl festgestellt wurde, stieg die Reibzahl für die Aluminiumlegierungen deutlich. Sowohl für AA6014 als auch für AA5182 wurden ausgeprägte Riefen an den Blechoberflächen sowie Adhäsion als primärer Verschleißmechanismus auf den konventionellen Werkzeugoberflächen detektiert.

Zur Evaluierung von Maßnahmen zur Reibungs- und Verschleißreduktion wurde das Einsatzverhalten von DLC-Schichten mit unterschiedlichen chemischen und mechanischen Eigenschaften untersucht. Eine W-Dotierung der a-C:H-Schichten führt zwar zu duktileren Schichteigenschaften, bewirkt jedoch im Kontakt zu den Aluminiumlegierungen keine ausreichende Reibungsreduktion und konnte die Adhäsion nicht vollständig verhindern. Im Gegensatz dazu wurden mit a-C:H- sowie ta-C-Schichten für AA5182 und AA6014 eine signifikante Reibungsreduzierung erzielt. Für beide Schichten kann das reibungsmindernde Potential nur bei ausreichend niedriger Werkzeugrauheit ausgeschöpft werden. Für DCo₄ wird im Vergleich zum direkten Kontakt zu konventionellen Werkzeugoberflächen keine signifikante Reibungsreduktion durch die Beschichtungen

erzielt. Für weiterführende Untersuchungen wurden Reibbacken mit lasergenerierten Mikrostrukturen versehen. Mikrostrukturen auf unbeschichteten Oberflächen verursachten im Kontakt zu AA5182 und AA6014 bereits nach dem ersten Versuch deutliche Anhaftungen. Im Kontakt zu DC04 wurde hingegen bei einem Flächendeckungsgrad von 35 % eine deutliche Reibungsreduktion und bei 50 % eine Reibungserhöhung ermittelt. Ein ähnliches tribologisches Verhalten wurde auch für die Kombination von ta-C-Schichten mit Mikrostrukturen ermittelt. Somit wirken bei den Mikrostrukturen sowohl reibungserhöhende als auch reibungsmindernde Mechanismen, deren Ausprägung vom Flächendeckungsgrad abhängt. Im Kontakt von mikrostrukturierten und beschichteten Oberflächen zu den Aluminiumlegierungen erwies sich das Verhältnis von Strukturtiefe zur Schichtdicke als signifikanter Faktor. Nur bei geschlossenen Funktionsschichten können Mikrostrukturen im Kontakt zu Aluminiumlegierungen eingesetzt werden, da es sonst zu Adhäsion an den Strukturen kommt. Die Reibungsreduktion ist bei AA5182 jedoch geringer als bei DC04. Aufgrund des deutlich größeren Potentials zur Reibungs- und vor allem zur Adhäsionsminderung durch die ta-C und a-C:H-Schichten wurden diese für die Übertragung der Laborversuche auf die Realisierung von schmierstofffreien Tiefziehprozessen gewählt.

Zur numerischen Prozessauslegung wurde das in dieser Arbeit entwickelte und validierte Simulationsmodell genutzt. Analysiert wurde, ob eine lokal variierende Reibzahl zu einer Verbesserung des Trockentiefziehens beiträgt. Für die gewählte Demonstratorgeometrie eines Rechtecknapfes ist das Potential einer lokal angepassten Reibung jedoch als begrenzt zu bewerten. Hinsichtlich der Ziehtiefen und Umformkraft wurden mit global niedrigen Reibzahlen die besten Ergebnisse erzielt. Bezogen auf Blechdurchdünnung und -aufdickung sowie Kontaktnormal- und Scherspannungen an den Werkzeugen bewirken lokal angepasste Reibzahlen stets die Verbesserung der einen bei gleichzeitiger Verschlechterung der anderen Größe. Für die experimentelle Erprobung wurde daher auf eine lokale Variation der Werkzeugeigenschaften verzichtet. Beim Trockentiefziehen wurde ein negativer Einfluss von rauen beschichteten Aktivflächen nachgewiesen, welcher für den Tiefziehstahl zu einer Erhöhung der Umformkraft und für die Aluminiumlegierungen zu Rissen führte. Beim Einsatz von glatten ta-C- oder a-C:H-beschichteten Oberflächen konnten mit allen drei Blechwerkstoffen versagensfreie Näpfe trocken tiefgezogen werden. Die Oberflächencharakterisierung ergab zudem, dass durch die Beschichtungen auch ohne Schmierstoff eine hohe Blechober-

flächenqualität sowie eine weitgehende Verhinderung von Adhäsion realisierbar sind.

Für eine industrielle Anwendung von Trockentiefziehprozessen, gilt es nachzuweisen, dass die Modifikationen auch bei hohen Stückzahlen zu einer ausreichenden Reibungs- und Verschleißreduktion beitragen. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Verschleißwege beschränken sich jedoch auf wenige Meter. Aufgrund der verwendeten Versuchseinrichtungen war eine effektive Analyse des Einsatzverhaltens bei hohen Stückzahlen nicht möglich. Für die weitere Qualifikation von maßgeschneiderten Oberflächen für das Trockentiefziehen wäre daher, zukünftig die Evaluierung des Reibungs- und Verschleißverhaltens in einem automatisierten Prüfstand zu empfehlen. Anschließend gilt es Maßnahmen für eine Erhöhung der Verschleißbeständigkeit zu entwickeln. In diesem Zusammenhang sollte der Fokus auf der Oberflächenbearbeitung sowie dem Beschichtungsprozess liegen, da durch die Anpassung der Schichteigenschaften und -rauheit ein großes Potential zur Beeinflussung des tribologischen Verhaltens nachgewiesen wurde. Eine weitere Analyse der Kombination aus Mikrostrukturen und Beschichtung ist zu empfehlen, da eine prinzipielle Reibungsbeeinflussung möglich scheint, jedoch nicht alle Wechselwirkungen zwischen Struktureigenschaften und tribologischen Einsatzverhalten verstanden wurden. Darüber hinaus ist es für das Trockentiefziehen im industriellen Umfeld relevant, die Eignung der ta-C- und a-C:H-Schichten im Kontakt zu weiteren Werkstückwerkstoffklassen wie beispielsweise höherfesten Stählen nachzuweisen.

9 Summary and Outlook

In conventional production processes lubricants are applied prior to forming. Thus, cleaning detergents have to be used afterwards. Both of these substances often contain environmentally harmful materials. Therefore, the abandonment of lubricants leads to a more efficient usage of resources and environmentally friendly production. Besides ecological potentials the so-called dry forming processes offer economic benefits by shortening the process chain. However, the direct contact between tool and workpiece resulting from mentioned lubricant abandonment is very challenging. Due to dry contact conditions the friction increases, leading to a hampered material flow and increasing forming forces. Additionally, the direct contact evokes an intensive interaction between the frictional partners which leads to increased wear depending on the material properties. Thus, measures need to be developed in order to overcome these challenges and realize dry forming processes.

In this thesis, dry deep drawing was analyzed in laboratory and in forming tests. At first, the consequences of lubricant abandonment were investigated depending on sheet material and process parameters. It can be concluded that dry conditions for DC04 lead only to a moderate increase of friction. In contrast, for AA5182 and AA6014 a distinct friction increase can be observed. In dry strip drawing and deep drawing tests significant scores were detected on the sheet surfaces and adhesion was identified as the dominating wear mechanism.

The tribological behavior of amorphous carbon based coatings with varying chemical and mechanical properties was investigated to evaluate their potential for decreasing friction and wear under dry conditions. Doping an a-C:H-coating with tungsten leads to more ductile coating properties but at the same time cannot prevent adhesion and reduce friction sufficiently in contact with aluminum alloys. However, applying hydrogenated a-C:H- as well as hydrogen-free ta-C-coatings reduces the friction coefficient significantly for AA5182 and AA6014. The potential to decrease the friction is strongly depending on the tool roughness for both coating types. For DC04 no distinctive friction reduction was measured compared to the direct contact with conventional tool surfaces because also in direct contact to uncoated 1.2379 no adhesion was observed. Furthermore, friction jaws were modified with laser generated microstructures. Uncoated tools with microstructures in direct contact with AA5182 and AA6014 already lead to distinctive adhesion after the first strip has been drawn. In

contrast, in contact with DCo₄ a degree of coverage of 35 % leads to a friction reduction whereas a degree of coverage of 50 % increases the friction coefficient. A similar tribological behavior was identified for the combination of ta-C coating and microstructures. Thus, microstructures lead to friction increasing and friction reducing mechanisms which depend on the degree of coverage. The tribological conditions in direct contact of coated and microstructured tools with aluminum alloys depend on the relation between structure depths and coating thickness. If the functional layer is closed, microstructures can be applied successfully. Otherwise adhesion occurs immediately. However, the range of the possible friction reduction is much lower for AA5182 compared to DCo₄. Due to the greater potential of DLC coatings for friction reduction and prevention of adhesion, these modifications were applied on deep drawing tools to proof the transferability of the laboratory results to real forming conditions.

For the numerical process design a FE model was used which was developed and validated within this work. In order to analyze whether a locally varying friction coefficient may further improve the results of dry deep drawing processes a variant simulation modelling different tribological conditions was performed. However, for rectangular cups, which were selected as the demonstrator geometry within this work, the potential of locally varying friction coefficients is rather limited. When looking at the achievable drawing depth and the necessary forming forces the simulations with globally low friction coefficients revealed the best results. Regarding the thickening and thinning of the sheets as well as the contact normal and shear stresses on the tools locally varying friction coefficients evoke improvement of one parameter and at the same time impair the results of the other parameter. Thus, for the experimental tests a locally varying friction coefficient obtained by locally modifying the tool surfaces was not further investigated. During dry deep drawing rough coated contact surfaces lead to increasing drawing forces and cracks for cups out of aluminum alloys. By applying smooth blank holder and die surfaces with ta-C- or a-C:H-coatings failure-free cups could be drawn without using lubricants for all three sheet materials. The characterization of the cups and tool surfaces after dry experiments revealed that with the help of the coatings adhesion could be prevented successfully and a high surface quality could be achieved.

For an industrial application of dry deep drawing it is necessary to proof that the surface modifications ensure low friction without wear even at high quantities. Within this thesis, the overall wear tracks do only

measure some meters because with the test setups in-use, an efficient investigation of a high number of strokes was not feasible. Thus, for the further qualification of tailored surfaces for dry deep drawing future research should evaluate the friction and wear behavior within an automated wear test setup. Based on these results, measures for increasing wear resistance should be developed. In this regard, approaches should focus on surface machining and coating development because tool roughness and coating properties seemed the most influential factors to improve the tribological behavior. Furthermore, the combination of coatings and microstructures should be analyzed more in detail because a friction adaption seems possible with this measure. However, not all relations between structure properties and tribological behavior are understood yet. Finally, it is important to proof the suitability of ta-C- and a-C:H-coatings for further sheet material categories like high strength steels for the industrial application of dry deep drawing in a broad range.

Literaturverzeichnis

- [1] Industrieverband-Blechumformung: Konjunkturbericht 2016 für die Blechumformung. 2016.
- [2] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): Jahresbericht 2016 – Die Automobilindustrie in Daten und Fakten.
<http://blog.hamromaya-nepal.de/2017/02/01/jahresbericht-2016/>
(abgerufen am 11.10.2017)
- [3] Eckl, V., Grave, B.; Kladroba, A.; Kreuels, B.; Nguyen, T.-V.; Stenke, G.: Analysen 2017 - Forschung und Entwicklung in der Wirtschaft. Wissenschaftsstatistik GmbH im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft, Essen, 2017
- [4] Zeit Online: Merkel warnt vor Ansehensverlust durch Dieselskandal. <http://www.zeit.de/politik/deutschland/2017-08/autoindustrie-angela-merkel-abgas-skandal-cdu?print> (abgerufen am 11.10.2017)
- [5] Wirtschaftsverband Stahl- und Metallverarbeitung e.V.: Branchenbericht. http://www.wsm-net.de/fileadmin/user_upload/wsm-net/documents/WSM-Branchenbericht_2017-06.pdf (abgerufen am 11.10.2017)
- [6] EU: Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember. <http://www.reach-info.de/verordnungstext.htm> (abgerufen am 11.10.2017)
- [7] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 4 – Umformen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006, 5. Auflage
- [8] Birkert, A.; Haage, S.; Straub, M.: Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile – Auslegung von Ziehanlagen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013
- [9] Mischke, J.: Europa 2020 Die Zukunftsstrategie der EU. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2013
- [10] Vollertsen, F.; Schmidt, F.: Dry Metal Forming: Definition, Chances and Challenges. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology 1(2014)1
- [11] König, W.; Klocke, F.: Fertigungsverfahren 5 - Blechbearbeitung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995

- [12] Fritz, A. H.; Schulze, G.: Fertigungstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012, 10. Auflage
- [13] Norm DIN 8584-3: Fertigungsverfahren Zugdruckumformen - Teil 3: Tiefziehen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth, 2003
- [14] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik - Grundlagen, Technologien, Maschinen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, 2. Auflage
- [15] Zein, H.; El Sherbiny, M.; El, M.: Thinning and spring back prediction of sheet metal in the deep drawing process. *Materials and Design* 53 (2014)
- [16] Kuppert, A.: Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2015
- [17] Norm DIN EN ISO 12004-2: Metallische Werkstoffe – Bleche und Bänder - Bestimmung der Grenzformänderungskurve – Teil 2: Bestimmung von Grenzformänderungskurven im Labor. Berlin: Beuth, 2008
- [18] Eberle, B.; Volk, W.; Hora, P.: Automatic approach in the evaluation of the experimental FLC with a full 2D approach based on a time depending method. In: P. Hora (Hrsg.): *Proceedings of the 7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (NUMISHEET)*, 2008, S. 279–284
- [19] Merklein, M.; Maier, A.; Kinnstätter, D.; Jaremenko, C.; Affronit, E.: A new approach to the evaluation of forming limits in sheet metal forming. *Key Engineering Materials* 639(2015)
- [20] Affroniti, E.; Merklein, M.: Metallographic analysis of Nakajima tests for the evaluation of the failure developments. *Procedia Engineering* 183(2017)
- [21] Doig, M.; Isik, K.; Heibel, S.; Richter, H.; Tekkaya, A. E.: Material Characterization and Validation Studies for Modeling. *Procedia Engineering* 183(2017)

- [22] Saxena, R. K.; Dixit, P.M.: Prediction of flange wrinkling in deep drawing process using bifurcation criterion. *Journal of Manufacturing Processes* 12(2010)
- [23] Otto, M: Erweiterung der Umformgrenzen beim Tiefziehen und Kragenziehen durch Nachschieben von Werkstoff. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2003
- [24] Groche, P.; Hennig, R.: Tribologische Untersuchung des Abriebverhaltens verzinkter Tiefziehbleche. EFB-Forschungsbereich Nr. 200, 2003
- [25] Harada, Y.; Maeda, Y.; Ueyama, M.; Fukuda, I.: Improvement of formability for multistage deep drawing of Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al alloy sheet. *Procedia Engineering* 81(2014)
- [26] Harada, Y.; Ueyama, M.: Formability of pure titanium sheet in square cup deep drawing. *Procedia Engineering* 81(2014)
- [27] Popp, U.; Neudecker, T.; Engel, U.; Geiger, M.: Surface characterization with regard to the tribological behavior of sheet metal in forming processes. In: Geiger, M.; Kals, H.J.J.; Shirvani, B.; Singh, U.P. (Hrsg.): *Proc. of the Int. Conf. SheMet'99, Bamberg: Meisenbach, 1999, S. 303-310*
- [28] Staeves, J.: Beurteilung der Topografie von Blechen im Hinblick auf die Reibung bei der Umformung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1998
- [29] Gachot, C.; Rosenkranz, A.; Hsu, S.M.; Costa, H.L.: A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. *Wear* 372-373(2017)
- [30] Weidel, S.; Engel, U.: Surface characterisation in forming processes by functional 3D parameters. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 33(2007)
- [31] Kovalchenko, A.; Ajayi, O.; Erdemir, A.; Fenske, G.: Friction and wear behavior of laser textured surface under lubricated initial point contact. *Wear* 271(2011)
- [32] Scaraggi, M.; Mezzapesa, F. P.; Carbone, G.; Ancona, A.; Tricarico, L.: Friction properties of lubricated laser-micro-textured-surfaces: An experimental study from boundary to hydrodynamic lubrication. *Tribology Letters* 49(2013)1

- [33] 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
- [34] 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
- [35] Torkar, M.; Tehovnik, F.; Podgornik, B.: Failure analysis at deep drawing of low carbon steels. *Engineering Failure Analysis* 40(2014)
- [36] Iwanaga, K.; Tashiro, H.; Okamoto, H.; Shimizu, K.: Improvement of formability from room temperature to warm temperature in AZ-31 magnesium alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 155-156(2004)1-3
- [37] Ravi Kumar, D.: Formability analysis of extra-deep drawing steel. *Journal of Materials Processing Technology* 130-131(2002)
- [38] 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
- [39] Friedrich, H. E.: *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013
- [40] Chan, S. M.; Chan, L. C.; Lee, T. C.: Tailor-welded blanks of different thickness ratios effects on forming limit diagrams. *Journal of Materials Processing Technology* 132(2003)1-3
- [41] Ahmetoglu, M. A.; Brouwers, D.; Shulkin, L.; Taupin, L.; Kinzel, G. L.; Altan, T.: Deep drawing of round cups from tailor-welded blanks. *Journal of Materials Processing Technology* 53(1995)3-4
- [42] Vollertsen, F.; Lange, K.: Enhancement of drawability by local heat treatment. *Annals of the CIRP* 47(1998)1
- [43] Nguyen, H.; Merklein, M.: Improved Formability of Aluminum Alloys using Laser Induced Hardening of Tailored Heat Treated Blanks. *Physics Procedia* 39(2012)
- [44] 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

- [45] Kishor, N.; Ravi Kumar, D.: Optimization of initial blank shape to minimize earing in deep drawing using finite element method. *Journal of Materials Processing Technology* 130–131(2002)
- [46] Park, C. S.; Ku, T. W.; Kang, B. S.; Hwang, S. M.: Process design and blank modification in the multistage rectangular deep drawing of an extreme aspect ratio. *Journal of Materials Processing Technology* 153–154(2004)1–3
- [47] Wiklund, D.; Liljengren, J.; Berglund, J.; Bay, N.; Kjellsson, K.; Rosen, B.-G.: Friction in sheet metal forming – a comparison between milled and manually polished die surfaces. In: Felder, E.; Montmitonnet, P. (Hrsg.): *Proc. 4th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes (ICTMP)*, Transvalor - Presses des MINES, 2010, S. 613–622
- [48] Godi, A.; Groenbaek, J.; De Chiffre, L.: Characterisation and full-scale production testing of multifunctional surfaces for deep drawing applications. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 16(2017)
- [49] Steitz, M.; Stein, P.; Groche, P.: Influence of Hammer-Peened Surface Textures on Friction Behavior. *Tribology Letters* 58(2015)2
- [50] Steitz, M.: Tribologisch günstige Oberflächenstrukturierung von Tiefziehwerkzeugen mittels maschinellem Oberflächenhämmern. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2016
- [51] Trauth, D.: Tribology of Machine Hammer Peened Tool Surfaces for Deep Drawing. Dissertation, RWTH Aachen, 2016
- [52] Sresomroeng, B.; Premanond, V.; Kaewtatip, P.; Khantachawana, A.; Kurosawa, A.; Koga, N.: Performance of CrN radical nitrided tools on deep drawing of advanced high strength steel. *Surface and Coatings Technology* 205(2011)17–18
- [53] Abe, Y.; Ohmi, T.; Mori, K.; Masuda, T.: Improvement of formability in deep drawing of ultra-high strength steel sheets by coating of die. *Journal of Materials Processing Technology* 214(2014)9
- [54] Behrens, B.-A.; Hübner, S.; Eckold, C.-P.; Groche, P.; Ertugrul, M.: Development of a segmented hydro-elastic blank holder for deep drawing. In: Felder, E.; Montmitonnet, P. (Hrsg.): *Proc. 4th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes (ICTMP)*, Transvalor - Presses des MINES, 2010, S. 683–689

- [55] Siegert, K.: Blechumformung: Verfahren, Werkzeuge und Maschinen, Heidelberg: Springer-Verlag, 2015
- [56] Häussermann, M.: Zur Gestaltung von Tiefziehwerkzeugen hinsichtlich des Einsatzes auf hydraulischen Vielpunktzieheinrichtungen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2002
- [57] Behrens, B.-A.; Eckold, C.-P.; Groche, P.; Ertugrul, M.; Bäcker, F.: Entwicklung eines Niederhaltersystems für Tiefziehprozesse. EFB-Forschungsbereich Nr. 334, 2011
- [58] Gavas, M.; Izciler, M.: Design and application of blank holder system with spiral spring in deep drawing of square cups. *Journal of Materials Processing Technology* 171(2006)2
- [59] M. Samuel: Influence of drawbead geometry on sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* 122(2002)1
- [60] Schmid, H.; Suttner, S.; Merklein, M.: An incremental analysis of a deep drawing steel's material behaviour undergoing the predeformation using drawbeads. *Journal of Physics: Conference Series* 896(2017)
- [61] M. Eriksen: The influence of die geometry on tool wear in deep drawing. *Wear* 207(1997)1-2
- [62] Jensen, M.; Damborg, F. ; Nielsen, K.; Danckert, J.: Optimization of the draw-die design in conventional deep-drawing in order to minimise tool wear. *Journal of Materials Processing Technology* 83(1998)1-3
- [63] Dhaiban, A. A.; Soliman, M. E. S.; El-Sebaie, M. G.: Finite element modeling and experimental results of brass elliptic cups using a new deep drawing process through conical dies. *Journal of Materials Processing Technology* 214(2014)4
- [64] Kesharwani, R. K.; Basak, S.; Panda, S. K.; Pal, S. K.: Improvement in limiting drawing ratio of aluminum tailored friction stir welded blanks using modified conical tractrix die. *Journal of Materials Processing Technology* 28(2017)
- [65] Mang, T.; Dresel, W.: *Lubricants and Lubrication*. Weinheim: Wiley-VCH, 2007, 2. Auflage

- [66] Kim, H.; Altan, T.; Yan, Q.: Evaluation of stamping lubricants in forming advanced high strength steels (AHSS) using deep drawing and ironing tests. *Journal of Materials Processing Technology* 209(2009)8
- [67] Kuwer, C.-J.: Verschleißreduktion beim Tiefziehen von X 5 CrNi 18-10. Dissertation, RWTH Aachen, 2007
- [68] Kirkhorn, L.; Frogner, K.; Andersson, M.; Ståhl, J. E.: Improved Tribotesting for Sheet Metal Forming. *Procedia CIRP* 3(2012)
- [69] Balbach, R.: Optimierung der Oberflächenmikrogeometrie von Aluminiumfeinblechen für das Karosserieziehen. Dissertation, Universität Stuttgart, 1988
- [70] Müllerschön, H.: Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Ziehen nicht-axialsymmetrischer Blechformteile durch Variation der Platinenbefettung. Dissertation, Universität Stuttgart, 1997
- [71] Schmoeckel, D.; Staeves, J.; Filzek, J.: Minimierung der Schmierstoffmenge bei der Umformung von Tiefziehblechen unterschiedlicher Oberflächenfeingestalt. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben EFB/AIF 10451 N, 1997
- [72] 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
- [73] Bay, N.; Nakamura, T.; Schmid, S.: Green Lubricants for Metal Forming. In: Felder, E.; Montmitonnet, P. (Hrsg.): *Proc. 4th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes (ICTMP)*, Transvalor - Presses des MINES, 2010, S. 4-33
- [74] Meiler, M.; Pfestorf, M.; Geiger, M.; Merklein, M.: The use of dry film lubricants in aluminum sheet metal forming. *Wear* 255(2003)7-12
- [75] Siegert, K.; Dogan, N.; Kleinert, H.: Verarbeitungsverhalten von Aluminiumblechen mit Trockenschmierstoffen. EFB-Forschungsbericht Nr. 184, 2002
- [76] Kim, H.; Sung, J. H.; Sivakumar, R.; Altan, T.: Evaluation of stamping lubricants using the deep drawing test. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47(2007)14

- [77] Lovell, M.; Higgs, C. F.; Deshmukh, P.; Mobley, A.: Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly lubricants. *Journal of Materials Processing Technology* 177(2006)1-3
- [78] Ramezani, M.; Schmid, S. R.: Bio-based lubricants for forming of magnesium. *Journal of Manufacturing Processes* 19(2015)
- [79] Mobarak, H.M.; Niza Mohamad, E.; Masjuki, H.H.; Kalam, M.A.; Al Mahmud, K.A.H.; Habibullah, M.; Ashraful, A.M.: The prospects of biolubricants as alternatives in automotive applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33(2014)
- [80] Jafari, A. J.; Hassanpour, M.: Analysis and comparison of used lubricants, regenerative technologies in the world. *Resources, Conservation and Recycling* 103(2014)
- [81] Abele, E., Feickert, S., and Weigold, M., "Symposium zum Thema Innovative Zerspanung - Effizient und Umweltgerecht," TU Darmstadt, Inst. f. Technologie und Werkzeugmaschinen, S. 4-6, 2004
- [82] Norm DIN 69090-1: MMS-Bearbeitungstechnologie - Teil 1: Begriffe und Definitionen. Berlin: Beuth, 2011
- [83] Weihnacht, V.; Brückner, A.; Bräunling, S.: ta-C beschichtete Werkzeuge für die Trockenumformung von Aluminiumblechen. *Vakuum in Forschung und Praxis* 20(2008)3
- [84] Wörz, C.; Liewald, M.; Singer, M.: Investigation of Tribological Conditions in the Strip Drawing Test Using Liquid CO₂ and N₂ as a Volatile Lubricant. In: Thai Tribology Association (TTA) (Hrsg.): 7 th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes, 2016, S. 140-148
- [85] Wörz, C.; Zahedi, E.; Umlauf, G.; Liewald, M.; Weber, R.; Tovar, G. E. M.: Tiefziehen eines U-Profiles mit flüchtigen Medien als Schmierstoffersatz. *Dry Metal Forming Open Access Journal FMT* 3(2017)
- [86] Tröber, P.; Weiss, H. A.; Kopp, T.; Golle, R.; Volk, W.: On the correlation between thermoelectricity and adhesive tool wear during blanking of aluminum sheets. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 118-119(2017)

- [87] Tröber, P.; Demmel, P.; Hoffmann, H.; Golle, R.; Volk, W.: On the influence of Seebeck coefficients on adhesive tool wear during sheet metal processing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 66(2017)1
- [88] Sonderforschungsbereich SFB442: Umweltverträgliche Tribosysteme durch geeignete Werkstoffverbunde und Zwischenstoffe am Beispiel der Werkzeugmaschine. <http://www.sfb442.rwth-aachen.de/> (abgerufen am 04.09.2017)
- [89] Kataoka, S.; Murakawa, M.; Aizawa, T.; Ike, H.: Tribology of dry deep-drawing of various metal sheets with use of ceramics tools. *Surface and Coatings Technology* 178(2004)
- [90] Tamaoki, K.; Manabe, K.; Kataoka, S.; Aizawa, T.: Electroconductive ceramic tooling for dry deep drawing. *Journal of Materials Processing Technology* 210(2010)1
- [91] Klocke, F.; Kuwer, C.; Zeppenfeld, C.: Tribological analysis of diverse ceramics in contact with stainless steel under different lubricating conditions. *Production Engineering* 13(2006)2
- [92] Horiuchi, T.; Yoshihara, S.; Iriyama, Y.: Dry deep drawability of A5052 aluminum alloy sheet with DLC-coating. *Wear* 286-287(2012)
- [93] Grill, A.: Diamond-like carbon: state of the art. *Diamond and Related Materials* 8(1999)2-5
- [94] Taube, K.: Carbon-based coatings for dry sheet-metal working. *Surface and Coatings Technology* 98(1998)1-3
- [95] Murakawa, M.; Takeuchi, S.: Evaluation of tribological properties of DLC films used in sheet forming of aluminum sheet. *Surface and Coatings Technology* 163-164(2003)
- [96] Podgornik, B.; Hogmark, S.; Sandberg, O.: Influence of surface roughness and coating type on the galling properties of coated forming tool steel. *Surface and Coatings Technology* 184(2004)2-3
- [97] Podgornik, B.; Hogmark, S.: Surface modification to improve friction and galling properties of forming tools. *Journal of Materials Processing Technology* 174(2006)1-3

- [98] Podgornik, B.; Jerina, J.: Surface topography effect on galling resistance of coated and uncoated tool steel. *Surface and Coatings Technology* 206(2012)11–12
- [99] Osakada, K.; Matsumoto, R.: Fundamental Study of Dry Metal Forming with Coated Tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 49(2000)1
- [100] Nyberg, H.; Tokoroyama, T.; Wiklund, U.; Jacobson, S.: Design of low-friction PVD coating systems with enhanced running-in performance - carbon overcoats on TaC/aC coatings. *Surface and Coatings Technology* 222(2013)
- [101] Azushima, A.; Tanno, Y.; Iwata, H.; Aoki, K.: Coefficients of friction of TiN coatings with preferred grain orientations under dry condition. *Wear* 265(2008)
- [102] Ghiotti, A.; Bruschi, S.: Tribological behaviour of DLC coatings for sheet metal forming tools. *Wear* 271(2011)9–10
- [103] Sresomroeng, B.; Premanond, V.; Kaewtatip, P.; Khantachawana, A.; Koga, N.; Watanabe, S.: Anti-adhesion performance of various nitride and DLC films against high strength steel in metal forming operation. *Diamond and Related Materials* 19(2010)7–9
- [104] Murrenhoff, H.: *Umweltverträgliche Tribosysteme - Die Vision einer umweltfreundlichen Werkzeugmaschine*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010
- [105] Bowden, F. P.; Tabor, D.: ;Mechanism of metallic friction. *Nature* 3798(1942), S. 197–199
- [106] Gachot, C.; Rosenkranz, A.; Reinert, L.; Ramos-Moore, E.; Souza, N.; Müser, M. H.; Mücklich, F.: Dry Friction Between Laser-Patterned Surfaces: Role of Alignment, Structural Wavelength and Surface Chemistry. *Tribology letters* 49(2012)1
- [107] Prodanov, N.; Gachot, C.; Rosenkranz, A.; Mücklich, F.; Müser, M. H.: Contact mechanics of laser-textured surfaces: Correlating contact area and friction. *Tribology letters* 50(2013)1
- [108] Pettersson, U.; Jacobson, S.: Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts. *Tribology International* 36(2003)11

- [109] Dumitru, M.; Romano, G.; Weber, V.; Pimenov, H.P.; Kononenko, S.; Hermann, T.; Bruneau, J.; Gerbig, S.; Shupegin, Y.: Laser treatment of tribological DLC films. *Diamond and Related Materials* 12(2003)
- [110] Roch, T.; Weihnacht, V.; Scheibe, H.; Roch, A.; Lasagni, A. F.: Direct Laser Interference Patterning of tetrahedral amorphous carbon films for tribological applications. *Diamond and Related Materials* 33(2013)
- [111] Scholz, P.; Richard, B.; Härtel, S.; Kühn, R.; Müller, R.; Schubert, A.: Dry Forming of Aluminium Sheet Metal : Influence of Different Types of Forming Tool Microstructures on the Coefficient of Friction. *Key Engineering Materials* 651-653(2015)
- [112] Mousavi, A.; Schomäcker, M.; Brosius, A.: Macro and Micro Structuring of Deep Drawing's Tools for Lubricant Free Forming. *Procedia Engineering* 81(2014)
- [113] Brosius, A.; Mousavi, A.: Lubricant free deep drawing process by macro structured tools. *Annals of the CIRP* 65(2016)₁
- [114] Merklein, M.: Charakterisierung von Blechwerkstoffen für den Leichtbau. Bamberg: Meisenbach Verlag, 2006
- [115] Norm DIN EN ISO 10130: Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen - Technische Lieferbedingungen. Berlin: Beuth, 2007
- [116] Norm DIN EN ISO 10338: Warmgewalzte und kaltgewalzte Flacherzeugnisse ohne Überzug aus Mehrphasenstählen zum Kaltumformen. Berlin: Beuth, 2015
- [117] Norm DIN EN ISO 10346: Kontinuierliche schmelztauchveredelte Flacherzeugnisse aus Stahl zum Kaltumformen. Berlin: Beuth, 2015
- [118] Norm DIN EN ISO 1461: Durch Feuerverzinken auf Stahl aufgebraachte Zinküberzüge (Stückverzinkung) - Anforderungen und Prüfung. Berlin: Beuth, 2009
- [119] Romhanji, E.; Popović, M.; Glišić, D.; Stefanović, M.; Milovanović, M.: On the Al-Mg alloy sheets for automotive application: Problems and solutions. *Metalurgija – Journal of Metallurgy* 10(2004)

- [120] Norm DIN EN ISO 573-3: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug - Teil 3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen. Berlin: Beuth, 2009
- [121] Norm STAHL-EISEN-Prüfblätter: PuD-AL - Prüf- und Dokumentationsrichtlinie für die mechanischen Kennwerte von Walzprodukten aus Aluminium. 2005
- [122] Norm STAHL-EISEN-Prüfblätter: PuD-S - Prüf- und Dokumentationsrichtlinie für die mechanischen Kennwerte von Feinblechen aus Stahl. 2003
- [123] Hockett, J. E.; Sherby, O. D.: Large Strain Deformation of Polycrystalline Metals at Low Homologous Temperatures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 23(1975)
- [124] Suttner, S.; Merklein, M.: Experimentelle Untersuchung des zweiachsigen Spannungszustands im Kreuzzugversuch zur Identifikation von Werkstoffmodellen für die Finite-Elemente Simulation. In: H.-J. Christ (Hrsg.): Tagungsband Werkstoffprüfung, Stahleisen, 2013, S. 59-64
- [125] Merklein, M.; Affronti, E.; Steiner, J.: Numerical Investigation of Dry and Lubricated Sheet Metal Forming Processes. *Key Engineering Materials* 651-653(2015)
- [126] Deutsches Institut für Normung, "DIN EN ISO 4957 Werkzeugstähle." 2001.
- [127] Norm DIN EN ISO 4288: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit. Berlin: Beuth, 1997
- [128] Norm DIN EN ISO 4287: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit. Berlin: Beuth, 2009
- [129] Norm DIN EN ISO 13565-2: Geometrische Produktspezifikation (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren, Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften, Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilkurve. Berlin: Beuth, 1998

- [130] Volk, R.: Rauheitsmessung: Theorie und Praxis. Berlin: Beuth, 2013, 2. Auflage
- [131] Pfestorf, M: Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1997
- [132] Haschke, M; Flock, J.: Röntgenfluoreszenzanalyse in der Laborpraxis. Weinheim: Wiley VCH, 2017
- [133] Eggert, F.: Standardfreie Elektronenstrahl-Mikroanalyse: mit dem EDX im Rasterelektronenmikroskop - Ein Handbuch für die Praxis. Norderstedt: Books on Demand GmbH, 2005
- [134] VDI Richtlinie 2840: Kohlenstoffschichten - Grundlagen, Schichttypen und Eigenschaften. Berlin: Beuth, 2012
- [135] Norm DIN EN ISO 6507-1: Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 1: Prüfverfahren. Berlin: Beuth, 2005
- [136] Norm DIN EN ISO 14577-1: Metallische Werkstoffe — Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter — Teil 1: Prüfverfahren. Berlin: Beuth, 2015
- [137] Sauter Engineering+Design: Optische und berührungslose 3D Messtechnik mit ATOS (GOM) Systemen. https://sautercar.ch/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/Datenblatt-ATOS-u-TRITOP-3D-Scannen-Sauter-E-D_15.pdf (abgerufen am: 12.08.2017)
- [138] Almohallami, A.; Arghavani, M.; Böhermann, F.; Freiße, H.; Herrmann, M.; Mousavi, S. A.; Schöler, S.; Scholz, P.; Tenner, J.; Teller, M.; Umlauf, G.; Wulff, D.; Yilkiran, D.; Maier, H.J.: How dry is dry ? - A critical analysis of surface conditions used in dry metal forming. Dry Metal Forming Open Access Journal FMT 3(2017)
- [139] Infrazytic GmbH: Funktionsweise der Infrarot-Spektroskopie. <http://www.infrazytic.de/funktionsweise-der-infarot-spektroskopie> (abgerufen am: 05.10.2016)
- [140] Stuart, B.: Infrared Spectroscopy : Fundamentals and Applications. West Sussex: John Wiley & Sons, 2004
- [141] Keiichiro, F.; Valle, B. L.: The Physical Basis of Analytical Atomic Absorption Spectrometry. Analytical Chemistry 35(1963)8

- [142] Severo, V.; Vilhena, L.; Silva, P. N.; Dias, J. P.; Becker, D.; Wagner, S.; Cavaleiro, A.: Tribological behaviour of W-Ti-N coatings in semi-industrial strip-drawing tests. *Journal of Materials Processing Technology* 209(2009)10
- [143] Shah, Q. H.; Abid, H. M.: *From Ls-PrePost to Ls-Dyna: An Introduction*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011
- [144] Livermore Software Technology Corporation: Applications. <http://www.lstc.com/applications> (abgerufen am: 01.03.2014)
- [145] LS-DYNA Keyword User`s Manual: Volume I R8. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, 2015
- [146] LS-Dyna Support: Contact types. <http://www.dynasupport.com/tutorial/contact-modeling-in-ls-dyna/contact-types> (abgerufen am: 21.06.2017)
- [147] Barlat, F.; Brem, J.C.; Yoon, J.W.; Chung, K.; Dick, R.E.; Lege, D.J.; Pourboghrat, F.; Choi, S.-H.; Chu, E.: Plane stress yield function for aluminum alloy sheets—part 1: theory. *International Journal of Plasticity* 19(2003)9
- [148] Zöllner, F.: *Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2016
- [149] Azushima, A.; Kudo, H.: Direct Observation of Contact Behaviour to Interpret the Pressure Dependence of the Coefficient of Friction in Sheet Metal Forming. *Annals of the CIRP* 44(1995)1
- [150] Stribeck, R.: Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager. In: VDA (Hrsg.): *Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, insbesondere aus den Laboratorien der technischen Hochschulen*. Berlin, Springer, 1903
- [151] Merklein, M.; Schmidt, M.; Wartzack, S.; Tremmel, S.; Andreas, K.; Häfner, T.; Zhao, R.; Steiner, J.: Development and Evaluation of Tool Sided Surface Modifications for Dry Deep Drawing of Steel and Aluminum Alloys. *Dry Metal Forming Open Access Journal FMT* 1(2015)
- [152] Sriraman, K. R.; Strauss, H. W.; Brahimi, S.; Chromik, R. R.; Szpunar, J. A.; Osborne, J. H.; Yue, S.: Tribological behavior of electrodeposited Zn, Zn-Ni, Cd and Cd-Ti coatings on low carbon steel substrates. *Tribology International* 56(2012)

- [153] Czichos, H.; Habig, K.: Tribologie-Handbuch. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010, 3. Auflage
- [154] Fricke, R.: Zur Oberflächenenergie fester Metalle. Zeitschrift für Elektrochemie 52(1948)2
- [155] Carlsson, P.: Surface Engineering in Sheet Metal Forming. Dissertation, Uppsala Universität, 2005
- [156] Vencl, A.; Bobic, I.; Stojanovic, B.: Tribological properties of A356 Al-Si alloy composites under dry sliding conditions. Industrial Lubrication and Tribology 66(2014)
- [157] Dietrich, J.; Tschätsch, H.: Praxis der Umformtechnik. Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen. Wiesbaden: Springer, 2013, 11. Auflage
- [158] Tenner, J.; Andreas, K.; Radius, A.; Merklein, M.: ScienceDirect Numerical and experimental investigation of dry deep drawing of aluminum alloys with conventional and coated tool surfaces. Procedia Engineering 207(2017)
- [159] Tenner, J.; Häfner, T.; Zhao, R. ; Andreas, K.; Schmidt, M.; Tremmel, S.; Merklein, M.: Analysis of tool-sided surface modifications for dry deep drawing of deep drawing steel and aluminum alloys in a model process. Dry Metal Forming Open Access Journal FMT 3(2017)
- [160] Hartmann, F.; Pickard, S.: Der Fehler bei finiten Elementen. Bauingenieur 60(1985)
- [161] Drotleff, K.; Liewald, M.: Verbesserte Versagensvorhersage für die Blechumformung.
<https://www.blechnet.com/index.cfm?pid=1&pk=558148&p=1>
(abgerufen am: 13.01.2018)
- [162] Lifshitz, Y.; Lempert, G. D.; Grossman, E.: Substantiation of Subplantation Model for Diamondlike Film Growth by Atomic Force Microscopy. Physical Review Letters 72(1994)17
- [163] Hetzner, H.: Systematische Entwicklung amorpher Kohlenstoffschichten unter Berücksichtigung der Anforderungen der Blechmassivumformung. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2014

- [164] Podgornik, B.; Hren, D.; Vižintin, J.: Low-friction behaviour of boundary-lubricated diamond-like carbon coatings containing tungsten. *Thin Solid Films* 476(2005)1
- [165] Steiner, J.; Andreas, K.; Merklein, M.: Investigation of surface finishing of carbon based coated tools for dry deep drawing of aluminium alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 159(2016)1
- [166] Zhao, R.; Steiner, J.; Andreas, K.; Merklein, M.; Tremmel, S.: Investigation of tribological behaviour of a-C:H coatings for dry deep drawing of aluminium alloys. *Tribology International* 118(2018)
- [167] VDI Richtlinie 3198: Beschichten von Werkzeugen der Kaltmassivumformung; CVD- und PVD-Verfahren. Berlin: Beuth, 1992
- [168] Coblas, D. G.; Fatu, A.; Maoui, A.: Manufacturing textured surfaces : State of art and recent developments. *Journal of Engineering Tribology* 229(2015)1
- [169] Segu, D. Z.; Kim, J.-H.; Choi, S. G.; Jung, Y.-S.; Kim, S.-S.: Application of Taguchi techniques to study friction and wear properties of MoS₂ coatings deposited on laser textured surface. *Surface & Coatings Technology* 232(2013)
- [170] Häfner, T.; Reg, Y.; Hertzner, H.; Schmidt, M.: Microstructuring tools for sheet bulk metal forming - a designated application for picosecond laser. *Journal of Laser Micro Nanoengineering* 8(2013)1
- [171] Tenner, J.; Häfner, T.; Rothhammer, B.; Krachenfels, K.; Zhao, R.; Schmidt, M.; Tremmel, S.; Merklein, M.: Influence of laser generated micro textured coated tool surfaces on dry deep drawing processes. *Dry Metal Forming Open Access Journal FMT* 4(2018)
- [172] Donnet, C.; Erdemir, A.: *Tribology of Diamond-Like Carbon Films*. New York: Springer Science, 2008
- [173] Lara, L. C.; Costa, H.; de Mello, J. D. B.: Influence of layer thickness on sliding wear of multifunctional tribological coatings *Industrial Lubrication and Tribology* 67(2015)5
- [174] Stephens, L. S.; Liu, Y.; Meletis, E. I.: Finite Element Analysis of the Initial Yielding Behavior of a Hard Coating/Substrate System With Functionally Graded Interface Under Indentation and Friction. *Journal of Tribology* 122(2000)

- [175] Strondl, C.; Carvalho, N. M.; De Hosson, J. T. M.; van der Kolk, G. J.: Investigation on the formation of tungsten carbide in tungsten-containing diamond like carbon coatings. *Surface & Coatings Technology* 162(2003)2–3
- [176] Merklein, M.; Schmidt, M.; Tremmel, S.; Andreas, K.; Häfner, T.; Zhao, R.; Tenner, J.: Tailored modifications of amorphous carbon based coatings for dry deep drawing. *Dry Metal Forming Open Access Journal FMT* 2(2016)
- [177] Scaraggi, M.; Mezzapesa, F. P.; Carbone, G.; Ancona, A.; Sorgente, D.; Lugarà, P. M.: Minimize friction of lubricated laser-microtextured-surfaces by tuning microholes depth. *Tribology International* 75(2014)
- [178] Kalin, M.; Polajnar, M.: The wetting of steel, DLC coatings, ceramics and polymers with oils and water: The importance and correlations of surface energy, surface tension, contact angle and spreading. *Applied Surface Science* 293(2014)
- [179] Robertson, J.: Diamond-like amorphous carbon. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 37(2002)4–6
- [180] Voevodin, A. A.; Phelps, A. W.; Zabinski, J. S.; Donley, M. S.: Friction induced phase transformation of pulsed laser deposited diamond-like carbon. *Diamond and Related Materials* 5(1996)11
- [181] Bowden, F. P.; Tabor, D.: *The Friction and Lubrication of Solids*. Oxford: Clarendon Press, 1964
- [182] Bartel, D.: Berechnung von Festkörper- und Mischreibung bei Metallpaarungen. Dissertation, Universität Magdeburg, 2001
- [183] Menezes, P., Ingole, S. P., Nosonovsky, M., Kailas, S. V., Lovell, M. R.: *Tribology for Scientists and Engineers: From Basics to Advanced Concepts*. New York: Springer Science and Business Media, 2013
- [184] Vijh, A. K. : The influence of metal-metal bond energies on the adhesion , hardness , friction and wear of metals. *Journal of Material Science* 10(1975)
- [185] Karupannasamy, D. K.; Hol, J.; de Rooij, M. B.; Meinders, T.; Schipper, D. J.: Modelling mixed lubrication for deep drawing processes. *Wear* 294–295(2012)
- [186] Engel, U.: Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Werkzeugen bei Massivumformung. Bamberg: Meisenbach Verlag, 1996

- [187] Welsch, M.: Bewertung von Spannungsspitzen und Singularitäten in FEM- Rechnungen. In: D. Pieper (Hrsg.): Das 11. Norddeutsches Simulationsforum, 2015, S. 15-27
- [188] Jh Werkzeug GmbH: Wärmebehandlung Werkzeugstahl 1.2379. <http://www.jhwerkzeug.de/produkte/werkzeugstahl/1.2379-x155crvm012-1/wermebehandlung122.html>
(abgerufen am: 12.02.2018)

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Andreas, K.; Steiner, J.; Vierzigmann, U.; Merklein, M.; Tremmel, S.; Zhao, R.: Innovative Tribological Systems in Sheet Metal Forming - Revolution in the Press Shop?. In: Bouzakis, K.-D.; Bobzin, K.; Denkena, B.; Merklein, M. (Hrsg.): Proc. 11th Int. Conf. THE "A" Coatings in Manufacturing Engineering, (2014)
- [P2] Merklein, M.; Affronti, E.; Steiner, J.: Numerical Investigation of Dry and Lubricated Sheet Metal Forming Processes. Key Engineering Materials 651-653 (2015)
- [P3] Merklein, M.; Schmidt, M.; Wartzack, S.; Tremmel, S.; Andreas, K.; Häfner, T.; Zhao, R.; Steiner, J.: Development and Evaluation of Tool Sided Surface Modifications for Dry Deep Drawing of Steel and Aluminum Alloys. Dry Metal Forming Open Access Journal FMT 1(2015)
- [P4] Steiner, J.; Merklein, M.: Investigation of Influencing Parameters for Tribological Conditions in Dry Forming Processes. Acta Metallurgica Sinica English Letters 28(2015)12
- [P5] Merklein, M.; Schmidt, M.; Wartzack, S.; Tremmel, S.; Andreas, K.; Häfner, T.; Zhao, R.; Steiner, J.: Development and Evaluation of Tool Sided Surface Modifications for Dry Deep Drawing of Steel and Aluminum Alloys. Dry Metal Forming Open Access Journal 2(2015)
- [P6] Merklein, M.; Andreas, K.; Steiner, J.: Influence of Tool Surface on Tribological Conditions in Conventional and Dry Sheet Metal Forming. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology 2(2015)2
- [P7] Steiner, J.; Andreas, K.; Merklein, M.: Investigation of surface finishing of carbon based coated tools for dry deep drawing of aluminium alloys. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 159(2016)1

- [P8] Merklein, M.; Schmidt, M.; Tremmel, S.; Andreas, K.; Häfner, T.; Zhao, R.; Tenner, J.: Tailored modifications of amorphous carbon based coatings for dry deep drawing. Dry Metal Forming Open Access Journal FMT 2(2016)
- [P9] Steiner, J.; Andreas, K.; Merklein, M.: Investigation of surface finishing of carbon based coated tools for dry deep drawing of aluminium alloys. In: ASMET (Hrsg.): Proc. Int. Deep Drawing Research Group Conf., (2016)
- [P10] Steiner, J.; Zhao, R.; Tremmel, S.; Merklein, M.: Investigation of Tribological Behavior of Carbon Coatings in Dry Sheet Metal Forming. In: K. Bobzin, K.-D. Bouzakis, B. Denkena, H. J. Maier, M. Merklein (Hrsg.): The "A" Coatings Conference Proceedings, PZH Verlag, (2016)
- [P11] Almohallami, A.; Arghavani, M.; Böhermann, F.; Freiße, H.; Herrmann, M.; Mousavi, S. A.; Schöler, S.; Scholz, P.; Tenner, J.; Teller, M.; Umlauf, G.; Wulff, D.; Yilkiran, D.; Maier, H.J.: How dry is dry ? - A critical analysis of surface conditions used in dry metal forming. Dry Metal Forming Open Access Journal FMT 3(2017)
- [P12] Tenner, J.; Häfner, T.; Zhao, R.; Andreas, K.; Schmidt, M.; Tremmel, S.; Merklein, M.: Analysis of tool-sided surface modifications for dry deep drawing of deep drawing steel and aluminum alloys in a model process. Dry Metal Forming Open Access Journal FMT 3(2017)
- [P13] Tenner, J.; Andreas, K.; Radius, A.; Merklein, M.: Numerical and experimental investigation of dry deep drawing of aluminum alloys with conventional and coated tool surfaces. Procedia Engineering 207(2017)

- [P14] Häfner, T.; Heberle, J.; Hautmann, H.; Zhao, R.; Tenner, J.; Tremmel, S.; Merklein, M.; Schmidt, M.: Effect of picosecond laser based modifications of amorphous carbon coatings on lubricant-free tribological systems. In: (Hrsg.): Proceedings of LPM - the 18th International Symposium on Laser Precision, (2017)
- [P15] Zhao, R.; Steiner, J.; Andreas, K.; Merklein, M.; Tremmel, S.: Investigation of tribological behaviour of a-C:H coatings for dry deep drawing of aluminium alloys. *Tribology International* 118(2018)
- [P16] Tenner, J.; Häfner, T.; Rothhammer, B.; Krachenfels, K.; Zhao, R.; Schmidt, M.; Tremmel, S.; Merklein, M.: Influence of laser generated micro textured coated tool surfaces on dry deep drawing processes. *Dry Metal Forming Open Access Journal FMT* 4(2018)
- [P17] Tenner, J.; Zhao, R.; Tremmel, S.; Häfner, T.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Tribological Behavior of Carbon Based Coatings Adapted to Lubricant-Free Forming Conditions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology* 3(2018)5
- [P18] Krachenfels, K.; Tenner, J.; Merklein, M.: Nachhaltige Blechumformung durch Trockentiefziehen. *Werkstattstechnik online* 108(2018)
- [P19] Häfner, T.; Rothhammer, B.; Tenner, J.; Krachenfels, K.; Merklein, M.; Tremmel, S.; Schmidt, M.: Adaption of tribological behavior of a-C:H coatings for application in dry deep drawing. In: Vollertsen, F.; Dean, T. A.; Qin Y.; Yuan S. J. (Hrsg.): 5th International Conference on New Forming Technology (ICNFT 2018), MATEC Web of Conferences, (2018)

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten*

- [S1] Raiser, F.; Tenner, J.; Merklein, M.: Experimentelle Ermittlung der tribologischen Bedingungen beim Trockenumformen. Bachelorarbeit (2014), Erlangen
- [S2] Wu, T.; Tenner, J.; Merklein, M.: Experimentelle Ermittlung von tribologischen Bedingungen beim schmierstofffreien Tiefziehen. Projektarbeit (2014), Erlangen
- [S3] Ertl, M.; Tenner, J.; Merklein, M.: Numerische Auslegung eines segmentierten Werkzeugs für die Trockenumformung von Aluminiumlegierungen. Masterarbeit (2014), Erlangen
- [S4] Riha, M.; Tenner, J.; Merklein, M.: Numerische Auslegung eines segmentierten Werkzeugs für die Trockenumformung von Tiefziehstahl am Beispiel von DCo4. Masterarbeit (2014), Erlangen
- [S5] Herr, E.; Tenner, J.; Merklein, M.: Konzeption eines segmentierten Werkzeugs für das Trockentiefziehen. Bachelorarbeit (2015), Erlangen
- [S6] Kurth, M.; Tenner, J.; Merklein, M.: Experimentelle und numerische Analyse der tribologischen Bedingungen beim Trockentiefziehen. Projektarbeit (2015), Erlangen
- [S7] Zahner, M.; Tenner, J.; Merklein, M.: Simulationsbasierte Auslegung eines segmentierten Modellwerkzeugs für die Trockenumformung von Stahl- und Aluminiumblechen. Masterarbeit (2015), Erlangen
- [S8] Radius, A.; Tenner, J.; Merklein, M.: Experimentelle und numerische Analyse eines Trockentiefziehprozesses am Beispiel eines Rechtecknapfzugs mit segmentiertem Werkzeug. Projektarbeit (2016), Erlangen

- [S9] Breitschwerdt, H.; Tenner, J.; Merklein, M.: Reibungs- und Verschleißanalysen für das Trockentiefziehen anspruchsvoller Geometrien. Projektarbeit (2016), Erlangen
- [S10] Wiesenmayer, S.; Tenner, J.; Merklein, M.: Experimentelle und numerische Untersuchung zur Realisierung von schmierstofffreien Tiefziehprozessen. Masterarbeit (2016), Erlangen
- [S11] Radius, A.; Tenner, J.; Merklein, M.: Experimentelle und numerische Untersuchung der tribologischen Bedingungen am Ziehringradius für das Trockentiefziehen. Masterarbeit (2017), Erlangen
- [S12] Breitschwerdt, H.; Tenner, J.; Merklein, M.: Numerische und experimentelle Untersuchung der Kontaktbedingungen beim Trockentiefziehen. Masterarbeit (2017), Erlangen
- [S13] Weiß, M.; Tenner, J.; Merklein, M.: Analyse von werkzeugseitigen Oberflächenmodifikationen zur Realisierung des Trockentiefziehens von Stahl- und Aluminiumlegierungen. Projektarbeit (2017), Erlangen
- [S14] Krachenfels, K.; Tenner, J.; Merklein, M.: Experimentelle und numerische Untersuchung des Trockentiefziehens von anspruchsvollen Geometrien. Masterarbeit (2017), Erlangen
- [S15] Rösch, P.; Tenner, J.; Merklein, M.: Entwicklung eines Verschleißprüfstands zur Untersuchung werkzeugseitiger Oberflächenmodifikationen für das Trockentiefziehen. Masterarbeit (2018), Erlangen

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

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2019):
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
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
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
Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge
der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-136-9.

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

Band 102: Christian Hinsel
Ermüdungsbruchversagen
hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle
in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert
Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen
von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum
Produktionsmanagement in der
Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.
Band 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 einatzgerechten 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
Laserdurchstrahlschweißen
transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen von walzplattiertem
Halbzeug und Aluminiumblech zur
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-
Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium
Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung
der Crashtauglichkeit von höchstfesten
Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen-
Entwicklung einer Methodik zur
Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das
Umformen lokal wärmebehandelter und
geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahl-
schweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel
Grundlegende Untersuchungen zum
Kontaktzustand zwischen Werkstück
und Werkzeug bei umformtechnischen
Prozessen unter tribologischen
Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer
Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner
Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke
Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3.

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

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

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

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

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

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

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des 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
Kohlenstoffaserverbundwerkstoffe mit
spezifischem Zusatzdraht
LFT, 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
LFT, 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 Stellin
Design of Manufacturing Processes for
the Cold Bulk Forming of Small Metal
Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling,
Simulation and Optimization of Molded
Interconnect Devices (MID) Based on
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-
mentelle 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 Magnesium-
legierung 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, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

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

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 319: Tobias Konrad
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen
LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge
FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile
LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeuoberflächen
LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Die Automobilindustrie steht unter zunehmenden Druck, einen Beitrag zur Ressourcenschonung und zum Umweltschutz zu leisten. Eine Möglichkeit, den Anforderungen an nachhaltige Umformprozesse, welche unter anderem zur Herstellung von Karoseriebauteilen benötigt werden, gerecht zu werden, stellt der Verzicht auf Schmierstoffe dar. Dies ermöglicht neben der Einsparung meist umweltschädlicher Schmiermittel auch eine Verkürzung der Prozesskette, da ein Beölen sowie ein späteres Reinigen entfallen können. Im Gegensatz zu konventionellen Blechumformprozessen, bei denen der Schmierstoff den direkten Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück verhindert, führt das so genannte Trockentiefziehen zu intensiven Wechselwirkungen im direkten Kontaktbereich. Dies bedingt wiederum erhöhte Reibung und zunehmenden Verschleiß, welcher primär durch adhäsive Verschleißmechanismen geprägt ist. Motiviert durch die ökologischen und ökonomischen Potentiale des schmierstofffreien Tiefziehens verfolgt diese Arbeit das primäre Ziel Trockentiefziehen unter prozessrelevanten Bedingungen materialübergreifend zu realisieren. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die tribologischen Bedingungen im schmierstofffreien Kontakt in Abhängigkeit des Blechwerkstoffs, der Oberflächeneigenschaften und Prozessparameter untersucht. Dazu werden Verschleiß und Reibung im trockenen Kontakt in Referenz zu geschmierten Bedingungen analysiert. Als Ansätze zur Erhöhung der Verschleißbeständigkeit und zur Beeinflussung der Reibung werden werkzeugseitige Oberflächenmodifikationen in Form von amorphen Kohlenstoffschichten und lasergenerierten Mikrostrukturen untersucht. Das tribologische Einsatzverhalten der Modifikationen wird im Labormaßstab anhand von Streifenziehversuchen quantifiziert. Durch eine Charakterisierung der oberflächennahen Eigenschaften vor und nach den Laborversuchen werden Rückschlüsse auf Wirkzusammenhänge zwischen Oberflächeneigenschaften und den resultierenden tribologischen Bedingungen abgeleitet. Abschließend werden geeignete Modifikationen auf ein Werkzeug zum Tiefziehen von Rechteckknäpfen appliziert und die Realisierbarkeit des Trockentiefziehens in realen Umformversuchen bewertet.

