

FAU Studien aus dem Maschinenbau 437

Stephan Schirdewahn

Verbesserung des tribologischen
Einsatzverhaltens im Presshärteprozess
durch Verwendung maßgeschneiderter
laserimplantierter Werkzeugoberflächen

Stephan Schirdewahn

Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im
Presshärteprozess durch Verwendung maßgeschneiderter
laserimplantierter Werkzeuge

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 437

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Stephan Schirdewahn

**Verbesserung des tribologischen
Einsatzverhaltens im
Presshärteprozess durch
Verwendung maßgeschneiderter
laserimplantierter Werkzeuge**

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

Erlangen
FAU University Press
2024

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

Kontakt: Stephan Schirdewahn, Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg ([ror https://ror.org/oof7hpc57](https://ror.org/oof7hpc57)), <https://orcid.org/0000-0002-8743-9176>

Bitte zitieren als

Schirdewahn, Stephan. 2024. *Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im Presshärteprozess durch Verwendung maßgeschneiderter laserimplantierter Werkzeugoberflächen*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 437. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-722-7.

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

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über OPEN FAU
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://open.fau.de/home>

Verlag und Auslieferung:
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-721-0 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-722-7 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-722-7

**Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens
im Presshärteprozess durch Verwendung
maßgeschneiderter laserimplantierter
Werkzeugoberflächen**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Stephan Schirdewahn, M.Sc.

aus Weiden i.d.OPf.

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

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Dezember 2023

Gutachter/in: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Prof. Dr.-Ing. Michael Rethmeier, TU Berlin

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Die Inhalte dieser Arbeit wurden im Rahmen der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekte (ME 2043/68-1 sowie ME 2043/68-2) „Laserimplantation an Presshärtewerkzeugen zur Beeinflussung der tribologischen und thermischen Eigenschaften im Prozesseinsatz“ erarbeitet.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein, Ordinaria des Lehrstuhls, für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit, den fachlichen und konstruktiven Diskussionen sowie das entgegengebrachte Vertrauen während der Leitung der Forschungsgruppe „Blechumformung“. Bedanken möchte ich mich darüber hinaus bei Prof. Dr.-Ing. Michael Rethmeier für die Übernahme des Koreferats. Bei Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Inf. Hinnerk Hagenah und Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Paul Fröba bedanke ich mich für Ihre Mitwirkung im Zuge meines Promotionsverfahrens als Prüfungsvorsitzender und fachfremder Gutachter.

Mein Dank gilt außerdem Dr.-Ing. Kai Hilgenberg, Dr.-Ing. Felix Spranger und Niels Carstensen von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung für die erfolgreiche, stets angenehme und zielorientierte Zusammenarbeit in den Forschungsprojekten. Ebenso gilt mein Dank den technischen Mitarbeitern sowie den Kolleginnen und Kollegen der Buchhaltung, des Sekretariats und der Systemadministration für ihre stetige Unterstützung. Ferner bedanke ich mich bei allen Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, welche durch ihren tatkräftigen Einsatz zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ganz besonders möchte ich Dr.-Ing. Johannes Henneberg, Peter Hetz, Dr.-Ing. Alexander Horn, Dr.-Ing. Clara-Maria Kuball, Martin Kraus, Doris Kohl, Miriam Leicht, Dr.-Ing. Matthias Lenzen, Raphaela März, Nikolaos Rigas sowie Dr.-Ing. Patrik Schwingenschlögl für die vertrauensvolle Zusammenarbeit auf fachlicher und persönlicher Ebene danken.

Abschließend gilt mein besonderer Dank meinen Eltern Renate und Paul sowie meinem Bruder Christoph mit seiner Lebensgefährtin Sophia, die mich auf meinem Lebensweg begleitet und unterstützt haben und mir jederzeit Rückhalt bieten.

Weiden i.d.OPf., im Januar 2024

Stephan Schirdewahn

Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und Forschung	3
2.1	Presshärten höchstfester Vergütungsstähle	3
2.2	Technologische Entwicklungen und verfahrensbedingte Herausforderungen	8
2.3	Thermo-mechanische und tribologische Wechselwirkungen im Presshärteprozess	11
2.3.1	Mechanismen der Wärmeübertragung und deren Einfluss auf die mechanischen Bauteileigenschaften	12
2.3.2	Tribologische Wirkmechanismen in der Wirkfuge	15
2.4	Werkzeugseitige Maßnahmen zur Erweiterung tribologischer Prozessgrenzen	22
2.4.1	Randschichtmodifikation	23
2.4.2	Oberflächenstrukturierung	25
2.4.3	Laserimplantation	28
2.5	Zusammenfassende Bewertung	30
3	Zielsetzung und methodische Vorgehensweise	33
4	Verwendete Werkstoffe, Prozessparameter und Methoden... ..	37
4.1	Werkstück- und Werkzeugwerkstoff	37
4.2	Parameter zur Herstellung lasergenerierter Oberflächenmodifikationen	38
4.3	Methoden zur Charakterisierung der Bauteil- und Werkzeugeigenschaften	41
4.4	Methoden zur Untersuchung des tribologischen Einsatzverhaltens	45
4.4.1	Analyse des Reib- und Verschleißverhaltens im Laborversuch	45
4.4.2	Finite-Elemente-Methode	50
4.4.3	Generierung von Demonstratorbauteilen	53
5	Ermittlung von Anforderungen an die Oberflächenmodifikationen für das Presshärten	55
5.1	Numerische Untersuchung des Beanspruchungskollektivs	55
5.2	Ableiten von Anforderungsprofile für die Werkzeugmodifikation	58

6	Erforschung von Wirkzusammenhängen zur Erzeugung maßgeschneiderter Oberflächenmodifikationen.....	65
6.1	Untersuchung des Einsatzverhaltens deterministischer Implantationsmuster	65
6.1.1	Analyse der Reibzahlen	66
6.1.2	Charakterisierung der Werkstücktopographie	75
6.1.3	Quantifizierung des Werkzeugverschleißes	82
6.1.4	Analyse der thermo-mechanischen Wechselwirkungen	90
6.2	Zusammenfassende Bewertung des Einsatzverhaltens der Oberflächenmodifikationen für den Presshärteprozess	103
7	Erarbeitung von funktionsoptimierten Oberflächenmodifikationen	109
7.1	Anforderungsgerechte Abbildung und Analyse hochbeanspruchter Kontaktbedingungen	110
7.2	Ermittlung reibungs- und verschleißreduzierender Implantationsmuster in Abhängigkeit des Beanspruchungskollektivs	120
7.2.1	Analyse des Reibverhaltens	123
7.2.2	Untersuchung der Verschleißausbildung	129
7.2.3	Zusammenfassende Bewertung	133
8	Transfer der Erkenntnisse aus den Modellversuchen auf eine industriennahe Demonstratorgeometrie.....	137
8.1	Anforderungsgerechte Auswahl und Platzierung der Oberflächenmodifikationen	137
8.2	Qualifizierung des thermo-mechanischen und tribologischen Einsatzverhaltens	141
8.3	Verifizierung der Maßnahmen zur Begünstigung der thermischen und tribologischen Wechselwirkungen	151
8.4	Abschließende Bewertung der Oberflächenmodifikationen hinsichtlich deren industrieller Relevanz.....	152
9	Zusammenfassung und Ausblick	155
10	Summary and Outlook	157
	Literaturverzeichnis	159

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
d_F	μm	Fokusedurchmesser der Laseroptik
d_i	μm	Distanz zum nächsten Implantat
h_i	μm	Implantathöhe
h_{Napf}	mm	Höhe des umgeformten Napfes
h_s	μm	Höhe der Pulvervorbeschichtung
k_f	N/mm^2	Fließspannung
n	-	Anzahl Wiederholungen
n_i	-	Anzahl an Implantaten
n_{Spuren}	-	Anzahl an Implantatspuren
p	N/mm^2	Flächenpressung
q	$^{\circ}\text{C}/\text{s}$	Abkühlgeschwindigkeit
s_o	mm	Initiale Blechdicke
t_P	ms	Laserpulsdauer
t_{γ}	s	Austenitisierungszeit
v	mm/s	Relativgeschwindigkeit
$v_{\text{Stößel}}$	mm/s	Geschwindigkeit des Stößels
A	mm^2	Kontaktfläche
A_{C_3}	$^{\circ}\text{C}$	Endtemperatur für die Austenitbildung
A_g	%	Gleichmaßdehnung
F_{Max}	N	Maximalkraft
F_N	N	Normalkraft
F_R	N	Reibkraft
I_{Probe}	A	Stromspannung an Proben
P_P	W	Pulsleistung
R_a	μm	Arithmetischer Mittenrauwert
R_m	N/mm^2	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Streckgrenze
S_a	μm	Mittlere arithmetische Profilhöhe
T_{Kontakt}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur bei Werkzeugverschluss
T_{MF}	$^{\circ}\text{C}$	Martensitendtemperatur beim Abkühlen
T_{MS}	$^{\circ}\text{C}$	Martensitstarttemperatur beim Abkühlen
T_{Platine}	$^{\circ}\text{C}$	Initiale Platinentemperatur
$T_{\text{Wkz.}}$	$^{\circ}\text{C}$	Initiale Werkzeugtemperatur
T_{γ}	$^{\circ}\text{C}$	Austenitisierungstemperatur

U	kV	Beschleunigungsspannung
WD	mm	Arbeitsabstand
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes
ρ	g/cm ³	Dichte
φ	-	Umformgrad
$\dot{\varphi}$	1/s	Dehnrade
$\dot{T}_{krit.}$	°C/s	Kritische Kühlrate zur Bildung von Martensit
\dot{V}	l/s	Volumenstrom
Δt	s	Zeitintervall während der Abkühlung
μ	-	Reibzahl

Abkürzung

Beschreibung

AlCrN	Aluminiumchromnitrid
AlSi	Aluminium-Silizium
AlCrTiN	Aluminium-Chrom-Titannitrid
AlTiN	Aluminium-Titannitrid
ATOS	Advanced Topometric Sensor
CAD	Computer Aided Design
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CrCN	Chromcarbonnitrid
CrN	Chromnitrid
CVD	Chemical Vapour Deposition
DIN	Deutsche Industrie-Norm
EDX	Energy-dispersive X-ray spectroscopy
FE	Finite Elemente
Fe-Al-Si	Eisen-Aluminium-Silizium
FEM	Finite-Elemente-Methode
Fe-Zn	Eisen-Zink
HRC	Härte nach Rockwell-Eindringverfahren
HV	Härte nach Vickers Eindringverfahren
MMC	Metal-Matrix Composite
MoS ₂	Molybdändisulfid
PVD	Physical Vapour Deposition
REM	Rasterelektronenmikroskop
TiAlN	Titan-Aluminium-Nitrit
TiB ₂	Titandiborid
Yb:YAG	Ytterbium-YAG-Festkörperlaser

1 Einleitung

Die Automobilindustrie ist gemessen am Umsatz der führende Industriesektor der Bundesrepublik und somit ein maßgeblicher Treiber für die Konjunktur der deutschen Volkswirtschaft [1]. Um ihrer Vorreiterrolle gerecht zu werden, müssen die technologischen Entwicklungen der Kraftfahrzeuge stets auf die gesetzlichen Regularien und kundenspezifischen Bedürfnisse zugeschnitten werden. Ein Kernziel im Fahrzeugbau ist die sukzessive Reduzierung des CO₂-Ausstoßes, um die politischen und gesellschaftlichen Forderungen nach Klimaschutzmaßnahmen zu erfüllen [2]. Verschärft wird das proklamierte Zielvorhaben durch das ratifizierte Klimaschutzgesetz der Europäischen Kommission, welches eine Limitierung der Treibhausgasemissionen auf 95 g/km für leichte Nutzfahrzeuge ab 2021 vorsieht [3]. Derzeit entfallen rund 20 % der bundesweiten CO₂-Emissionen auf den Automobilssektor [4], wobei gegenwärtige Prognosen von einem weiteren Anstieg der Quote ausgehen, da seit 2010 die Zahl an Zulassungen aufgrund des wachsenden Bedarfs nach individueller Mobilität jährlich um etwa 500.000 Kraftfahrzeuge zunimmt [5].

Um diese ökonomische und ökologische Diskrepanz zu bewältigen, werden in der Fahrzeugentwicklung innovative Leichtbaustrategien verfolgt. Durch Verringerung der Gesamtmasse des Fahrzeuges um 100 kg wird der fossile Kraftstoffverbrauch um 0,4 l pro 100 km [6] respektive die Menge emittierter Schadstoffe um 8,5 g/km [7] reduziert. Ein hohes Potenzial zur Gewichtsreduzierung ergibt sich durch Multi-Material-Bauweise, was durch die Applikation und dem Fügen von Leichtbaumaterialien [8] wie Aluminium, Magnesium sowie hoch- und höchstfeste Stahlwerkstoffe realisiert wird. Insbesondere in der Karosseriestruktur, welche mit bis zu 40 % den größten Anteil am Fahrzeuggewicht einnimmt [9], werden konventionelle Ziehgüten durch hoch- und höchstfeste Stähle substituiert, um gleichbleibende oder steigende Festigkeitseigenschaften bei verringerter Blechdicke und folglich reduziertem Bauteilgewicht zu realisieren [10]. Die gesteigerten Festigkeiten führen jedoch zugleich zu erhöhten Prozesskräften und Bauteilrückfederungen, weshalb für die Verarbeitung dieser Materialien thermisch unterstützte Fertigungsverfahren genutzt werden [11].

Das Presshärteverfahren hat sich im Zuge dieser Prämisse als Schlüsseltechnologie zur effizienten Verarbeitung hoch- und höchstfester Stahlwerkstoffe etabliert. Das Grundprinzip dieser Verfahrenstechnologie kennzeichnet sich durch eine Kombination aus Warmumformung und Härten in einem Prozessschritt. Als Platinen werden beschichtete Bor-Mangan

Stähle eingesetzt, die zunächst in einem separaten Ofensystem auf etwa 900 °C erwärmt und nachfolgend im Pressenwerkzeug simultan umgeformt und abgeschreckt werden [12]. Durch diese Verfahrensfolge können geometrisch komplizierte Strukturen generiert werden, die Zugfestigkeiten bis zu 2000 MPa aufweisen [13]. Aufgrund der hohen Festigkeiten der Bauteile ist das Presshärteverfahren vor allem für die Herstellung hochbeanspruchter, sicherheitsrelevanter Karosseriekomponenten, wie zum Beispiel der B-Säule, dem Stoßfänger sowie dem Dachrahmen, prädestiniert [14].

Während der Umformoperation können jedoch keine konventionellen Schmierstoffsysteme zur Verbesserung der tribologischen Eigenschaften eingesetzt werden, da diese sich bei den hohen Temperaturen unmittelbar zersetzen. Aufgrund der fehlenden Schmierung ergeben sich signifikant höhere Beanspruchungen im Werkzeugsystem, was wiederum die Ausbildung von Verschleiß und hoher Reibkräfte begünstigt und folglich die Bauteilqualität und die Werkzeugstandzeit maßgeblich beeinträchtigt [15]. Bisherige Verschleißschutzmaßnahmen, wie beispielsweise die Beschichtung der Werkzeugtopographie [16] oder die Werkzeugstrukturierung und Befüllung der Kavitäten mittels Festschmierstoff [17], konnten keinen nachhaltigen ökonomischen und ökologischen Benefit erzielen.

Ein vielversprechender Ansatz stellt die Modifikation der Presshärtewerkzeuge mittels Laserimplantation dar. Das Verfahrensprinzip besteht darin, keramische Hartstoffpartikel mittels gepulster Laserstrahlung in die Werkzeuge zu dispergieren, wodurch erhabene, kuppelförmige und höchstfeste Strukturen im Mikrometerbereich entstehen [18]. Aufgrund der signifikanten Reduzierung der Werkzeugkontaktfläche sowie der hohen Verschleißbeständigkeit der Oberflächenmodifikationen wird ein verbessertes tribologisches Einsatzverhalten gegenüber konventionellen Werkzeugsystemen erwartet. Um das proklamierte Potenzial dieser Technologie systematisch zu analysieren, werden im Rahmen dieser Arbeit prozessspezifische Anforderungen an die Oberflächenmodifikationen identifiziert, das thermo-mechanische und tribologische Einsatzverhalten der Strukturen untersucht und Ursache-Wirkzusammenhänge abgeleitet. Die gewonnenen Erkenntnisse werden schließlich genutzt, um die Übertragbarkeit anhand eines industrienahen Demonstrators zu qualifizieren und folglich die industrielle Relevanz und Wirksamkeit der Strukturen zu verifizieren. Das erarbeitete Wissen leistet einen wesentlichen Beitrag zur ressourceneffizienten und beanspruchungsgerechten Herstellung pressgehärteter Bauteile, wodurch das Leichtbaupotenzial gesteigert sowie ökonomische respektive ökologische Vorteile in Form von niedrigen Ausschussquoten, höheren Qualitätsgüten und längeren Maschinenstandzeiten erzielt werden.

2 Stand der Technik und Forschung

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht die Erforschung maßgeschneiderter laserimplantierter Werkzeugsysteme, welche sowohl die Reibung als auch den Verschleiß im Presshärteprozess reduzieren. Um ein fundiertes Verständnis hinsichtlich dieser Thematik zu erlangen, wird im Rahmen des folgenden Kapitels der aktuelle Wissensstand zur Warmumformung höchstfester Vergütungsstähle aufgeführt. In diesem Kontext werden grundlegende Verfahrensvarianten und aktuelle Entwicklungstrends der Presshärte-technologie beschrieben sowie bestehende prozessseitige Herausforderungen aufgezeigt. Hierzu werden die thermo-mechanischen Wechselwirkungen während des Presshärtens erörtert und vorherrschende tribologische Wirkmechanismen erläutert. Darauf aufbauend folgt eine zusammenfassende Darstellung bisheriger werkzeugseitiger Maßnahmen zur Erweiterung der tribologischen Prozessgrenzen. Anhand der vorliegenden Wissensbasis wird eine abschließende Bewertung vorgenommen, in welcher der Status quo bestehender Werkzeugmodifikationen dargestellt und der Bedarf nach innovativer, technologischer Ansätze aufgezeigt wird.

2.1 Presshärten höchstfester Vergütungsstähle

Die Herstellung moderner Fahrzeugkarosserien erfordert den Einsatz innovativer Technologien, um die gesetzlichen Regularien und kundenspezifischen Forderungen nach reduziertem Kraftstoffverbrauch, verringerten Kohlenstoffdioxidemissionen sowie steigender passiver Fahrzeugsicherheit zu erfüllen [19]. Ein verbreiteter Lösungsansatz zur Bewältigung dieser Herausforderungen ist die Nutzung von Leichtbaustrategien, welche die Schaffung hochfunktionaler Systeme unter Wahrung ökologischer und ökonomischer Aspekte ermöglichen. Im Allgemeinen lassen sich Leichtbaustrategien in den Konzept-, Form- und Stoffleichtbau untergliedern, wobei letzterer die industriell zumeist genutzte Variante ist [20]. Die Intention des Stoffleichtbaus besteht darin, konventionelle Stähle durch höchstfeste Stahlwerkstoffe zu substituieren, um geringere Blechdicken bei gleichbleibenden Festigkeiten zu generieren. Dies ermöglicht, die Masse der Karosseriekomponenten zu reduzieren, und schafft zugleich neue Freiheiten hinsichtlich Funktionalität und Design. Die ressourceneffiziente Verarbeitung dieser höchstfesten Stahlwerkstoffe erfolgt unter Anwendung des Presshärteverfahrens, das auch unter dem Begriff Formhärten bekannt ist und sich weltweit etabliert hat.

Anforderungen und Charakteristika der Presshärte-technologie

Das Grundprinzip der Presshärte-technologie ist durch einen hybriden Warmumform- und Härtingsprozess der eingesetzten Stahlwerkstoffe gekennzeichnet, infolgedessen geometrisch komplizierte Strukturen mit Zugfestigkeiten von bis zu 2000 MPa generiert werden [21]. Um diese Bauteileigenschaften zu erreichen, werden vorrangig borlegierte Vergütungsstähle genutzt, die in ihrem Ausgangszustand ein ferritisch-perlitisches Gefüge besitzen und eine Zugfestigkeit von ~ 500 MPa sowie eine Bruchdehnung von ~ 18 % aufweisen [22].

Zu Beginn des Presshärteprozesses erfolgt der Zuschnitt des Blechcoils in einheitliche Platinensegmente, die nachfolgend einer Wärmebehandlung unterzogen werden. Die Zielsetzung besteht darin, die materialspezifische A_{C_3} -Temperatur von 845 °C zu überschreiten, um eine vollständige Umwandlung des kubisch-raumzentrierten Ausgangsgefüges in kubisch-flächenzentrierten Austenit herbeizuführen [23]. Die erforderliche Austenitierungstemperatur T_γ und die daran gekoppelte Zeitspanne t_γ zur vollständigen Austenitierung des Rohlings ist sowohl von der Dicke des Blechs, als auch von der chemischen Zusammensetzung respektive des applizierten Beschichtungssystems des Vergütungsstahls abhängig [24]. Um eine stabile austenitische Gefügephase unter Berücksichtigung niedriger Prozesskosten und -zykluszeiten zu garantieren, werden im industriellen Serienprozess zumeist Temperaturen T_γ zwischen 900 - 950 °C sowie Haltezeiten t_γ von 5 - 8 Minuten gewählt [25]. In diesem Zusammenhang werden vornehmlich Rollenherd- oder Durchlauföfen eingesetzt, um eine prozesssichere Ausbildung des austenitischen Gefüges sowie eine kontinuierliche Bereitstellung der wärmebehandelten Bauteile zu garantieren [26].

Nachdem die bauteilspezifischen Austenitierungsdauer t_γ überschritten ist, erfolgt der robotergestützte Transfer des erwärmten Rohlings in das wassergekühlte Umformwerkzeug. Für den Vorgang werden niedrige Transferzeiten von 3 - 5 s angestrebt, um Wärmeverluste in Form von Konvektion und Strahlung zu minimieren, die wiederum das Fließverhalten sowie die mechanischen Eigenschaften des Bauteils erheblich beeinflussen [27]. Unmittelbar nach Abschluss des Transferprozesses weisen die Halbzeuge verfahrenstypische Temperaturen zwischen 650 °C - 850 °C auf [28].

Der direkt angeschlossene Umform- und Abkühlvorgang im Pressensystem wird mit hohen Stößelgeschwindigkeiten von bis zu 350 mm/s durchgeführt, um die temporär niedrige Fließspannung respektive hohe Umformbarkeit der austenitisierten Platine zu nutzen [29]. Analog dazu wird die

Wärme des Bauteils durch den metallischen Kontakt mit dem wassergekühlten Werkzeug entzogen, um die Ausbildung eines martensitischen Platinengefüges zu induzieren. Die Phasenumwandlung ist vollständig abgeschlossen, sofern der werkstoffspezifische Temperaturbereich zwischen Martensitstart M_S (~ 425 °C) und -finish M_F (~ 280 °C) [30] mit einer Abkühlrate $\dot{T}_{krit.}$ von mindestens 27 °C/s unterschritten wird [31]. Nach Erreichen der Ziehtiefe bleibt das Werkzeug bis zu einer Entnahmetemperatur von ~ 150 °C geschlossen, um eine vollständige martensitische Gefügeumwandlung zu garantieren sowie den Abbau vorhandener Eigenspannungen zu gewährleisten [32]. Die erzwungene Phasentransformation beeinflusst die mechanischen Eigenschaften des Vergütungsstahls erheblich. Durch das formgebundene Aushärten des Bauteils können dünnwandige, geometrisch komplizierte sowie rückfederungsfreie Strukturen generiert werden, die Zugfestigkeiten von bis zu 2000 MPa [21] respektive Bruchdehnungen von ~ 5 % aufweisen [33]. Grundsätzlich sind für den Presshärteprozess niedrige Zykluszeiten anzustreben, um vor allem ökonomische Vorteile in Form von hohen Losgrößen und geringen Stückkosten zu erzielen. Abhängig von der jeweiligen Blechstärke und der gewählten Verfahrensstrategie werden Taktzeiten von $15 - 25$ s im Pressenwerkzeug erreicht [34].

Etablierte Verfahrensvarianten der Warmblechumformung

In der industriellen Warmblechumformung haben sich zwei unterschiedliche Prozessrouten etabliert, die als direktes und indirektes Presshärten bezeichnet werden. Die Wahl der Presshärtestrategie richtet sich primär nach den geforderten geometrischen und mechanischen Eigenschaften der herzustellenden Bauteilgruppe [35].

Die direkte Presshärtevariante weist einen kompakten und kosteneffizienten Prozessablauf auf, weshalb diese Strategie zur Herstellung von Presshärtekomponenten favorisiert wird [23]. Mit Hilfe des Verfahrens kann die Bauteilgeometrie, wie zuvor beschrieben, in einem einstufigen und kombiniert ablaufenden Umform- und Abkühlprozess hergestellt werden. Nach vollzogener Umwandlungshärtung wird das pressgehärtete Bauteil entnommen, mittels Laser- oder Hartschneiden auf Endgeometrie getrimmt und erforderliche Maßnahmen zur Oberflächenkonditionierung veranlasst [36]. Da innerhalb der gesamten Prozesskette lediglich ein Umformwerkzeug benötigt wird, ist die direkte Prozessroute durch niedrige Stückkosten, Rüst- und Zykluszeiten gekennzeichnet. Nachteilig ist die hohe Verschleißanfälligkeit der Presshärtewerkzeuge, welche auf die hohen Prozesskräfte und wenig duktilen Halbzeuge zurückzuführen sind [12]. Ferner

sind nur geringe Bauteilkomplexitäten realisierbar, die verhältnismäßig niedrige Umformgrade und Ziehtiefen aufweisen [37].

Vor diesem Hintergrund hat sich das indirekte Presshärteverfahren als weitere Prozessroute im industriellen Einsatz etabliert, anhand dessen geometrisch kompliziertere Bauteilstrukturen prozesssicher hergestellt werden können. Das Verfahrensprinzip zeichnet sich durch einen vorgelagerten Kaltumformprozess aus, bei diesem das Halbzeug auf 90 - 95 % der finalen Bauteilgeometrie mit Hilfe einer ein- oder mehrstufigen Umformoperation vorgeformt wird. Daraufhin erfolgt, analog zur direkten Prozessroute, die homogene Austenitisierung des Materialgefüges sowie der robotergestützte Transfer in das wassergekühlte Werkzeugsystem. Ein daran anschließender Kalibriervorgang im Presshärtewerkzeug bewirkt sowohl die Ausformung der restlichen 5 - 10 % der Bauteilgeometrie, als auch die simultane Umwandlung des Materialgefüges von Austenit in Martensit [38]. Abschließend werden die pressgehärteten Bauteile entnommen, beschnitten und erforderliche Maßnahmen zur Oberflächenkonditionierung ergriffen [36]. Die Intention der indirekten Presshärteroute besteht darin, die Formgebungsgrenzen der Halbzeuge anhand der vorgeschalteten Kaltumformoperation zu erweitern. Ferner können durch die Vorformung der Platinengeometrie vollflächige Kontakte zwischen Werkzeug und Werkstück generiert werden, um höhere Abkühlraten, Ziehtiefen und Umformgrade im nachfolgenden Kalibrierprozess zu induzieren. Insgesamt begünstigen diese Faktoren die Herstellung komplizierter Bauteilgeometrien, jedoch erhöhen sich zugleich die Durchlaufzeiten sowie die Prozess- und Anlagenkosten [25].

Industriell eingesetzte presshärzbare Werkstoffe

Steigende Qualitätsansprüche in Bezug auf Fahrzeugsicherheit, Leichtbau und Funktionalität erfordern die Applikation moderner Hochleistungsstähle in der Warmblechumformung. Grundlegende Anforderungen an die Halbzeugeigenschaften sind demzufolge ein gutes Formgebungsvermögen sowie eine schnelle und gleichmäßige Härbarkeit, um geometrische komplizierte Strukturen mit homogenen mechanischen Eigenschaften zu generieren. Im Zuge dessen werden borlegierte Vergütungsstähle für das Presshärteverfahren eingesetzt, da im Vergleich zu reinen Kohlenstoffstählen höhere Streckgrenzen, Zugfestigkeiten und Kerbschlagzähigkeiten erreicht werden [24]. Für die Herstellung pressgehärteter Bauteilkomponenten stehen am Markt mehrere Varianten zur Verfügung, die beispielhaft die Werkstoffbezeichnungen 22MnB5, 27MnCrB5 und 37MnB4 haben [39]. Die

wesentlichen Werkstoffbestandteile gliedern sich in die Legierungselemente Kohlenstoff, Chrom, Bor und Mangan. Durch die Zugabe von Mangan wird die erforderliche Mindestabkühlgeschwindigkeit zur Generierung von Martensit reduziert, wodurch das Zeitfenster für den Transfer- und Umformprozess vergrößert wird [24]. Demgegenüber kann durch die Variation des Chrom-, Kohlenstoff- und Borgehaltes die Härtebarkeit und resultierende Festigkeit des Werkstoffes gezielt beeinflusst werden [23]. Prinzipiell eignen sich alle aufgeführten Stahlsorten für den Presshärteprozess, jedoch hat sich im industriellen Einsatz primär der Bor-Mangan-Stahl 22MnB5 durchgesetzt. Das Eigenschaftsprofil des Vergütungsstahls kennzeichnet sich im Ausgangszustand durch ein feinkörniges ferritisch-perlitisches Gefüge mit Streckgrenzen von 340 - 520 MPa sowie Zugfestigkeiten von 410 - 580 MPa [22]. Ferner ist das Material durch Härten von ~ 165 HV₁₀ sowie Bruchdehnungen von 16 - 21 % gekennzeichnet [22]. Die mechanischen Bauteileigenschaften werden durch eine gezielte thermische Prozessführung signifikant beeinflusst. Die im Presshärteprozess erzwungene martensitische Gefügeumwandlung führt zu einer Steigerung der Streckgrenze auf 1050 - 1400 MPa [40] sowie zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit auf bis zu 2000 MPa [21]. Darüber hinaus wird eine Härtesteigerung auf 450 HV₁₀ [41] induziert, wohingegen die Bruchdehnung auf 3 - 14 % abnimmt [40].

Beschichtungssysteme presshärterbarer Vergütungsstähle

In der Automobilindustrie werden verfahrenstypische Blechstärken im Bereich 0,65 - 3 mm zur Herstellung pressgehärteter Karoseriesegmente verwendet, wobei die Platinentopographie in der Regel mit einem Beschichtungssystem versehen ist [42]. Unbeschichtete Halbzeugen sind bei der Wärmebehandlung respektive dem Transfer der Platine thermisch induzierten Oxidationsvorgängen ausgesetzt, was wiederum die Ausbildung abrasiver Zunderschichten auf der Platinenoberfläche bewirkt. Während der Umformoperation ergeben sich folglich undefinierte Kontaktbedingungen in der Wirkfuge, wodurch die Maßhaltigkeit und die mechanischen Eigenschaften der Bauteile beeinflusst werden [23]. Vor diesem Hintergrund sind verschiedene Beschichtungskonzepte entwickelt worden, die in Abhängigkeit der gewählten Presshärteroute eingesetzt werden.

Für das direkte Presshärteverfahren werden Halbzeug mit einer Aluminium-Silizium-Beschichtung (AlSi-Beschichtung) versehen [12]. Die 20 - 30 µm dicken Schutzschichten setzen sich aus etwa 85 - 95 % Aluminium und 5 - 15 % Silizium zusammen [25]. Durch die Wärmebehandlung diffundiert das Eisen aus dem Stahlsubstrat in die Halbzeugbeschichtung,

wodurch der Schmelzpunkt von 600 °C auf 1100 °C gesteigert und folglich ein Verflüssigen und vorzeitiges Lösen der Schutzschicht im Presshärteprozess unterbunden wird [43]. Analog dazu werden, in Abhängigkeit der gewählten Austenitisierungstemperatur T_γ und Ofenverweilzeit t_γ , mehrere intermetallische Fe-Al-Si Phasen gebildet, die wiederum die Werkstoffoberfläche vor Verzunderung, Entkohlung und passiver Korrosion schützen [44]. Nachteile ergeben sich durch die geringe Schweißeignung der AlSi-Beschichtung, was ein nachträgliches Entfernen mittels Sandstrahlen erfordert [45]. Zudem weist die applizierte Schutzschicht eine hohe Sprödigkeit bei Raumtemperatur auf, was bei Kaltumformvorgängen zu einem Abplatzen der Schicht führt [24]. Aus diesem Grund eignet sich das Beschichtungssystem nicht für die indirekte Presshärtevariante, da keine vollständige Schutzwirkung im gesamten Prozessablauf garantiert werden kann.

Vor diesem Hintergrund werden für den indirekten Presshärteprozess feuerverzinkte Halbzeugbeschichtungen verwendet. Im ungehärteten Zustand weisen die Platinenoberflächen eine 10 – 20 µm hohe Zinkschicht auf, die bei Kaltumformprozessen eine geringe Neigung zur metallischen Versprödung besitzen [25]. Hierdurch ist eine vollständige Schutzwirkung der kalt umgeformten Bauteile gewährleistet. Während der nachfolgenden Wärmebehandlung bilden sich durch Diffusionsvorgänge verschiedene intermetallische Fe-Zn Phasen mit Eisenanteile von bis zu 60 % aus [46], die wiederum ein vorzeitiges Aufschmelzen der Beschichtung unterbinden sowie das Bauteil vor Verzunderung, Entkohlung und kathodischer Korrosion schützen [25]. Durch die Erwärmung des Zinksubstrates werden jedoch Verdampfungseffekte und Zinkoxidationen hervorgerufen, die gesundheitsschädliche Wirkung verursachen und gesonderte Schutzmaßnahmen für deren Verarbeitung erfordern [24].

2.2 Technologische Entwicklungen und verfahrensbedingte Herausforderungen

Die Grundzüge der Presshärte-technologie lassen sich auf das Jahr 1906 datieren, in diesem der wesentliche Leitgedanke zur gleichzeitigen Umformung und Abschreckhärtung patentiert und zur Herstellung von Sensenblättern genutzt worden ist. Zur damaligen Zeit konnten durch die neuartige Fertigungstechnologie jedoch nur geringe Umformgrade erzielt werden, weshalb sich dessen Anwendung im industriellen Umfeld vorerst nicht durchsetzen konnte. Im Jahr 1973 hat der schwedische Stahlproduzent Norrbottens Järnverk AB die Grundidee des Verfahrens aufgegriffen,

auf die Blechumformung übertragen und gleichermaßen patentieren lassen [47]. In den folgenden Jahren konnten anhand mehrerer Forschungsvorhaben der Luleå University of Technology weitere technologische Fortschritte erzielt werden, sodass 1984 der Fahrzeughersteller SAAB erste pressgehärtete Seitenaufprallträger in das Modell 9000 integrierte, was als Novum in der Geschichte der Automobilindustrie galt [48]. Bereits wenige Jahre später haben zahlreiche Automobilisten das Potenzial dieser Leichtbauphilosophie erkannt und das Verfahrensprinzip übernommen. Die bis heute fortwährende Relevanz der Technologie kann durch den sukzessiv wachsenden Bedarf an pressgehärteten Komponenten belegt werden. Exemplarisch wurde im Jahr 1987 die Anzahl an pressgehärteten Bauteilen auf drei Millionen Bauteilen beziffert, wohingegen zwanzig Jahre später bereits 107 Mio. [49] und im Jahr 2015 über 300 Mio. Komponenten hergestellt worden sind [13]. Die hohe Strukturfestigkeit und das geringe Deformationsvermögen der Bauteile werden primär genutzt, um sicherheitsrelevante Karosseriekomponenten wie B-Säule, Stoßfänger sowie Längs- und Querträger herzustellen [50]. Darüber hinaus sind Batteriewannen für Elektroautos sowie Panzerungen für die Rüstungsindustrie weitere typische Produkte im Portfolio des Warmumformprozesses [13]. Aufgrund des wachsenden Bedarfs nach hochbeanspruchbaren sowie funktionsoptimierten Bauteilen müssen jedoch stets neuartige Prozessvarianten und Produktinnovationen erschlossen werden, um die steigenden Forderungen des globalen Marktes zu bedienen.

Entwicklungen und Markttrends in der Warmblechumformung

Beim Presshärten ergibt sich durch die thermisch induzierte Umwandlung des Materialgefüges der Effekt, das mit Zunahme der Festigkeit simultan die Duktilität des Werkstoffes verringert wird. Hierdurch können zwar bei kurzzeitdynamischen Belastungen, wie beispielsweise bei einem Fahrzeugcrash, hohe Struktursteifigkeiten gewährleistet werden, jedoch stellt sich zugleich nur ein geringes Deformationsvermögen aufgrund der mangelnden Energieabsorption der Karosseriesegmente ein, was folgenschwere Risiken für den Fahrzeuginsassen impliziert. Vor diesem Hintergrund sind verschiedene Strategien entwickelt worden, um pressgehärtete Bauteile mit Zonen unterschiedlicher mechanischer Eigenschaften zu generieren, infolgedessen die kinetische Energie über vordefinierte Lastpfade gezielt abgeführt werden kann [51]. Zur Herstellung solcher maßgeschneiderten Komponenten werden beim Presshärten zwei grundlegende Varianten verfolgt, die nach Svec [35] in die Kategorien „intrinsic Tailored Blanks“ und „Tailored Blanks“ untergliedert werden.

Das Prinzip der intrinsischen Tailored Blanks basiert auf einer Anpassung der Temperaturführung im Prozessablauf, um die diffusionsgesteuerte Phasenumwandlung des Materialgefüges gezielt zu beeinflussen. Vor diesem Hintergrund haben sich drei Varianten etabliert, die entweder ein partielles Austenitisieren der Halbzeuge während der Wärmebehandlung, ein definiertes Abschrecken der Platinen im Umformprozess oder ein lokales Anlassen der Bauteile nach dem Presshärteprozess beabsichtigen [52]. Die Zielsetzung der Strategien besteht darin, lediglich Teilbereiche der Werkstücke oberhalb der AC_3 -Linie zu erwärmen, wohingegen die verbleibenden Segmente unterhalb der kritischen AC_3 -Temperaturschwelle verbleiben. Durch die differierende Temperaturführung werden lokal unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten am Bauteil hervorgerufen, wodurch nach Ghotti et al. [53] und Lenze et al. [54] einerseits ein vollständig martensitisches Gefüge mit hohen Zugfestigkeiten und andererseits ein bainitisches respektive ferritisch-perlitisches Mischgefüge mit erhöhter Duktilität generiert wird. Die Zone zwischen dem hochfesten und duktilen Bauteilbereich ist nicht übergangslos getrennt, sondern in lateraler Ausdehnung durch die thermische Prozessführung gradierbar. Feuser und Schweiker [55] zeigten anhand dynamischer Fallturmversuche, dass aufgrund der stetigen Übergangzone die vorliegenden Spannungen im Bauteil gleichermaßen verteilt werden. Hierdurch konnte die kinetische Energie im deformierbaren Bauteilbereich absorbiert werden ohne den Intrusionswiderstand der Gesamtstruktur zu verringern.

Um die industriellen Leichtbaubestrebungen weiter zu intensivieren, wurden simultan zur Presshärte-technologie, innovative Halbzeugkonzepte, wie Tailor Rolled Blanks, Patchwork Blanks und Tailor Welded Blanks, entwickelt und unter dem Begriff Tailored Blanks zusammengefasst. Durch die gezielte Anpassung der Bauteilgeometrie mittels flexiblem Walzen (Tailor Rolled Blanks) oder durch das Fügen unterschiedlicher Materialien respektive Blechdicken im Überlappstoß (Patchwork Blanks) oder Stumpfstoß (Tailor Welded Blanks), kann eine gewichts- und funktionsoptimierte Auslegung der Bauteilkomponenten forciert werden [56]. Aktuelle Bestrebungen der Automobilindustrie bestehen darin, die Vorzüge der Halbzeug-technologie und der Warmblechumformung zu vereinen, um entstehende Synergieeffekte aus beiden Leichtbauphilosophien zu nutzen. Durch das Presshärten von Tailored Blanks können sicherheitsrelevante Karosseriekomponenten lokal verstärkt werden, ohne die Temperaturführung im Prozessablauf zu verändern. Darüber hinaus stellen die hohe Flexibilität an herstellbaren Werkstückgeometrien und Materialkombinationen sowie die

Einsparung zusätzlicher Wärmebehandlungsverfahren einen hohen technologischen und wirtschaftlichen Benefit in der Serienfertigung dar [13]. Experimentelle und numerische Untersuchungen von Lamprecht [57] und Knabe [58] zeigten demgegenüber, dass bei inhomogenen Materialstärken und -eigenschaften, hohe Spannungskonzentrationen im Übergangsbereich aufgrund des abrupten Blechdicken- und Festigkeitssprunges hervorgerufen werden, wodurch das Formgebungsvermögen der Bauteile limitiert wird. Unabhängig der gewählten Verfahrensstrategie müssen jedoch stets die veränderten thermischen und tribologischen Randbedingungen kompensiert werden, um eine fehlerfrei Bauteilherstellung zu garantieren.

Prozessspezifische Herausforderungen

Das Presshärteverfahren ist durch eine nicht-isotherme Prozessführung gekennzeichnet, infolgedessen das Formgebungsvermögen sowie die resultierenden mechanischen Eigenschaften der Bauteile beeinflusst werden. Die thermischen Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und Werkstück sind maßgeblich von der Größe der Kontaktflächen und der Höhe der Anpressdrücke abhängig, weshalb eine präzise Werkzeug- und Prozessauslegung zur Erzeugung qualitativ hochwertiger Bauteile unerlässlich ist [24]. Weiterhin können aufgrund der hohen thermischen Beanspruchungen keine Schmierstoffsysteme eingesetzt werden, da sich diese bei Prozess-temperaturen $> 650\text{ °C}$ angesichts mangelnder Thermostabilität unmittelbar zersetzen würden [59]. Aufgrund der fehlenden Tragfähigkeit des Schmierstofffilms ergibt sich ein direkter metallischer Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück, wodurch hohe Reib- und Umformkräfte hervorgerufen werden, die eine Hemmung des Stoffflusses verursachen. Verstärkt wird dieser Effekt durch die zyklisch wirkenden thermo-mechanischen Beanspruchungen, die infolge des kombinierten Umform- und Abschreckprozesses im Werkzeugsystem auftreten [12]. Analog dazu begünstigt der schmierstofffreie Kontakt sowohl abrasiven als auch adhäsiven Verschleiß in der Wirkfuge, wodurch die Werkzeugstandzeit sowie die Bauteilqualität nachhaltig beeinträchtigt werden [60].

2.3 Thermo-mechanische und tribologische Wechselwirkungen im Presshärteprozess

Während der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück liegen inhomogene, hochbeanspruchte sowie schmierstofffreie Kontaktbedingungen vor, die sowohl das thermo-mechanische als auch das tribologische Einsatzverhalten beeinflussen und folglich den Stofffluss respektive das

Formgebungsvermögen der Bauteile limitieren [12]. Vor diesem Hintergrund werden im nachfolgenden Abschnitt grundlegende Einflussgrößen und Mechanismen der Wärmeübertragung sowie deren Auswirkung auf die Gefügetransformation und resultierenden Bauteileigenschaften aufgezeigt. Als weitere prozessbestimmende Größen werden die tribologischen Wechselwirkungen im Presshärteprozess erörtert. Diesbezüglich werden die Reibungs- und Verschleißmechanismen beschrieben und zentrale Einflussgrößen auf das tribologische System erläutert.

2.3.1 Mechanismen der Wärmeübertragung und deren Einfluss auf die mechanischen Bauteileigenschaften

Die thermische Prozessführung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Qualitätsgüte der pressgehärteten Bauteile. Aufgrund des hybriden Umform- und Abschreckprozesses werden thermisch induzierte Umwandlungsvorgänge im Materialgefüge hervorgerufen, die wiederum die mechanischen Eigenschaften der Halbzeuge signifikant verändern. Ferner kann durch die Einbringung von Wärmeenergie das resultierende Formgebungsvermögen der Halbzeuge beeinflusst werden. Dieses Verhalten ist darin begründet, dass die Beweglichkeit der Versetzungen mit zunehmender thermischer Aktivierung zunimmt, wodurch Bewegungswiderstände, wie beispielsweise im Gitter enthaltene Fremdatome oder Korngrenzen, leichter überwunden werden [61]. Mit steigender Temperatur nimmt folglich die Duktilität zu, wodurch das Formgebungsvermögen der Halbzeuge erhöht wird. Simultan dazu werden niedrigere Fließspannungen hervorgerufen, was zu einer Verringerung der Umformkräfte führt [24].

Thermische Wechselwirkungen und deren Einflussfaktoren

Über die gesamte Prozesskette hinweg, vom Erwärmen des Halbzeuges, dem Transfer sowie dem Umform- und Abschreckvorgang, wird thermische Energie aufgenommen oder abgegeben. Die Form der Wärmeübertragung kann in physikalischer Sicht in die Prinzipien der Konvektion, Konduktion und Wärmestrahlung unterteilt werden [62]. Im Allgemeinen treten alle Mechanismen gleichzeitig auf, wobei deren jeweilige Dominanz von den Umgebungsbedingungen und Prozessparametern beeinflusst wird. Zu Beginn des Presshärteverfahrens werden die Platinen durch die Heizrohre des Ofensystems erwärmt, wobei Wärmeenergie vorrangig mittels Konvektion in Form von strömenden Gasen übertragen wird. Beim anschließenden Transfer der Platine ergeben sich demgegenüber Wärmeverluste an die Umgebungsluft, welche primär durch Emission und Absorption elektromagnetischer Strahlungsfelder hervorgerufen werden [35].

Während der nachfolgenden Formgebung wird die Wärmeenergie der Halbzeuge primär mittels Wärmestrahlung und Konduktion abgeführt, wobei letztere eine höhere Wirkung bezüglich des Wärmeaustauschs besitzt. Der direkte metallische Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück ermöglicht eine effiziente Energieübertragung zwischen den beiden Körpern, welche durch molekularer Stoßprozesse verursacht wird [62].

Die Eignung des Werkstoffes zur Übertragung von Wärmeenergie wird als Wärmeleitfähigkeit λ definiert, welche als Stoffkonstante für jedes Material individuell festgesetzt ist [63]. Metalle besitzen aufgrund der hohen Anzahl an freien Elektronen eine hohe Wärmeleitfähigkeit, wodurch Wärmeenergie in kurzer Zeit aufgenommen oder abgegeben werden kann. Analog dazu hat die Beschaffenheit der Materialoberfläche einen maßgeblichen Einfluss auf die resultierende Wärmeübertragung in der Wirkfuge. Hohe Rauigkeiten in der Randschicht und vorkommende Zwischenstoffe hemmen den Wärmetransport in der Kontaktzone erheblich [64]. Um grundlegende Kenntnisse hinsichtlich der Auswirkung unterschiedlicher Prozessparameter zu gewinnen, wurden von Merklein et al. [65] Abschreckversuche unter industrienahen Presshärtebedingungen durchgeführt. In diesem Kontext wurde eine 1,5 mm dicke 22MnB5 Platine für 300 s bei 900 °C in einem separaten Ofensystem austenitisiert und anschließend innerhalb weniger Sekunden zwischen zwei verschleißbaren Werkzeugplatten und in Abhängigkeit unterschiedlicher Kontaktdrücke im Bereich von 0 – 30 MPa abgekühlt. Durch die Versuche konnte belegt werden, dass steigende Anpresskräfte eine zunehmende Einglättung der Rauheitsspitzen zwischen Werkzeug- und Werkstücktopographie bewirken, wodurch die wahre Kontaktfläche vergrößert und folglich der Wärmetransfer in der Wirkfuge in Form von Konduktion verstärkt wird. Daran anknüpfend wurde von Svec [66] der Einfluss differierender Spaltabstände zwischen Werkzeug und Werkstück analysiert. Unter Verwendung eines Abschreckwerkzeuges konnte nachgewiesen werden, dass eine zweiseitige Erhöhung der Spaltweite zwischen 0,3 mm und 5 mm zu einer Verringerung des Wärmetransfers führte, da weniger Wärmeenergie in Form von Konvektion und Strahlung übertragen worden ist. Verstärkt wurde dieser Effekt durch das isolierend wirkende Luftreservoir, welches mit ansteigendem Spaltabstand zunehmend in den Zwischenraum einströmte [61].

Auswirkung der Temperaturhistorie auf die Bauteileigenschaften

In der Umformtechnik wird die Wechselbeziehung zwischen Zeit, Halbzeugtemperatur und Gefügetransformation in Form von Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder, kurz ZTU-Diagramme, veranschaulicht. Bei der

Darstellung der Diagramme wird unterschieden, ob diese unter isothermer Temperaturführung oder im Rahmen kontinuierlichen Abkühlgeschwindigkeiten aufgenommen worden sind. Für die Presshärtetechnologie wird vorrangig das kontinuierliche ZTU-Schaubild verwendet, um die Umwandlungscharakteristik des borlegierten Vergütungsstahls 22MnB5 zu veranschaulichen. Bild 1 zeigt in diesem Kontext ein kontinuierliches ZTU-Schaubild für den Bor-Mangan-Stahl 22MnB5.

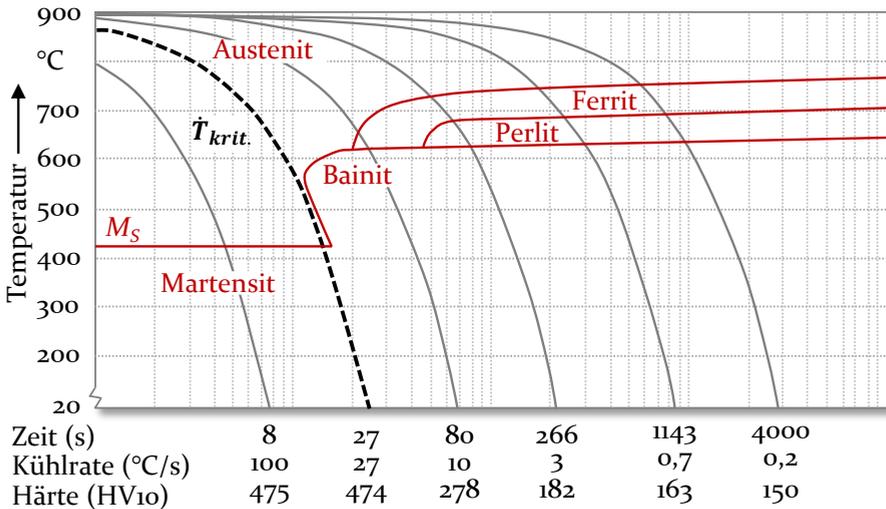


Bild 1: Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit auf das resultierende Gefüge respektive Härte des Bor-Mangan-Stahls 22MnB5 in Anlehnung an [13]

In dem ZTU-Schaubild ist zu erkennen, dass in Abhängigkeit der Abkühlgeschwindigkeit unterschiedliche Gefügephasen ausgebildet werden, die wiederum das mechanische Eigenschaftsprofil der pressgehärteten Bauteile beeinflussen. Eine vollständige Gefügeumwandlung zu Martensit kann nur gewährleistet werden, sofern das austenitisierte Halbzeug die werkstoffspezifische Martensitstarttemperatur M_s mit einer Mindestabkühlgeschwindigkeit $\dot{T}_{krit.}$ von 27 °C/s überschreitet. Durch Verringerung der Abkühlrate wird hingegen bainitisches, ferritisches respektive perlitisches Materialgefüge induziert. Im Presshärteprozess wird eine vollständige martensitische Gefügeumwandlung durch wassergekühlte Pressensysteme sichergestellt. Die im Werkzeug integrierten, oberflächennahen Kühlkanäle können Abkühlraten von bis zu 200 °C/s im Umformprozess erzielen. Durch das schnelle Abschrecken im Formgebungsprozess werden im Werkstoffgefüge diffusionslose Umklappvorgänge von Gitterbereichen initiiert, infolgedessen das kubisch-flächenzentrierte Austenitgefüge in kubisch raumzentriertes und tetragonal verzerrtes Martensit umgewandelt wird [23]. Aufgrund der verursachten Martensitumwandlung steigt die

Härte und Zugfestigkeit im Material an, wohingegen die Bruchdehnung simultan abnimmt.

2.3.2 Tribologische Wirkmechanismen in der Wirkfuge

Während des Presshärteprozesses sind die Werkzeugsysteme extremen Prozessbedingungen ausgesetzt, die aus den hohen Umformtemperaturen und Prozesskräften sowie deren zyklischer Änderung hervorgehen. Um die Prozessbeanspruchungen zu reduzieren, werden in der Kaltumformung für gewöhnlich pastöse oder flüssige Schmierstoffe verwendet, welche als Trennmittel zwischen den interagierenden Komponenten fungieren und zugleich deren Oberflächen vor Korrosion schützen [67]. Im Presshärteprozess ist die Applikation konventioneller Schmierstoffsysteme angesichts deren mangelnder thermischer Stabilität nicht möglich. Aufgrund der hohen Umformtemperatur von über 650 °C verflüchtigen sich die Schmierstoffe innerhalb kürzester Zeit, wodurch die Tragfähigkeit und folglich die Funktionalität des Schmiermittels nicht mehr gegeben ist [59]. Bedingt durch den direkten metallischen Kontakt entstehen Verschleißerscheinungen sowie hohe Reibkräfte zwischen Werkzeug und Werkstück, infolgedessen die Qualität der Bauteile reduziert sowie die Maschinenstandzeit nachhaltig beeinträchtigt wird [68].

Zur Untersuchung von Reibung, Schmierung und Verschleiß wurde eine eigenständige Wissenschaftsdisziplin mit der Fachbezeichnung Tribologie geschaffen [69]. Die Tribologie ist gemäß DIN 50323 die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen, die zueinander in Relativbewegung stehen. Grundlegend setzt sich das tribologische System aus einem Grundkörper, Gegenkörper, Zwischenstoff und Umgebungsmedium zusammen [70]. Die Topographien des Grund- und Gegenkörpers berühren sich in örtlich und zeitlich stochastisch verteilten Mikrokontakten. Die Summe aller Mikrokontakte wird als wahre Kontaktfläche bezeichnet, deren Gesamtfläche wiederum nur einen Bruchteil der geometrischen Kontaktfläche umfasst [71]. Während der Relativbewegung von Grund- und Gegenkörper ergeben sich an diesen interagierenden Mikrokontakten chemische und mechanische Wechselwirkungen, infolgedessen Reibung und Verschleiß verursacht wird.

Reibung im Werkzeug-Werkstück-Kontakt

Der Begriff Reibung wird als bewegungshemmende Widerstandskraft definiert, die unter Relativbewegung von mindestens zwei sich berührender Körper hervorgerufen wird [71]. Je nach Beschaffenheit des tribologischen

Systems liegen unterschiedliche Reibzustände vor, welche in die Mechanismen der Festkörperreibung, Grenzreibung, Mischreibung und hydrodynamische Reibung untergliedert werden [72]. Im Presshärteprozess treten sowohl Festkörperreibung als auch Grenzreibung auf, da einerseits ein schmierstofffreier metallischer Kontakt zwischen beiden Festkörpern vorliegt und andererseits die Grenzschichten der Werkzeug- und Werkstückoberfläche von Oxidablagerungen bedeckt sind, die wiederum das Kontakt- und Reibverhalten lokal beeinflussen [42].

Der Bewegungswiderstand zwischen Presshärtewerkzeug und Werkstück wird sowohl durch Furchung als auch durch adhäsive Bindung der in Kontakt stehenden Rauheitsspitzen verursacht [73]. Furchungseffekte werden vor allem durch kleinere Partikel herbeigeführt, die zum einen lose in der Wirkfuge vorliegen und zum anderen in der härteren Werkzeugoberfläche fest eingebunden sind. Während der Relativbewegung der beiden Kontaktpartner werden plastische Deformationen auf der Werkstückoberfläche durch die abrasiv wirkenden Teilchen hervorgerufen, die wiederum höhere Reibkräfte bewirken [71]. Darüber hinaus liegen adhäsive Bindungen an den interagierenden Rauheitsspitzen zwischen Grund- und Gegenkörper vor, die zu einer Hemmung der Relativbewegung führen. Die Höhe der Adhäsionskraft ist direkt proportional zur Größe der wahren Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück [71]. Untersuchungen von Kondratiuk und Kuhn [74] zeigten in diesem Zusammenhang, dass hohe Adhäsionskräfte ein Ablösen der Halbzeugbeschichtung verursachen, sofern die Bindungskraft zwischen den Mikrokontakten größer ist als die Scherfestigkeit des applizierten Beschichtungssystems. Weitere Untersuchungen von Neubauer [75] belegten demgegenüber, dass niedrige Härten der Werkzeugoberflächen zu höheren Reibkräften führen, da unter thermo-mechanischer Belastung die Rauheitsspitzen leichter einglätten, wodurch die wahre Kontaktfläche vergrößert und folglich die Adhäsionskräfte erhöht werden.

Zur Quantifizierung der Reibverhältnisse wird das Coulomb'sche Reibgesetz verwendet, welches in Gleichung 1 abgebildet ist. Mit Hilfe des mathematischen Ansatzes lässt sich die Reibzahl μ aus dem Quotienten zwischen Reibkraft F_R und Normalkraft F_N berechnen.

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad (1)$$

Im tribologischen System wird die Reibung von vielzähligen Faktoren beeinflusst. Insbesondere sind die Berührungsverhältnisse, die Werkstoffpaarung sowie das vorliegende Belastungskollektiv, wie Flächenpressung, Dehnung, Relativgeschwindigkeit und Temperatur von hoher Relevanz [76].

Dennoch wird dieses vereinfachte Modell in zahlreichen ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen genutzt, da es eine gute Näherung an die tribologischen Prozessbedingungen erreicht.

Zur Qualifizierung des tribologischen Verhaltens wurden verschiedene Anlagen auf Basis des Coulomb'schen Reibmodells entwickelt. Borsetto et al. [77], Hochholdinger [78] sowie Hardell und Prakash [79] nutzten eine Stift-Scheibe-Prüfeinrichtung, um das Reibverhalten im Werkzeug-Werkstück-Kontakt unter Presshärtebedingungen zu analysieren. Das Prinzip der Anlage besteht darin, eine zylindrische Probe mit einer definierten Normalkraft F_N gegen eine rotierende und beheizte Scheibe zu drücken, wodurch das Drehmoment der Scheibe verlangsamt wird. Durch die veränderte Rotation der Antriebswelle wird die Reibkraft F_R ermittelt und folglich die Reibzahl μ berechnet. Der Prüfstand weist jedoch nur bedingt industriennahe Prozessbedingungen auf, da der Werkzeugstift stets über dieselbe Verschleißspur verfährt und demnach ein anhaltender, wiederholter Kontakt zwischen den Reibpartnern besteht. Wieland [80] und Neubauer [81] erweiterten daher das Prinzip der Prüfanlage, indem sie einen frei beweglichen Roboterarm zum Verfahren des Werkzeugspins nutzten. Gegenüber dem herkömmlichen Stift-Scheibe Prüfstand konnte dadurch ein stetiger Kontakt zwischen Werkzeugoberfläche und unverschlissenen Blechmaterial sichergestellt werden, was wiederum mit dem industriellen Presshärteprozess korrespondiert. Weiterhin wurde von Yanagida und Azushima [82] eine Warmstreifenzieh-anlage entwickelt, um die tribologischen Wechselwirkungen zwischen Presshärtewerkzeug und Werkstück zu analysieren. Das Prüfverfahren basiert darauf, eine Reibbacke mit einer definierten Normalkraft F_N auf einen fixierten sowie beheizten Blechstreifen zu drücken, welcher anschließend mit konstanter Geschwindigkeit verfahren wird. Durch integrierte Kraftmessdosen an der Abzugseinheit wird die vorliegende Reibkraft F_R detektiert, wodurch auf die Reibzahl μ geschlossen werden kann. Der Prüfstand zeichnet sich durch eine gute Reproduzierbarkeit sowie durch realitätsnahe Prozessbedingungen aus. Schwingenschlöggl [73] nutzte ebenfalls eine Warmstreifenzieh-anlage, um die Reibung und das Verschleißverhalten von Presshärtewerkzeugen bei variierender Werkzeug- und Werkstücktemperatur, Flächenpressung und Abziehggeschwindigkeit zu analysieren.

Verschleißerscheinungen im Werkzeug-Werkstück-Kontakt

In den Wirkorten tribologischer Systeme treten örtlich und zeitlich stochastisch verteilte Dissipationsvorgänge auf, die sowohl die Reibbedin-

gungen beeinflussen, als auch das Verschleißverhalten von Grund- und Gegenkörper beeinträchtigen [71]. Die Interaktionen zwischen Reibung und Verschleiß bewirken ein vorzeitiges Versagen des Werkzeugsystems, was hohe Instandhaltungskosten sowie zeitintensive Wartungsintervalle verursacht. Im Allgemeinen wird Verschleiß als fortschreitender Materialverlust definiert, der an der Oberfläche eines festen Körpers durch mechanische Ursachen, wie Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers hervorgerufen wird [71].

Im Presshärteprozess treten aufgrund der hohen Umformtemperaturen und des schmierstofffreien metallischen Kontaktes mehrere Verschleißmechanismen zeitgleich in Erscheinung, welche sich in Abrasion, Adhäsion und Triboreaktion untergliedern [81]. Während Abrasion durch mechanische Wechselwirkungen ausgelöst wird, basieren Adhäsion sowie Triboreaktion auf chemische Reaktionen in atomarer und molekularer Ebene [71]. Bei industriellen Presshärtewerkzeugen werden vorrangig adhäsive Verschleißerscheinungen hervorgerufen, welche sich durch einen lokalen Materialtransfer der Halbzeugbeschichtung auf die Werkzeugoberfläche manifestieren. Napfzugversuche [81], Stift-Scheibe-Experimente [83] sowie Streifenziehversuche [84] zeigten, dass vor allem AlSi-beschichtete Platinen eine hohe Adhäsionsneigung aufweisen, was nach Wang et al. [85] auf die hohe Benetzungsfähigkeit von Aluminium bei erhöhten Temperaturen zurückzuführen ist. Adhäsion unterteilt sich in Adhäsion 1. und 2. Art. Adhäsiver Verschleiß 1. Art entsteht in Folge hoher Normal- und Tangentialspannungen, die an den kontaktierten Rauheitsspitzen von Grund- und Gegenkörper wirken. Durch die Beanspruchungen werden die schützenden Deckschichten der Werkzeug- und Werkstückoberfläche durchbrochen, infolgedessen lokale, adhäsive Grenzflächenbindungen in den Mikrokontakten entstehen, die auch als Kaltverschweißungen bezeichnet werden [71]. Die Festigkeit der sich ausbildenden atomaren und molekularen Grenzflächenbindung kann höher sein als die ursprüngliche Kohäsion im Inneren des Werkzeug- oder Werkstückwerkstoffes [86]. Durch die Relativbewegung der beiden Kontaktpartner werden schließlich die schwächeren Bindungen außerhalb der Grenzfläche abgesichert, wodurch Materialpartikel vom kohäsiv schwächer gebundenen Partner zum kohäsiv stärker gebundenen Partner übertragen werden [87]. Die Höhe der Bindungskräfte wird von der Anzahl der in Wechselwirkung stehenden Atomen und folglich von der Größe der wahren Kontaktfläche beeinflusst [71]. Ferner nimmt der adhäsive Materialübertrag mit zunehmender Temperatur und sinkender Scherfestigkeit des Beschichtungssystems zu [88]. Eine weitere Variante des Materialtransfers zwischen zwei Festkörpern stellt adhäsiver

Verschleiß 2. Art dar. Infolge der Deformation der Platinenoberfläche wird Abrieb erzeugt, welcher sich in den Rauheitstälern der Werkzeugoberfläche konzentriert ansammelt [89]. Aufgrund der hohen Normalkräfte und Umformtemperaturen beim Presshärten werden neue metallische Bindungen zwischen den losen Verschleißpartikel und der Werkzeugtopographie gebildet, die sich durch kompakte, fest anhaftende Schichten kennzeichnen und mit zunehmenden Umformzyklen sukzessiv anwachsen [71]. Adhäsiver Verschleiß 1. Art begünstigt die Entstehung des Verschleißes 2. Art, da lose Partikel in die Bereiche der abgetrennten Materialfragmente eingelagert werden.

Neben adhäsiven Materialanlagerungen ergeben sich auch abrasive Oberflächenschäden an den Werkzeug- und Werkstückwirkflächen, die sich durch tiefe Riefen oder Furchen kennzeichnen. Abrasion wird durch Rauheitsspitzen harter Festkörper sowie durch eingebettete respektive lose Verschleißpartikel herbeigeführt, die unter Last in den weicheren Werkstoff eindringen und simultan über deren Topographie gleiten [69]. Auf dem tribologisch beanspruchten Körper finden sowohl mikrospannende als auch mikropflügende Prozesse statt, die mit zunehmender Sprödigkeit des Werkstoffes von mikrobrechenden Mechanismen überlagert werden [70]. Im Presshärteprozess werden infolge der Tangentialbeanspruchung des Werkzeuges harte Oxidpartikel aus der Werkstückoberfläche herausgebrochen, die wiederum als Abrasivstoff entlang des Gleitweges wirken und Schleifspuren auf der Werkzeugoberfläche erzeugen. Ferner werden die adhäsiven Materialanlagerungen auf der Werkstückoberfläche durch im Werkzeug eingebundene Körner lokal abgeschert, infolgedessen Risse längs der Verschleißfurchen entstehen [90].

Das adhäsive sowie abrasive Verschleißverhalten wird durch das Auftreten tribochemischer Reaktionen beeinflusst. Aufgrund der hohen thermo-mechanischen Beanspruchung treten in molekularer und atomarer Ebenen erhöhte chemische Reaktionsgeschwindigkeiten auf, wodurch Gitterfehler in den Grenzschichten herbeigeführt werden, die wiederum zu einem höheren Materialabtrag führen [71]. Analog dazu werden durch die Wärmebehandlung der Materialien dünne Oxidschichten auf der Werkstückoberfläche gebildet, welche durch tribooxidative Vorgänge verstärkt anwachsen. Die Oxidablagerungen haben nach Hardell et al. [91] zwar eine reibungsreduzierende Wirkung, da sie einen direkten metallischen Kontakt zwischen den Reibpartnern unterbinden, jedoch besteht mit ansteigender Schichthöhe zugleich das Risiko, das Partikel abgeschert und abrasive Verschleißerscheinungen entstehen [70].

Prozesseitige Einflussfaktoren auf die tribologischen Mechanismen

Je nach Beanspruchungskollektiv werden unterschiedliche tribologische Wechselwirkung im Werkzeug-Werkstück-Kontakt hervorgerufen. Prozesseitige Kenngrößen stellen die Werkzeug- und Werkstücktemperatur, die Flächenpressung sowie die Relativgeschwindigkeit dar, deren jeweiliger Einfluss auf das Reib- und Verschleißverhalten anhand verschiedener Laborversuche analysiert worden ist [76].

Untersuchungen von Venema et al. [60] zeigten, dass in Abhängigkeit der Werkstücktemperatur unterschiedliche Reibbedingungen und Verschleißmechanismen in der Wirkfuge begünstigt werden. Im Temperaturbereich zwischen 500 – 700 °C dominierten adhäsive Verschleißerscheinungen, wohingegen bei Werkstücktemperaturen oberhalb 700 °C zunehmend abrasive Oberflächenschädigungen herbeigeführt worden sind. Die vornehmliche Ausbildung von Adhäsion wird durch die hohe Diffusionsrate der Atome bei erhöhten Temperaturen begründet, infolgedessen starke chemische Bindungskräfte an den Grenzflächen ausgebildet werden. Simultan dazu liegt eine hohe Duktilität des Werkstücks vor, wodurch unter Belastung die interagierenden Rauheitsspitzen leichter eingeglättet werden und folglich die wahre Kontaktfläche respektive die Adhäsionsneigung zunimmt [92]. Bei Temperaturen oberhalb 700 °C werden vermehrt Oxidablagerungen sowie intermetallische Phasen in den Grenzschichten der Halbzeuge gebildet. Durch die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück werden schließlich verstärkt metallische Partikel an den Wirkorten abgetragen, die wiederum zu Kratzer und Furchungen führen [93]. Hinsichtlich der Reibbedingungen wurde von Schwingenschlögl [73] beobachtet, dass eine Erhöhung der Werkstücktemperatur von 530 °C auf 600 °C zu niedrigeren Reibzahlen führt. Aufgrund der steigenden Temperatur werden verringerte Festigkeiten und Scherkräfte an den Grenzschichten der Halbzeuge hervorgerufen, wodurch weniger Energie zur Einglättung der Mikrokontakte aufgebracht werden muss [93]. Es bildet sich primär adhäsiver Verschleiß in diesem Temperaturbereich aus, der eine schmierende, reibungsreduzierende Wirkung besitzt. Liegen demgegenüber zu hohe Verschleißanhaftungen vor, so hat dies einen Anstieg der Reibzahl aufgrund der zunehmenden Verhakung der interagierenden Rauheitsspitzen zur Folge. Streifenziehversuche von Venema et al. [60] und Ademaj et al. [94] zeigten, dass dieser Effekt vor allem bei Werkstücktemperaturen oberhalb 600 °C in Erscheinung tritt.

Aufgrund des direkten metallischen Kontaktes wirkt sich die Werkstücktemperatur unmittelbar auf das resultierende Temperaturprofil des Werkzeugsystems aus. Bei industriellen Presshärtewerkzeugen steigt das Temperaturniveau von anfänglich $\sim 20\text{ °C}$ auf $\sim 150\text{ °C}$ im Serienbetrieb an, was durch die zyklisch wechselnden Kontaktverhältnissen zwischen austenitiertem Blech und nachfolgender Kühlung begründet ist [75]. Mit zunehmender Temperatur des Werkzeugsystems wird weniger Wärme dem Bauteil entzogen, was nach Wang et al. [95] die Bildung adhäsiven Verschleißes auf der Werkstückoberfläche begünstigt und folglich höhere Reibkräfte während der Relativbewegung verursacht.

Um weitere Erkenntnisse hinsichtlich prozesseitiger Einflussgrößen zu gewinnen, wurden Presshärteversuche unter variierenden Flächenpressungen durchgeführt. Ghiotti et al. [96] nutzten in diesem Zusammenhang eine Stift-Scheibe Prüfeinrichtung, um das Reibverhalten bei 5 und 25 MPa zu untersuchen. Die Experimente zeigten, dass zunehmende Kontaktnormalkräfte zu einer Verringerung der Reibzahl führen, da steigende mechanischen Belastungen ein zunehmendes Einglätten der interagierende Rauheitsspitzen verursachen. Hierdurch ergeben sich Gleiteffekte an den Wirkflächen, was wiederum niedrigere Reibkräfte induziert. Weitere Warmstreifenziehversuche von Schwingenschlögl [73] sowie Stift-Scheibe- und Napfzugversuche von Borsetto et al. [97] bestätigten die reibungsreduzierende Wirkung steigender Flächenpressungen. Hinsichtlich der Verschleißausbildung zeigte sich, dass steigende Kontaktnormalkräfte die Bildung von Adhäsion und Abrasion begünstigen. Aufgrund der zunehmenden Einglättung der Mikrokontakte vergrößert sich die wahre Kontaktfläche und folglich die Adhäsionsneigung in den Grenzflächen. Darüber hinaus werden durch die steigenden mechanischen Belastungen vermehrt metallische Partikel aus den Grenzschichten abgetragen, wodurch abrasive Verschleißerscheinungen in Form von Riefen und Furchungen auf der Werkzeug- und Werkstücktopographie entstehen [73].

In weiteren Untersuchungen von Tian et al. [98] wurde das Verschleißverhalten im Werkzeug-Werkstück-Kontakt bei variierenden Ziehgeschwindigkeiten analysiert. Anhand von Streifenziehversuchen konnte belegt werden, dass adhäsive Materialanhaftungen vor allem bei niedrigeren Ziehgeschwindigkeiten entstehen, was wiederum durch das zeitabhängige Diffusionsverhalten der atomaren und molekularen Bindungen begründet wird. Streifenziehversuche von Vilaseca et al. [68] belegten demgegenüber, dass unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten von 20 mm/s, 60 mm/s und 120 mm/s keinen Einfluss auf die Reibbedingungen haben. Diese

Erkenntnis bestätigten Borsetto et al. [97] anhand von Stift-Scheibe-Experimenten, welche mit unterschiedlichen Ziehgeschwindigkeiten der Werkzeuge von 3 mm/s und 6 mm/s durchgeführt worden sind.

2.4 Werkzeugseitige Maßnahmen zur Erweiterung tribologischer Prozessgrenzen

Eine Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens durch Anpassung prozesseitiger Kenngrößen ist nur bedingt möglich, da veränderte Temperaturprofile, Flächenpressung und Relativgeschwindigkeiten einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen und geometrischen Bauteileigenschaften haben und zugleich die Taktzeit und resultierenden Stückzahlen verändern. Um die tribologischen Bedingungen im Presshärteprozess nachhaltig zu begünstigen sowie prozesseitige Restriktionen zu umgehen, werden vorrangig werkzeugseitige Modifikationen angestrebt. Die Anforderungen an die Presshärtewerkzeuge unterscheiden sich erheblich von den geforderten Eigenschaften konventioneller Werkzeugsysteme der Blechumformung. Insbesondere die hohen Temperaturen des austenitierten Bor-Mangan-Stahls in Zusammenspiel mit den zyklisch induzierten Kühlvorgängen beim Abschrecken der Platine setzen eine hohe thermische Stabilität der verwendeten Werkzeugstähle voraus. Die Werkzeugwerkstoffe müssen eine hohe Warmfestigkeit aufweisen sowie eine schnelle Wärmeabfuhr garantieren, um ein vorzeitiges Ermüdungsversagen des Werkzeugsystems zu unterbinden sowie eine zügige Phasenumwandlung des Platinengefüges zu gewährleisten [37]. Im Zuge dessen haben sich für die Gestaltung der Presshärtewerkzeuge die hochlegierten Warmarbeitsstähle X38CrMoV5-1 (1.2343), X40CrMoV5-1 (1.2344) und X38CrMoV5-3 (1.2367) etabliert [13], wobei letzterer im industriellen Einsatz vorrangig eingesetzt wird [12]. Neben der gießtechnischen Verarbeitung der Materialien werden ebenfalls pulvermetallurgische Verfahren zur Herstellung der Werkzeugsysteme angewandt [19]. Trotz Verwendung hochlegierter Werkzeugstähle werden sowohl Materialanhaftungen als auch hohe Reibzahlen in der Wirkfuge der Presshärtewerkzeuge herbeigeführt, deren Ursache in der fehlenden Schmierung sowie in den zyklisch wirkenden thermo-mechanischen Wechselbelastungen begründet ist. Um die Effizienz des Presshärteprozesses nachhaltig zu steigern, wurden verschiedene Maßnahmen zur Werkzeugmodifikation unternommen.

2.4.1 Randschichtmodifikation

Die Zielsetzung der Randschichtmodifikation besteht darin, dünne sowie tragfähige Schichtsysteme auf das Substratmaterial zu applizieren, um die chemische Affinität und mechanischen Eigenschaften in den Wirkflächen gezielt zu adaptieren. Bei dieser Werkzeugmodifikation wird zwischen Auflage- und Reaktionsschicht differenziert [99]. Reaktionsschichten sind durch einen fließenden Verlauf zwischen Grundwerkstoff und Beschichtungssystem charakterisiert. Beispielsweise werden via Borieren, Vanadieren oder Nitrieren zusätzliche Legierungselemente mittels Diffusion oder Strahlung in das Werkstoffgefüge eingebracht [99]. Demgegenüber weisen Aufageschichten eine strikte Trennung zwischen Substrat und Beschichtungssystem auf. Typische Beschichtungsverfahren stellen die physikalische (PVD) und chemische (CVD) Gasphasenabscheidung dar, die via thermischen Verdampfens oder chemischer Reaktionen eine Haftung des Schichtsystems auf dem Grundwerkstoff erzeugen [100]. Für das Presshärteverfahren wird vorrangig das PVD-Verfahren genutzt, da eine höhere thermische Beständigkeit in der Randschicht erreicht wird [75].

Das tribologische Einsatzverhalten von Reaktions- und Aufageschichten wurde anhand mehrerer Studien untersucht. Kondratiuk und Kuhn [101] analysierten das Verschleißverhalten von Reaktionsschichten mit Hilfe von Napfzugversuchen, die sowohl mit unmodifizierten als auch mit plasmanitrierten Ziehringen durchgeführt worden sind. Für die Experimente wurden rondenförmige Platinen für 360 s bei 880 °C und 920 °C in einem externen Ofensystem austenitisiert, innerhalb von 7 s in das Pressensystem transferiert und mit einer Geschwindigkeit von 120 mm/s zu rotationssymmetrischen Näpfen mit einem Durchmesser von 60 mm und einer Höhe von 27 mm umgeformt. Die Untersuchungen zeigten, dass plasmanitrierte Werkzeugoberflächen die Ausbildung adhäsiven und abrasiven Verschleißes begünstigen, was durch die mangelnde Anbindung der Nitrierschicht zum Substratwerkstoff erklärt wird. Neubauer [75] nutzte ein drahtbasiertes Laserstrahllegierungsverfahren, um die Verschleißbeständigkeit von Presshärtewerkzeugen zu erhöhen. Für die Versuche wurden verschiedene Legierungsdrähte mit Fördergeschwindigkeiten von 2 m/min und 6 m/min auf die Werkzeugtopographie zugeführt, die zeitgleich mittels dynamischer Laserstrahloszillation aufgeschmolzen worden sind. Zur Untersuchung des tribologischen Einsatzverhaltens wurden modifizierte Stiftscheibe Experimente bei Flächenpressungen von 10 MPa, Pingschwindigkeiten von 120 mm/s und Blechtemperaturen von 800 °C durchgeführt. Die Ergebnisse belegten, dass legierte Oberflächen mit hoher Titankonzentration den adhäsiven Materialübertrag reduzieren, was wiederum durch die

geringe chemische Affinität von Titan zur metallischen Adhäsion begründet wird. Niedrige Drahtfördergeschwindigkeiten zeigten eine verschleißreduzierende Wirkung, da ein höherer Anteil an Drahtvolumen in die Randzone des Substratmaterials eingeschmolzen wird. Bei der Reibzahlenanalyse konnte lediglich ein marginaler Unterschied zwischen unmodifizierten und laserstrahllegierten Oberflächen festgestellt werden.

Zur Untersuchung des tribologischen Einsatzverhaltens von Auflageschichten wurden verschiedenartige Legierungszusammensetzungen verwendet, die in ihrer Anwendung zum Teil widersprüchliche Verhaltensweise aufzeigten. Wieland [102] konnte anhand modifizierter Napfzugversuche belegen, dass Monolagen aus AlCrN eine Verringerung des adhäsiven Materialübertrags bewirken. Für die Verschleißuntersuchungen wurde eine Relativgeschwindigkeit von 10 mm/s, eine Austenitisierungstemperaturen von 950 °C sowie eine Austenitisierungszeit von 300 s gewählt. Vilaseca et al. [103] nutzten zur Verschleißuntersuchung ein B-Säulenwerkzeug, bei diesem der Stempel mit AlCrN und die Matrize mit CrN beschichtet worden ist. Für die Versuche wurden 2200 Blechzuschnitte verwendet, die für 420 s bei 900 °C austenitisiert und anschließend im Umformwerkzeug pressgehärtet worden sind. Durch das Auftragen der Beschichtungssysteme konnten adhäsive Verschleißanhaftung gegenüber konventionellen Werkzeugoberflächen signifikant verringert werden. Analog dazu wies Schwingenschlögl [73] anhand miniaturisierter B-Säulen nach, dass Beschichtungssysteme aus AlCrTiN, AlTiN und CrCN eine reibungs- und verschleißreduzierende Wirkung besitzen. Das verbesserte tribologische Verhalten wurde auf die signifikant höheren Härte der Beschichtungen sowie deren niedrigen chemischen Affinität zu adhäsiven Verschleiß zurückgeführt. Pelcastre et al. [104] nutzten eine Stift-Scheibe Prüfeinrichtung, um das Reib- und Verschleißverhalten von AlCrN sowie TiAlN Schichten zu untersuchen. Als Versuchsparameter wurde eine Flächenpressung von 10 MPa, eine Blechtemperatur von 800 °C sowie eine Belastungsdauer von 30 s gewählt. Die Beschichtungen zeigten gegenüber der unmodifizierten Referenzfläche eine höhere Anfälligkeit gegenüber adhäsiven Verschleiß auf. Kondratiuk und Kuhn [101] bestätigten diese Erkenntnisse, indem sie Napfzugversuche mit unbehandelten sowie AlCrN und TiAlN beschichteten Ziehringen durchführten. Die modifizierten Werkzeugsysteme wiesen eine höhere Affinität zu aluminiumhaltigen Bestandteilen auf, was durch ausgeprägte Verschleißschichten auf der Werkzeugoberfläche erkenntlich wurde. Weitere Untersuchungen von Birol und İslar [105] deuteten darauf hin, dass Oberflächenbeschichtungen für industrielle Anwendungen nur bedingt geeignet sind, da häufige Temperaturwechsel spannungsinduzierte

Risse verursachen, die wiederum die Tragfähigkeit und Haftung der Schicht verringern. Ferner weisen großflächige Beschichtungssysteme hohe Sprödigkeiten auf, wodurch bei punktuellen Belastungen ein Abplatzen und Versagen der Beschichtung herbeigeführt wird.

2.4.2 Oberflächenstrukturierung

Die Oberflächenstrukturierung stellt eine weitere Möglichkeit zur Beeinflussung des tribologischen Verhaltens dar. Unter Relativbewegung führen Scher- und Adhäsionskräfte zu Reibung und Verschleiß an den interagierenden Wirkflächen. Gelingt es, durch eine geeignete Adaption der Werkzeugtopographie beide Kraftkomponenten zu minimieren, so kann das tribologische Einsatzverhalten in der Wirkfuge begünstigt werden. Im Zuge dessen werden auf der Werkzeuoberfläche entweder geometrische Erhebungen oder Vertiefungen erschaffen, deren Größen im Bereich weniger Millimeter oder Mikrometer liegen.

Erzeugung deterministischer Strukturen mittels Mikroumformung

Um das Reib- und Verschleißverhalten metallischer Werkstoffe durch eine Adaption der Geometrieigenschaften gezielt zu beeinflussen, muss die Randschicht der Werkzeuge anhand geeigneter Verfahren ertüchtigt werden. Da die geometrischen Dimensionen der Merkmale zumeist im Submillimeterbereich liegen, werden vorrangig Verfahren und Prozesse der Mikroumformtechnik herangezogen. Nach Definition von Geiger [106] wird der Bereich der Mikroumformung adressiert, sofern mindestens zwei Dimensionen bei der Herstellung von Bauteilen und Strukturen im Submillimeterbereich liegen. Typische Technologien zur Herstellung von Werkzeugstrukturen im Mikrometerbereich stellen das Mikroprägen, -fräsen und -erodieren dar. Durch die Verfahren können Strukturmerkmale im Werkzeug exakt abgebildet und enge Toleranzen eingehalten werden [107]. Nachteilig zeigen sich jedoch die geringen Abtragsraten, die eine zeitintensive Manipulation der Werkzeuoberfläche verursachen. Ferner werden mit zunehmender Miniaturisierung der Bauteilstrukturen messbare Größeneffekte sichtbar, die sich bei der Herstellung auf das plastische Formänderungsverhalten negativ auswirken und die präzise Abbildung der Konturen zunehmend erschweren [108]. Vor diesem Hintergrund werden zur Strukturierung der Werkzeuoberflächen vorrangig laserbasierte Verfahren, wie zum Beispiel dem Laserauftragsschweißen, der Laserablation oder die Lasertexturierung, herangezogen. Neben der kontaktlosen Bearbeitung der Substratoberfläche sind laserbasierte Methoden durch eine hohe Flexibilität und Automatisierbarkeit gekennzeichnet. Ferner wird eine hohe

chemische Reinheit und ein präziser Materialabtrag erreicht, weshalb geringen Nacharbeitszyklen erfordern werden [109].

Zur Manipulation der Werkzeugtopographie wird entweder Material aus der Oberfläche lokal entfernt, lokal hinzugefügt oder lokal umverteilt. Die Zielsetzung besteht darin, die Oberfläche derart zu verändern, sodass die Kontaktbedingungen und folglich die Reibkräfte in der Wirkzone reduziert, adhäsive Bindungen verringert und eingelagerte Verschleißpartikel entfernt werden [110]. Die Funktionalität der adaptierten Oberflächen ist nach Coblas [111] von den geometrischen Eigenschaften, der Anzahl und Anordnung der Strukturelemente abhängig. Hinsichtlich der Geometrie werden vorrangig vertiefende Strukturen, sogenannte Negativstrukturen, erzeugt, welche durch eine gezielte Entfernung von Substratmaterial hergestellt werden. Unter geschmierten Bedingungen fungieren die Vertiefungen als Schmierstoffreservoir, wodurch eine kontinuierliche Schmierstoffbevorratung und -bereitstellung ermöglicht wird, was wiederum den Festkörperkontakt zwischen Werkzeug und Werkstück reduziert und die Tragfähigkeit des Schmierfilms erhöht [110]. Negativstrukturen unterliegen jedoch lokalen Abnutzungserscheinungen, welche sich beispielsweise in der Schädigung der scharfen Strukturkanten widerspiegeln. Eine weitere Möglichkeit der Oberflächenmanipulation stellt die Erzeugung von Positivstrukturen dar. Durch das lokale Auftragen von Zusatzmaterial, zum Beispiel mittels Mikro-Laserauftragungsschweißen, können erhabene Strukturen generiert werden, die über das initiale Oberflächenniveau hinausragen. Die exponierte Lage der Strukturelemente ermöglicht die lokale Beeinflussung der Kontaktbedingungen, infolgedessen der Stofffluss unter geschmierten Bedingungen gezielt begünstigt werden kann. Jedoch unterliegen Positivstrukturen aufgrund ihrer erhabenen Architektur einer sehr hohen Anfälligkeit gegenüber Abrasion [112], weshalb in der Literatur nur wenige technische Anwendungen oder Einsatzpotenziale aufgeführt werden. Ferner werden Positiv- und Negativstrukturen vorrangig unter geschmierten Bedingungen verwendet. Untersuchungen verschiedener Autoren zeigen jedoch, dass eine Reibungs- und Verschleißminderung auch unter schmierstofffreien Kontaktbedingungen realisierbar ist.

Beeinflussung des tribologischen Verhaltens im schmierstofffreien Kontakt mittels Oberflächenstrukturierung

Mousavi et al. [113] analysierten das Potenzial erhabener Makro- und Mikrostrukturen zur Beeinflussung der tribologischen Bedingungen beim Trockentiefziehen von Rechteckknäpfen. Analog zum Presshärteverfahren wurden die Laborversuche unter schmierstofffreien Kontaktbedingungen

durchgeführt, weshalb konventionelle Werkzeugoberflächen signifikante Verschleißanhaftungen und hohe Reibkräfte verursachten, die zu einem vorzeitigen Bauteilversagen führten. Durch die Erzeugung wellenförmiger Konturen im Niederhalter und der Matrize gelang es den Autoren, definierte Kontakt- und Reibbedingungen zwischen Blech und Werkzeug zu generieren, wodurch falten- und rissfreie Rechtecknöpfe mit großen Aspektverhältnissen hergestellt werden konnten [113]. Weitere Studien von Brosius [114] zeigten zudem, dass die Reduzierung der Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück niedrigere Umformkräfte hervorruft, was durch die lokal steigenden Flächenpressungen und folglich den höheren Einglättungen der interagierenden Rauheitsspitzen erklärt wird. Die lokalen Belastungen verursachen jedoch hohe Abnutzungserscheinungen an den exponierten Makro- und Mikrostrukturen, weshalb zusätzliche Verschleißschutzmaßnahmen erforderlich sind, um deren Widerstandsfähigkeit dauerhaft zu erhöhen.

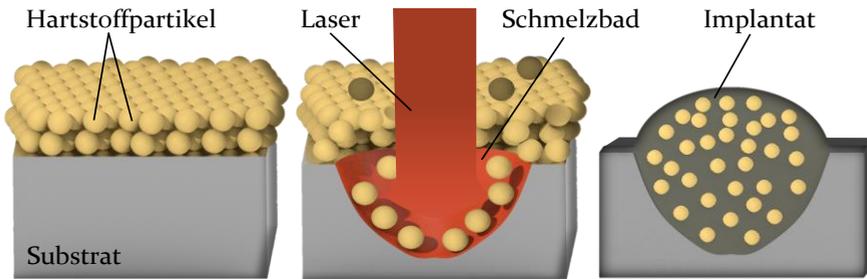
Tenner [115] konnte anhand schmierstofffreier Streifenziehversuche belegen, dass deterministisch angeordnete Mikrokavitäten sowohl eine reibungsmindernde als auch reibungserhöhende Wirkung besitzen, deren jeweilige Dominanz von der Strukturform, -tiefe, und -flächendeckung abhängig ist. Für die Untersuchungen wurden linien- sowie rechteckförmige Elemente mit Tiefen von 0,5 - 6 μm gewählt, die mit einem Deckungsgrad von 10 - 50 % mittels gepulster Laserstrahlung in ta-C beschichteten Reibbacken eingebracht worden sind. Linienförmige Strukturen, die 90° zur Ziehrichtung orientiert waren, wiesen signifikant höhere Reibzahlen auf, was durch die scherende Wirkung der Rauheitsspitzen entlang der Strukturkanten erklärt worden ist. Demgegenüber konnten verringerte Reibzahlen bei höheren Flächendeckungen festgestellt werden, da sich weniger Anhaftungen auf der Werkzeugoberfläche ausbildeten. Weitere Untersuchungen von Segu et al. [116] bestätigten die reibungsreduzierende Wirkung von steigenden Deckungsgraden. Das tribologische Einsatzverhalten von laser-generierten Mikrokavitäten wurden ebenfalls von Roch et al. [117] anhand Kugel-Scheibe-Versuchen analysiert. Durch das Einbringen punktförmiger Strukturen konnte die Reibkraft in der Wirkfuge verringert werden. Parallel dazu zeigten linienförmige Muster, deren Orientierung in Ziehrichtung lag, reibungsreduzierende Effekte. Zur Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im Presshärteprozess verwendeten Shihomatsu et al. [118] laserstrukturierte Werkzeugoberflächen. Basierend auf einer lokalen Laserbehandlung wurden halbkugelförmige Kavitäten mit Tiefen von 30 - 150 μm und Durchmesser von 100 - 300 μm in die Werkzeugmatrizen ein-

gebracht, welche als Schmierstoffreservoir im Werkzeug-Werkstück-Kontakt fungierten. Durch das Befüllen der Vertiefungen mittels Molybdändisulfid konnten die Reibkräfte beim Presshärten von U-Profilen reduziert werden. Jedoch ergaben sich nach kurzer Zeit massive Abnutzungserscheinungen und Einglättungseffekte an den lasergenerierten Strukturen, wodurch die Funktionsfähigkeit der Kavitäten nicht mehr gewährleistet werden konnte. Darüber hinaus ist der Einsatz des mineralöhlhaltigen Festschmierstoffes aufgrund der geringen thermischen Beständigkeit bis $\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ [119] und des wachsenden gesellschaftlichen Umweltbewusstseins umstritten. Um ökonomische sowie ökologische Vorteile zu erzielen, werden daher weitere Verfahren benötigt, die zu einer nachhaltigen Begünstigung des tribologischen Verhaltens führen.

2.4.3 Laserimplantation

Das Laserimplantationsverfahren kombiniert die Technologien der Randschichtmodifikation und der Oberflächenstrukturierung, um Synergieeffekte aus beiden Werkzeugmodifikationen zu erzielen. Das Grundprinzip des Verfahrens besteht darin, Hartstoffpartikel mittels gepulster Laserstrahlung in die Werkzeugoberfläche zu dispergieren, um verschleißresistente, hochfeste sowie kuppelförmige Mikrostrukturen zu erzeugen [120]. Durch die Implantation der Hartstoffe wird sowohl die Topographie der Werkzeuge verändert als auch die Materialeigenschaften in den Wirkflächen adaptiert. Erste Studien zu diesem Verfahren wurden im Jahr 1998 von Steinhoff et al. [121] vorgenommen, um die Verschleißbeständigkeit hochbelasteter Oberflächen lokal zu erhöhen. Weiterführende Untersuchungen von Hilgenberg [122] zielten darauf ab, den Mechanismus zur Entstehung gradierter geometrischer und mechanischer Oberflächeneigenschaften systematisch weiterzuentwickeln. Das Verfahrensprinzip zur Herstellung der lasergenerierten Strukturen ist in Bild 2 schematisch aufgezeigt. Zu Beginn des Prozesses wird auf das zu modifizierende Substratmaterial eine definierter Schichthöhe, bestehend aus den keramischen Hartstoffpartikel, Ethanol als Lösungsmittel und Polyvinylbutyral als Binder, manuell oder robotergeführt aufgetragen und bei Raumtemperatur getrocknet (I). Die präparierte Oberfläche wird anschließend mittels gepulster Laserstrahlung lokal aufgeschmolzen (II). Bei ausreichender Laserintensität und Pulsdauer wird die Vorbeschichtung innerhalb weniger Millisekunden durchstoßen, infolgedessen auf dem darunterliegenden Substrat ein Schmelzbad entsteht. Durch die radiale Expansion der Schmelze werden angrenzende Hartstoffpartikel in das Strahlzentrum transportiert, was wiederum eine Volumenvergrößerung aufgrund der fein dispergierten Partikel verursacht.

Mit Abkühlen des Schmelzbades werden die Partikel fest in die Werkstoffmatrix eingebunden. Durch den erzwungenen Volumenzuwachs entstehen kuppelförmige Strukturen, die je nach gewählter Vorbeschichtungshöhe und Laserkonfiguration differierende Durchmesser von 50 - 400 μm und Höhen von 5 - 30 μm aufweisen [123]. Nach dem Implantationsprozess wird die verbleibende Vorbeschichtung mittels Ethanol entfernt und die Oberfläche mit einer Diamantsuspension poliert (III).



I. Vorbeschichtung → II. Laserimplantation → III. Nachbehandlung
Bild 2: Verfahrensschritte des Laserimplantationsprozesses

Zur Herstellung der lasergenerierten Strukturen, welche auch als Implantate bezeichnet werden, eignen sich vor allem metallische Hartstoffe, da diese eine gute Benetzbarkeit und hohen Schmelzpunkt aufweisen. Eine Implantierbarkeit ist gegeben, sofern die Hartstoffpartikel über den Implantatquerschnitt gleichmäßig verteilt sind und keine Materialdefekte wie Risse, Poren oder Einschlüsse vorliegen. Untersuchungen von Hilgenberg et al. [18] und Spranger et al. [124] zeigten, dass durch die Verwendung von Titandiborid (TiB_2) hochfeste, lunkerfreie und geometrisch einstellbare Implantate mit Härten von bis zu 1600 HV_1 generierbar sind. Die laserimplantierten Strukturen weisen eine hohe Verschleißbeständigkeit auf, da die hochtemperaturbeständigen Hartstoffe einen Metall-Matrix Verbund (MMC) mit dem Substratmaterial bilden und folglich auftretende Prozesskräfte effektiv in den Grundwerkstoff abgeleitet werden. Ferner lassen sich durch das flexible Lasersystem deterministische Muster aus einzelnen Implantaten an geometrisch komplizierten Werkzeugoberflächen erzeugen, wodurch der Stofffluss und die Reibung an den Kontaktflächen gezielt beeinflusst werden kann. Da TiB_2 zu der Werkstoffgruppe der nichtoxidischen Keramiken zählt, liegen innerhalb der Atomstruktur überwiegend kovalenten Bindungen vor, die starke Bindungsenergien aufweisen. Die Hartstoffpartikel zeichnen sich daher durch hohe Härten und chemisch inerte Eigenschaften aus, was wiederum die Ausbildung von Adhäsion entgegenwirkt [125]. Hilgenberg und Steinhoff [126] untersuchten in diesem Zusammenhang das tribologische Einsatzverhalten laserimplantierter Strukturen

anhand eines Twin-Disk-Tests. Hierzu nutzten die Autoren eine laserimplantierte Walze, die unter geschmierten Bedingungen mit einer Normalkraft von bis zu 7 kN gegen einen gehärteten Gegenkörper gepresst und zeitgleich rotiert worden ist. Die Versuche zeigten, dass auch nach $1,26 \times 10^{26}$ Zyklen weder Implantate aus der Werkstoffmatrix herausbrechen noch signifikante Verschleißerscheinungen sichtbar waren.

Da in der Warmumformung ebenfalls hohe Werkzeugbeanspruchungen vorliegen, ist ein Transfer dieser Verfahrenstechnologie auf den Presshärteprozess von großem Interesse. Aufgrund der simultanen Veränderung von Mikrogeometrie und Werkstoffeigenschaften sowie der Flexibilität der Strukturordnung weist das Laserimplantationsverfahren ein hohes Potenzial zur Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens auf. Es wird erwartet, dass die Strukturierung tribologisch hochbelasteter Bereiche reibungs- und verschleißreduzierende Effekte hervorruft [124]. Im Zuge dessen müssen jedoch grundlegende Analysen hinsichtlich des vorliegenden Beanspruchungskollektivs, der thermischen Wechselwirkungen sowie des Reib- und Verschleißverhaltens durchgeführt werden, um Ursache-Wirkzusammenhänge zu erkennen, Verfahrensstrategien abzuleiten und Potenziale für die industrielle Anwendung zu identifizieren.

2.5 Zusammenfassende Bewertung

Das Presshärteverfahren hat sich in der Automobilindustrie als Schlüsseltechnologie zur Verarbeitung höchstfester Stahlwerkstoffe etabliert. Das Verfahrensprinzip basiert auf einem hybriden Warmumform- und Härteprozess, infolgedessen eine Gefügeumwandlung von Austenit in Martensit initiiert wird. Durch die Prozessabfolge können Zugfestigkeiten von bis zu 2000 MPa erzeugt werden. Die hohen Prozesstemperaturen von über 650 °C lassen jedoch nur bedingt den Einsatz von Schmierstoffsystemen zu, was wiederum zu erhöhten Reibzahlen und Verschleißerscheinungen am Werkzeug führt und folglich niedrigere Bauteilqualitäten sowie zeit- und kostenintensiven Wartungsintervallen verursacht. Um die Effizienz des Presshärteprozesses nachhaltig zu steigern, wurden verschiedene Maßnahmen zur Werkzeugmodifikation untersucht. Anhand der Randschichtmodifikation werden dünne Schichtsysteme auf die Werkzeugtopographie aufgebracht, um die Adhäsionsneigung der Wirkflächen zu reduzieren. Untersuchungen verschiedener Beschichtungskonzepte zeigten jedoch widersprüchliche Verhaltensweisen in Bezug auf Schichthaftigkeit, Reibung und Verschleiß. Eine weitere Methode zur Verbesserung des tribologischen

Verhaltens stellt die Oberflächenstrukturierung dar. Durch die gezielte Anpassung der Geometrie der Werkzeugtopographie können die Kontaktbedingungen und somit das Reib- und Verschleißverhalten begünstigt werden. Exponierte Strukturen unterliegen allerdings hohen lokalen Belastungen, weshalb bei mangelnder Widerstandsfähigkeit der Strukturen fortschreitende Abnutzungserscheinungen auftreten, welche durch zusätzliche Verschleißschutzmaßnahmen kompensiert werden müssen. Mit der Technologie der Laserimplantation wird durch eine lokale Veränderung der Werkstoffeigenschaften bei gleichzeitiger Strukturierung der Oberfläche hierfür die Voraussetzung geschaffen. Momentan sind keine Erkenntnisse vorhanden, ob die in der Laserimplantationstechnologie kombinierten Verfahren der Randschichtmodifikation und der Oberflächenstrukturierung reibungs- und verschleißreduzierende Effekte beim Presshärten induzieren. Zwar konnte unter geschmierten Bedingungen das tribologische Verhalten durch Verwendung laserimplantierter Werkzeuge nachweislich verbessert werden, jedoch liegen keine Kenntnisse vor, ob ein Transfer der Verfahrenstechnologie auf den schmierstofffreien Warmumformprozess mit höheren Umformkräften und zyklischen wirkenden thermo-mechanischen Beanspruchungen gleichermaßen eine tribologisch begünstigende Wirkung erzielt.

Neben den tribologischen Bedingungen ist die Qualitätsgüte der pressgehärteten Bauteile auch von den thermischen Wechselwirkungen in der Wirkfuge abhängig. Eine vollständige Gefügeumwandlung zu Martensit kann nur gewährleistet werden, sofern das austenitisierte Halbzeug die Mindestabkühlgeschwindigkeit von $27\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ überschreitet. In diesem Zusammenhang liegen derzeit keine Kenntnisse vor, ob laserimplantierte Werkzeugoberflächen einen Einfluss auf das Abkühlvermögen ausüben und folglich die mechanischen Eigenschaften und Qualitätsgüten der pressgehärteten Komponenten beeinflussen. Weitere Fragestellungen ergeben sich hinsichtlich der Wirkweise variierender Implantationsmuster und -geometrien. Aufgrund der hohen Flexibilität des Lasersystems lassen sich deterministische Strukturen aus einzelnen Implantaten an geometrisch komplizierten Werkzeugoberflächen erzeugen. Allerdings ist nicht bekannt, ob durch die Variation der Geometrie, des Abstandes und der Anordnung der Implantate das thermische und tribologische Verhalten beeinflusst oder sogar gesteuert werden kann. Zusammenfassend liegt derzeit kein grundlagenwissenschaftliches Verständnis vor, inwiefern das Verfahren der Laserimplantation genutzt werden kann, um die Qualität der Bauteile, die Standzeiten der Werkzeuge und folglich die Effizienz des Presshärteprozesses zu erhöhen.

3 Zielsetzung und methodische Vorgehensweise

Das übergeordnete Ziel der Arbeit ist die Verringerung von Reibung und Verschleiß im Presshärteprozess durch Einsatz maßgeschneiderter laserimplantierter Werkzeugoberflächen. Um diese Zielsetzung zu erreichen, müssen zunächst grundlegende Anforderungsprofile an die Oberflächenmodifikationen definiert werden, um eine belastungsangepasste Modifikation der Werkzeugoberfläche zu erzielen. Hierdurch sind die Voraussetzungen geschaffen, um das Reib-, Verschleiß- und Abkühlverhalten der Oberflächenstrukturierungen unter Presshärtebedingungen zu qualifizieren, bestehende Ursache-Wirkzusammenhänge zu eruieren und adäquate Strategien zur Werkzeugmodifikation abzuleiten. Anhand des erarbeiteten Wissens ist die Möglichkeit gegeben, maßgeschneiderte, reibungs- und verschleißreduzierende Oberflächenmodifikationen zu generieren. Um die Wirksamkeit der identifizierten Wirkmechanismen zu verifizieren, müssen abschließend Presshärteversuche unter Verwendung eines industrienahen Demonstrators durchgeführt werden. Die Vorgehensweise zum Erreichen des angestrebten Zielvorhabens ist in Bild 3 dargestellt.

Eine zielorientierte Modifikation der Presshärtewerkzeuge erfordert zunächst die Definition von Anforderungsprofilen an die Implantatkonfigurationen. Daher gilt es, tribologisch hochbeanspruchte Werkzeugbereiche simulationsgetrieben zu detektieren, um fundierte Kenntnisse hinsichtlich dem in der Wirkfuge vorliegenden Belastungskollektiv zu erlangen. Vor diesem Hintergrund müssen mit Hilfe einer FE-Analyse umformkritische Kontaktbereiche einer Rechtecknapfmatrize ermittelt werden, die höchsten Flächenpressungen und thermischen Belastungen unterliegen. Anhand der lokalisierten und quantifizierten thermo-mechanischen Werkzeugbeanspruchung ist die Möglichkeit gegeben, grundlegende Anforderungsprofile zur beanspruchungsgerechten Oberflächenmodifikation abzuleiten. Ferner lassen sich anhand der generierten Wissensbasis prozessrelevante Anlagenparameter für die experimentellen Untersuchungen identifizieren.

Aufbauend auf den definierten Anforderungsprofilen kann ein grundlegendes Verständnis hinsichtlich dem Reib-, Verschleiß- und Abkühlverhalten der lasergenerierten Oberflächenmodifikationen unter Presshärtebedingungen erarbeitet werden. In diesem Zusammenhang gilt es, den Einfluss von Geometrie, Abstand und Anordnung der Mikrostrukturen auf die thermo-mechanischen und tribologischen Wechselwirkungen zwischen

Werkstück und laserimplantierten Werkzeug zu untersuchen. Vor diesem Hintergrund wird der Einsatz simulativer sowie experimenteller Analysemethoden, wie Abschreck-, Zug-, Streifenzieh- sowie Pin-on-Disk Versuche erfordert, um die Ursachen-Wirkzusammenhänge hinsichtlich dem Einsatzverhalten deterministischer Implantationsmuster zu erforschen. Mit Hilfe des erarbeiteten Wissens lassen sich wiederum maßgeschneiderte Implantatstrukturen generieren, die sowohl die thermo-mechanischen als auch die tribologischen Wechselwirkungen im Presshärteprozess begünstigen.

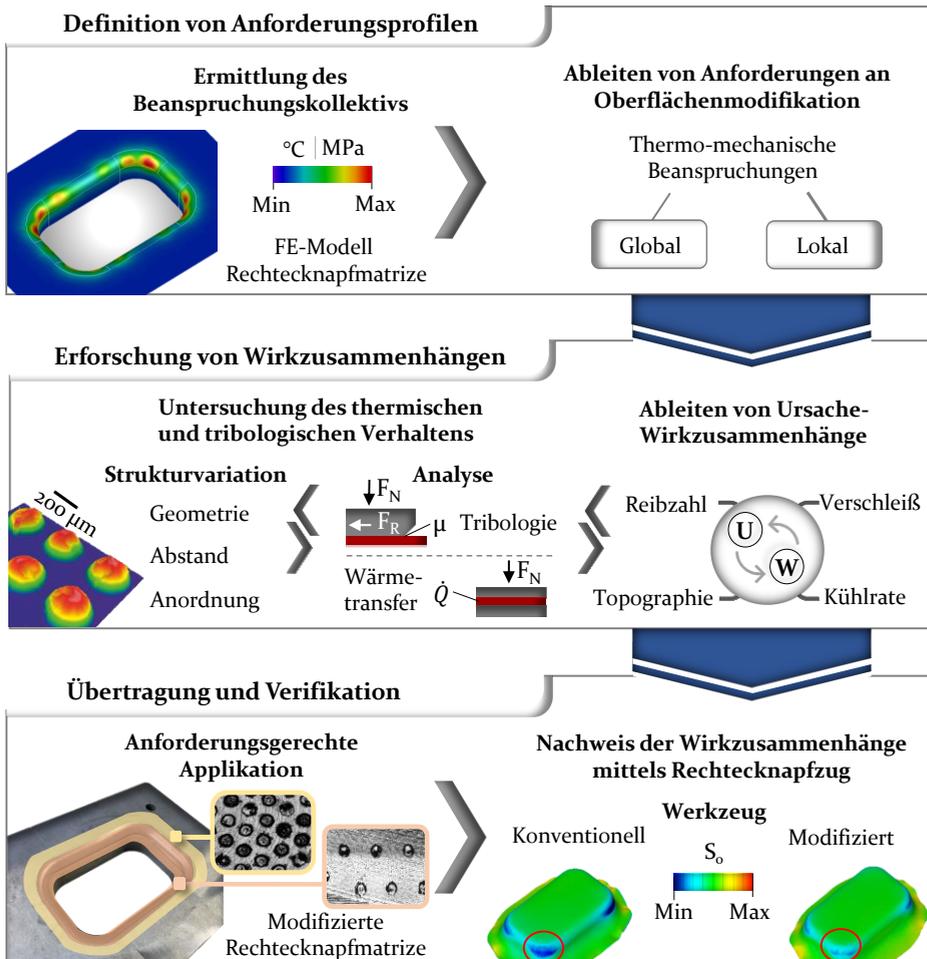


Bild 3: Vorgehensweise und Forschungsschwerpunkte

Die zuvor erforschten Wirkmechanismen bilden die Grundlage, um Werkzeuggeometrien beanspruchungsgerecht zu laserimplantieren. Die Zielset-

zung besteht nun darin, die Übertragbarkeit der identifizierten Wirkzusammenhänge anhand eines industrienahen Demonstrators zu verifizieren. Zu diesem Zweck gilt es, Rechtecknapfzugversuche sowohl mit einem konventionellen als auch mit einem maßgeschneidert laserimplantierten Presshärtewerkzeug durchzuführen und deren tribologisches Einsatzverhalten gegenüberstellend zu evaluieren. Durch die anforderungsgerechte Auslegung und Platzierung der lasergenerierten Oberflächenmodifikationen kann sowohl das proklamierte Potenzial der Reibungs- und Verschleißminderung als auch die industrielle Relevanz und Wirksamkeit verifiziert werden. Anhand des erarbeiteten Wissens ist die Möglichkeit gegeben, pressgehärtete Bauteile ressourceneffizient und beanspruchungsgerecht herzustellen, wodurch ein nachhaltiger ökonomischer und ökologischer Nutzen in Form höherer Bauteilqualitäten, niedriger Ausschussquoten und längeren Werkzeugstandzeiten geschaffen wird.

4 Verwendete Werkstoffe, Prozessparameter und Methoden

Im nachfolgenden Kapitel wird das im Rahmen der Arbeit genutzte Versuchsumfeld beschrieben. Im Zuge dessen werden die verwendeten Werkstoffe, Anlagen, Prozessparameter und Methoden vorgestellt, welche zur Qualifizierung, Analyse und Evaluation der lasergenerierten Oberflächenmodifikationen eingesetzt werden.

4.1 Werkstück- und Werkzeugwerkstoff

Als Werkstückwerkstoff wird der borlegierte Vergütungsstahl 22MnB5 (DIN 1.5528) verwendet, der sich als Standardwerkstoff zur Herstellung sicherheitsrelevanter Karosseriekomponenten etabliert hat [127]. Explizit werden 1,5 mm dicke Formplatinen der Firma thyssenkrupp Steel (MBW® 1500) eingesetzt, deren Oberflächen via Schmelztauchveredelung mit einer AlSi-Schicht von 150 g/m² überzogen worden sind, um Abkohlung, Korrosion und Zunderbildung im direkten Presshärteprozess entgegenzuwirken [33]. Im Anlieferungszustand besitzt der Werkstoff ein feinkörniges, ferritisch-perlitisches Gefüge, welches hauptsächlich aus den Legierungselementen Silizium, Mangan und Chrom besteht. Eine detaillierte Übersicht der chemischen Zusammensetzung ist in Tabelle 1 aufgezeigt. Das Halbzeug weist eine Streckgrenze $R_{p0,2}$ von 350 - 550 MPa sowie eine Zugfestigkeit R_m von 500 - 700 MPa auf. Ferner liegen Bruchdehnungen A_{80} von ~ 12 % und Härten von ~ 170 HV₁₀ vor. Durch die Wärmebehandlung über die materialspezifische AC_3 -Temperatur (845 °C) und dem nachfolgenden Abschrecken mit einer Mindestabkühlgeschwindigkeit > 27 °C/s wandelt sich der Werkstoff in ein martensitisches Gefüge um, infolgedessen die Streckgrenze $R_{p0,2}$ auf ~ 1000 MPa, die Zugfestigkeit R_m auf ~ 1500 MPa und die Härte auf ~ 470 HV₁₀ erhöht werden. Gleichzeitig verringert sich die Bruchdehnung auf ~ 5 % [33].

Tabelle 1: Elementzusammensetzung des Vergütungsstahl 1.5528 gemäß Hersteller [33]

Chemische Zusammensetzung 22MnB5 (MBW® 1500) in max. Gew.-%.									
C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	B	Cr Mo	Fe
0,25	0,4	1,4	0,025	0,01	0,015	0,05	0,005	0,5	Rest

Als Werkzeugwerkstoff wird der Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-3 (DIN 1.2367) eingesetzt. Warmarbeitsstähle sind speziell für Matrizen, Formen und Stempel konzipiert, die hohen thermo-mechanischen Belastungen ausgesetzt sind [128]. Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffes ist in Tabelle 2 aufgezeigt. Charakteristisch für das Material ist die geringe Verzugsneigung sowie die hohe Verschleiß- und Warmfestigkeit, weshalb diese Stahlsorte im industriellen Presshärteprozess weltweit genutzt wird [73]. Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften kennzeichnet sich der Werkstoff durch eine Dichte von $7,85 \text{ g/cm}^3$ sowie durch eine Härte von 602 HV₁₀. Das Material weist zudem eine hohe Wärmeleitfähigkeit von 29 - 35 W/mK [129] auf, um hohe Abkühlraten respektive niedrige Taktzeiten im Presshärteprozess zu erreichen. Die Werkzeugstähle sind in Ziehrichtung geschliffen, um gleichmäßige Oberflächeneigenschaften zu gewährleisten.

Tabelle 2: Elementzusammensetzung des Warmarbeitsstahl 1.2367 gemäß Hersteller [129]

Chemische Zusammensetzung X38CrMoV5-3 in max. Gew.-%.							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0,4	0,5	0,5	0,03	0,02	5,2	3,2	0,6

4.2 Parameter zur Herstellung lasergenerierter Oberflächenmodifikationen

Das Laserimplantationsverfahren basiert auf dem lokalen Dispergieren keramischer Hartstoffpartikel mittels gepulster Laserstrahlung. Die Auswahl geeigneter Hartstoffe und Laserparameter stellt ein entscheidendes Kriterium dar, um maßgeschneiderte Oberflächenmodifikationen zu erzeugen.

Verwendung titanbasierter Hartstoffpartikel

Die Generierung der laserimplantierten Strukturen erfolgt in enger Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung mit Sitz in Berlin. Untersuchungen von Spranger et al. [130] belegen, dass titanbasierte Hartstoffe ein hohes Potenzial besitzen, um die geometrischen und mechanischen Eigenschaften der laserimplantierten Strukturen gezielt einzustellen. Durch die Verwendung von Titandiborid gelang es, verschleißbeständige, lunkerfreie und geometrisch adaptierbare Mikrostrukturen auf Warmarbeitsstähle zu erzeugen [124]. Das Material hat einen sehr hohen Schmelzpunkt sowie eine hohe chemische Stabilität und thermische Beständigkeit [131]. Zudem verfügt TiB₂ über die höchste Härte aller Metallboride [132]. Eine Übersicht der Materialeigenschaften ist in Tabelle 3 gegeben.

Tabelle 3: Eigenschaften der laserimplantierten TiB₂-Partikel gemäß [133]

Partikel - Ø	Schmelzpunkt	Härte	Dichte
5,3 µm	3225 °C	3480 HV ₁	4,5 g/cm ³

Titandiborid unterliegt der Werkstoffgruppe der nichtoxidischen Keramiken. Technische Keramiken haben ein großes Anwendungspotenzial für tribologisch hochbeanspruchte Werkzeuge, da aufgrund ihres atomaren Bindungscharakters ein hoher Widerstand gegen adhäsiven Verschleiß und tribochemischer Beanspruchung hervorgeht. Darüber hinaus liegt eine hohe Beständigkeit gegen Abrasion angesichts der hohen Härte der Materialien vor [134]. Wegen dieser Eigenschaften wird Titandiborid derzeit in vielzählig hochbeanspruchten und verschleißanfälligen technischen Anwendungen, wie z. B. Schneidwerkzeuge [125], Tigelmateriale [132] oder militärischen Panzerungen [131], eingesetzt.

Probenpräparation und Laserimplantation

Zur Erzeugung der lasergenerierten Oberflächenmodifikationen muss die Werkzeugtopographie vorbehandelt werden. Hierzu wird auf dem zu modifizierenden Warmarbeitsstahl 1.2367 eine definierte Schichthöhe, bestehend aus den keramischen Hartstoffpartikel, Polyvinylbutyral als Binder und Ethanol als Lösungsmittel, aufgetragen und bei Raumtemperatur getrocknet. Untersuchungen von Spranger et al. [135] zeigten, dass in Abhängigkeit der Vorbeschichtungshöhe unterschiedliche geometrische und mechanische Implantateigenschaften eingestellt werden können. Im Zuge dessen werden im Rahmen der Arbeit mehrere Schichthöhen h_s von 50 µm, 75 µm und 100 µm gewählt, um gradierte Eigenschaftsprofile herzustellen. Die pastösen Suspensionen werden mit einer Sprühpistole aufgetragen und anschließend mit einer Rasierklinge geglättet, die mit konstantem Abstand über die Oberfläche geführt wird. Somit können reproduzierbare Vorbeschichtungshöhen mit einer Sollwertabweichung von $\pm 5\%$ erzeugt werden.

Für den nachfolgenden Laserimplantationsprozess wird ein gepulster Yb:YAG-Faserlaser (YLS-600/6000-QCW-ACY15, Fa. IPG Photonics) mit einer Wellenlänge von $\lambda = 1070$ nm und einer Gauß'schen Intensitätsverteilung verwendet. Die Strahloptik (BIMO, Fa. HIGHYAG) ist senkrecht zur präparierten Substratoberfläche justiert, wobei die Strahlführung und -formung durch eine Lichtleitfaser mit einem Durchmesser von 50 µm erfolgt. Durch die Aussendung eines gepulsten Laserstrahls wird die Werkzeugtopographie innerhalb weniger Millisekunden (< 20 ms) auf über 1500 °C erwärmt, wodurch das Substratmaterial lokal aufschmilzt. Simultan dazu werden die hitzebeständigen Partikel aufgrund der nach innen gerichteten

Marangoniströmung in Richtung des Schmelzbadzentrums transportiert, was wiederum ein Volumenzuwachs der Schmelze verursacht [130]. Durch das Abkühlen des Schmelzbades werden die Partikel fest in das Substrat eingebunden, infolgedessen eine erhabene und kuppelförmige Struktur im Mikrometerbereich entsteht. Während der Versuchsdurchführung wird Argon als Schutzgas mit einem konstanten Volumenstrom von 22 l/min zugeführt. Die Laseranlage wird mit einem Fokussdurchmesser d_F von 105 μm , einer Pulsleistung P_P von 90 W sowie einer Pulsdauer t_P von 9 ms konfiguriert. Laborversuche von Spranger et al. [124] zeigten, dass diese Parameterkombination sich besonders eignet, um einen defektfreien Metall-Matrix Verbund mit einem hohen Anteil an homogen verteilten Partikel zu erzeugen. Nach Abschluss des Implantationsprozesses wird die restliche Vorbeschichtung mit Hilfe von Ethanol im Ultraschallbad entfernt.

Resultierende Implantatcharakteristika

Um die Wirkweise der gewählten Parameter hinsichtlich der resultierenden Implantateigenschaften zu analysieren, wurden in [133] lichtmikroskopische Untersuchungen, Querschliffaufnahmen sowie Härtemessungen vorgenommen. In Bild 4 sind die Implantatcharakteristika sowie eine Mikroskopaufnahme einer lasergenerierten Oberflächenmodifikation aus TiB_2 aufgezeigt. Durch das Laserimplantationsverfahren werden axialsymmetrische, kuppelförmige Struktur erzeugt, deren Eigenschaften von den Laserparametern und den gewählten Vorbeschichtungshöhen abhängig sind. Mit zunehmender Schichtdicke h_s steigt die Höhe der Kuppelform an, da ein größerer Anteil an Hartstoffpartikel im Schmelzbad dispergiert [130]. Die gemessenen arithmetischen Mitterauwerte der Kuppelstrukturen betragen im Durchschnitt $R_a \sim 15 \text{ nm}$. Zusätzlich durchgeführte Querschliffaufnahmen von Spranger et al. [124] belegen, dass durch die Implantation von TiB_2 eine defektfreie Metall-Matrix Struktur generiert wird, die durchschnittlich $\sim 80 \mu\text{m}$ im Substratmaterial verankert ist und zu $\sim 65 \%$ aus martensitischen Werkzeugstahl respektive $\sim 35 \%$ aus homogen verteilten Hartstoffpartikel besteht. Die laserimplantierte Zone weist eine signifikante Härtesteigerung (bis 1600 HV₁) gegenüber dem Werkzeugstahl (550 HV₁) auf. Bei der Laserbearbeitung werden aufgrund der hohen Prozesstemperaturen vielzählige Keramikpartikel aufgelöst und als Sekundärpartikel ausgeschieden, was in Kombination mit den verbleibenden, fein dispergierten Hartstoffpartikel eine signifikante Härtesteigerung im Implantatgefüge verursacht [124].

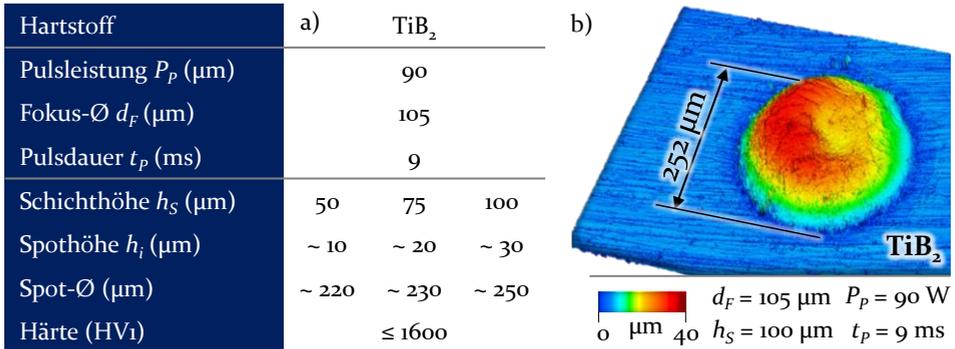


Bild 4: a) Implantatcharakteristika in Abhängigkeit der gewählten Prozessparameter und b) Mikroskopaufnahme einer laserimplantierten Struktur

4.3 Methoden zur Charakterisierung der Bauteil- und Werkzeugeigenschaften

Zur Untersuchung der Ursache-Wirkzusammenhänge müssen die verwendeten Werkzeug- und Werkstückwerkstoffe hinsichtlich deren topographischen respektive thermo-mechanischen Eigenschaften analysiert werden. Vor diesem Hintergrund werden verschiedene Anlagensysteme und Messinstrumente benötigt, die im nachfolgenden Abschnitt vorgestellt werden.

Analyse der Oberflächeneigenschaften

In den Wirkorten tribologisch hochbelasteter Werkzeugsysteme treten adhäsive sowie abrasive Verschleißmechanismen in Erscheinung, infolgedessen die Topographie in Form von Materialanhaftungen oder Furchungen nachhaltig verändert wird [71]. Zur Detektion des jeweiligen Schädigungsverhaltens werden im Rahmen der Arbeit optische Messungen anhand eines konfokalen Laser-Scanning Mikroskops vom Typ VK-X 200 der Firma Keyence durchgeführt. Das Messgerät ist mit einer Laserlicht- und einer Weißlichtquelle ausgestattet, wodurch Kontur- und Höheninformationen mit hoher Auflösung und Tiefenschärfe erfasst werden. Zur Analyse der topographischen Eigenschaften der Proben wird ein Lichtimpuls über eine Abtastoptik und eine Objektivlinse mit 20-facher Vergrößerung ausgesendet, welcher von einem Fotorezeptor detektiert und in einem CCD-Bildsensor verarbeitet wird. Die Messdaten können mit Hilfe des Softwareprogrammes VK Analyse Module (Fa. Keyence) in zwei- sowie dreidimensionale Oberflächenaufnahmen überführt werden, was wiederum Analysen in Bezug auf Rauheit und Profilhöhe ermöglicht. Für die Untersuchungen wird jeweils ein Messfeld von 30 mm² aufgenommen, um aussagekräftige

Informationen hinsichtlich vorliegender Verschleißerscheinungen zu gewinnen.

Ergänzend zu den optischen Untersuchungen werden taktile Messungen mit Hilfe des elektrischen Tastschnittgeräts Mahr Surf GD 120 der Firma Mahr durchgeführt. Das Prinzip dieses Messverfahrens besteht darin, eine Tastnadel mit einer Diamantspitze über die zu untersuchende Oberfläche mit einer definierten Vorschubgeschwindigkeit zu verfahren, wodurch das Höhenprofil entlang der Messstrecke in Form von Ausschlägen erfasst und in elektrische Signale umgewandelt wird [136]. Die Messdaten werden wiederum softwaregestützt in Rauheitskenngrößen nach DIN 4768 überführt. Um statistische Abweichungen zu berücksichtigen werden an jeder Probe fünf Wiederholmessungen vorgenommen.

Zur Charakterisierung der chemischen Zusammensetzung der Probenoberflächen werden weiterführende Untersuchungen auf Basis der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) veranlasst, die mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops (REM) Merlin der Firma Zeiss durchgeführt werden. Bei diesem Verfahren werden die Atome der Probenoberfläche durch hochenergetische Elektronen beschossen, wodurch ein charakteristisches, elementspezifisches Röntgenspektrum entsteht. Durch die Detektion der Strahlung können wiederum Informationen über die Elementzusammensetzung der Probe abgeleitet werden [137]. Zur Untersuchung der Verschleißcharakteristika werden auf der Werkzeuoberfläche sowohl linienförmige Abtastungen von 1 mm, als auch flächige Analysen in einem Messfeld von $\sim 6,5 \text{ mm}^2$ vorgenommen. Als Anlagenkonfiguration ist eine Beschleunigungsspannung U von 20 kV, eine Stromstärke I_{Probe} von 1 nA und ein Arbeitsabstand WD von 35 mm eingestellt.

Untersuchung der thermo-mechanischen Wechselwirkungen

Im Presshärteprozess wird durch die Adaption der Temperaturführung die diffusionsgesteuerte Phasenumwandlung des Halbzeuggefüges beeinflusst, wodurch veränderte Bauteileigenschaften entstehen. Vor diesem Hintergrund wird untersucht, ob die lasergenerierten Mikrostrukturen einen Einfluss auf das Abkühlverhalten ausüben und folglich die Festigkeitseigenschaften des Bor-Mangan-Stahls beeinträchtigen.

Zu diesem Zweck werden die Abkühlraten unterschiedlich laserimplantierter Werkzeuoberflächen anhand eines am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie entworfenen, konstruierten und qualifizierten Abschreckwerkzeuges untersucht. Das wassergekühlte Werkzeugsystem besteht aus zwei

symmetrischen Werkzeughälften, an deren Stirnfläche jeweils eine demontierbare Kontaktplatte befestigt ist. Das Grundprinzip der Versuchsanlage besteht darin, eine zuvor austenitisierte Platine zwischen den senkrecht zueinander angeordneten Kontaktplatten zu positionieren, die anschließend mit einer definierten Flächenpressung verschlossen werden und die Abkühlung des Halbzeuges erzwingen. Für jeden Prüfzyklus werden Bor-Mangan-Platinen mit den Abmaßen $l = 105 \text{ mm}$, $b = 45 \text{ mm}$, $d = 1,5 \text{ mm}$ verwendet, die zunächst in dem Laborofen ME 17 der Firma Rhode für 360 s bei $930 \text{ }^\circ\text{C}$ erwärmt und anschließend manuell in das Abschreckwerkzeug transferiert werden. Die Blechzuschnitte werden auf vier gefederte Distanzstifte platziert, um ein vorzeitiges Abkühlen der Halbzeuge zu verhindern. Der nachfolgende Schließvorgang der beiden Werkzeughälfte wird durch die hydraulische Tiefziehpresse vom Typ TSP 100So der Firma Lasco Umformtechnik bewerkstelligt. Für die Versuchsdurchführung wird die maximale Schließgeschwindigkeit von 60 mm/s eingestellt. Ferner werden Anpressdrücke von 20 MPa und 35 MPa gewählt, um industrienahen Prozessbedingungen abzubilden. Auf Basis der austauschbaren Abkühlplatten können die thermischen Wechselwirkungen unterschiedlicher Werkzeugmodifikationen untersucht werden. Im Zuge dessen werden ein unmodifiziertes Kontaktplattenpaar sowie vier laserimplantierte Werkzeugeinsätze mit unterschiedlichen Implantathöhen ($10 \text{ }\mu\text{m}$, $30 \text{ }\mu\text{m}$) und -abständen ($350 \text{ }\mu\text{m}$, $750 \text{ }\mu\text{m}$) verwendet. Bild 5 zeigt eine modifizierte Abkühlplatte sowie den Aufbau des Abschreckwerkzeuges. Die Aufzeichnung des Temperatur-Zeit-Verlaufes der Platinen erfolgt anhand eines 1 mm dicken Mantelthermometers vom Typ K, welches in einer 17 mm tiefen Bohrung in der Mitte der Probenlängsseite integriert ist. Für jede Werkzeugkonfiguration werden drei Wiederholversuche durchgeführt, um statistische Messabweichungen zu berücksichtigen. Anhand der Temperatur-Zeit-Verläufe der Platinen können die jeweiligen Abkühlraten der Werkzeugeinsätze berechnet, gemittelt und gegenübergestellt werden.

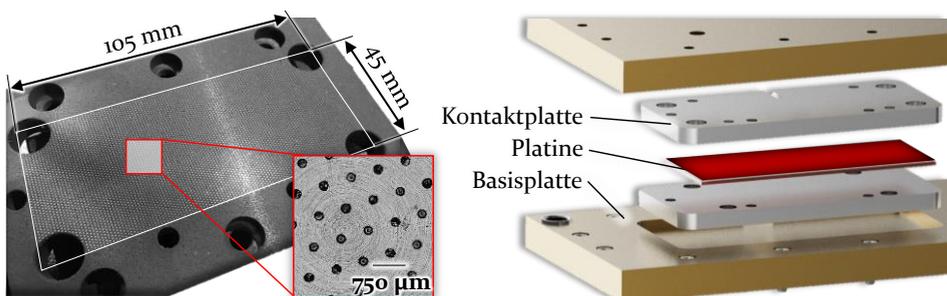


Bild 5: Modifizierte Kontaktplatte und Anlagenaufbau zur Untersuchung der thermischen Wechselwirkung im Presshärteprozess

Um weitere Erkenntnisse hinsichtlich der Auswirkung der Abkühlrate auf die resultierende Qualitätsgüte der Halbzeuge zu erarbeiten, werden die abgeschreckten Platinen im Hinblick auf deren mechanischen Eigenschaften analysiert. Im Zuge dessen wird die Probenhärte mit Hilfe der Universal Härteprüfmaschine Digi-Testor 930/250 der Firma Instron Wolpert quantifiziert. Anhand des Messsystems können Härteprüfungen nach Brinell, Rockwell und Vickers durchgeführt werden, wobei letzteres Prüfverfahren im Rahmen der Arbeit genutzt wird. Zur Untersuchung der Materialhärte wird ein normierter Prüfkörper unter elektromechanischer Kraftaufbringung in die Versuchsprobe gedrückt. Durch Vermessen der Eindringtiefe mit Hilfe einer Präzisionsoptik kann wiederum auf die Härte geschlossen werden [138]. Das Verfahren wird nach Norm DIN-EN-ISO 6507 absolviert. Anhand der ermittelten Härtewerte und des in Abschnitt 2.3.1 dargestellten kontinuierlichen ZTU-Schaubildes ist es möglich, phasenspezifische Veränderungen im Halbzeug zu detektieren, welche infolge der Wärmebehandlung und des Abschreckprozesses initiiert werden.

Ergänzend zu den Härtemessungen werden uniaxiale Zugversuche durchgeführt, um weitere Erkenntnisse hinsichtlich der mechanischen Halbzeugeigenschaften zu gewinnen. Im Zuge dessen werden aus den abgeschreckten Platinen jeweils A_{30} -Flachzugproben mit Hilfe eines CO_2 -Lasers (TruLaserCell 7020, Fa. Trumpf) entnommen. Die Sekundärproben werden anschließend im Prüfbereich um 0,1 mm spanend nachbearbeitet, um die Wärmeeinflusszone des Laserstrahls zu entfernen. Die verwendete Probengeometrie ist in Bild 6 dargestellt. Die Versuchsdurchführung erfolgt an der Universalprüfmaschine Zwick Z100 (Fa. Zwick Roell AG), die über eine maximale Prüfkraft von 100 kN verfügt. Zur Klemmung der Flachzugproben werden hydraulische Spannbacken eingesetzt, die jeweils einen Anpressdruck von 100 bar erzeugen. Während der Zugversuche wird die Formänderung der Proben anhand eines optischen Messsystems (Aramis, Fa. GOM mbH) erfasst. In Kombination mit den aufgezeichneten Kraft-Weg-Verläufen können die mechanischen Werkstoffkennwerte, wie Zugfestigkeit R_m , Streckgrenze $R_{p0,2}$ und Gleichmaßdehnung A_g , berechnet werden.

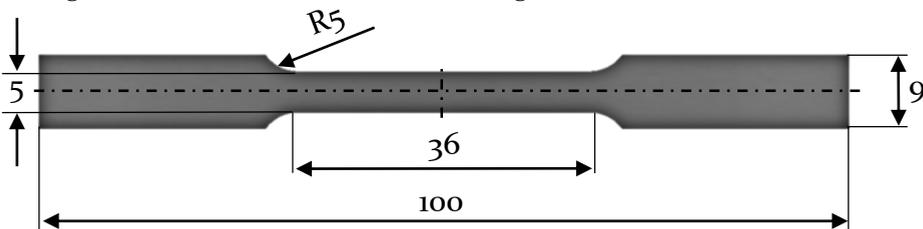


Bild 6: Geometrie der entnommenen Sekundärprobe zur Ermittlung der resultierenden mechanischen Eigenschaften der abgeschreckten Halbzeuge

4.4 Methoden zur Untersuchung des tribologischen Einsatzverhaltens

Zur Untersuchung des Reib- und Verschleißverhaltens konventioneller sowie laserimplantierter Werkzeugoberflächen werden sowohl simulationsbasierte als auch experimentelle Verfahren angewandt. Im nachfolgenden Abschnitt werden die im Rahmen der Arbeit eingesetzten Methoden zur Untersuchung des tribologischen Einsatzverhaltens vorgestellt.

4.4.1 Analyse des Reib- und Verschleißverhaltens im Laborversuch

Zur Bewertung des tribologischen Einsatzverhaltens werden zwei verschiedene Prüfstände eingesetzt, die am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie entworfen, konstruiert und qualifiziert worden sind. Durch die Verwendung beider Versuchseinrichtungen ist es möglich, sowohl grundlegende Untersuchungen hinsichtlich der Ursache-Wirkzusammenhänge durchzuführen, als auch vertiefende Analysen unter tribologisch hochbeanspruchten Kontaktbedingungen zu absolvieren.

Anlagen zur Quantifizierung des Reib- und Verschleißverhaltens

Die Analyse des Reib- und Verschleißverhaltens der Oberflächenmodifikationen erfolgt an einem von Wieland [42] konzipierten und Neubauer [75] weiterentwickelten Verschleißprüfstand, der an eine Stift-Scheibe Prüfeinrichtung angelehnt ist. Im Gegensatz zu herkömmlichen Versuchseinrichtungen dieser Bauart verfügt dieser Tribotester über ein offenes tribologisches System, wodurch ein kontinuierlicher Kontakt zwischen unverschlissenen Blechmaterial und der Werkzeugoberfläche ermöglicht wird. Der Prüfstand basiert auf einer Blechaufnahmevorrichtung, an dessen Gestell zwei Keramikheizelemente montiert sind, um eine isotherme Halbzugtemperatur von 800 °C während der Versuchsdurchführung zu gewährleisten. Analog dazu wird ein Industrieroboter (KR 200-3, Fa. Kuka) eingesetzt, an dessen Säulenführung eine gelagerte Einspannvorrichtung zur Fixierung eines zylindrischen Werkzeugpins ($l = 70 \text{ mm}$, $\varnothing = 22 \text{ mm}$) befestigt ist. Der Pin besitzt ein konisches Endstück, in das eine ebene Kontaktfläche mit einem Durchmesser von 5 mm geschliffen worden ist. Durch das Robotersystem ist die Möglichkeit gegeben, sowohl die Relativgeschwindigkeit als auch die Flächenpressung gezielt einzustellen, mit denen das Werkzeug über die homogen beheizte Werkstückoberfläche geführt werden soll. Die übertragene Normalkraft F_N des Roboters wird mit drei

Kraftmessdosen (Typ C9B, Fa. HBM) gemessen. Eine zusätzliche Kraftmessdose (Typ C9B, Fa. HBM) ist an der Frontplatte der Versuchsanlage montiert, um die Reibkraft F_R im Werkzeug-Werkstück-Kontakt zu quantifizieren. Mit Hilfe der aufgezeichneten Normal- und Reibkräfte kann die Reibzahl μ unter Verwendung des Coulomb'schen Reibgesetzes berechnet werden. Zu Beginn der Versuchsdurchführung wird die Kontaktfläche des eingespannten Werkzeugpins mit Hilfe einer Druckmessfolie (Prescale, Fa. Fujifilm) kontrolliert, um eine homogene, vollflächige Kraftübertragung in der Wirkfuge zu gewährleisten. Nachfolgend wird ein AlSi-beschichteter 22MnB5 Rohling ($l = 200 \text{ mm}$, $b = 30 \text{ mm}$, $d = 1,5 \text{ mm}$) für 360 s bei $930 \text{ }^\circ\text{C}$ in einem separaten Laborofen (Typ ME 17, Fa. Rhode) austenitiert und auf die vorbeheizte Blechauflage transferiert. Der anschließende Prüfzyklus gliedert sich in drei aufeinanderfolgende und wiederkehrende Prozessschritte, die in Bild 7 visualisiert sind. Einleitend wird der zylindrische Werkzeugpin über das zuvor austenisierte Halbzeug positioniert (I). Anschließend wird eine vordefinierte Normalkraft F_N auf die erwärmte Platine aufgebracht, während zeitgleich der Roboterarm entlang vorprogrammierter Bahnen über die Werkstückoberfläche verfahren wird (II). Abschließend hebt das Werkzeug von der Platine ab und wird simultan mittels Druckluft gekühlt, um die thermische Wechselbeanspruchung eines industriellen Presshärteprozesses zu imitieren (III).

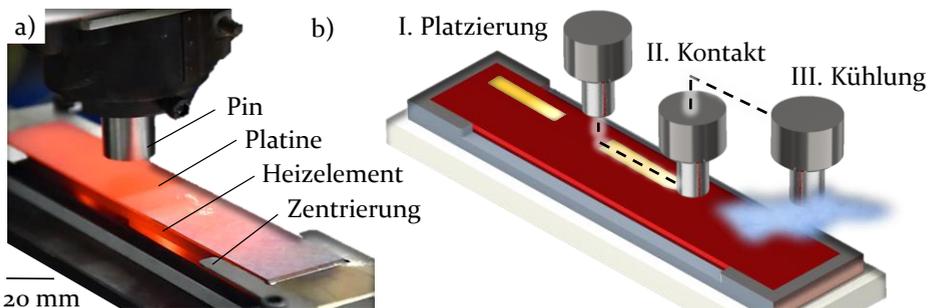


Bild 7: a) Tribotesterprüfstand und b) schematische Abbildung des Versuchsablaufes

Pro Werkzeugpin wird diese Prozessabfolge neun Mal mit einer Verschleißspurlänge von je 50 mm wiederholt. Jede Werkzeugmodifikation wird zur statistischen Absicherung mit drei Werkzeugpins und fünf Platinen getestet, was eine Gesamtverschleißstrecke von 6750 mm ergibt. Für die Versuche wird eine Vorschubgeschwindigkeit von 120 mm/s, eine Flächenpressung von 20 MPa und einer Halbzeugtemperatur von $800 \text{ }^\circ\text{C}$ gewählt, um industriennahe Presshärtebedingungen abzubilden. Aufgrund des kompakten Ablaufs und des effizienten Materialeinsatzes eignet sich die Versuchsanlage besonders, um vielzählige Werkzeugvarianten sowohl zeit-

als auch ressourceneffizient zu charakterisieren. Demgegenüber ist die Anlagenapparatur auf eine maximale Kontaktnormalspannung von 20 MPa limitiert, wodurch tribologisch hochbeanspruchte Kontaktbedingungen nicht hinreichend analysiert werden können.

Vor diesem Hintergrund wird als weiterer Verschleißprüfstand eine von Schwingenschlögl [73] konzipierte und im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelte Warmstreifenziehanlage genutzt, um hochbelastete Umformzonen in Kombination mit längeren Gleitwegen abbilden und analysieren zu können. Der Versuchsaufbau ist in mehreren Baugruppen unterteilt. Die Hauptkomponenten bilden die Normalkrafteinheit, die Abzugsvorrichtung sowie ein Linearschlitten. Ein Steuerungsrechner zur Vernetzung der einzelnen Module komplettiert die Prüfanlage. Die Normalkrafteinheit basiert auf einem elektrischen Zylinder (YJKP C135, Fa. Festo), der ein Kraftniveau von 1 - 4000 N mit einer Genauigkeitsabweichung von 0,25 % aufbringen kann. Daran angeschlossen ist eine piezoelektrische Kraftmessdose (Typ CHW-2, Fa. HBM) sowie eine Reibbacke, die eine ebene Kontaktfläche von 30 mm² aufweist. Anhand der Normalkrafteinheit können vordefinierte Normalkräfte F_N durch das vertikale Verfahren des Elektrozylinders übertragen werden. Die Abzugseinheit setzt sich aus einem Hydraulikzylinder, einer Kraftmessdose (Typ 9371 BU, Fa. Kister) und einer mechanischen Klemmvorrichtung zur Sicherung des Halbzeuges zusammen. Mit Hilfe dieser Baugruppe ist es möglich, eine horizontale Abzugsbewegung zu realisieren und auftretende Reibkräfte F_R zu ermitteln. Die Baugruppe des Linearschlittens besteht aus Isolierkeramiken, temperaturbeständigen Auflageplatten und mehreren Keramikheizelementen, die mit Hilfe zweier Heizgeräte der Firma HotSet betrieben werden. Durch das Modul wird eine gleichbleibende Platinentemperatur während der Versuchsdurchführung gewährleistet. Zur Durchführung der Warmstreifenziehversuche wird, analog zum Tribotesterprüfstand, der vollflächige Kontakt der Reibbacke anhand einer Druckessmessfolie (Prescale, Fa. Fujifilm) überprüft. Anschließend werden 22MnB5 Blechstreifen ($l = 550$ mm, $b = 50$ mm, $d = 1,5$ mm) in einem 930 °C heißen Laborofen vom Typ ME87/13 der Firma Rhode platziert. Nachdem die Verweilzeit von 360 s erreicht ist, wird die austenitisierte Platine auf den beheizten Linearschlitten der Warmstreifenziehanlage transferiert und mittels der Klemmvorrichtung der Abzugseinheit fixiert. Im Folgenden wird die Abkühlung des eingespannten Werkstoffes mit Hilfe zweier Thermokamerasysteme überwacht und aufgezeichnet. Sobald die Platinentemperatur den gewünschten Sollwert erreicht, wird das Anfahren der Normalkrafteinheit manuell aktiviert. Hierzu verfährt die Reibbacke mit einem vorprogrammierten Kraftprofil auf den temperierten

Blechstreifen (I). Im Anschluss daran wird der Schlitten mit einer definierten Relativgeschwindigkeit linear in horizontaler Richtung bewegt (II). Nach Erreichen des 190 mm langen Abzugsweges wird die Reibbacke sowie das Schlittengestell in seine Ausgangsposition zurückbefördert. In Bild 8 ist der Verschleißprüfstand und der Versuchsablauf dargestellt. Die auftretenden Prozesskräfte und Verfahrenswege werden mit Hilfe der integrierten Kraftmessdosen sowie eines inkrementellen Wegmesssystems aufgezeichnet, sodass über den gesamten Prozessablauf das Reibzahlenprofil mit Hilfe des Coulomb'schen Reibgesetzes berechnet werden kann. Zur statischen Absicherung wird jede Werkzeugkonfiguration mit fünf Reibbacken und fünf Platinen getestet, wodurch sich eine Gesamtverschleißstrecke von 4750 mm ergibt. Die Warmstreifenziehversuche werden mit einer Relativgeschwindigkeit von 60 mm/s, einer Flächenpressung von 20 MPa respektive 35 MPa und einer Halbzeugtemperatur von 800 °C durchgeführt, um industrienaher Presshärtebedingungen abzubilden.

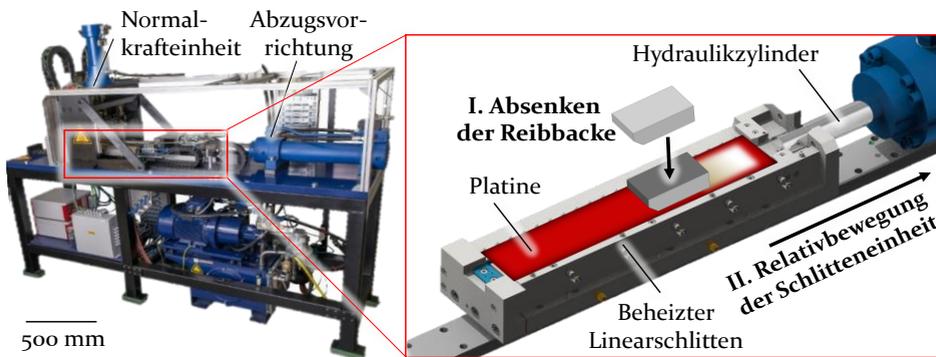


Bild 8: Warmstreifenziehanlage und schematische Abbildung des Versuchsablaufes

Modifikation der Werkzeugeinsätze

Ein Vorteil des Laserimplantationsverfahrens stellt das hohe Maß an Flexibilität dar, welches es ermöglicht, Geometrie und Abstand der Implantate innerhalb definierter Muster zu gradieren. Hierdurch steht eine hohe Bandbreite an möglichen Varianten zur Verfügung, die jeweils die thermischen und tribologischen Wechselwirkungen in der Wirkfuge unterschiedlich begünstigen könnten. Zur systematischen Analyse der Ursache-Wirkbeziehungen werden daher ausgewählte Implantate in ihrer Geometrie und Distanz variiert, zu Oberflächenstrukturen kombiniert und auf die Werkzeugeinsätze appliziert. In diesem Zusammenhang werden drei verschiedene Implantathöhen h_i von $\sim 10 \mu\text{m}$, $\sim 20 \mu\text{m}$ und $\sim 30 \mu\text{m}$ (Konfig. A - C) gewählt. Die Auswahl basiert auf Untersuchungen von Spranger et al. [124],

welche belegen, dass diese Implantatkonfigurationen sich mit hoher Prozesssicherheit und Reproduzierbarkeit generieren lassen. Die Implantate werden in hexagonalen Mustern angeordnet, deren jeweiligen Distanzen d_i zueinander mit $350\ \mu\text{m}$, $550\ \mu\text{m}$ und $750\ \mu\text{m}$ (Konfig. 1 - 3) variieren. Inklusive des unmodifizierten Referenzwerkzeuges (Konfig. R) ergeben sich folglich zehn unterschiedliche Werkzeugkonfigurationen für die Versuchsdurchführungen, welche in Bild 9 aufgezeigt werden.

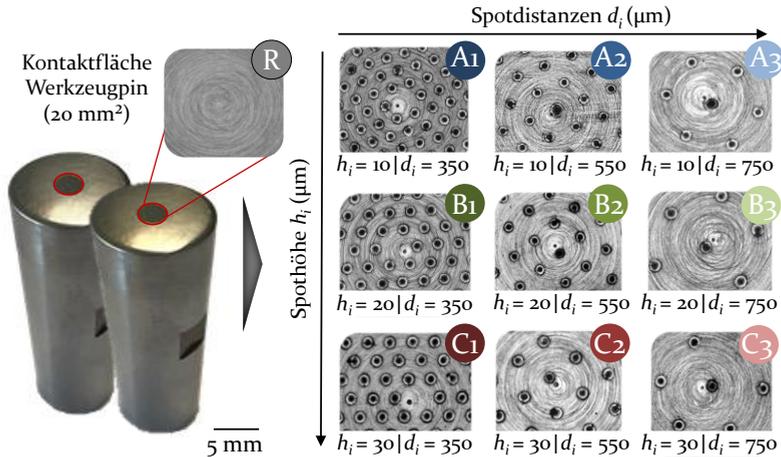


Bild 9: Übersicht der verwendeten Werkzeugkonfigurationen zur Untersuchung des thermischen und tribologischen Einsatzverhaltens

Probenpräparation und Verschleißanalyse

Zur Evaluation der Verschleißentwicklung werden die Kontaktflächen der Werkzeugeinsätze mit Hilfe optischer Messverfahren analysiert. Das Verfahrensprinzip besteht darin, die Topographien der unbenutzten und verschlissenen Werkzeugeinsätze computerbasiert zu überlagern, wodurch das Verschleißvolumen quantifiziert werden kann. Im Zuge dessen werden die Topographien der Werkzeuge sowohl vor als auch nach den tribologischen Untersuchungen mit Hilfe eines Laser-Scanning Mikroskops (Keyence VK-X200, Fa. Keyence) optisch vermessen. Anschließend werden die aufgenommenen Bilder mit Hilfe der Software VK Analyse-Modul (Fa. Keyence) überlappt, wodurch die Volumendifferenz der beiden Kontaktzonen ermittelt werden kann. Für eine präzise Berechnung des Verschleißes muss jedoch eine exakte horizontale und vertikale Ausrichtung der beiden Kontaktflächen gewährleistet sein. Im Zuge dessen werden vor der Versuchsdurchführung vier Bohrungen in jedem Werkzeugeinsatz mikroeroziert (SX-200-HPM, Fa. Sarix), um Referenzebenen für die optische Vergleichsmessung zu generieren. Die Vertiefungen ($d = 100\ \mu\text{m}$, $\varnothing = 30\ \mu\text{m}$)

sind außerhalb der Kontaktfläche platziert, um Beschädigungen und adhäsive Verschleißansammlungen zu vermeiden. Anhand der integrierten Bohrungen wird eine präzise Ausrichtung der beiden Werkzeugkontaktflächen gewährleistet, was wiederum eine exakte Berechnung des Oberflächenverschleißes ermöglicht. Bild 10 veranschaulicht die Vorgehensweise zur Quantifizierung der Verschleißvolumina.

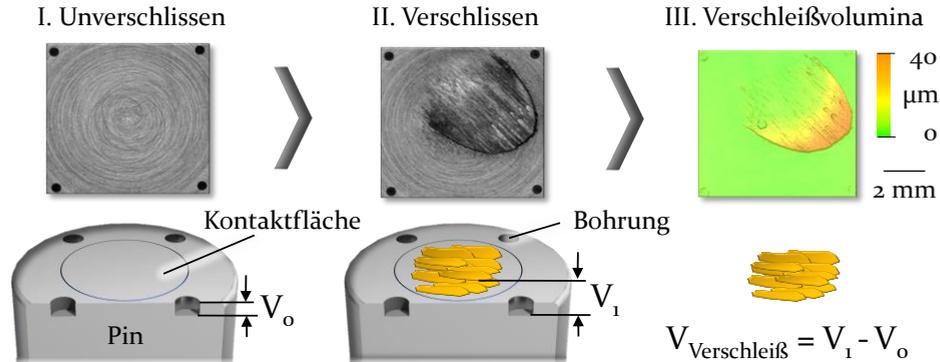


Bild 10: Quantifizierung des Werkzeugverschleißes mittels optischer Vergleichsmessungen

4.4.2 Finite-Elemente-Methode

Die Finite-Elemente-Methode basiert auf dem Leitgedanken, technische Verfahrensabläufe mit Hilfe von Differenzialgleichungssystemen abzubilden. Der Aufbau und die Berechnung numerischer Simulationsmodelle erfolgt daher stets nach demselben Prinzip. Für jeden Simulationsprozess wird ein CAD-Modell des zu untersuchenden Systems benötigt, welches über eine Schnittstelle in das FEM-Programm importiert wird. Im Pre-Processor wird anschließend die Idealisierung und Diskretisierung des Modells in Volumen- oder Schalenelemente vorgenommen. Ferner werden Prozesskennwerte wie Lasten, Lagerungen und thermo-mechanische Randbedingungen festgelegt [139]. Insbesondere in der Warmblechumformung müssen mechanische sowie thermische Prozesskennwerte hinterlegt werden, um das temperaturabhängige Umformverhalten des Bor-Mangan-Stahl 22MnB5 realitätsnah abzubilden [61]. Im nachfolgenden Solverprozess werden die implementierten Parameter in Differenzialgleichungssysteme abgeleitet und berechnet. Die Ergebnisse werden mit dem Post-Processor visualisiert und durch experimentelle Versuche validiert.

Im Rahmen der Arbeit werden zwei verschiedene FE-Programme verwendet, deren jeweiliger Einsatz sich nach den softwarespezifischen Kernkompetenzen richtet. Zur Untersuchung der tribologischen Wechselwirkung

der laserimplantierten Oberflächenmodifikationen wird das Simulationsprogramm Simufact.Forming 16.0 (Fa. Simufact Engineering GmbH) eingesetzt. Das Programm wird in der metallverarbeitenden Industrie zur Auslegung von Fertigungsprozesse genutzt. Das Softwareprogramm prädestiniert sich zudem, um Prozessabläufe im Mikrometerbereich mit hoher Lösungsgüte zu berechnen [140].

Vor diesem Hintergrund ist die Zielsetzung, das Einsatzverhalten unterschiedlicher Geometrien und Abstände der Mikrostrukturen anhand numerischer Untersuchungen zu analysieren, um ein grundlegendes Verständnis hinsichtlich der tribologischen Wechselwirkungen im Werkzeug-Werkstück-Kontakt zu schaffen. Im Zuge dessen wird ein auf mikroskopischer Ebene modellierter Kontaktbereich aufgebaut, welcher aus einem Grundkörper sowie einem Gegenkörper mit integrierten Mikrostrukturen besteht, der mit einer definierten Kontaktnormalkraft beansprucht und simultan mit einer horizontalen Relativbewegung verfahren wird. Für die numerischen Analysen wird eine Relativgeschwindigkeit von 120 mm/s sowie eine Flächenpressung von 20 MPa festgelegt. Ferner wird dem Grundkörper eine Temperatur von 800 °C sowie dem Gegenkörper eine Temperatur von 20 °C zugewiesen, um industriennahe Presshärtebedingungen zu imitieren. Zur Festlegung der Materialeigenschaften der Implantate, welche zu ~ 35 % aus TiB₂ und ~ 65 % aus dem Substratmaterial 1.2367 bestehen [124], werden die von Kim et al. [141] beschriebenen Mischregelansätze angewandt. Darüber hinaus werden aus der Datenbank des Softwareprogrammes die temperatur- und dehnratenabhängigen Materialkennwerte des Bor-Mangan-Stahls 22MnB5 ausgewählt und dem Grundkörper zugewiesen, um eine realitätsnahe Abbildung des plastischen und elastischen Fließverhaltens zu erzielen.

Als Werkzeugkonfigurationen werden Implantathöhen von 10 µm und 30 µm in Kombination mit Spotabstände von 350 µm und 750 µm verwendet. Hierdurch werden die maximalen und minimalen Spothöhen und -abstände der experimentell untersuchten Werkzeugkonfigurationen adressiert, anhand dessen funktionale Beziehungen hinsichtlich der Wirkweisen differierender Implantatkonfigurationen gezielt abgeleitet werden können. Für alle numerischen Berechnungen wird die presshärte typische Reibzahl von 0,45 konfiguriert, um lediglich den Einfluss der variierenden Implantatgeometrien und -abstände zu analysieren. Zur Diskretisierung der Oberflächenmodifikationen ist eine Elementvernetzung im Mikrometerbereich ($l_{min} \sim 10 \mu\text{m}$) erforderlich. Aufgrund der hohen Anzahl an generierten Elementen können im Vergleich zur experimentellen Untersuchung nur wenige Implantatanzahlen ($n \leq 14$) abgebildet und berechnet werden. Im Zuge

dessen wird ein vereinfachter Werkzeugausschnitt von 2 mm x 2 mm genutzt, um einen guten Kompromiss zwischen erforderlicher Berechnungsdauer und Ergebnisqualität zu erzielen. Bild 11 zeigt den Simulationsaufbau sowie die numerisch untersuchten Spotvarianten, welche auf Grundlage realer Implantationsstrukturen modelliert worden sind.

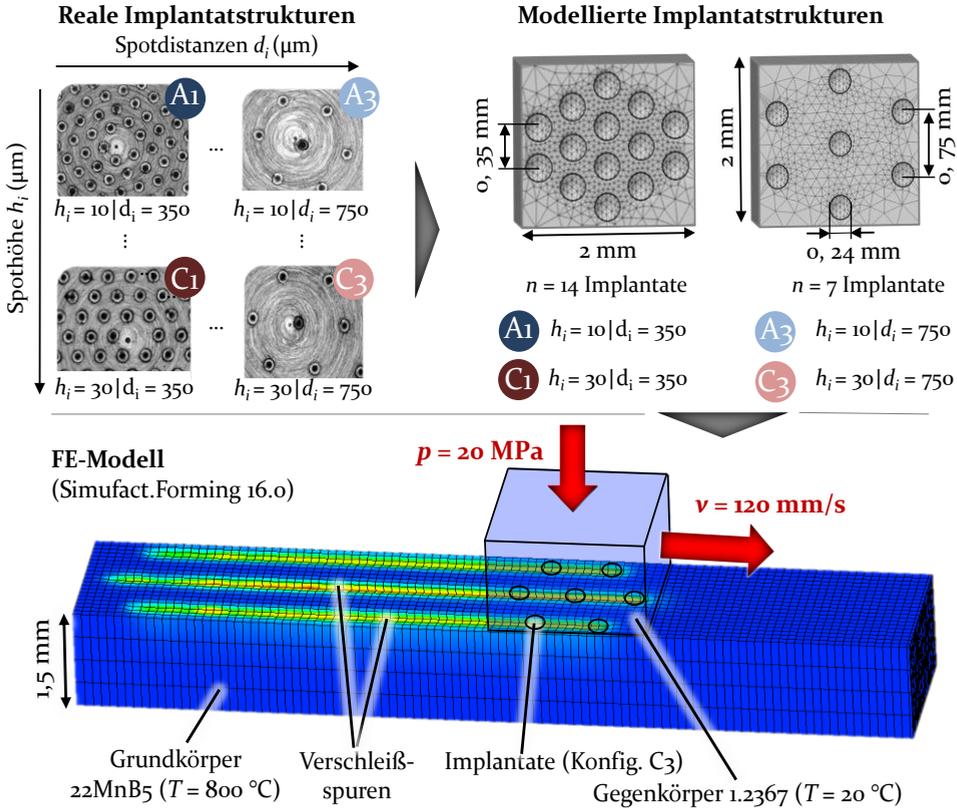


Bild 11: Simulationsmodell und eingesetzte Werkzeugkonfigurationen zur Untersuchung der tribologischen Wechselwirkungen im Werkzeug-Werkstück-Kontakt

Die Validierung des Simulationsmodells erfolgte, indem das thermische Verhalten der modifizierten Werkzeugoberflächen sowie dessen Einfluss auf die resultierenden mechanischen Bauteileigenschaften sowohl numerisch berechnet als auch experimentell anhand von Abschreckversuchen und Härtemessungen ermittelt worden sind (Abschnitt 6.1.4). Durch die Gegenüberstellung der jeweiligen Ergebnisgrößen konnte die Prognosefähigkeit des FE-Modells verifiziert werden.

Neben Simufact.Forming 16.0 wird als weitere Software AutoForm Forming R8 (Fa. AutoForm Engineering GmbH) verwendet. Das FE-Programm ist in

der Automobilindustrie weit verbreitet, um blechumformende Prozessabläufe anforderungsgerecht auszulegen. Das Simulationsprogramm wird im Rahmen der Arbeit genutzt, um das Beanspruchungskollektiv bei der Herstellung von pressgehärteten Rechtecknäpfe numerisch zu analysieren. Der Aufbau sowie die Validierung des erstellten Simulationsmodells werden in Abschnitt 5.1 eingehend erläutert.

4.4.3 Generierung von Demonstratorbauteilen

Die numerisch-experimentell eruierten Wirkzusammenhänge werden durch das Presshärten von Demonstratorbauteilen verifiziert. In diesem Zusammenhang werden Rechtecknapfzugversuche durchgeführt, um sowohl die anforderungsgerechte Auslegung und Platzierung der Oberflächenmodifikationen zu erforschen, als auch die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse zu qualifizieren.

Verwendete Pressen- und Werkzeugsysteme

Die Rechtecknapfzugversuche werden mit Hilfe der hydraulischen Tiefziehpresse TSP100So (Fa. Lasco Umformtechnik) absolviert, die über eine maximale Pressenkraft von 1000 kN verfügt. Die Führung des Ober- und Unterwerkzeuges ist mittels einem Viersäulenführungsgestell sichergestellt. Der 25 mm hohe Stempel des Napfzugwerkzeuges besitzt eine Grundfläche von 96 mm x 56 mm, einen Eckradius von 16 mm und einen Kantenradius von 5 mm. Die Matrize ist in jeweils zwei Radial- und Linearsegmente unterteilt, um eine anforderungsgerechte Modifikation und Verschleißanalyse zu ermöglichen. Der Innendurchmesser der Matrize beträgt 100 mm x 60 mm, wobei die Ecken einen Radius von 18 mm und die Einlaufkanten einen Radius von 10 mm aufweisen. Zur Herstellung der Rechtecknäpfe wird zunächst ein AlSi-beschichteter 22MnB5 Rohling in einem Laborofen (Typ ME17, Fa. Rhode) für 360 s bei 930 °C aufgeheizt. Die vollständig austenitisierte Platine wird anschließend im Werkzeug auf gefederte Distanzstifte platziert, um die Gefahr einer fehlerhaften Positionierung und vorzeitigen Abkühlung zu minimieren. Analog dazu wird ein distanzierter Niederhalter mit einer Höhe von 3 mm genutzt, um eine vorzeitige Auskühlung und Phasenumwandlung im Flansch zu unterbinden. Für die Versuche wird die maximale Pressengeschwindigkeit von 60 mm/s eingestellt, wobei der Stößel weggeregelt durch Festlegen des oberen und unteren Totpunkts verfährt. Insgesamt werden pro Werkzeugmodifikation 60 Näpfe abgepresst. Bild 12 zeigt die Matrize, den Platinenzuschnitt und den resultierenden Rechtecknapf.

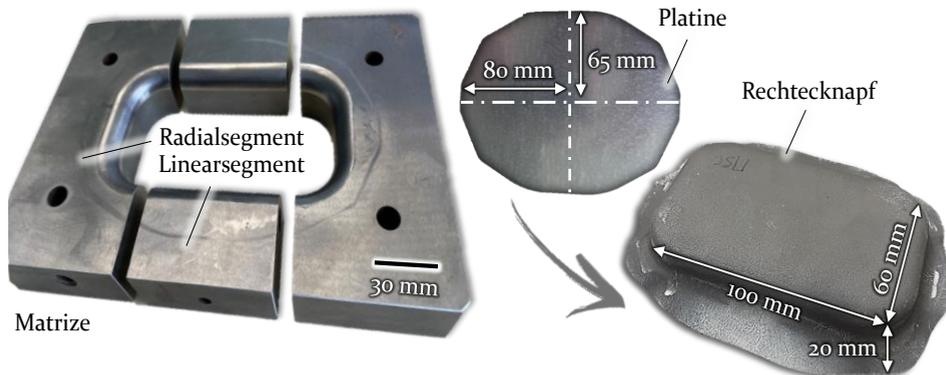


Bild 12: Matrizeinsätze, Platinenzuschnitt und resultierende Rechtecknapfgeometrie

Evaluation des tribologischen und thermischen Einsatzverhaltens

Eine direkte Reibzahlermittlung aus den Umformversuchen ist aufgrund lokal unterschiedlicher Kontaktbedingungen und Spannungszustände nicht möglich. Im Zuge dessen werden die maximal erreichten Stempelkräfte pro Hub verglichen, um Rückschlüsse hinsichtlich der vorliegenden Reibbedingungen abzuleiten. Im Allgemeinen führen Verschleißanhaftungen oder Furchungen auf der Werkzeug- und Werkstückoberfläche zu einem zunehmenden Verhaken der interagierenden Rauheitsspitzen, wodurch höhere Umformkräfte während der Formgebung benötigt werden [71]. Durch den Vergleich der Stempelkräfte kann daher die reibungs- und verschleißreduzierende Wirkung der Oberflächenmodifikationen evaluiert werden. Um weitere Effekte hinsichtlich einer möglichen Steigerung der Bauteilqualität und Verbesserung des Umformverhaltens durch laserimplantierte Oberflächen nachzuweisen, wird die Blechdickenverteilung der abgepressten Demonstratoren mit Hilfe des topometrischen 3D-Scanners ATOS Core 300 der Firma GOM mbH erfasst. Durch die Digitalisierung der Werkstückgeometrie können ziehkritische Bauteilzonen visualisiert und verglichen werden. Analog dazu werden optische Messungen an den Werkzeugeinsätzen vorgenommen, um weitere Erkenntnisse hinsichtlich der tribologischen Wirkzusammenhänge zu gewinnen. Zur Untersuchung des thermischen Einflusses der Werkzeugmodifikationen wird die Platinentemperatur sowohl vor als auch nach dem Umformprozess analysiert. Hierzu wird eine Thermografiekamera (SC7600, Fa. FLIR) neben dem Pressensystem positioniert, um die Wärmeverteilung auf der Halbzeugtopographie zu erfassen. Zur Kalibrierung des Kamerasystems werden Referenzversuchen mit Thermoelementen absolviert. Durch den Abgleich des berührungslosen und taktilen Messsystems war es möglich, den Emissionskoeffizienten (0,86) des Pyrometers zu bestimmen.

5 Ermittlung von Anforderungen an die Oberflächenmodifikationen für das Presshärten

Für eine zielorientierte Modifikation der Presshärtewerkzeuge müssen zunächst grundlegende Anforderungen an die Oberflächenmodifikation ermittelt werden. Vor diesem Hintergrund werden durch eine FE-Analyse tribologisch hochbeanspruchte Werkzeugbereiche eines Rechtecknapfdemonstrators simulativ detektiert, um fundierte Kenntnisse hinsichtlich dem in der Wirkfuge vorliegenden Belastungskollektiv zu erlangen. Anhand der erarbeiteten Wissensbasis können gezielt Maßnahmen abgeleitet werden, die für eine beanspruchungsgerechte Applikation der Oberflächenmodifikationen erfordert werden. Aus diesem Grund erfolgt im Rahmen des nachfolgenden Kapitels die numerische Abbildung, experimentelle Validierung und thermo-mechanische Analyse eines Rechtecknapfzugprozesses, um umformkritische Werkzeugbereiche zu lokalisieren und vorliegende Temperaturspitzen und Flächenpressungen zu quantifizieren. Anhand der generierten Kenntnisse werden abschließend Anforderungsprofile an die Implantatcharakteristika definiert.

5.1 Numerische Untersuchung des Beanspruchungskollektivs

Zur Identifikation reibungs- und verschleißkritischer Werkzeugbereiche wird ein thermo-mechanisch gekoppeltes Modell eines Rechtecknapfzugprozesses in AutoForm Forming R8 erstellt. Das FE-Modell setzt sich aus den Komponenten Matrize, Stempel, Distanzring, Niederhalter und Platine zusammen. Der Modellaufbau ist in Bild 13 visualisiert.

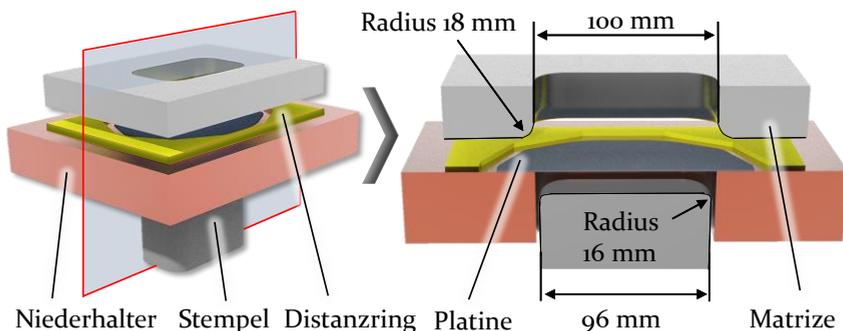
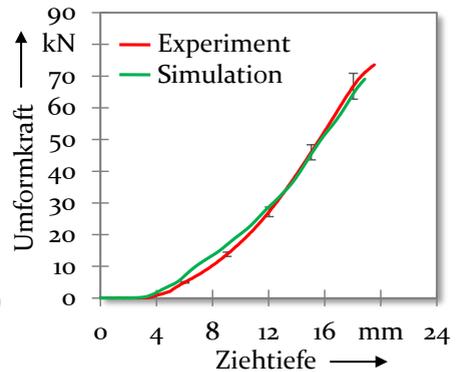


Bild 13: Gesamt- und Schnittansicht des Modellaufbaus

Der Ziehspalt zwischen Stempel und Matrize wird gemäß [72] berechnet und auf 2 mm festgesetzt, um weder Faltenbildung noch Bodenreißer zu erhalten. Die Höhe des Distanzringes ist auf 3 mm festgelegt, um eine vorzeitige Auskühlung und Verfestigung des Flanschbereiches der 1,5 mm dicken Platine zu unterbinden. Die Diskretisierung der Bauteile erfolgt anhand von Schalenelemente, deren initiale Größe 4 mm beträgt. Alle Werkzeugkomponenten werden als Starrkörper definiert, da eine elastische Deformation im realen Umformprozess vernachlässigbar ist. Als Werkzeugwerkstoff wird der Warmarbeitsstahl 1.2367 verwendet und dessen materialspezifischen Kenngrößen dem Modell zugewiesen. Für das Halbzeug werden aus der integrierten Softwaredatenbank die temperatur- und dehnratenabhängigen Materialkennwerte des Bor-Mangan-Stahls 22MnB5 (1.5528) hinterlegt, um eine realitätsnahe Abbildung des elastischen und plastischen Fließverhalten zu erzielen. Die Reibzahl wird auf 0,45 festgelegt, da dieser Kennwert dem industriellen Standard von Presshärteprozessen entspricht [142]. Die Berechnung der Simulation erfolgte anhand des programminternen Solvers.

Da die Finite-Elemente-Methode eine mit Fehler behaftete Näherungslösung darstellt, ist vor dessen Analyse eine Plausibilitätskontrolle notwendig. In diesem Zusammenhang wird geprüft, ob die prognostizierte Qualitätsgüte vorliegt und das zu erwartende Umformverhalten eintritt. Zur Validierung der FE-Simulation werden Realversuche mit identischem Werkzeugaufbau an der hydraulischen Tiefziehpresse TSP 100So (Fa. Lasco Umformtechnik) durchgeführt. Für die experimentellen Analysen wird eine Ziehtiefe von 20 mm gewählt. Ferner wird die maximale Stoßelgeschwindigkeit der Anlage (60 mm/s) eingestellt, da im Presshärteprozess hohe Umformgeschwindigkeiten aufgrund der temperaturabhängigen Phasenumwandlung erfordert werden [61]. Die Pressenparameter korrespondieren mit den numerisch hinterlegten Prozesskennwerten. Zur Validierung des thermo-mechanischen Simulationsmodells werden drei Rechteckknöpfe pressgehärtet.

Die Überprüfung der Qualitätsgüte der Simulationsergebnisse erfolgt anhand zweier Auswertemethoden. Da im Presshärteprozess sowohl die thermischen als auch die mechanischen Wechselwirkungen die resultierende Bauteilqualität beeinflussen, werden die Temperaturverteilungen sowie die Kraft-Weg-Verläufe der umgeformten Rechteckknöpfe bewertet. In Bild 14 sind die experimentell und simulativ gewonnenen Ergebnisse gegenübergestellt. Zum Abgleich der thermischen Kennwerte wird die Thermokamera (Typ SC7600, Fa. FLIR) verwendet, dessen Emissionsvermögen vorab mit dem Koeffizienten 0,86 kalibriert worden ist.

ExperimentBoden: $636 \pm 21^\circ\text{C}$ Radius: $417 \pm 8^\circ\text{C}$ Zarge: $571 \pm 10^\circ\text{C}$ Flansch: $593 \pm 9^\circ\text{C}$ **Simulation**Boden: 645°C Radius: 418°C Zarge: 552°C Flansch: 555°C 

AutoForm Forming R8	Elementgröße = 4 mm		
$V_{\text{Stößel}} = 60 \text{ mm/s}$	$T_\gamma = 930^\circ\text{C}$	$t_\gamma = 360 \text{ s}$	$n = 3$

Bild 14: Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Verläufe und Temperaturprofile unmittelbar nach Öffnung der beiden Werkzeughälften

Die numerischen und experimentellen Ergebnisse zeigen, dass unmittelbar nach dem Öffnen der beiden Werkzeughälften unterschiedliche Temperaturverteilungen am Bauteil vorliegen, die wiederum auf die lokal und zeitlich variierenden Kontaktbedingungen zwischen Werkzeug und Werkstück zurückgeführt werden können. Die höchsten Temperaturen liegen am Boden des Rechtecknapfes vor. Da zu Beginn der Umformung das austenitisierte Halbzeug lediglich an den Stempel- und Matrizenradien anliegt, ergibt sich eine geringfügige Aufwölbung im Zentrum der Platine. Der Wärmetransport im Bodenbereich erfolgt ausschließlich mittels Wärmestrahlung und Konvektion, infolgedessen nur niedrige Abkühlraten erzielt werden. Anhand der Thermografiekamera wird im Napfboden eine Temperatur von $\sim 636^\circ\text{C}$ gemessen, wohingegen in der Simulation eine geringfügig höhere Temperatur von 645°C berechnet wird. Die größte Abkühlung von $\sim 417^\circ\text{C}$ wird in den Eckradien des Bauteils detektiert, da in diesen Bereichen ein vollflächiger Werkzeug-Werkstück-Kontakt während des gesamten Umformvorganges vorliegt. Hierdurch wird dem Bauteil thermische Energie mittels Wärmeleitung entzogen, wodurch eine starke Abkühlung erfolgt. Bei der numerischen Simulation wird dieser Bereich lediglich um 1°C überschätzt. In der Zarge des Rechtecknapfes wird mit Hilfe der Thermokamera eine Temperatur von $\sim 571^\circ\text{C}$ und bei der Simulation eine Temperatur von 552°C ermittelt. Ähnliche Temperaturen liegen im Flansch des Bauteiles vor. Mit Hilfe des Pyrometers werden Temperaturen von $\sim 593^\circ\text{C}$ gemessen, während in der Umformsimulation dieser Bereich mit 38°C unterschätzt wird. Bei den experimentellen Versuchen werden

gefederte Distanzstifte zur Positionierung der Platine verwendet, wohingegen in der Simulation die Platine aufgrund der Idealisierung des Modellaufbaus direkt auf dem Niederhalter aufliegt. Durch den direkten Kontakt zwischen Werkstück und Niederhalter wird im Flansch die Wärmeenergie schneller entzogen, wodurch höhere Abkühlraten in der numerischen Simulation berechnet werden. Der Vergleich der Temperaturverteilungen am virtuell und real umgeformten Rechtecknapf zeigt, dass eine maximale Abweichung von $\sim 6\%$ vorliegt. Aufgrund der verhältnismäßig niedrigen Temperaturdifferenzen kann eine hinreichende Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation angenommen werden.

Zur Überprüfung der mechanischen Eigenschaften werden die ermittelten Umformkräfte gegenübergestellt. Mit fortschreitender Ziehtiefe steigen die Stempelkräfte simultan an, da sowohl die Reibung in der Wirkfuge als auch die Spannungen im Bauteil mit zunehmender Umformung erhöht werden. Ferner ergeben sich aufgrund der 3 mm hohen Distanzierung leichte Falten im Flanschbereich, die während der Relativbewegung lokale Verhakungen mit steigenden Prozesskräften verursachen. Sobald der untere Totpunkt erreicht und der Umformprozess abgeschlossen ist, verfährt der Stempel wieder in seine Ausgangsposition zurück. Der Vergleich der realen und virtuellen Kraft-Weg-Verläufe zeigt, dass eine hinreichend genaue Abbildung der beiden Kurvenprofile vorliegt. In der numerischen Simulation wird die Maximalkraft F_{max} von 67 kN um 7 % unterschätzt. Ursachen für die Abweichungen können eine nicht präzise Positionierung der Platine, ein nicht exakt zutreffendes Materialmodell oder differierende Halbzeugtemperaturen zu Beginn der experimentellen respektive numerischen Analyse sein, was wiederum das Fließverhalten des Werkstoffes beeinflusst.

Zusammenfassend lassen sich mit dem aufgebauten Simulationsmodell die thermo-mechanischen Wechselwirkungen im Presshärteprozess realitätsnah abbilden. Hierdurch sind die Voraussetzungen geschaffen, um das Beanspruchungskollektiv am Werkzeug umfassend zu analysieren.

5.2 Ableiten von Anforderungsprofile für die Werkzeugmodifikation

Im folgenden Abschnitt werden umformkritische Werkzeugbereiche lokalisiert und deren thermo-mechanischen Belastungsspitzen quantifiziert. Anhand der generierten Wissensbasis lassen sich die zu modifizierende Werkzeugbereiche festlegen, in denen zur Begünstigung des Stoffflusses niedrige respektive hohe Reibung sowie höhere oder niedrigerer Wärme-

übergänge erfordert werden. Darüber hinaus können auf Basis des ermittelten Beanspruchungskollektivs, prozessrelevante Parameter für die nachfolgenden Untersuchungen abgeleitet werden.

Analyse der thermischen Wechselwirkungen vor Umformbeginn

Beim Presshärten hat die thermische Prozessführung einen maßgeblichen Einfluss auf das Formgebungsvermögen der Halbzeuge. Nach Abschluss des Austenitisierungsprozesses wird ein schneller Platinentransfer mit geringen Temperaturverlusten angestrebt, um eine hohe Duktilität und niedrige Fließspannungen zu gewährleisten. Vor diesem Hintergrund wird die Platinentemperatur vor Umformbeginn analysiert, um weiterführende Erkenntnisse hinsichtlich der Temperaturhistorie und folglich dem Formgebungsvermögen des Halbzeuges zu erlangen. Bild 15 zeigt die gemessenen Temperaturen des Bor-Mangan-Stahl nach der Positionierung im Werkzeug sowie unmittelbar vor Verschluss der beiden Werkzeughälften.

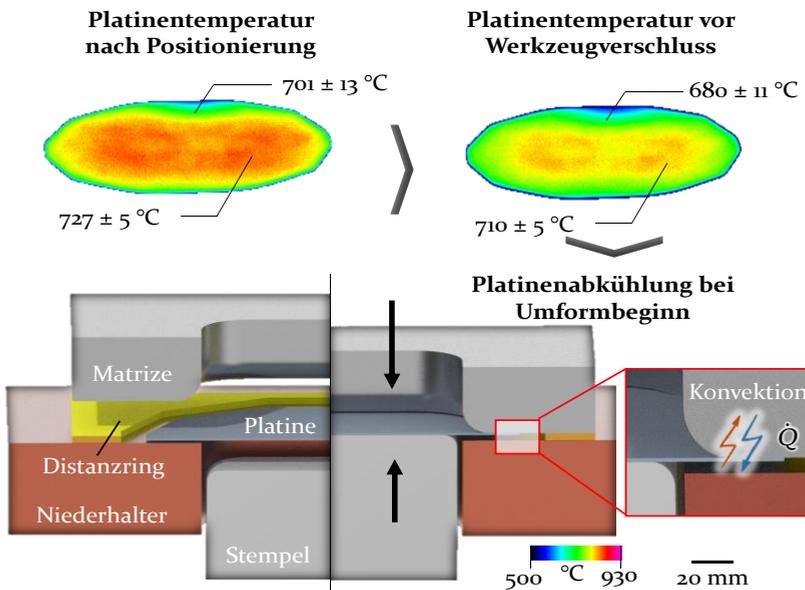


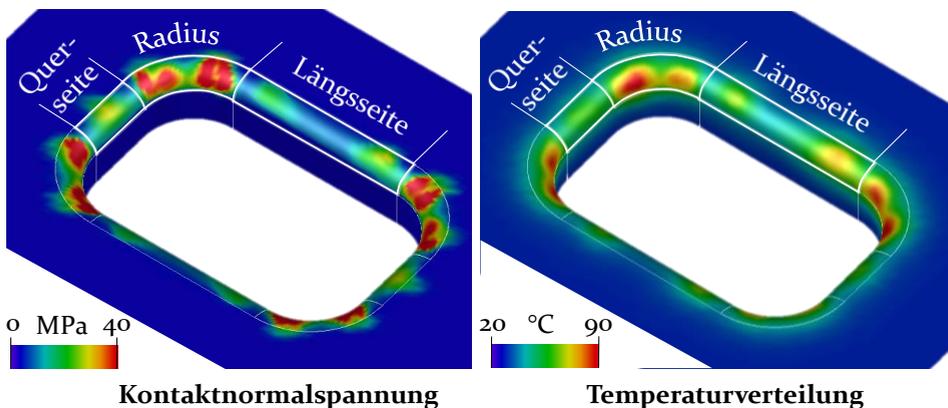
Bild 15: Temperaturhistorie der Bor-Mangan-Platine vor Beginn des Umformprozesses

Nach der Ofenentnahme ($T_y = 930 \text{ °C}$) und Platzierung der Platine beträgt die Temperatur im Zentrum des Halbzeuges $\sim 727 \text{ °C}$, wohingegen der Flanschbereich ein niedrigeres Temperaturniveau von $\sim 701 \text{ °C}$ aufweist. Erneute Temperaturmessungen unmittelbar vor Werkzeugverschluss belegen weitere Temperaturverluste im Blechzentrum ($\sim 710 \text{ °C}$) und Flansch ($\sim 680 \text{ °C}$). Die Pyrometermessungen zeigen, dass trotz geringer Transferzeiten (6 - 8 s) vor allem hohe Wärmeverluste im Flansch entstehen und somit inhomogene Temperatur- und Festigkeitsverteilungen am Halbzeug

vorliegen. Dieser Abkühlungseffekt wird unmittelbar zu Beginn des Umformprozesses verstärkt, da durch das Verfahren des Stößels die Platine zunächst gegen die Stirnfläche der Matrize gedrückt wird, infolgedessen ein direkter metallischer Kontakt entsteht. Aufgrund dominierender Wärmeleitungseffekte wird eine noch schnellere Abkühlung im Flansch hervorgerufen, die eine zunehmende Festigkeitssteigerung zur Folge hat. Durch die Verfestigung wird das Nachfließen des Flanschbereiches während der Stößelbewegung gehemmt und folglich eine Ausdünnung der heißeren und weicheren Zarge bewirkt. Hierdurch ergibt sich die Gefahr von Einschnürungen und Rissen, die zu einem vorzeitigen Bauteilversagen führen können [24].

Analyse der Flächenpressungsverteilung und thermischen Wechselwirkung während der Umformung

Zur Identifizierung umformkritischer Kontaktbereiche werden die Werkzeugsegmente ermittelt, die höchsten Flächenpressungen und thermischen Belastungen unterliegen. Aus der Literatur ist bekannt, dass adhäsiver Werkzeugverschleiß vor allem in Bereichen mit höchsten Normallastverteilungen [143] und thermischer Beanspruchung [42] in Erscheinung tritt. Bei den Rechtecknapfzugversuchen sind insbesondere an der Matrizenkrümmung hohe tribologische Beanspruchungen zu erwarten, da durch die langen Gleitbewegung des Halbzeuges das Reib-, Verschleiß- und Abkühlverhalten in der Wirkfuge maßgeblich beeinflusst wird. Im nachfolgenden Bild 16 sind die simulativ ermittelten Flächenpressungen und Temperaturverläufe der Matrizeneinheit dargestellt.



Rechtecknapfmatrize	AutoForm Forming R8	Elementgröße = 4 mm	_____
$V_{Stößel} = 60 \text{ mm/s}$	$h_{Napf} = 20 \text{ mm}$	$\mu = 0,45$	22MnB5 $s_o = 1,5 \text{ mm}$ 25 mm

Bild 16: Simulativ ermittelte Kontaktnormalspannung und Temperaturverteilung an den Flächensegmenten der Matrizeneinheit

Zur Analyse des thermischen und mechanischen Belastungskollektivs wird der symmetrische Matrizenaufbau in drei Flächensegmente untergliedert, die nachfolgend als Querseite, Radius und Längsseite bezeichnet werden. Mit fortschreitendem Platineneinzug steigen die Kontaktkräfte im gesamten Matrizenlaufbereich aufgrund der verstärkten Fließbehinderung des Blechhalbzeuges sukzessive an. Nach vollständiger Ausformung des Rechtecknapfes zeigt sich, dass die Flächenpressungen an den Matrizenkrümmungen von der Längs- über die Querseite hin zum Radius zunehmen. Die niedrigsten Kontaktdrücke von ~ 16 MPa liegen an der Längsseite der Matrize vor, da dieser Bereich während der Umformoperation ausschließlich durch Zugspannungen beansprucht wird. Dieser Spannungszustand resultiert daraus, dass das Werkstück lediglich um den Einlaufradius gebogen wird. In diesem Bauteilbereich werden die Prozesskräfte vorrangig vom Kraftanteil der Biegung und Reibung beeinflusst. An der Querseite der Rechtecknapfmatrize werden Flächenpressungen von ~ 22 MPa verzeichnet. Dieser Werkzeugbereich ist analog zur Längsseite einfach gekrümmt, infolgedessen Zugbeanspruchungen hervorgerufen werden. Aufgrund der unmittelbaren Nähe der Eckradien werden die Zugspannungen zunehmend durch Druckspannungen überlagert, wodurch höherer Prozesskräfte resultieren. Maximale Normallastverteilungen treten an den doppelt gekrümmten Eckradien auf, die sowohl durch tangentielle Druck- als auch radiale Zugspannungen beansprucht sind und folglich hohe plastische Bauteildeformationen induzieren. Im Mittel ergeben sich in diesem Bereich Flächenpressungen von ~ 35 MPa.

Zur Einordnung und Bewertung des numerisch ermittelten Beanspruchungskollektivs werden aus der Literatur bekannte Kennwerte herangezogen. Im Allgemeinen werden zur experimentellen Abbildung seriennaher Presshärtebedingungen Normallastverteilungen von bis zu 40 MPa gewählt [61], was wiederum mit dem ermittelten Beanspruchungskollektiv der Rechtecknapfmatrize korrespondiert. Neubauer [75] verwendete ebenfalls die Methode der Finiten Elemente, um die Werkzeugbeanspruchungen beim Presshärten eines Rundnapfes sowie einer miniaturisierten B-Säule zu analysieren. Ihre Simulationsergebnisse zeigten, dass maximale Flächenpressungen von 45 MPa an den Einlaufradien der Rundnapfmatrize auftreten, wohingegen bei der miniaturisierten B-Säule höhere Kontaktnormalspannungen von bis zu 60 MPa hervorgerufen werden. Als Ursache für die steigenden Flächenpressungen werden, analog zur Rechtecknapfmatrize, unterschiedliche Spannungszustände an den Radienkrümmungen angeführt, wodurch zunehmende Bauteil- und Werkzeugbeanspruchungen erzielt werden.

Vor Beginn des Umformprozesses werden hohe Platinentemperaturen erfordert, um eine hohe Duktilität und niedrige Fließspannung der Halbzuge zu gewährleisten. Demgegenüber müssen nach der Formgebung hohe Abkühlraten von $> 27 \text{ }^\circ\text{C/s}$ gewährleistet werden, um eine vollständige martensitische Gefügeumwandlung zu erzwingen. Die numerische Analyse belegt, dass sich an den Krümmungsradien ebenfalls hohe thermische Beanspruchungen ergeben, die wiederum das Reib- und Verschleißverhalten sowie das Formgebungsvermögen des Blechwerkstoffes nachhaltig beeinträchtigen. Korrespondierend zu den Flächenpressungsverteilungen zeigt sich, dass steigende Temperaturen von der Längs- über die Querseite bis zum Radius vorliegen. Die höchsten Werkzeugtemperaturen von $\sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ werden in den Ecksegmenten identifiziert, wohingegen der Matrizenquerseite mit $\sim 51 \text{ }^\circ\text{C}$ und der Matrizenlängsseite mit $\sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ thermisch belastet wird. Die Korrelation zwischen den thermisch und mechanisch höchstbelasteten Werkzeugbereichen lässt sich auf den dominierenden Wärmetransportmechanismus der Wärmeleitung zurückführen, welcher maßgeblich durch die lokal vorherrschende Kontaktnormalspannung beeinflusst wird. Merklein et al. [65] zeigten in diesem Zusammenhang, dass zunehmende Anpresskräfte eine steigende Einglättung der Rauheitsspitzen zwischen Werkzeug- und Werkstücktopographie hervorrufen, wodurch die wahre Kontaktfläche vergrößert und folglich der Wärmetransport in der Wirkfuge verstärkt wird.

Im industriellen Serienbetrieb wird während des Umformprozesses eine schnelle Wärmeabfuhr der austenitisierten Platine angestrebt, um eine vollständige martensitische Umwandlung des Materialgefüges zu erzwingen. In Presshärtelinien werden entgegen dem Modellprozess höhere Werkzeugtemperaturen von $\sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen [42], die sich aufgrund des Dauerbetriebs durch die hohen Temperaturen des austenitisierten Bor-Mangan-Stahls in Zusammenspiel mit den zyklisch induzierten Kühlvorgängen beim Abschrecken der Platine einstellen.

Zusammenfassende Bewertung und Ableiten von Anforderungen

Die Analyse der thermischen Wechselwirkungen belegt, dass bereits nach dem Transfer und der Positionierung der austenitisierten Platine inhomogene Temperatur- und Festigkeitsverteilungen vorliegen, welche den Stofffluss hemmen und die Gefahr von Einschnürungen und Rissbildungen bedingen. Dieser Abkühlungseffekt wird unmittelbar zu Beginn des Umformprozesses verstärkt, da durch das Verfahren des Stößels die Platine gegen die Stirnfläche der Matrize gedrückt wird und weitere Wärmeverluste entstehen. Um die Prozessrobustheit zu erhöhen, müssen demnach die

werkzeugseitigen Kontaktverhältnisse gezielt adaptiert werden, sodass vor Umformbeginn lokal niedrigere Abkühlraten und folglich geringere Fließspannungen an der Blechrunde erzielt werden.

Bei der anschließenden Bauteilumformung werden lokal unterschiedliche Werkzeugbeanspruchungen hervorgerufen, die maßgeblich von der Geometrie der Rechtecknapfmatrize und den daraus resultierenden Spannungszuständen abhängig sind. Die höchsten mechanischen Beanspruchungen (~ 35 MPa) treten an den doppelt gekrümmten Eckradien auf, da diese die höchsten plastischen Bauteildeformationen durch radiale Zug- und tangentiale Druckspannungen verursachen. Demgegenüber werden die Quer- und Längsseite durch Zugspannungen beansprucht, wodurch Kontaktnormalspannungen von ~ 20 MPa entstehen. Um das Reib- und Verschleißverhalten zu begünstigen, müssen die Kontaktbedingungen im Matrizeneinlaufbereich beanspruchungsgerecht modifiziert werden, sodass eine Verringerung der Werkzeugbelastung und Verbesserung des Stoffflusses herbeigeführt wird.

Analog dazu konnte durch die numerische Prozessanalyse nachgewiesen werden, dass die vorliegenden Kontaktdrücke die Wärmeleitung in der Wirkfuge und folglich die Temperaturverteilung in der Umformzone maßgeblich beeinflussen. Die höchste thermische Belastung von ~ 70 °C wird in den Eckradien erreicht, wohingegen die Quer- und Längsseite mit ~ 40 °C thermisch beansprucht werden. Vor Beginn der Bauteilumformung werden hohe Platinentemperaturen erfordert, wohingegen im Formgebungsprozess eine schnelle Wärmeabfuhr gewährleistet werden muss, um eine vollständige martensitische Gefügeumwandlung zu erzwingen. Vor diesem Hintergrund müssen die Kontaktbedingungen in den Matrizeneinlaufdradien derart angepasst werden, sodass neben reibungs- und verschleißmindernden Effekten auch die geforderte Mindestabkühlrate (> 27 °C/s) während des Umformprozesses stets erreicht wird.

Durch die Prozessanalyse konnten umformkritische Werkzeugbereiche lokalisiert und thermo-mechanische Belastungsspitzen quantifiziert werden. Es wird erwartet, dass eine belastungsangepasste Modifikation der Werkzeugoberflächen eine signifikante Verbesserung der thermischen Wechselwirkungen sowie des Reib- und Verschleißverhaltens bewirkt. Hierbei müssen die Oberflächenmodifikationen eine dauerhafte Tragfähigkeit sowie hohe Beständigkeit gegen Oberflächenermüdung unter Presshärtebedingungen aufweisen, um eine hohe Ressourceneffizienz und einen nachhaltigen ökonomischen und ökologischen Nutzen zu erzielen. Nur unter

Einhaltung dieser Prämissen können höheren Bauteilqualitäten und längeren Werkzeugstandzeiten erzielt werden. Basierend auf den numerisch-experimentell kombinierten Untersuchungen lassen sich die im Bild 17 dargestellten Anforderungsprofile für eine beanspruchungsgerechte Oberflächenmodifikation ableiten:

Anforderungen an die Implantatcharakteristika

- **Lokale Steuerung des Wärmetransfers:** Verringerung der Temperaturverluste an der Stirnfläche zur Begünstigung des Fließverhaltens sowie Überschreitung der Mindestabkühlrate im Matrixeintritt ($\dot{T}_{krit.} > 27 \text{ °C/s}$) zur Erzeugung von Martensit
- **Sicherung der Funktionstüchtigkeit:** Gewährleistung einer gleichbleibenden Oberflächengestalt und dauerhaften Tragfähigkeit der Implantate unter mechanischer ($p \geq 20 \text{ MPa}$) und thermischer ($T \leq 150 \text{ °C}$) Beanspruchung im schmierstofffreiem Kontakt
- **Begünstigung des Reibverhaltens:** Verringerung der Reibkräfte in Abhängigkeit der Werkzeugbeanspruchung ($p_{Quer,Längs} \sim 20 \text{ MPa}$; $p_{Radius} \sim 35 \text{ MPa}$) zur Förderung des Stoffflusses in umformkritischen Bereichen (z. B. *Eckradien*)
- **Erhöhung der Verschleißbeständigkeit:** Reduzierung der Verschleißerscheinungen in den hochbeanspruchten Einlaufgraden der Matrize

Bild 17: Anforderungsprofile an die Implantatcharakteristika für eine beanspruchungsgerechte Modifikation von Presshärtewerkzeuge

Durch die Definition von Anforderungsprofilen an die Implantatcharakteristika sind die grundlegenden Voraussetzungen für eine zielorientierte und bedarfsgerechte Modifikation der Presshärtewerkzeuge geschaffen. Basierend auf den ermittelten Beanspruchungskollektiven wird im nachfolgenden Kapitel die lokale Steuerung des Wärmetransfers, die Sicherung der Funktionstüchtigkeit sowie das Reib- und Verschleißverhalten laserimplantierter Oberflächen unter Presshärtebedingungen erforscht und Ursache-Wirkzusammenhänge abgeleitet.

6 Erforschung von Wirkzusammenhängen zur Erzeugung maßgeschneiderter Oberflächenmodifikationen

In diesem Kapitel wird ein grundlegendes Verständnis hinsichtlich dem Reib-, Verschleiß- und Abkühlverhalten der lasergenerierten Oberflächenmodifikationen unter Presshärtebedingungen geschaffen. Die Untersuchungen des tribologischen Einsatzverhaltens erfolgt sowohl simulationsgetrieben als auch mit Hilfe experimenteller Versuche. Zur vollständigen Erfassung der funktionalen Wechselwirkungen werden zudem die thermischen Randbedingungen mit Hilfe von Abschreckversuchen analysiert sowie deren Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften eruiert. Anhand der generierten Wissensbasis wird eine abschließende Bewertung vorgenommen, in der das Potenzial der Oberflächenmodifikationen zur Reibungsbeeinflussung, Verschleißreduktion und Wärmeübertragung beurteilt wird.

6.1 Untersuchung des Einsatzverhaltens deterministischer Implantationsmuster

Im Folgenden werden die tribologischen und thermischen Wechselwirkungen konventioneller sowie laserimplantierter Werkzeugoberflächen anhand numerisch-experimentell kombinierter Versuchsdurchführungen qualifiziert und evaluiert. Zur prozessnahen Abbildung der am Werkzeug vorherrschenden Kontaktverhältnisse wird ein FE-Modell, ein modifizierter Tribotesteraufbau sowie ein Abschreckwerkzeug genutzt. Zur Bewertung des tribologischen Einsatzverhaltens der Oberflächenmodifikationen werden in Abhängigkeit des vorliegenden Beanspruchungskollektivs die Varianten mit der geringsten Reibzahl und mit dem niedrigsten Verschleißvolumen ermittelt. Als zusätzliches Bewertungskriterium werden die Topographien der verschlissenen Werkzeuge und Werkstücke mittels optischer und taktile Messverfahren untersucht, um weitere Rückschlüsse hinsichtlich der vorliegenden tribologischen Wechselwirkungen zu erhalten. Zur Analyse des thermo-mechanischen Einsatzverhaltens werden die Abkühlraten konventioneller sowie laserimplantierter Oberflächen gemessen und gegenübergestellt. Ferner wird deren Einfluss auf das Platinengefüge mittels Härteprüfungen und Zugversuchen untersucht und Wechselwirkungen identifiziert.

6.1.1 **Analyse der Reibzahlen**

Zur Untersuchung des Reib- und Verschleißverhaltens der Oberflächenmodifikationen wird ein modifizierter Tribotesteraufbau in Anlehnung an einen konventionellen Pin-on-Disk Test eingesetzt. Der Prüfstand wurde bereits in Arbeiten von Neubauer [144] und Wieland [42] genutzt, um das werkzeug- und werkstückseitige Reib- und Verschleißverhalten unter presshärtespezifischen Belastungskollektiven zu analysieren. In der Prüfeinrichtung werden zylindrische Werkzeugpins mit definierter Flächenpressung in vordefinierten Bahnen über ein fixiertes und zugleich beheiztes 22MnB5 Blech geführt, sodass stets unberührtes Halbzeugmaterial mit dem Werkzeugpin interagiert. Während der Relativbewegung wird die vorherrschende Normal- (F_N) und Reibkraft (F_R) anhand integrierter Kraftmessdosen aufgezeichnet, wodurch mit Hilfe des Coulomb'schen Reibgesetzes die Reibzahl μ berechnet werden kann. Für die Versuchsdurchführung werden industriennahe Prozessparameter gewählt, um sowohl ein grundlegendes Prozessverständnis aufzubauen, als auch die Wirksamkeit der Oberflächenmodifikationen unter prozessnahen Versuchsbedingungen zu prüfen.

Für die experimentellen Untersuchungen werden, wie in Abschnitt 4.4.1 dargestellt, neun verschiedene Implantatkonfigurationen mit unterschiedlichen Implantathöhen ($\sim 10 \mu\text{m}$, $\sim 20 \mu\text{m}$, $\sim 30 \mu\text{m}$) und Implantatdistanzen ($350 \mu\text{m}$, $550 \mu\text{m}$, $750 \mu\text{m}$) in hexagonalen Mustern auf zylindrische Werkzeugpins mit einer Kontaktfläche von $A = 20 \text{ mm}^2$ laserimplantiert. Zur Einordnung und Bewertung des tribologischen Einsatzverhaltens werden zudem unmodifizierte Werkzeugpins untersucht. Um eine hohe Konstanz und Reproduzierbarkeit der Reibzahlmessung sicherzustellen, werden für jede Parameterkombination drei Werkzeugeinsätze hergestellt, die jeweils mit fünf AlSi-beschichteten Bor-Mangan-Platinen getestet werden. Hierdurch liegt pro Werkzeugkonfiguration eine Reib- und Verschleißstrecke von 6750 mm vor. Die gemittelten Reibzahlen der einzelnen Werkzeugvarianten sind im nachfolgendem Bild 18 gegenübergestellt.

In den Versuchsreihen sind signifikante Unterschiede des Reibzahlenniveaus in Abhängigkeit der lokal dispergierten keramischen Hartstoffpartikel zu erkennen. Die ermittelten Reibzahlen der Werkzeugkonfigurationen liegen allesamt in einem Bereich von 0,40 - 0,49. Um die Plausibilität der berechneten Werte einschätzen zu können, erfolgt zunächst ein Abgleich mit bereits publizierten Kennwerten aus der Literatur. Ghiotti et al. [96], Neubauer [75] und Medea et al. [93] nutzen ebenfalls Pin-on-Disk Versuche sowie AlSi-beschichtete Bor-Mangan Stähle 22MnB5, um das Reibverhalten

bei variierenden Flächenpressungen von 5 - 25 MPa zu analysieren. Die ermittelten Reibzahlen der Autoren befanden sich, je nach gewählter Parameterkombination, in einem Bereich zwischen 0,4 und 0,8, was in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Kennwerten ist und die Plausibilität der Versuchsdaten bestätigt.

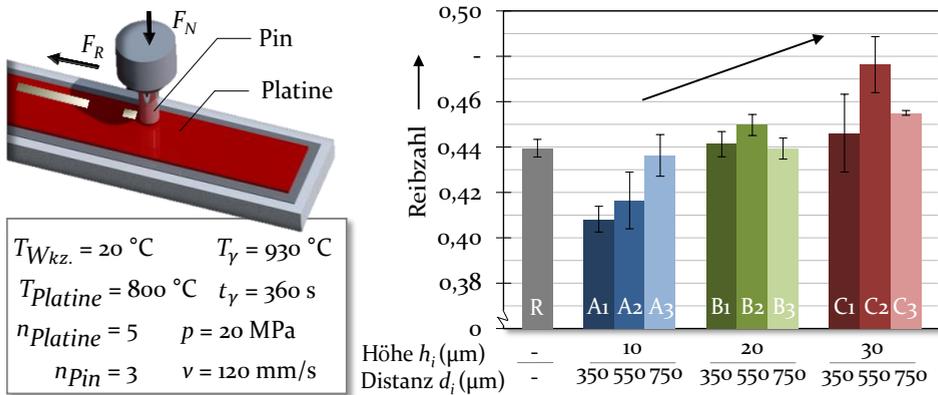


Bild 18: Ermittelte Reibzahlen in Abhängigkeit der gewählten Werkzeugkonfiguration

Der Vergleich der Reibzahlen zeigt, dass konventionelle Werkzeugoberflächen (Konfig. R) einen gemittelten Wert von $0,439 \pm 0,004$ aufweisen, wohingegen die niedrigste Reibzahl von $0,408 \pm 0,006$ für modifizierte Oberflächen mit einer Strukturhöhe von $10 \mu\text{m}$ und einem Implantatabstand von $350 \mu\text{m}$ (Konfig. A1) erreicht wird. Ferner lässt sich die Tendenz erkennen, dass mit zunehmender Implantatdistanz und -höhe die resultierende Reibzahl simultan ansteigt. Die höchsten Reibzahlen von $0,476 \pm 0,012$ und $0,446 \pm 0,017$ werden durch laserimplantierte Werkzeuge erreicht, die eine ausgeprägte Kuppelhöhen von $30 \mu\text{m}$ und einen Implantatabstand von $550 \mu\text{m}$ respektive $750 \mu\text{m}$ aufweisen. Als Ursache für die unterschiedlichen Reibzahlen können sowohl primäre als auch sekundäre Einflussfaktoren identifiziert werden, deren jeweilige Dominanz in Bezug auf das tribologische Verhalten unterschiedlich stark ausgeprägt ist.

Nach [73] wird der Bewegungswiderstand zwischen Presshärtewerkzeug und Werkstück sowohl durch Furchung als auch durch adhäsive Bindungen der in Kontakt stehenden Rauheitsspitzen verursacht. Furchungseffekte werden durch Partikel herbeigeführt, die lose in der Wirkfuge vorliegen oder in der härteren Werkzeugoberfläche fest eingebunden sind [71]. Während der Relativbewegung des Werkzeuges werden plastische Deformationen auf der Werkstückoberfläche hervorgerufen, die mit steigender Eindringtiefe und fortschreitender Vorschubbewegung zunehmende

Scherkräfte und Reibzahlen bewirken. Korrespondierende Verhaltensweisen lassen sich unter Verwendung laserimplantierter Werkzeuge erkennen.

Einfluss der Oberflächengestalt

Ein maßgeblicher Treiber und primärer Einflussfaktor hinsichtlich der resultierenden Scher- und Reibkräfte stellt die Wahl der Implantathöhe und des Flächendeckungsgrades dar. Die modifizierten Werkzeugoberflächen weisen aufgrund der signifikanten Reduzierung der Kontaktfläche lokal hohe Flächenpressungen auf. Da für alle Testreihen die gleiche Normalkraft eingestellt ist, steigt mit abnehmendem Flächendeckungsgrad die nominelle Kontaktspannung pro Implantat an. Analog dazu ergeben sich tendenziell höhere Normallastverteilungen mit zunehmenden Implantathöhen, da die steigende Ausprägung der Kuppelform einen fortschreitenden punktuellen Werkzeug-Werkstück-Kontakt verursacht. Die Flächenpressung wird als Kraft pro Kontaktfläche zweier sich berührender Festkörper definiert [69]. Der Effekt der ansteigenden Normallastverteilungen mit zunehmender Implantathöhe und abnehmendem Flächendeckungsgrad ist folglich darauf zurückzuführen, dass weniger Kontaktfläche zur Kraftübertragung vorliegt, um die wirkenden Druckspannungen des Werkzeuges in das Werkstück abzuleiten. Demnach wird die Kraft auf die verringerte Berührungsfläche konzentriert, was steigende Normallastverteilungen in der Wirkfuge impliziert. Bild 19 zeigt den Einfluss differierender Flächendeckungen und Spothöhen auf die Flächenpressung schematisch auf.

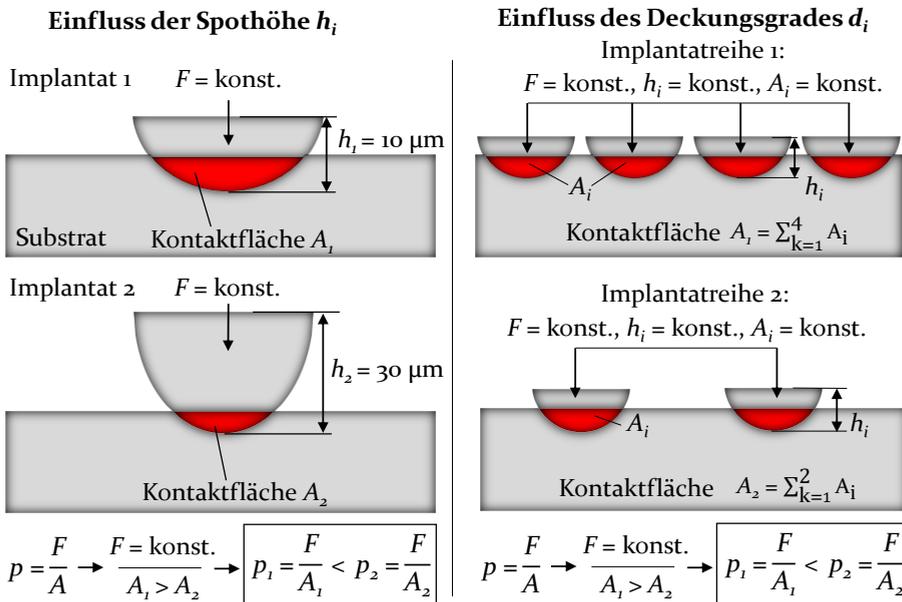


Bild 19: Einfluss unterschiedlicher Spothöhen und -abstände auf die Flächenpressung

Durch den Anstieg der Flächenpressung mit steigender Spothöhe und -abstand liegt ein verstärktes Eindringen der Implantate in den heißen und weichen Blechwerkstoff vor, infolgedessen höhere Scherkräfte für die horizontale Relativbewegung des Werkzeugpins induziert werden. Vor diesem Hintergrund weisen modifizierte Werkzeuge mit Strukturhöhen von $30\ \mu\text{m}$ und Implantatabständen von $550\ \mu\text{m}$ bzw. $750\ \mu\text{m}$ die höchsten Reibzahlen auf, wohingegen implantierte Oberflächen mit einer Höhe von $\sim 10\ \mu\text{m}$ und einem Abstand von $\sim 350\ \mu\text{m}$ bzw. $\sim 550\ \mu\text{m}$ entgegen dem Referenzwert signifikant verringerte Reibzahlen hervorrufen.

Als Ursache für die verbesserten Reibverhältnisse wird die geringere plastische Deformation der Platine aufgrund der vergleichsweise niedrigen Flächenpressung vermutet, welche in Kombination mit der lokal signifikanten Reduzierung der Kontaktfläche zu verminderten Scherkräften infolge des verringerten mechanischen Verhakens der Rauheitsspitzen gegenüber dem konventionellen Werkzeugwerkstoff führt. Mit zunehmender Eindringtiefe der laserimplantierten Strukturen wird jedoch ein zunehmender Kraftanteil zum Durchstoßen der Bindungskräfte der Mikrokontakte benötigt. Es ist ersichtlich, dass modifizierte Werkzeuge mit Implantathöhen $\geq 20\ \mu\text{m}$ und Spotabständen $\geq 350\ \mu\text{m}$ keine weitere Verbesserung der Reibbedingungen gegenüber konventionellen Oberflächen hervorrufen. In diesem Zusammenhang liegt die Vermutung nahe, dass die zunehmende Scherwirkung der Oberflächenmodifikationen dem reibungsmindernden Effekt der reduzierten Kontaktfläche überwiegt.

Simulationsbasierte Untersuchung des Einflusses der Oberflächengestalt

Zur Verifizierung der Annahmen werden simulationsbasierte Untersuchungen vorgenommen, um den Einfluss von Geometrie und Abstand der Mikrostrukturen auf deren tribologischen Wechselwirkungen in der Wirkfuge vertiefend zu analysieren. Bild 20 zeigt den auf mikroskopischer Ebene modellierten Kontaktbereich, der aus einem Grundkörper (Werkstück) sowie einem Gegenkörper (Werkzeug) mit integrierten Mikrostrukturen besteht. Eine detaillierte Modellbeschreibung ist in Abschnitt 4.4.2 angeführt. Aufgrund der notwendigen Diskretisierung der Elemente im Mikrometerbereich, wird ein vereinfachter Werkzeugausschnitt von $2\ \text{mm} \times 2\ \text{mm}$ mit $n = 7$ respektive $n = 14$ Implantaten modelliert, um einen guten Kompromiss zwischen erforderlicher Berechnungsdauer und Ergebnisqualität zu erzielen. Analog zu den Tribotesterversuchen wird der Gegenkörper mit einer definierten Flächenpressung von $20\ \text{MPa}$ beansprucht und simultan mit einer horizontalen Relativbewegung von $120\ \text{mm/s}$ verfahren. Darüber hinaus wird dem Werkzeug eine Temperatur von 20°C und dem Werkstück

eine Temperatur von 800 °C zugewiesen, um korrespondierend zu den Tribotesterversuchen identische Versuchsbedingungen zu imitieren. Um funktionale Beziehungen hinsichtlich der Wirkweisen differierender Implantatgeometrien und -anzahlen gezielt ableiten zu können, werden die maximalen und minimalen Spotabstände ($d_i = 350 \mu\text{m}$, $d_i = 750 \mu\text{m}$) und -höhen ($h_i = 10 \mu\text{m}$, $h_i = 30 \mu\text{m}$) der experimentellen untersuchten Werkzeugkonfigurationen analysiert und gegenübergestellt.

Die Bewertung der tribologischen Wechselwirkungen erfolgt, indem zunächst die am Grundkörper lokal erzeugten Flächenpressungen der Implantate analysiert und mit den im Mittel erreichten Verschleißspurtiefen im Kontaktbereich verglichen werden. Die niedrigsten Flächenpressungen von 604 MPa werden bei Werkzeugen mit einem Implantatabstand von 350 μm und einer Implantathöhe von 10 μm (Konfig. A1) verzeichnet. Durch Erhöhung des Spotabstandes auf 750 μm (Konfig. A3) werden steigende Kontaktnormalkräfte von 650 MPa erreicht. Analogien lassen sich bei Implantathöhen von 30 μm erkennen. Der Vergleich der Werkzeugkonfigurationen mit Abständen von 350 μm (Konfig. C1) und 750 μm (Konfig. C3) zeigt, dass steigende Flächenpressungen mit zunehmenden Implantatabstand hervorgerufen werden.

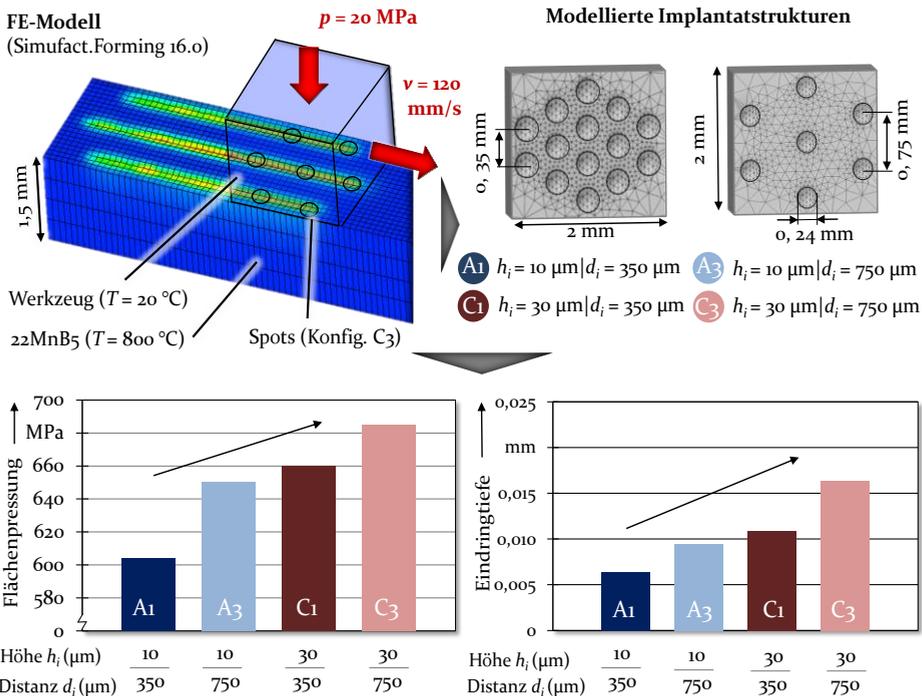


Bild 20: Numerisch berechnete Verschleißspurtiefen und Flächenpressungen im Kontaktbereich in Abhängigkeit der gewählten Werkzeugkonfiguration

Die indirekte Proportionalität zwischen abnehmenden Deckungsgrad und zunehmender Flächenpressung lässt sich durch die gleichmäßige Verteilung der Normalkraft auf die verringerte Kontaktfläche erklären. Da für die Kraftübertragung weniger Stützstellen vorhanden sind, werden pro Implantat steigende Flächenpressungen in der Wirkfuge verursacht. Darüber hinaus wird bei der Analyse des Einflusses der Implantatgeometrie erkenntlich, dass steigende Kontaktnormalspannungen durch zunehmende Kuppelhöhen verursacht werden. Die Gegenüberstellung der durchschnittlich erreichten Flächenpressungen bei Implantatdistanzen von $350\ \mu\text{m}$ zeigt, dass Flächenpressungen von $604\ \text{MPa}$ bei $10\ \mu\text{m}$ (Konfig. A₁) und $660\ \text{MPa}$ bei $30\ \mu\text{m}$ Implantathöhe (Konfig. C₁) hervorgerufen werden. Parallelen lassen sich bei Spotabständen von $750\ \mu\text{m}$ erkennen, da Normallastverteilungen von $650\ \text{MPa}$ bei $10\ \mu\text{m}$ (Konfig. C₁) und $686\ \text{MPa}$ bei einer Spothöhe von $30\ \mu\text{m}$ (Konfig. C₃) vorliegen. Der Anstieg der Kontaktnormalspannung mit zunehmender Implantathöhe kann durch die steigende Ausprägung der Kuppelgeometrie erklärt werden, welche einen zunehmenden punktuellen Werkzeug-Werkstück-Kontakt und folglich eine verringerte Fläche zur Kraftübertragung bewirkt.

Um weitere Erkenntnisse hinsichtlich dem Einsatzverhalten der laserimplantierten Werkzeuge zu gewinnen, werden die Eindringtiefen der Oberflächenmodifikationen analysiert (Bild 20). Es ist eine direkte Proportionalität zwischen Kontaktnormalspannung und Eindringtiefe der Implantatstrukturen feststellbar. Bei der Verwendung der Werkzeugkonfiguration A₁, welche die geringste Flächenpressung verursacht, werden ebenfalls die niedrigste Eindringung von $6,3\ \mu\text{m}$ identifiziert. Mit abnehmender Implantanzahl und zunehmender Höhe der kuppelförmigen Strukturen steigen die Flächenpressungen im Werkzeug-Werkstück-Kontakt sukzessive an, wodurch eine fortschreitende plastische Deformation im austenitisierten und folglich erweichten Werkstücks bewirkt wird. Für das modifizierte Werkzeug mit einer Kuppelhöhe von $30\ \mu\text{m}$ und einem Spotabstand von $750\ \mu\text{m}$ (Konfig. C₃) kann demnach die höchste Eindringtiefe von $16,4\ \mu\text{m}$ ermittelt werden. In Bezug auf das tribologische Einsatzverhalten der Werkzeugkonfigurationen wird daher vermutet, dass mit zunehmender Eindringtiefe der Implantate, höhere Reibkräfte während der horizontalen Abzugsbewegung induziert werden.

Zur Prüfung dieser Annahme werden die resultierenden Scherkraftverläufe der Simulationsmodelle analysiert, die im nachfolgendem Bild 21 dargestellt sind. Die Implantatkombination mit den geringsten lokalen Flächenpressungen und Eindringtiefen weist den niedrigsten Scherkraftverlauf auf (Konfig. A₁). Mit Zunahme der Implantathöhe und des Implantatabstandes

wird ein Anstieg der Scherung aufgrund der erhöhten plastischen Deformation des Platinenwerkstoffes durch das zunehmende Eindringen der Implantate initiiert. Dies führt zu einem erhöhten Bewegungswiderstand bei der Relativbewegung des Werkzeuges, weshalb mit steigender Scherbelastung höhere Reibzahlen zu erwarten sind.

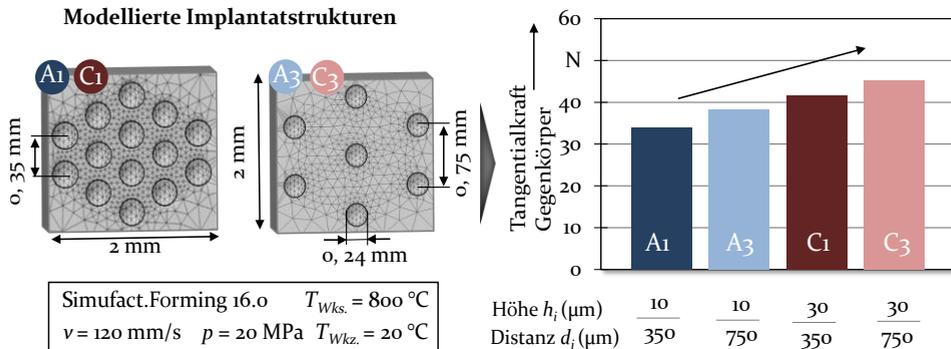


Bild 21: Numerisch berechneter Scherkraftverlauf in Abhängigkeit der gewählten Werkzeugkonfiguration

Die numerischen Simulationsanalysen zeigen auf, dass mit zunehmender Implantathöhe und -abstand die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück sukzessive reduziert wird, was wiederum steigende Flächenpressungen in der Wirkfuge verursacht. Die höheren Kontaktnormalspannungen bewirken ein tieferes Eindringen der Implantate in den heißen und folglich weichen Platinenwerkstoff, wodurch höhere Scherkräfte während der horizontalen Relativbewegung des Werkzeugpins hervorgerufen werden. Eine zusammenfassende Übersicht der numerisch identifizierten Wechselwirkungen ist in nachfolgender Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Tribologische Wechselwirkungen in Abhängigkeit der Oberflächengestalt

	Implantathöhe h_i	Implantatdistanz d_i
Ausprägung	↓	↓
1. Flächenpressung	↓	↓
2. Eindringtiefe	↓	↓
3. Scherkraft	↓	↓

Die numerischen Ergebnisse bestätigen die zuvor getroffenen Annahmen der experimentellen Versuchsdurchführung. Implantationsmuster mit niedrigen Spothöhen und engen Implantatabständen führen zu verringerten Flächenpressungen, Werkstückdeformationen und Scherbelastungen, wodurch die Reibung respektive der Stofffluss in der Umformzone begünstigt wird. Ähnliche Verhaltensweisen beobachteten Segu et al. [116] in ihren

Untersuchungen. Durch die gezielte Adaption der Werkzeugkontaktfläche konnten reibungserhöhende oder -mindernde Mechanismen in der Wirkfuge gezielt hervorgerufen werden. Zur Verbesserung des tribologischen Einsatzverhalten im geschmierten Werkzeug-Werkstück-Kontakt generierten die Autoren kreisförmige Mikrokavitäten mit unterschiedlichen Deckungsgraden in die Werkzeugoberfläche. Die Ergebnisse der durchgeführten Stift-Scheibe-Experimente zeigten, dass mit steigender Anzahl an Mikrostrukturierungen niedrigere Scherbelastungen in der Wirkfuge und folglich geringere Reibzahlen erreicht worden sind. Parallel dazu konnte Tenner [115] die reibungsreduzierende Wirkung steigender Flächendeckungsgraden mikrostrukturierter Werkzeuge bestätigen. Anhand von Trockentiefziehversuchen, die analog zum Presshärteverfahren ohne Schmierstoffsysteme arbeiten, wurde nachgewiesen, dass steigende Deckungsgrade eine höhere Einglättung in den Randschichten bewirken und folglich niedrigere Reibkräfte während der Relativbewegung des Werkzeuges verursachen. Neben der Abhängigkeit des Flächendeckungsgrades wird in den Simulationsmodellen der laserimplantierten Strukturen auch eine Reibungsbeeinflussung durch die Adaption der Implantatgeometrie aufgezeigt. Ähnliche Effekte konnten von Brosius et al. [114] anhand makrostrukturierter Werkzeugoberflächen nachgewiesen werden. Zur Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im Trockentiefziehprozess nutzten die Autoren wellenförmige Oberflächenmodifikationen, welche sowohl im Niederhalter als auch im Flanschbereich der Matrize integriert worden sind. Durch die Verkleinerung der Höhe der Wellenamplitude konnten die Kontaktverhältnisse in der Wirkfuge und folglich die Reibkräfte verringert werden, wohingegen zu groß gewählte Wellenamplituden signifikant ansteigende Eindringtiefen hervorriefen, infolgedessen der Stofffluss stark gehemmt und Bodenreißer induziert worden sind.

Einfluss der Materialeigenschaften

Neben der Oberflächengestalt der modifizierten Werkzeuge stellen die stofflichen Besonderheiten der Implantate einen weiteren, sekundären Einflussfaktor zur Begünstigung des tribologischen Einsatzverhaltens dar. Parallel zu den beschriebenen Furchungseffekten werden nach [73] die Reibzahlen im schmierstofffreien metallischen Kontakt durch adhäsive Bindungen zwischen Grund- und Gegenkörper beeinflusst, die mit zunehmender Ausprägung zu einer Hemmung der Relativbewegung führen. Die Ursache der adhäsiven Bindungen liegt im Vorhandensein molekularer Wechselwirkungen, die wiederum von der Oberflächenenergie und der Elektronenstruktur der Kontaktpartner abhängig sind [71]. In diesem Zusammenhang

kann die Höhe der Bindungskraft in hohem Maße durch die Stoffkennwerte respektive mechanischen Eigenschaften der beiden Reibpartner gesteuert werden. Es ist davon auszugehen, dass sowohl das Implantationsverhalten als auch die resultierenden Implantateigenschaften einen bedeutenden Einfluss auf das Reib- und Verschleißverhalten der modifizierten Werkzeugoberflächen ausüben.

Durch das Laserdispergieren der titanbasierten Hartstoffpartikel in den Werkzeugwerkstoff entsteht ein Metall-Matrix Verbund, der zu 65 % aus dem martensitischen Werkzeugstahl 1.2367 und zu 35 % aus den TiB_2 -Partikeln besteht [124]. Titandiboridkeramiken zeichnen sich durch chemisch inerte Eigenschaften aus, die wiederum die Ausbildung von Adhäsion entgegenwirken [125]. Als Ursache wird die niedrige Elektronendichte der titanbasierten Hartstoffe angenommen, die weniger neue Metallverbindungen zwischen den sich kontaktierenden Festkörpern zulassen [71]. Weiterhin besitzt Titandiborid von allen Metallboriden die höchste Härte [132]. Diese ist im Vergleich zu dem konventionellen eingesetzten Werkzeugstahl 1.2367 um $\sim 2900 \text{ HV}_1$ höher. Hohe Schichthärten gelten als vorteilhaft, da Werkstoffe mit hohen Härten über größere innere Bindungsenergien verfügen, die wiederum adhäsionsmindernde Eigenschaften induzieren und somit ein verbessertes Gleiten der beiden Kontaktpartner ermöglichen. Wegen dieser tribologisch günstigen Eigenschaften wird TiB_2 aktuell in vielzähligen verschleißintensiven Anwendungen, wie z. B. Schneidwerkzeuge [125] oder Tigelmateriale, eingesetzt [132]. Hilgenberg und Steinhoff [126] untersuchten ebenfalls das tribologische Verhalten laserimplantierter TiB_2 -Partikel anhand eines Twin-Disk-Tests. Die Versuche zeigten, dass auch nach $1,26 \times 10^{26}$ Zyklen keine signifikanten Verschleißerscheinungen sichtbar waren, was unter anderem durch die niedrige Adhäsionsneigung der Hartstoffpartikel begründet wird.

Zusammenfassend begünstigt sowohl die geometrische Adaption der Kontaktfläche als auch die werkstoffspezifischen Eigenschaften der eingebetteten TiB_2 -Partikel das tribologische Einsatzverhalten in der Wirkfuge. In diesem Zusammenhang weisen insbesondere laserimplantierte Werkzeugoberflächen mit Höhen von $10 \mu\text{m}$ und Abständen von $350 \mu\text{m}$ und $550 \mu\text{m}$ entgegen dem Referenzwert reibungsreduzierende Eigenschaften auf. Als Ursache wird die geringe plastische Deformation der Platinenoberfläche vermutet, welche aufgrund der reduzierten Kontaktfläche und den adhäsionsabweisenden Keramikpartikeln zu verminderten Scher- und Bindungskräften in der Wirkfuge führt. Zur Verifizierung der getroffenen Annahmen und zur weiteren Analyse der Ursache-Wirkzusammenhänge werden die am Blechwerk erzeugten Verschleißspurriefen analysiert.

6.1.2 Charakterisierung der Werkstücktopographie

Um weitere Informationen hinsichtlich der Kontaktbedingungen und den tribologischen Wechselwirkungen der Werkzeugkonfigurationen zu erhalten, werden im Folgenden die Oberflächen der verschlissenen Platinen sowohl qualitativ als auch quantitativ untersucht. Als Messmittel werden optische sowie taktile Verfahren genutzt.

Taktile Messung der Werkstücktopographie

Im Allgemeinen weisen alle Blechhalbzeuge neun parallele Verschleißspuren mit einer Länge von je 50 mm und einer Breite von 5 mm auf, welche durch den Abzugsprozess des Werkzeugpins herbeigeführt worden sind. Um Aussagen hinsichtlich dem Kontaktverhalten der Werkzeuge treffen zu können, werden zunächst die am Halbzeug erzeugen Verschleißspuren anhand von Tastschnittmessungen nach DIN 4746 analysiert. Durch die taktile Abtastung der Werkstückoberfläche können plastische Deformationen infolge der Werkzeugbeanspruchung detektiert werden. Die Messungen werden dreimal senkrecht zu den Verschleißspuren wiederholt, um statistische Abweichungen zu berücksichtigen. Im nachfolgenden Bild 22 werden die ermittelten arithmetischen Mittenrauwerte R_a der verschlissenen Platinenoberfläche aufgezeigt.

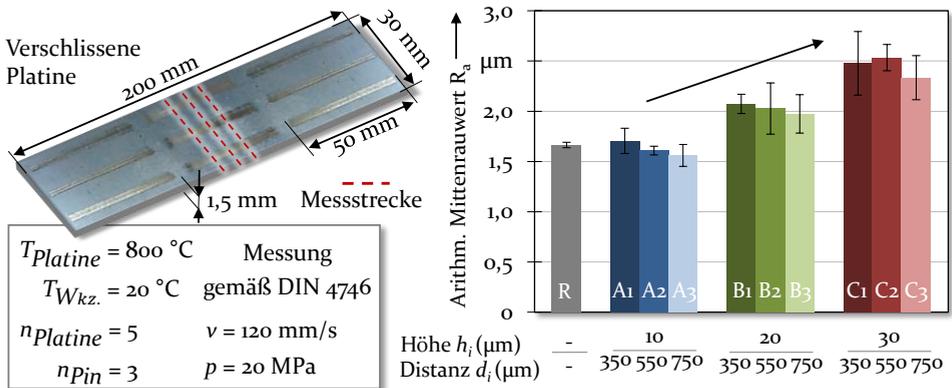


Bild 22: Taktill gemessene Rauheitswerte der verschlissenen Platinenoberfläche

Die Messergebnisse belegen, dass konventionelle Werkzeuge annähernd gleichbleibende Rauheitswerte ($R_a \sim 1,6 \mu\text{m}$) auf der Blechtopographie hervorrufen wie Implantatkombinationen mit Höhen von 10 μm . Darüber hinaus ist ersichtlich, dass eine Zunahme der Spothöhe auf 20 μm und 30 μm zu einem Anstieg der arithmetischen Mittenrauwerte auf $R_a \sim 2 \mu\text{m}$ respektive $R_a \sim 2,5 \mu\text{m}$ führt. Dieser Effekt korrespondiert mit den Erkenntnissen

aus der numerischen Simulation, welche besagen, dass eine steigende Ausprägung der Kuppelgeometrie einen zunehmend punktuellen Werkzeug-Werkstück-Kontakt in der Wirkfuge verursacht, infolgedessen höhere Flächenpressungen und Eindringtiefen in die Platine hervorgerufen werden.

Die unterschiedlichen Eindringtiefen der Implantate haben einen signifikanten Einfluss auf das resultierende tribologische Einsatzverhalten der Werkzeugkonfigurationen. Mit zunehmender plastischer Deformation der Werkstückoberfläche müssen mehr interagierende Rauheitsspitzen durchbrochen und demnach mehr Materialfragmente während der horizontalen Abzugsbewegung des Werkzeugpins verdrängt werden, was zu einem erhöhten Bewegungswiderstand mit steigenden Reibkräften führt. Bestätigt wird diese These durch die ermittelten Reibzahlen (Abschnitt 6.1.1), welche ein ansteigendes Reibzahlenniveau mit zunehmender Implantathöhe und folglich steigender plastischer Deformation des Blechhalbzeuges erkennen lassen.

Um das Prozessverständnis hinsichtlich des tribologischen Verhaltens der laserimplantierten Strukturen weiter zu vertiefen, werden im Folgenden die in der Wirkfuge ablaufenden Verschleißmechanismen näher untersucht. Die Oberflächen der Blechplatinen werden hauptsächlich durch Riefen geschädigt, die aufgrund der Relativbewegung der Werkzeuge entstehen. Gemäß der Definition von Sommer et al. [70] liegt demnach Abrasion als Verschleißmechanismus vor, da ein harter Abrasivstoff in gebundener Form (Implantat) unter Last in einen weicheren Festkörper (Platine) eindringt und über deren Oberfläche gleitet. Der abrasive Materialabtrag durch einen gebundenen Festkörper lässt sich wiederum in drei Abrasionsmechanismen untergliedern, die als Mikropflügen, Mikrospanen und Mikrobrechen bezeichnet werden. Das Mikropflügen ist dadurch gekennzeichnet, dass der beanspruchte Werkstoff unter Wirkung des Abrasivstoffes zwar plastisch deformiert, jedoch kein weiterer Materialabtrag stattfindet. Mikrospanen liegt dem hingegen vor, wenn Materialfragmente aus dem beanspruchten Grundkörper abgetragen werden und Verschleißpartikel entstehen. Mikrobrechen findet statt, wenn Rissbildungen längs der Verschleißfurchen aufgrund hoher lokaler Beanspruchungen auftreten [71].

Bei duktilen Werkstoffen laufen vorrangig mikropflügende und mikrospanende Prozesse ab, die in Anwesenheit spröder Phasen von einem Mikrobrechen überlagert sind [70]. Die Höhe der tribologischen Beanspruchung ist maßgeblich von der Dominanz des vorliegenden Abrasionsmechanismus abhängig. Die höchsten Reibkräfte und Verschleißvolumina werden

durch Mikrospanen induziert, wohingegen Mikropflügen und Mikrobrechen einen erheblich geringeren Einfluss auf das tribologische Verhalten ausüben [70]. Das Beanspruchungskollektiv sowie die Gestalt des abrasiv wirkenden Festkörpers haben maßgeblichen Einfluss auf den vorliegenden Abrasionsmechanismus. Je höher die Eindringtiefe und der Angriffswinkel des abrasiv wirkenden Festkörpers, desto mehr Materialfragmente werden durch mikrospanende Prozesse aus der Wirkfuge abgetragen, was wiederum höhere tribologische Beanspruchung während der Relativbewegung des Werkzeuges verursacht [145]. Demgegenüber werden bei niedrigen Angriffswinkel elastisch-plastische Deformationen im weicheren Kontaktpartner hervorgerufen, die nur einen geringfügigen Werkstoffabtrag mit niedrigen Reibkräften bedingen. Bild 23 a) veranschaulicht die von zum Gahr [145] aufgestellten Zusammenhänge, welche den Einfluss der Gestalt und des Beanspruchungskollektivs des abrasiv wirkenden Körpers in Hinblick auf das zu erwartende tribologische Einsatzverhalten aufzeigen.

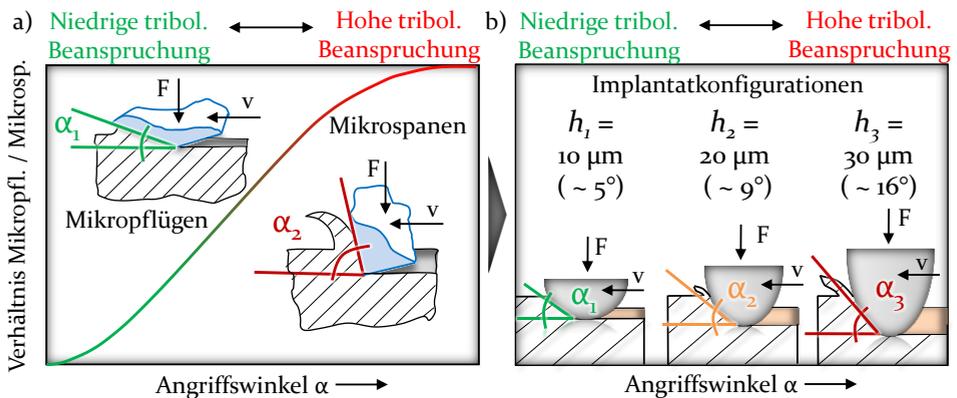


Bild 23 a) Höhe der tribologischen Beanspruchung in Abhängigkeit der Gestalt und des Beanspruchungskollektivs des abrasiv wirkenden Körpers gemäß [145] und b) Wissenstransfer in Bezug auf das tribologische Verhalten der laserimplantierten Strukturen

Wird das von zum Gahr aufgestellte Modell auf die laserimplantierten Werkzeugkonfigurationen (Bild 23 b) transferiert, so lässt sich ableiten, dass mit zunehmender Implantathöhe und Eindringtiefe steigende Angriffswinkel und folglich höhere tribologische Beanspruchung verzeichnet werden. Bestätigt wird diese Annahme durch die Reibzahlenanalyse und den taktil gemessenen Rauheitskennwerten. Ferner zeigt die optische Analyse der verschlissenen Bleche, dass primär unter Verwendung von Implantaten mit 30 μm Spothöhen lose Materialfragmente an den Rändern der Verschleißfurchen auftreten, was auf das Wirken mikrospanender Prozesse hindeutet.

In Bild 24 sind exemplarisch verschlissene Werkstücktopographien gegenübergestellt, die mit gleichem Spotabstand von $750\ \mu\text{m}$, aber mit unterschiedlichen Implantathöhen von $10\ \mu\text{m}$ und $30\ \mu\text{m}$ beansprucht worden sind. Um die tribologische Belastung unter Verwendung laserimplantierter Werkzeuge zu reduzieren, müssen folglich in hochbeanspruchten Werkzeugbereichen niedrige Implantatkuppeln mit geringen Angriffswinkeln appliziert werden.

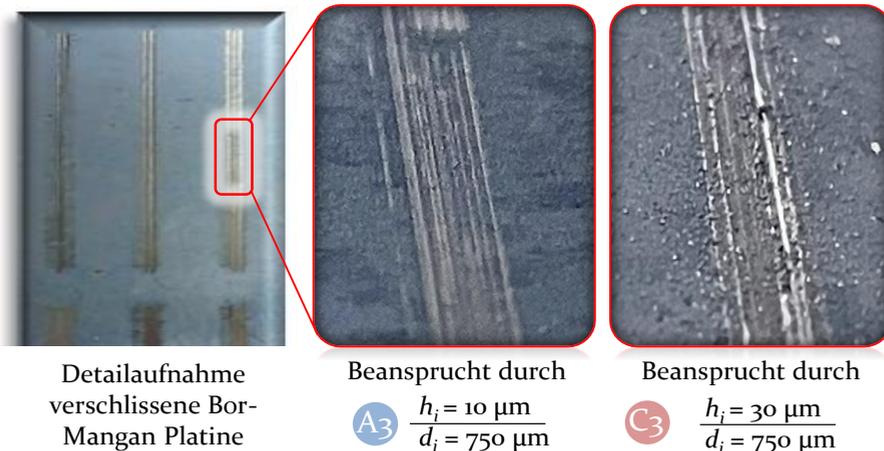


Bild 24: Zunehmender Materialabtrag durch Wirken mikrospanender Prozesse aufgrund ansteigender Implantathöhen und Angriffswinkel

Optische Analyse der Verschleißspuren

Um weitere Erkenntnisse hinsichtlich der vorliegenden Abrasionsmechanismen zu erhalten, werden optische Messungen der Verschleißspuren mit Hilfe eines Laser-Scanning Mikroskops vom Typ VK-X200 der Firma Keyence durchgeführt. Durch das Messinstrument kann sowohl die Rauheit anhand von 3D-Kenngrößen ermittelt, als auch Unstetigkeiten in der Oberflächenbeschaffenheit, wie zum Beispiel das Auftreten von Rissen, identifiziert werden. Vor allem thermo-mechanisch beanspruchte Körper unterliegen nach Sommer et al. [70] einer hohen Rissanfälligkeit, infolgedessen höhere Oberflächenrauheiten herbeigeführt werden, die wiederum negative Auswirkungen auf die Kontaktverhältnisse und tribologischen Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und Werkstück haben. Die Intensität der Rissbildung wird sowohl von der Temperatur als auch von der Höhe der lokal vorliegenden mechanischen Beanspruchungen beeinflusst. Mit Zunahme des Temperaturgradienten und der mechanischen Belastung tritt eine Wechselplastifizierung ein, welche die Trennfestigkeit des Werkstoffes beeinträchtigt und die Rissinitiierung respektive die Reibbedingungen in der Wirkfuge negativ beeinflusst.

Zur Beurteilung der Oberflächenqualität der verschlissenen Bleche wird der richtungsunabhängige Mittenrauwert S_a genutzt, der bereits in den Arbeiten von Neubauer [75] und Ghiotti et al. [146] herangezogen worden ist, um weiterführende Informationen hinsichtlich auftretender Reib- und Verschleißmechanismen im Presshärteprozess zu gewinnen. In Bild 25 sind die optischen Messungen der Verschleißspuren in Abhängigkeit der unterschiedlichen Implantathöhen gegenübergestellt.

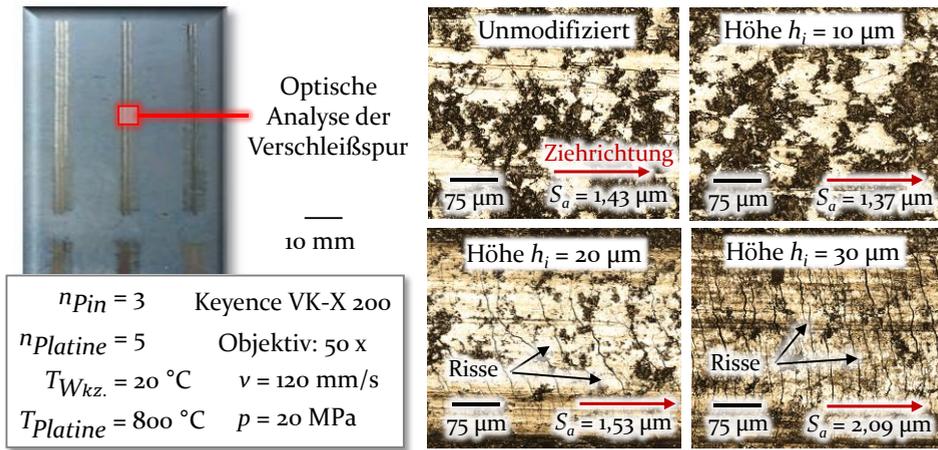


Bild 25: Optische Analyse der Verschleißspuren in Abhängigkeit der genutzten Werkzeuge

Es ist ersichtlich, dass unmodifizierte sowie laserimplantierte Werkzeuge mit Spothöhen von 10 µm ähnliche Schleifriefen auf den Halbzeugoberflächen erzeugen, was durch die gleichbleibenden Rauheitskennwerte der Perthometermessungen bestätigt wird. In diesem Zusammenhang weist das Halbzeug, das mit unmodifizierten Werkzeugeinsätzen beansprucht worden ist, einen mittleren Rauheitswert von $S_a = 1,43 \mu\text{m}$ auf, wohingegen bei den laserimplantierten Werkzeugen ($h_i = 10 \mu\text{m}$) ein marginal geringerer Wert von $S_a = 1,37 \mu\text{m}$ gemessen wird. Sichtbare Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit zeigen sich bei den Platinen, die mit Implantathöhen von 20 µm und 30 µm beansprucht werden. Die optischen Analysen lassen feinmaschige Risse erkennen, deren Orientierung senkrecht zur Ziehrichtung ausgerichtet ist. Darüber hinaus kann mit ansteigender Implantathöhe eine fortschreitende Ausprägung des Rissnetzes beobachtet werden, was sich ebenfalls durch ansteigende Rauigkeiten ($S_a = 1,53 \mu\text{m}$ bei $h_i = 20 \mu\text{m}$; $S_a = 2,09 \mu\text{m}$ bei $h_i = 30 \mu\text{m}$) bemerkbar macht.

Das vorliegende Schädigungsverhalten deutet auf eine abrasive Materialbeanspruchung durch mikrobrechende Prozesse hin, die infolge hoher mechanischer Schubbeanspruchung in Kombination mit hoher thermischer

Wechselbelastung in Erscheinung treten. Adewoye und Page [147] beobachteten ebenfalls in ihren tribologischen Untersuchungen, dass zunehmende Normalkräfte steigende Reibzahlen induzieren, was unter anderem durch die vermehrte Rissausbildung an der Oberfläche eines Reibpartners begründet wird. Korrespondierend zu den Ergebnissen von Adewoye und Page wird auch bei den laserimplantierten Werkzeugen eine Zunahme der Reibzahl mit steigender Kuppelhöhe und folglich zunehmender Eindringtiefe und Rissbildung verzeichnet. Die optischen Analysen bestätigen die Annahme, dass durch Implantathöhen $h_i \geq 20 \mu\text{m}$ steigende Beanspruchungen und Oberflächenschäden auf der Platine durch mikrospannende und mikrobrechende Prozesse hervorgerufen werden, die wiederum zu einer erhöhten tribologischen Beanspruchung im Werkzeug-Werkstück-Kontakt führen.

Untersuchung der metallographischen Beschaffenheit

Um weitere Informationen bezüglich der metallographischen Zusammensetzung der verschlissenen Platinen zu gewinnen, werden abschließend Querschliffaufnahmen veranlasst. Hierzu werden die Bleche quer zu den Verschleißspurriefen getrennt, eingebettet, geschliffen und poliert. Im Anschluss werden optische Analysen mit Hilfe des Laser-Scanning Mikroskops Keyence VK-X200 (Fa. Keyence) an den präparierten Proben durchgeführt, um die Beschaffenheit der Randschichten zu untersuchen. Eine Übersicht der Schichtdickenmessung ist in Bild 26 veranschaulicht. Es ist ersichtlich, dass sowohl unmodifizierte als auch laserimplantierte Werkzeugeinsätze mit Spothöhen von $10 \mu\text{m}$ keine geometrischen Veränderungen auf der Platinenoberfläche hervorrufen. Demgegenüber werden lokal geringe Verschleißriefen bei $20 \mu\text{m}$ hohen Implantaten sichtbar, deren Einkerbungen bei $30 \mu\text{m}$ hohen Strukturen nochmals ansteigen. Die analysierten Querschliffaufnahmen stimmen mit den Erkenntnissen der numerischen Analyse und den Tastschnittmessungen überein. Weiterhin lässt sich durch die Querschliffaufnahmen die metallographische Zusammensetzung der verschlissenen Bleche charakterisieren, die im Ausgangszustand lediglich den Substratwerkstoff 22MnB5 und die AlSi -Beschichtung umfasst. Durch die Wärmebehandlung des Halbzeuges ($> 600 \text{ }^\circ\text{C}$ [13]) diffundieren Eisenatome aus dem Bor-Mangan-Stahl in das AlSi -Schichtsystem, was wiederum die Ausbildung einer schützenden Fe-Al-Si Schicht bewirkt [148]. Aufgrund dieser Phasentransformation wird sowohl die Entkohlung als auch die Verzunderung der Platine vermieden. Vor diesem Hintergrund ist ersichtlich, dass die ausgebildete Schutzschicht bei allen Werkzeugkonfigurationen aktiven Bestand hat, da die Platinendeckschicht zwar lokal plastisch deformiert, jedoch nicht durchstoßen wird.

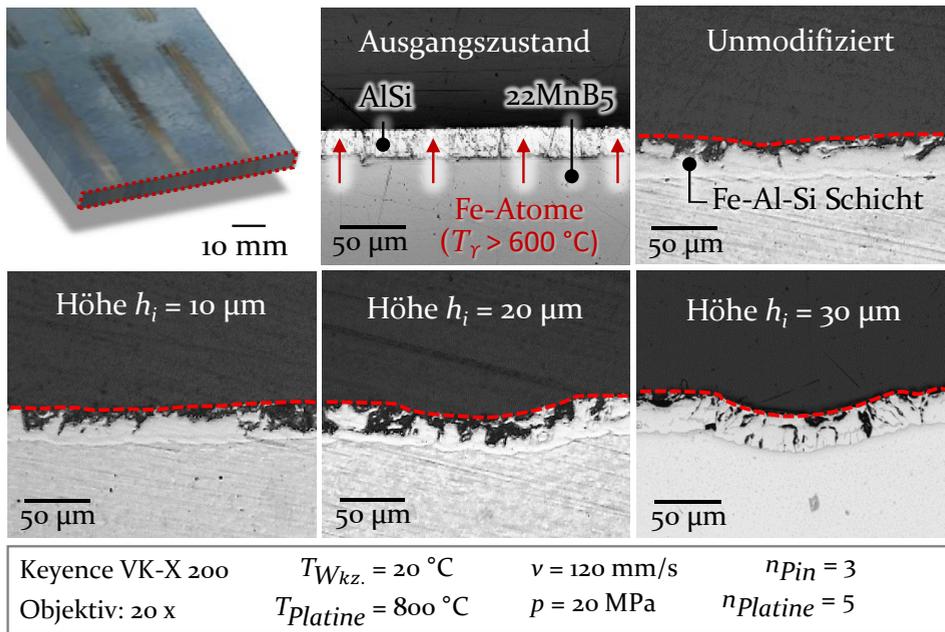


Bild 26: Querschliffaufnahmen der verschlissenen Blechhalbzeuge in Abhängigkeit der eingesetzten Werkzeugkonfiguration

Die taktilen und optischen Messungen belegen, dass in Abhängigkeit der gewählten Werkzeugkonfiguration unterschiedliche tribologische Beanspruchungen auf der Werkstücktopographie hervorgerufen werden. Durch den Einsatz konventioneller sowie laserimplantierter Werkzeuge mit Implantathöhen von $10\ \mu\text{m}$ werden lediglich geringe plastische Deformationen auf der Werkstückoberfläche verursacht. Im Gegensatz dazu werden lokal ansteigende Einkerbungen mit zunehmender Implantathöhe identifiziert, die wiederum auf die geringere Kontaktfläche und steigenden Flächenpressungen der Mikrostrukturen zurückzuführen sind. Während der Abzugsbewegung des Werkzeuges werden folglich abrasiv wirkende Verschleißmechanismen herbeigeführt, deren jeweilige Dominanz vom Beanspruchungskollektiv und der geometrischen Form der laserimplantierten Struktur abhängig ist. In diesem Zusammenhang weisen insbesondere niedrige Implantathöhen, aufgrund von geringen Flächenpressungen, Eindringtiefen und Angriffswinkel, reibungs- und verschleißreduzierende Eigenschaften auf. Trotz divergierender tribologischer Beanspruchungen der Implantate wird die ausgebildete Schutzschicht des Bor-Mangan-Stahls in keinem Anwendungsfall durchbrochen, wodurch ein stetiger Barrierschutz gegen Entkohlung und Verzunderung gewährleistet wird.

6.1.3 **Quantifizierung des Werkzeugverschleißes**

Während der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück treten örtlich und zeitlich stochastisch verteilte Dissipationsvorgänge auf, die sowohl die Reibbedingungen beeinflussen als auch das Verschleißverhalten an beiden metallischen Festkörpern beeinträchtigen. Aus diesem Grund werden neben der Schädigung der Blechplatinen auch prozesstypische Verschleißerscheinungen auf der Werkzeugtopographie erwartet. Zur Verifizierung der Annahmen werden Aufnahmen der Werkzeugkontaktfläche sowohl vor als auch nach den Verschleißuntersuchungen mit Hilfe des Laser-Scanning Mikroskops VK-X200 (Fa. Keyence) angefertigt. Durch die anschließende Überlagerung der beiden dreidimensional aufgelösten Oberflächenkonturen kann die Volumendifferenz und folglich der Oberflächenverschleiß mit Hilfe der Software VK-Analyse Modul (Fa. Keyence) quantifiziert werden. Die exakte Ausrichtung und Überlappung der beiden Werkzeugoberflächen erfolgt anhand mikroerodierter Bohrungen, die vor Versuchsbeginn außerhalb der Werkzeugkontaktflächen eingebracht werden und als Referenzebene fungieren. Bild 27 zeigt die Methodik sowie eine Übersicht der untersuchten Werkzeugoberflächen, die jeweils mit einer Verschleißstrecke von 2250 mm beansprucht worden sind. Die optischen Messanalysen belegen, dass alle Werkzeugtopographien lokal konzentrierte Materialanhaftungen aufweisen, die jeweils in Gleitrichtung des Werkzeuges angelagert sind.

Als Auslöser des adhäsiven Verschleißeffektes können die kombiniert auftretenden Normal- und Tangentialkräfte des Werkzeugpins angeführt werden, welche ein Scheren des Blechwerkstoffes bewirken. Da durch die Wärmebehandlung des Bor-Mangan-Stahls die materialspezifische Schmelztemperatur der AlSi-Beschichtung ($\sim 600\text{ °C}$ [13]) überschritten wird, liegt eine niedrigere Anbindungsfestigkeit des Schichtsystems gegenüber dem Grundwerkstoff vor. Durch die Relativbewegung des Werkzeuges werden schließlich die schwächeren Bindungen außerhalb der Grenzfläche abgeschert, wodurch Materialfragmente vom kohäsiv schwächer gebundenen Werkstück zum kohäsiv stärker gebundenen Werkzeug in Gleitrichtung übertragen werden [87]. Begünstigt durch die hohen thermo-mechanischen Beanspruchungen ergeben sich neue Metallverbindungen, die sich auf dem Werkzeug durch lokale, adhäsive Anlagerungen manifestieren.

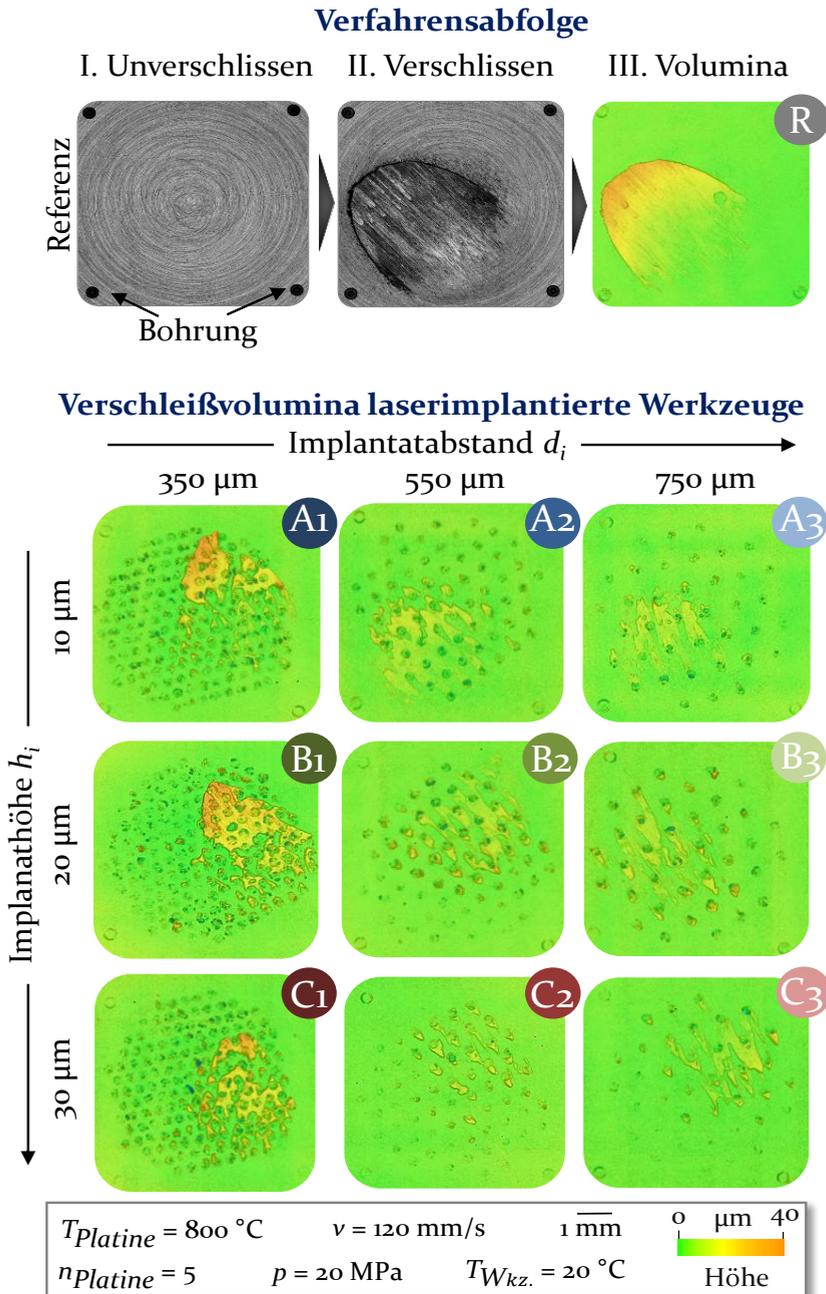


Bild 27: Resultierende Verschleißvolumina der Werkzeugkonfigurationen

Vor diesem Hintergrund lassen sich auf der Werkzeugoberfläche kaum abrasive Schädigungen in Form von Furchungen oder Riefen erkennen, da das Werkzeug eine signifikant höhere Festigkeit und Härte als das austenitierte und folglich erweichte Blechmaterial hat. Bestätigt werden die vorliegenden Erkenntnisse durch Arbeiten von Vilaseca et al. [103], Neubauer [75] und Ghiotti et al. [146], welche ebenfalls Adhäsion als dominierenden Verschleißmechanismus auf der Werkzeugtopographie unter Presshärtebedingungen identifizierten.

Zur genaueren Bewertung des tribologischen Verhaltens wird das vorliegende Verschleißaufkommen der Werkzeugtopographien anhand optischer Vergleichsmessungen quantifiziert und gegenübergestellt. Bild 28 zeigt eine Übersicht der ermittelten Verschleißvolumina, für deren Berechnung jeweils drei Pins pro Werkzeugvariante herangezogen werden. Die Ergebnisse belegen, dass unmodifizierte Werkzeuge (Konfig. R) ein Verschleißvolumen von $\sim 0,027 \text{ mm}^3$ aufweisen, wohingegen alle laserimplantierten Oberflächen mit einem Spotabstand von $350 \mu\text{m}$ (Konfig. A₁, B₁, C₁) ein signifikant höheres Verschleißaufkommen gegenüber diesen Referenzwert besitzen. Das höchste Verschleißvolumen von $\sim 0,059 \text{ mm}^3$ wird für laserimplantierte Werkzeuge mit einem Spotabstand von $350 \mu\text{m}$ und einer Implantathöhe von $20 \mu\text{m}$ verzeichnet (Konfig. B₁). Durch die Verringerung des Deckungsgrades der laserimplantierten Strukturen wird die lokal konzentrierte Verschleißausbildung signifikant reduziert. Es ist ersichtlich, dass eine Erhöhung des Spotabstandes $\geq 550 \mu\text{m}$ zu niedrigeren Verschleißvolumina führt, die mit $\sim 0,012 \text{ mm}^3$ (Konfig. A₂, A₃, C₂) bis zu 46 % geringer als der ermittelte Referenzwert ausfallen. Durch die Variation der Höhe der Implantatstrukturen ergibt sich demgegenüber kein signifikanter Effekt hinsichtlich der Verschleißreduktion.

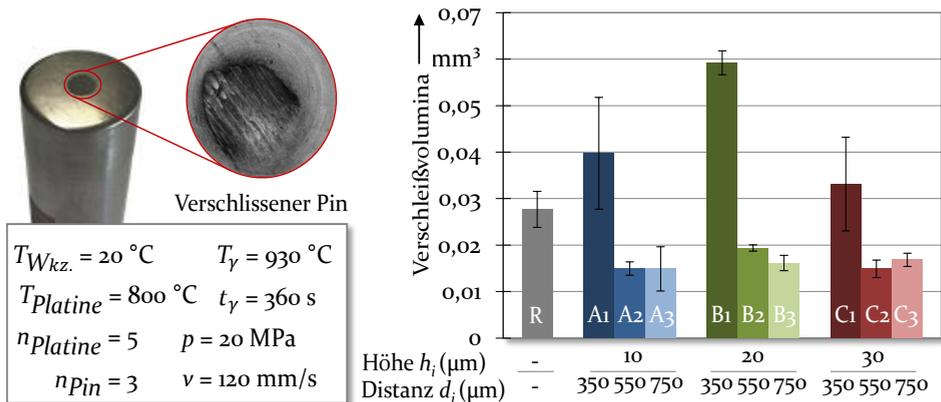


Bild 28: Berechnete Verschleißvolumina der Werkzeugkonfigurationen

Das unterschiedliche Verschleißverhalten der Werkzeugkonfiguration kann, analog zu den Reibmechanismen, auf primäre sowie auf sekundäre Einflussfaktoren zurückgeführt werden. Nach [73] wird die Ausbildung adhäsiven Verschleißes sowohl von den Kontaktverhältnissen der interagierenden Reibpartner, als auch von deren stofflichen Wechselwirkungen in atomarer und molekularer Ebene beeinflusst. Da durch das Laserimplantationsverfahren sowohl die Oberflächengestalt als auch die Materialeigenschaften lokal adaptiert und folglich beide wesentlichen Treiber zur Verschleißreduktion beeinflusst werden, muss eine separate Analyse der beiden Beanspruchungskollektive vorgenommen werden.

Einfluss der Oberflächengestalt

Die quantifizierten Verschleißvolumina zeigen, dass die Oberflächengestalt der laserimplantierten Strukturen einen dominierenden Einfluss auf die metallische Adhäsion hat. Vor allem modifizierte Werkzeugoberflächen mit Spotabständen von 350 μm weisen ein signifikant erhöhtes Verschleißaufkommen gegenüber den restlichen Werkzeugkonfigurationen auf. Eine mögliche Begründung für den ansteigenden Verschleiß bei hohen Deckungsgraden ist durch die zunehmende Verhakung der Rauheitsspitzen an den interagierenden Wirkflächen gegeben. Durch die Relativbewegung des Werkzeugspins werden vermehrt adhäsive Verschleißpartikel aus dem Blechwerkstoff abgetragen, welche in den eng anliegenden Zwischenräumen der Implantate angehäuft werden. Durch die Erhöhung des Spotabstandes $\geq 550 \mu\text{m}$ wird diese konzentrierte Verschleißbildung unterbunden. Als Begründung wird die abnehmende Anzahl an Kontaktpunkte zwischen Werkzeug und Werkstück vermutet, die eine Verringerung der metallischen Bindungskräfte in der Wirkfuge implizieren. Es wird angenommen, dass gegenüber konventionelle Werkzeugoberflächen ein verringertes Verhaken der interagierenden Rauheitsspitzen auftritt, was wiederum eine abnehmende Scherwirkung der Mikrokontakte während der Gleitbewegung des Werkzeugspins zur Folge hat. Im Gegensatz dazu lässt die Analyse der Implantathöhe keine signifikanten, verschleißreduzierenden Abhängigkeiten erkennen. Trotz steigender plastischer Deformationen und zunehmenden Reibzahlen mit ansteigender Kuppelhöhe kann keine direkte Erhöhung der Verschleißvolumina bei eben diesen Implantatstrukturen identifiziert werden. Im Hinblick auf die gewonnenen Erkenntnisse der Halbzeugcharakterisierung (Abschnitt 6.1.2) wird angenommen, dass niedrige Implantathöhen $\leq 20 \mu\text{m}$ vorrangig mikropflügende Prozesse mit elastisch-plastischen Deformationen verursachen, die nur einen geringfügigen Werkstoffabtrag mit niedrigen Reibkräften zur Folge haben. Demgegenüber werden mit steigender Implantathöhe vermehrt mikrospanende

Prozesse mit höheren Anteilen an abrasiven Verschleißpartikeln hervorgerufen, die aufgrund des keramischen, adhäsionsabweisenden Charakters der Oberflächenmodifikationen nicht an den Strukturen haften bleiben, sondern an den Rändern der Verschleißfurche als lose Materialfragmente angelagert werden.

Die Beeinflussung des tribologischen Verhaltens durch die gezielte Anpassung der Oberflächengestalt wurde ebenfalls von Tenner [115] anhand mikrostrukturierter Werkzeugsysteme unter schmierstofffreien Tiefziehbedingungen nachgewiesen. Die Ergebnisse der Streifenziehversuche belegen, dass durch die Adaption des Deckungsgrades der Strukturen sowohl das Reib- als auch das Verschleißverhalten signifikant beeinflusst wird. Mit Zunahme der Flächendeckung der lasergenerierten Mikrokavitäten von 10 % auf 35 % konnten die Reibkräfte sowie die Materialanhaftungen maßgeblich reduziert werden, was auf die lokale Erhöhung der Flächenpressung und dem dadurch bedingten Einglätten der interagierenden Rauheitsspitzen zurückgeführt worden ist. Eine weitere Erhöhung des Deckungsgrades auf 50 % bewirkte demgegenüber reibungs- und verschleißerhöhende Effekte, die wiederum durch die ansteigende Scherwirkung der Strukturkanten erklärt worden sind.

Einfluss der Materialeigenschaften

Neben der Oberflächengestalt und den Berührungsverhältnissen der interagierenden Reibpartner wird eine weitere, sekundäre Einflussnahme auf das Verschleißverhalten durch die materialspezifischen Eigenschaften der Implantatstrukturen angenommen. Durch das Laserdispargieren der keramischen Hartstoffpartikel entsteht ein Metall-Matrix Verbund, der zu 65 % aus dem martensitischen Werkzeugstahl 1.2367 und zu 35 % aus den TiB_2 -Partikeln besteht [124]. Die Oberflächenmodifikationen verfügen demnach über einen hohen Anteil an metall-keramischen TiB_2 -Partikel, wodurch die chemische Affinität zur metallischen Adhäsion verringert wird. Nach Czichos [71] weist Titan als Übergangsmetall eine sehr geringe Dichte an freibeweglichen Elektronen auf. Hierdurch werden die atomaren Wechselwirkungen in der Randschicht zwischen Werkzeug und Werkstück reduziert, infolgedessen weniger neue Metallverbindungen zwischen den Festkörpern entstehen. Vor diesem Hintergrund nimmt der Materialübertrag in Form adhäsiven Verschleißes unter Einsatz titanbasierter Materialien ab. Eine Bestätigung dieser These konnte Neubauer [75] durch Verwendung unmodifizierter sowie laserstrahllegierter Presshärtewerkzeuge aufzeigen.

Zur Untersuchung des tribologischen Einsatzverhaltens wurden Stift-Scheibe-Experimente bei Pingschwindigkeiten von 120 mm/s, Flächenpressungen von 10 MPa und Blechtemperaturen von 800 °C durchgeführt. Durch das Einbringen von 0,34 Gew.-% Titan in die Randschicht des Werkzeugstahls WP7V konnte das Verschleißvolumen gegenüber unmodifizierte Werkzeugstähle um mehr als 20 % reduziert wird. Mozgovoy et al. [149] und Schwingenschlögl [73] belegten ebenfalls anhand ihren tribologischen Untersuchungen, dass durch die Applikation titanbasierter Beschichtungssysteme die Verschleißbeständigkeit der Werkzeuge erhöht wird. Mozgovoy et al. wiesen mittels Streifenziehversuche nach, dass TiAlN beschichtete Werkzeugeinsätzen gegenüber unmodifizierte Oberflächen eine niedrigere Affinität zu aluminiumhaltigen Bestandteilen besitzen, was durch reduzierte Verschleißanhaftungen auf der Werkzeugtopographie sichtbar wurde. Schwingenschlögl bestätigte die verschleißreduzierende Wirkung titanbasierter Schichtsysteme, indem er miniaturisierte B-Säulen mit unmodifizierten sowie AlCrTiN und AlTiN beschichteten Werkzeugeinsätzen unter Presshärtebedingungen abpresste. Das verbesserte tribologische Verhalten der Werkzeugbeschichtungen wird durch die adhäsionsmindernden Eigenschaften von Titan erklärt. Weiterhin wurde von dem Autor angeführt, dass die signifikant höhere Härte der Legierungselemente verschleißreduzierende Eigenschaften verursacht. In diesem Zusammenhang gibt es in der Literatur mehrere Hinweise darauf, dass die Ausbildung adhäsiver Materialanhaftungen auf Werkzeugstählen umgekehrt proportional zu deren Härteeigenschaften ist [150]. Da der laserimplantierte Hartstoff TiB₂ die höchste Härte von allen Metallboriden aufweist [132], wird ein zusätzlicher verschleißreduzierender Effekt aufgrund der signifikanten Härtesteigerungen der Metallmatrix vermutet. Durch das schmelzmetallurgische Dispergieren der Titanpartikel in die martensitische Werkstoffmatrix ergeben sich Implantathärten von ≤ 1600 HV₁₀ [133], die im Vergleich zum unmodifizierten Werkzeugstahl X38CrMoV5-3 (~ 600 HV₁₀) um ~ 1000 HV₁₀ höher sind. In den Randschichten der Oberflächenmodifikationen liegen demnach größere innere Bindungsenergien vor, welche Schutz gegen abrasive Schädigungen sowie adhäsiven Verschleiß bieten. Untersuchungen von Neubauer [75] bestätigten, dass höhere Härten zu niedrigeren tribologischen Werkzeugbeanspruchungen führen, da unter thermo-mechanischer Belastung die Rauheitsspitzen in der Wirkfuge schwerer einglätten, wodurch die Reib- und Adhäsionskräfte abnehmen.

Analyse der Verschleißbeständigkeit der Implantate

Neben der verschleißreduzierenden Wirkung der Oberflächenmodifikationen stellt die Verschleißbeständigkeit der lasergenerierten Strukturen eine weitere grundlegende Prämisse für die industrielle Anwendung dar. Aus der Literatur ist bekannt, dass exponierte Strukturen hohe Anfälligkeiten gegenüber abrasiven Schädigungen aufweisen, infolgedessen deren Funktionstüchtigkeit nicht mehr gewährleistet ist [120].

Um grundlegende Aussagen hinsichtlich der Verschleißbeständigkeit der Oberflächenmodifikationen treffen zu können, werden zunächst die optischen Vergleichsmessungen aus Bild 27 herangezogen. Durch die Überlagerung der unverschlissenen und verschlissenen Werkzeugtopographie werden geometrische Abweichungen infolge der tribologischen Beanspruchung sichtbar, die wiederum Rückschlüsse auf das Abrasionsverhalten der Implantate zulassen. Da bei allen laserimplantierten Werkzeugkonfigurationen weder Fehlstellen noch Rissbildungen durch die optischen Messungen detektiert worden sind, kann grundlegend eine hohe Beständigkeit gegenüber Oberflächenermüdung und Abrasion angenommen werden.

Zur Verifizierung dieser Annahme sowie zur weiteren Vertiefung des Verständnisses werden EDX-Analysen durchgeführt. Anhand der REM-Aufnahmen kann die chemische Zusammensetzung der verschlissenen Werkzeugoberfläche gemessen werden, was wiederum Erkenntnisse hinsichtlich möglicher Partikelabbrüche der titanbasierten Strukturen liefert. Bild 29 zeigt die chemische Elementzusammensetzung einer unmodifizierten und laserimplantierten Werkzeugoberfläche (Konfig. R, A3), die beide mit einer identischen Verschleißstrecke von 2250 mm beansprucht worden sind. Beide Werkzeugtopographien weisen ausgeprägte adhäsive Verschleißanhaftungen auf, die durch eine längliche Form in Ziehrichtung gekennzeichnet sind. Die EDX-Messungen belegen, dass das anhaftende Material zu einem Großteil aus Al und Fe mit geringeren Anteilen an Si besteht, welches bei der Relativbewegung des Werkzeugkörpers von der Beschichtung der Bor-Mangan-Platine abgeschert worden ist. In Übereinstimmung mit den berechneten Verschleißvolumina (Bild 28) zeigt die laserimplantierte Werkzeugoberfläche weniger Materialanhaftungen als der unmodifizierte Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-3 auf. Weiterhin wird aus den EDX-Messungen ersichtlich, dass die adhäsiven Verschleißanhaftungen der modifizierten Werkzeuge keine Titanfragmente oder agglomerierte Ti-Elemente aufweisen, was wiederum die hohe Beständigkeit der exponierten Oberflächenmodifikationen gegenüber Abrasion und Oberflächenermüdung bestätigt.

Als Ursache für die hohe Widerstandsfähigkeit wird der Metall-Matrix Verbund der Strukturen vermutet, welcher durch das laserbasierte Aufschmelzen der duktilen Werkzeugmatrix und dem darauffolgenden Implantierten der hochfesten TiB_2 -Partikel entsteht. Aufgrund des erzwungenen Werkstoffverbundes entstehen rotationssymmetrische Strukturen, die zu $\sim 75\%$ im Substratmaterial eingebunden und zu $\sim 25\%$ an der Werkzeugoberfläche als kuppelförmige Geometrie sichtbar sind [18]. Durch die tiefe Verankerung der Implantate können die auftretende Normal- und Tangentialkräfte in das Substrat abgeleitet werden, ohne deren Gestalt zu schädigen.

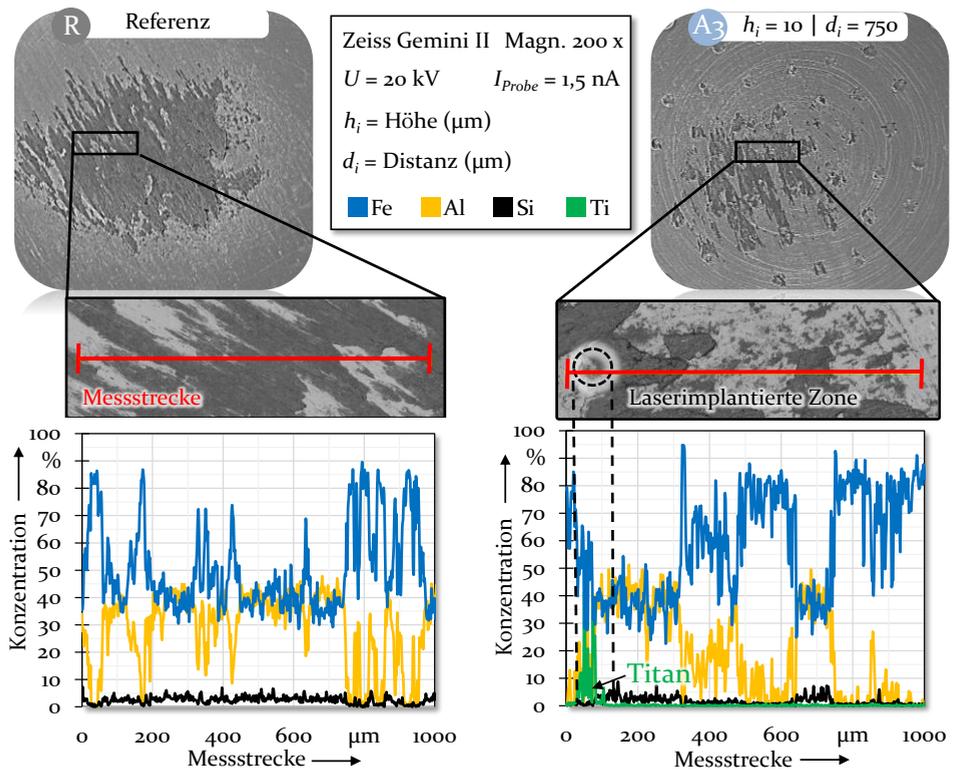


Bild 29: EDX-Analyse zur Untersuchung der chemischen Elementzusammensetzung

Die hohe Verschleißbeständigkeit wurde ebenfalls von Hilgenberg und Steinhoff [126] anhand eines Twin-Disk Tests nachgewiesen. Hierzu nutzten die Autoren einen laserimplantierten Walzkörper, der unter geschmierten Bedingungen mit einer Normalkraft von bis zu 7 kN gegen einen gehärteten Gegenkörper gepresst und zeitgleich rotiert worden ist. Die Versuche zeigten, dass auch nach $1,26 \times 10^{26}$ Rotationen weder Implantate

aus dem Substratwerkstoff herausbrachen noch signifikante Oberflächenschädigungen auf den beiden Walzkörper erkennbar waren. Durch den erschaffenen Metall-Matrix Verbund konnte sowohl der adhäsive Verschleiß mit Hilfe der keramischen Partikel reduziert als auch auftretende Prozesskräfte aufgrund der tiefen Verankerung der Oberflächenmodifikationen in die duktile Werkzeugmatrix effektiv abgeleitet werden.

Die Verschleißuntersuchungen belegen, dass durch die Modifikation der Werkzeugoberfläche via Laserimplantation die prozessspezifischen Verschleißerscheinungen signifikant reduziert werden. Durch das lokale Dispergieren der keramischen Hartstoffpartikel in die Werkstoffmatrix wird sowohl die Oberflächengestalt als auch die Materialeigenschaften der Werkzeugtopographie adaptiert, infolgedessen die metallischen Bindungskräfte im Werkzeug-Werkstück Kontakt verringert sowie die chemische Affinität zur Adhäsionsbildung reduziert wird. Vor allem die Abstände der Implantate besitzen einen dominierenden Einfluss auf die Verschleißausbildung. Hohe Deckungsgrade ($\leq 350 \mu\text{m}$) bedingen ein zunehmendes Verhaken der Rauheitsspitzen an den interagierenden Wirkflächen, wodurch vermehrt Verschleißverschleißpartikel aus dem Werkstück abgetragen und schließlich in den eng anliegenden Zwischenräumen der Implantate angelagert werden. Durch eine Erhöhung des Spotabstandes wird diese lokal konzentrierte Verschleißausbildung signifikant reduziert. Des Weiteren belegen die optischen Vergleichsmessungen sowie die EDX-Analysen, dass lasergenerierte Strukturen aufgrund des vorliegenden Metall-Matrix-Verbundes über eine hohe Beständigkeit gegen Abrasion und Oberflächenermüdung verfügen, da weder Rissbildungen der Strukturen noch Titanfragmente in den Materialanhaftungen identifiziert worden sind.

6.1.4 Analyse der thermo-mechanischen Wechselwirkungen

Die thermischen Wechselwirkungen im Werkzeug-Werkstück-Kontakt haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Qualitätsgüte der pressgehärteten Bauteile. Zur vollständigen Erfassung der funktionalen Zusammenhänge muss daher neben den tribologischen Randbedingungen auch das thermische Einsatzverhalten der modifizierten Werkzeugoberflächen als möglicher Sekundäreffekt untersucht werden. Im Zuge dessen wird analysiert, ob die Mikrostrukturen einen Einfluss auf das Abkühlverhalten ausüben und somit veränderte Festigkeiten des Vergütungsstahls hervorrufen.

Untersuchung der thermischen Wechselwirkungen

Die Untersuchung des Abkühlverhaltens erfolgt an einem vom Lehrstuhl für Fertigungstechnologie konzipierten, konstruierten und qualifizierten Abschreckwerkzeug, das mit wechselbaren Kontaktplatten versehen ist [42]. Durch die Anlage ist die Möglichkeit gegeben, den Einfluss der Geometrie, Anzahl und Anordnung der implantierten Hartstoffe auf den Wärmeübergang zu analysieren. Neben konventionellen Werkzeugeinsätzen werden laserimplantierte Kontaktplatten mit unterschiedlichen Höhen ($h_i = 10 \mu\text{m}$, $h_i = 30 \mu\text{m}$) und Spotabständen ($d_i = 350 \mu\text{m}$, $d_i = 750 \mu\text{m}$) unter Kontaktdrücken von 20 MPa und 35 MPa analysiert. Zur Aufzeichnung der Temperaturhistorie wird in das Werkstück ein Thermoelement vom Typ K integriert. Hierdurch kann die Platinentemperatur über den Versuchsablauf gemessen werden, welcher sich in drei Phasen gliedert und in Bild 30 beispielhaft visualisiert ist.

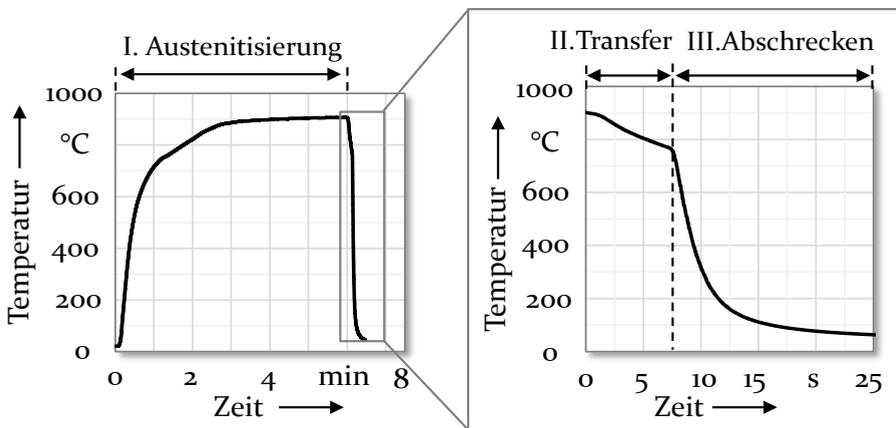


Bild 30: Aufgezeichneter Temperatur-Zeit-Verlauf der Bor-Mangan-Platine

Zu Versuchsbeginn erfolgt die Aufheizung der Bor-Mangan-Platine für $t_\gamma = 360 \text{ s}$ bei $T_\gamma = 930 \text{ °C}$, infolgedessen eine vollständige Austenitisierung des Materialgefüges erzielt wird (I). Nachfolgend wird die Platine manuell in das Abschreckwerkzeug transferiert, was wiederum Wärmeverluste in Form von Konvektion und Strahlung induziert (II). Die aufgezeichneten Transferzeiten ($\sim 5 - 8 \text{ s}$ [27]) und Temperaturen beim Einlegen der Halbzeuge ($\sim 700 \text{ °C}$ [28]) korrespondieren mit den Bedingungen im industriellen Presshärteprozess. Im Anschluss wird durch das Schließen der beiden Werkzeughälften eine rasche Abkühlung des Halbzeuges erzwungen, wobei die Formgebung der Platine gegenüber herkömmlichen Presshärteprozessen nicht beeinträchtigt wird (III). Der direkte metallische Werkzeug-

Werkstück-Kontakt bewirkt eine schnelle Abkühlung in Form von Konduktion, wodurch das Gefüge und somit die mechanischen Eigenschaften des Halbzeuges verändert werden. Da dieser Prozessabschnitt die Qualitätsgüte der Bauteile maßgeblich bestimmt, richtet sich der Fokus der Untersuchung ausschließlich auf die abschließende Phase (III). In Bild 31 sind die resultierenden Platinentemperaturen der III. Phase unter Verwendung konventioneller sowie laserimplantierter Werkzeuge dargestellt.

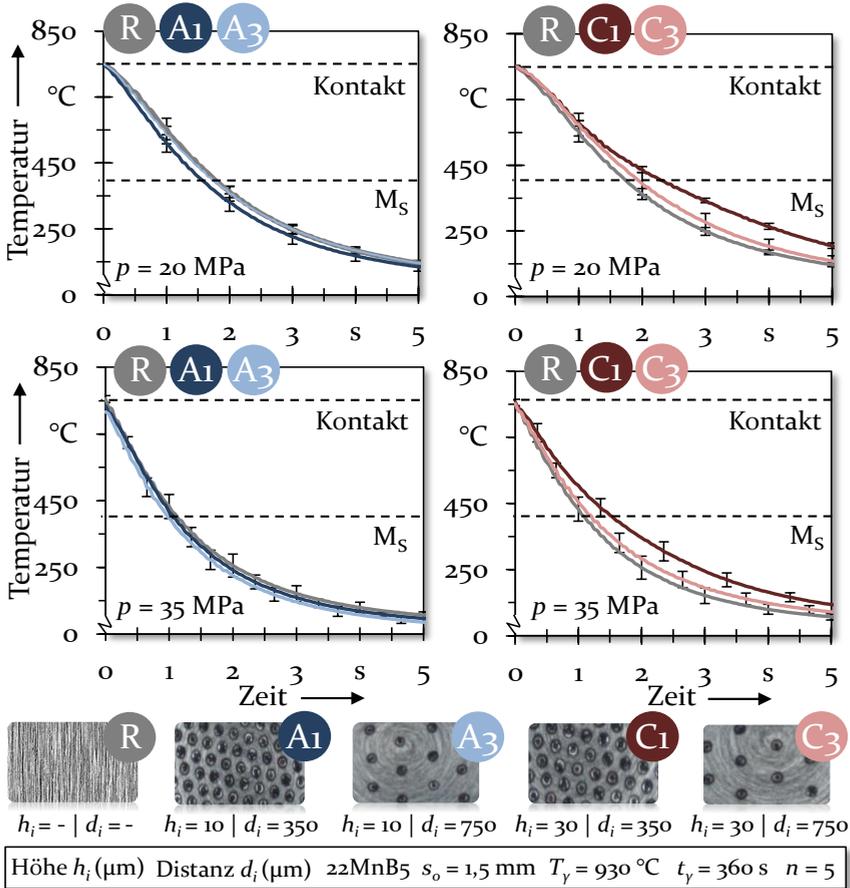


Bild 31: Platinenabkühlung bei geschlossenem Abschreckwerkzeug unter Verwendung konventioneller sowie laserimplantierter Kontaktplatten bei unterschiedlichen Anpressdrücken

Die Temperatur-Zeit-Profile bei 20 MPa Flächenpressungen lassen für unmodifizierte sowie laserimplantierte Kontaktplatten mit niedrigen Spothöhen (Konfig. A1, A3) ähnliche Kurvenverläufe erkennen. Demgegenüber werden unter Verwendung größerer Implantathöhen wesentliche Unterschiede im Abkühlverhalten sichtbar, da beide modifizierten Werkzeugto-

pographien (Konfig. C₁, C₃) den Wärmeübergang in der Wirkfuge erheblich verlangsamen. Der niedrigste Wärmetransfer wird für Mikrostrukturen mit Spotabständen von 350 µm und Kuppelhöhen von 30 µm (Konfig. C₁) erzielt. Durch eine Erhöhung der Flächenpressung von 20 MPa auf 35 MPa wird ein schnellerer Wärmeaustausch von allen Werkzeugsystemen bewerkstelligt. Dieses Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass mit Zunahme der Kontaktnormalkräfte eine höhere Einglättung der intermetallischen Rauheitsspitzen zwischen Werkzeug und Werkstück hervorgerufen wird, was wiederum zu einer Verstärkung des dominierenden, konduktiven Wärmeübertragungsmechanismus führt [61]. Weiterhin wird bei der Analyse des Abkühlvermögens der einzelnen Werkzeugkonfigurationen ersichtlich, dass höhere Abkühlgeschwindigkeiten bei kleinen Implantathöhen (Konfig. A₁, A₃) respektive verringerte Kühlraten bei ausgeprägter Kuppelform hervorgerufen werden (Konfig. C₁, C₃).

Beim Presshärten muss während des hybriden Umform- und Abkühlprozesses eine Mindestabkühlgeschwindigkeit $\dot{T}_{krit.}$ von 27 °C/s vorliegen, um die geforderte mikrostrukturelle Umwandlung von Austenit in Martensit zu initiieren. Wird diese Kühlrate nicht erreicht, so wird gemäß dem werkstoffspezifischen ZTU-Diagramm (Bild 1) bainitisches respektive ferritisches und perlitisches Gefüge gebildet, was erhebliche Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit, Bruchdehnung und Duktilität hat. Um vertiefende Kenntnisse hinsichtlich der thermo-mechanischen Wechselwirkungen zu erarbeiten, werden die erzielten Abkühlraten q aller Werkzeugeinsätze gemäß Gleichung (2) berechnet.

$$q = \frac{T_{Kontakt} - T_{MS}}{\Delta t} \quad (2)$$

In der mathematischen Formel wird die gemessene Temperatur beim Schließen der beiden Werkzeughälften mit $T_{Kontakt}$ berücksichtigt, um einheitliche Versuchsbedingungen trotz möglicher differierender Transferzeiten beim Einlegen zu gewährleisten. Ein weiterer Referenzpunkt bildet die Starttemperatur zur Martensitbildung T_{MS} , welche 425 °C für den Bor-Mangan-Stahl 22MnB5 beträgt [13]. Das vorliegende Zeitintervall zwischen beiden Temperaturwerten wird mit Δt berücksichtigt. Hierdurch lassen sich die Abkühlraten der Werkzeugkonfigurationen berechnen, welche im nachfolgendem Bild 32 gegenübergestellt sind.

Unter Verwendung konventioneller Werkzeugeinsätze (Konfig. R) werden Abkühlraten von ~ 196 °C/s bei 20 MPa und ~ 290 °C/s bei 35 MPa erreicht. Durch den Einsatz laserimplantierter Oberflächen mit Kuppelhöhen von 10 µm werden ähnliche Verhaltensweise in Bezug auf den Wärmetransfer

sichtbar. Die schnellste Platinenabkühlung von $\sim 212 \text{ }^\circ\text{C/s}$ wird bei 20 MPa durch laserimplantierte Kontaktplatten mit Spotabständen von $350 \text{ }\mu\text{m}$ (Konfig. A1) erzielt, wohingegen modifizierte Werkzeuge mit Spotabständen von $750 \text{ }\mu\text{m}$ (Konfig. A3) die höchsten Kühlraten von $\sim 303 \text{ }^\circ\text{C/s}$ bei 35 MPa aufzeigen. Im geschlossenen Abschreckwerkzeug weisen die unmodifizierten Werkzeugeinsätze einen vollflächigen metallischen Kontakt mit dem austenitisierten Halbzeug auf, infolgedessen konduktive Wärmetransportmechanismen an den interagierenden Rauheitsspitzen dominieren und eine schnelle Abkühlung der Platine bewirken. Bei der Verwendung laserimplantierter Werkzeuge mit Implantathöhen von $10 \text{ }\mu\text{m}$ wird angenommen, dass die kuppelförmigen Strukturen vollständig im austenitisierten und folglich erweichten Werkstück verankert sind. Durch das Eindringen der Strukturen in die Platine könnten die metallischen Bindungskräfte zwischen Werkzeug und Werkstück verstärkt werden, was wiederum den Wärmeaustausch in Form von Konduktion beschleunigt.

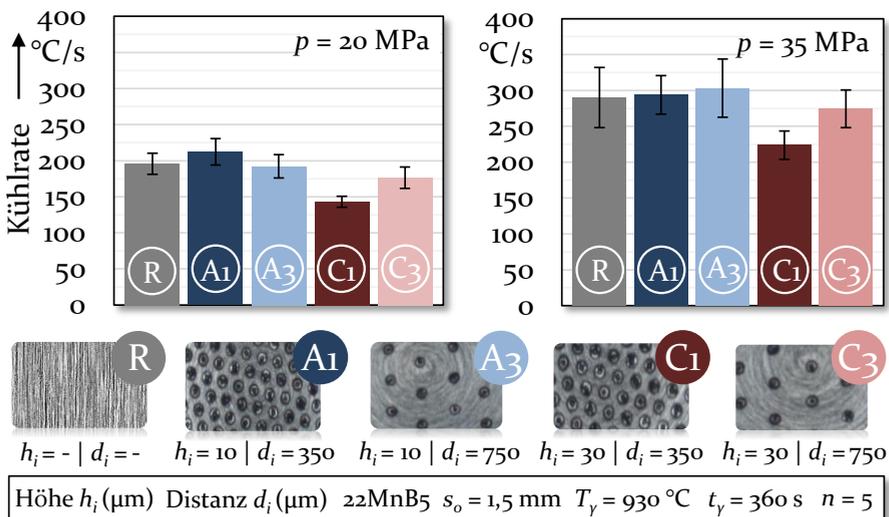


Bild 32: Abkühlraten der Werkstücke unter Verwendung konventioneller sowie laserimplantierter Werkzeugeinsätze in Abhängigkeit des Anpressdruckes

Laserimplantierte Werkzeugoberflächen mit Kuppelhöhen von $30 \text{ }\mu\text{m}$ bedingen demgegenüber niedrigere Abkühlraten. In diesem Zusammenhang wird bei modifizierten Kontaktplatten mit Spotabständen von $750 \text{ }\mu\text{m}$ (Konfig. C3) ein Wärmeübergang von $\sim 177 \text{ }^\circ\text{C/s}$ bei 20 MPa und $\sim 274 \text{ }^\circ\text{C/s}$ bei 35 MPa berechnet, wohingegen Spotdistanzen von $350 \text{ }\mu\text{m}$ (Konfig. C1) geringere Abkühlgeschwindigkeiten von $\sim 143 \text{ }^\circ\text{C/s}$ respektive $\sim 224 \text{ }^\circ\text{C/s}$ induzieren. Es wird angenommen, dass die größeren Implantate der beiden Werkzeugkonfigurationen C1 und C3 nicht vollständig in das Werkstück

eindringen. Hierdurch ergeben sich Lufteinschlüsse in den Zwischenräumen der exponierten Oberflächenmodifikationen, welche den direkten metallischen Kontakt in der Wirkfuge unterbrechen und den Wärmeübergang in Form von Konvektion und Strahlung hemmen. Des Weiteren zeigt die Analyse der Spotabstände der beiden Konfigurationen C_1 und C_3 auf, dass höhere Abkühlraten durch weitere Spotdistanzen erzielt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass weniger Implantate und folglich lokal höhere Anpressdrücke vorliegen, was wiederum ein tieferes Eindringen in den austenitisierten Werkstoff verursacht. Demzufolge wird das Gesamtvolumen an Lufteinschlüssen reduziert, was die Wärmetragung in der Wirkfuge begünstigt.

Ähnliche Verhaltensweisen hinsichtlich der thermischen Wechselwirkungen bei unterschiedlichen Kontaktbedingungen wurden von Hoff [24] mit Hilfe von Abschreckversuchen nachgewiesen. Für die Untersuchungen wurde eine 2,5 mm dicke Bor-Mangan-Platine für 180 s bei 950 °C austenitisiert, die im Anschluss bei verschiedenen Ziehspalten (0 mm - 5,5 mm) in einem Abschreckwerkzeug abgekühlt worden ist. Die höchsten Abkühlraten wurden bei vollständigem Werkzeugverschluss identifiziert. Als Ursache wird der beidseitige metallische Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück angeführt, infolgedessen kinetische Energien in Form von Molekülen und Elementarteilchen mittels konduktivem Wärmetransport übertragen werden. Mit Zunahme des Spaltabstandes verringert sich der Wärmetransfer in der Wirkfuge sukzessive. Je größer der Abstand des Spalts, desto mehr Luftvolumen wird zwischen Werkzeug und Werkstück eingeschlossen. Der Wärmetransport wird zunehmend gehemmt, da Luft als Isolator wirkt und die Wärmeleitfähigkeit erheblich beeinträchtigt. Darüber hinaus wird der konduktive Wärmetransport zunehmend durch Strahlungsemission und Konvektion überlagert, wodurch weniger Wärmeenergie von der Wärmequelle zur Wärmesenke transferiert werden kann.

Trotz divergierender Abkühlraten wird unter Verwendung konventioneller sowie laserimplantierter Werkzeugsysteme die geforderte Mindestabkühlgeschwindigkeit von 27 °C/s stets überschritten, infolgedessen eine martensitische Phasenumwandlung initiiert wird. Zur Verifizierung der angeführten Ursache-Wirkzusammenhänge und der getroffenen Annahmen hinsichtlich des Materialgefüges werden nachfolgend die Oberflächentopographien der Werkstücke charakterisiert sowie die mechanischen Eigenschaften der abgeschreckten Halbzeuge anhand von Härtemessungen und Zugversuchen analysiert.

Charakterisierung der Werkstücktopographie

In den nachfolgenden Bildern 33 und 34 sind beispielhafte Mikroskopaufnahmen der Werkstückoberflächen in Abhängigkeit der verwendeten Werkzeugkonfiguration und Flächenpressung abgebildet.

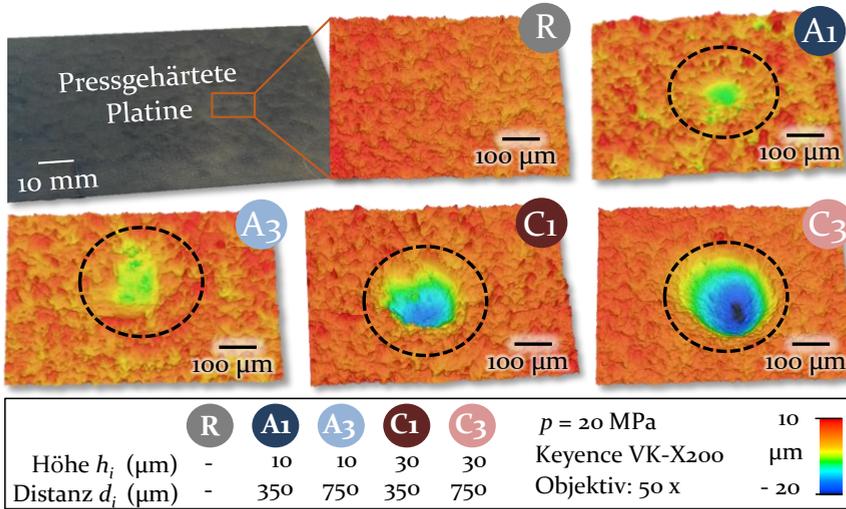


Bild 33: Optische Analyse der abgeschreckten Platinen bei 20 MPa Flächenpressung

Die optischen Messungen in Bild 33 belegen, dass Oberflächenmodifikationen mit Kuppelhöhen von 10 μm (Konfig. A1, A3) Eindringtiefen von 9 - 10 μm in der Platinenoberfläche verursachen. Demgegenüber werden durch Verwendung 30 μm hoher Implantate, steigende Eindringtiefen an der Werkstückoberfläche sichtbar. Bei Spotabständen von 350 μm (Konfig. C1) kann eine durchschnittliche Vertiefung von $\sim 15 \mu\text{m}$ identifiziert werden, während Spotdistanzen von 750 μm (Konfig. C3) Einkerbungen von $\sim 20 \mu\text{m}$ bewirken. Identische Verhaltensmuster lassen sich bei der Analyse der Platinetopographien erkennen, die mit 35 MPa Flächenpressung beansprucht worden sind (Bild 34). Bei modifizierten Werkzeugen mit Implantathöhen von 10 μm werden wiederum Eindringtiefen von $\sim 10 \mu\text{m}$ sichtbar. Mit zunehmender Ausprägung der Spothöhe werden demgegenüber steigende Einkerbungen von $\sim 19 \mu\text{m}$ (Konfig. C1) respektive $\sim 25 \mu\text{m}$ (Konfig. C3) erzielt.

Die optischen Messungen bestätigen die Annahme, dass 10 μm hohe Implantate während des Abschreckprozesses vollständig im austenitisierten Werkstück verankert sind, infolgedessen ein vollflächiger Werkzeug-Werkstück-Kontakt hervorgerufen wird. Durch den direkten metallischen Kontakt werden vorrangig konduktive Wärmetransportmechanismen in

der Wirkfuge mit hohe Abkühlraten herbeigeführt. Demgegenüber dringen die 30 μm hohen Implantatkuppeln der Werkzeugkonfigurationen C₁ und C₃ nicht vollständig in das austenitisierte Werkstück ein. Beim Abschrecken entstehen demzufolge mehrere Luftreservoirs in den Zwischenräumen der modifizierten Kontaktplatten, wodurch der direkte metallische Kontakt unterbrochen und der Wärmetransport in Form von Strahlungsemission und Konvektion gehemmt wird. Es bestätigt sich die Vermutung, dass mit niedrigerer Implantatanzahl (Konfig. C₃) zunehmende Kontaktdrücke und folglich lokal steigende Eindringtiefen in die Werkstückoberfläche hervorgerufen werden. Durch die Verringerung des mikroskopischen Spaltes zwischen Werkzeug und Werkstück wird das Volumen der Luftsinschlüsse minimiert, was wiederum die Wärmetragung begünstigt.

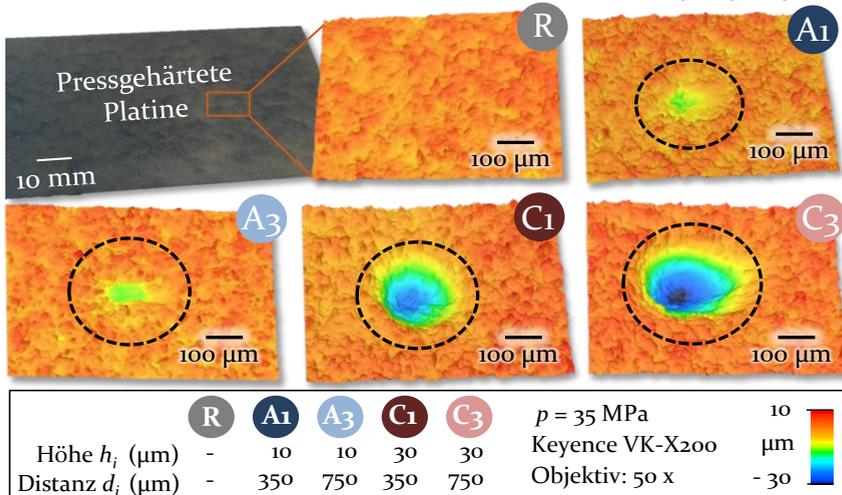


Bild 34: Optische Messungen der abgeschreckten Halbzeuge bei 35 MPa Flächenpressung

Analyse der mechanischen Eigenschaftsprofile

Anhand der Abschreckversuche konnte gezeigt werden, dass die dispergierten keramischen Partikel die thermischen Wechselwirkungen im Presshärteprozess lokal beeinflussen. Da die Temperaturhistorie des zu verarbeiteten Halbzeuges wiederum Auswirkung auf die Gefügetransformation und die mechanischen Eigenschaften der Bauteile hat, wird im Folgenden ermittelt, ob die laserimplantierten Hartstoffmaterialien veränderte Eigenschaftsprofile der warmumgeformten Bauteile verursachen. Es wird erwartet, dass alle Probenkörper ein martensitisches Gefüge mit Härten $> 473 \text{ HV}_{10}$ aufweisen, da die erforderliche Mindestabkühlgeschwindigkeit $> 27 \text{ }^\circ\text{C/s}$ gemäß dem ZTU-Diagramm in Bild 1 stets übertroffen wird. Zur Analyse der Gefügeeigenschaften der Halbzeuge werden Querschliffe sowohl vor als auch nach den Abschreckversuchen durchgeführt. Bild 35 zeigt

exemplarische Aufnahmen der metallographischen Untersuchungen. Der verwendete Bor-Mangan-Stahl weist im Ausgangszustand ein feinkörniges ferritisch-perlitisches Gefüge auf, das im Querschliff durch weiße (Ferrit) und dunkle (Perlit) Phasenanteile sichtbar ist. Durch die Austenitisierung der Platine oberhalb der werkstoffspezifischen AC_3 -Temperatur ($\sim 845^\circ\text{C}$) und dem anschließenden Abschrecken mit einer Kühlrate $> 27^\circ\text{C/s}$ erfolgt eine diffusionslose Umwandlung des kubisch-flächenzentrierten Austenits in kubisch-raumzentriertes und tetragonal verzerrtes Martensit, welches durch eine nadelförmige Struktur gekennzeichnet ist [61]. Da bei den abgeschreckten Versuchsproben die Nadelstruktur des Martensits in den Querschliffaufnahmen (Bild 35 b) stets erkennbar ist, kann eine vollständige martensitische Gefügeumwandlung angenommen werden.

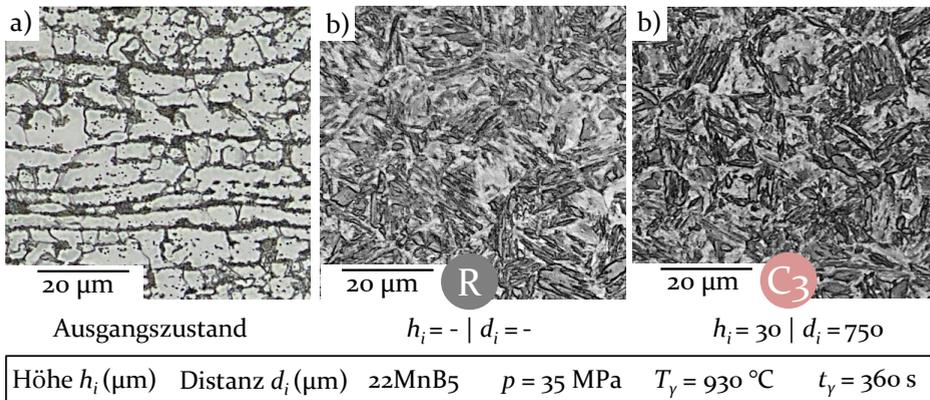


Bild 35: Querschliffaufnahmen der 22MnB5 Platine vor a) und nach b) dem Abschrecken

Um vertiefende Kenntnisse hinsichtlich den mechanischen Eigenschaften der abgeschreckten Platinen zu bekommen, werden zudem Härtemessungen nach Vickers durchgeführt. Die Härtewerte der abgeschreckten Bor-Mangan-Platinen sind im nachfolgendem Bild 36 gegenübergestellt. Die Gegenüberstellung der Härtemessungen zeigt, dass bei 20 MPa Flächenpressungen sowohl konventionelle als auch laserimplantierte Kontaktplatten mit 10 µm Spothöhe ähnliche Platinenhärten von $\sim 520 \text{ HV}_{10}$ erreichen. Demgegenüber wird ein signifikanter Härteabfall durch den Einsatz laserimplantierter Werkzeuge mit Spothöhen von 30 µm verzeichnet. Die niedrigste Härte von $\sim 479 \text{ HV}_{10}$ (Konfig. C1) wird anhand modifizierter Kontaktplatten mit Spotabständen von 350 µm erzielt, wohingegen eine Vergrößerung der Spotdistanz auf 750 µm einen Anstieg der Härte auf $\sim 508 \text{ HV}_{10}$ (Konfig. C3) zur Folge hat. Durch die Erhöhung der Kontaktnormalkräfte von 20 MPa auf 35 MPa werden ähnliche Verhaltensweisen in Bezug auf die resultierenden Härteeigenschaften der abgeschreckten Platinen identifiziert. Konventionelle Werkzeuge bewirken eine Platinenhärte

von ~ 518 HV₁₀, wohingegen durch modifizierte Werkzeuge mit 10 µm Spothöhen, die Härte­werte um 5 % (~ 541 HV₁₀, Konfig. A₃) respektive 6 % (~ 551 HV₁₀, Konfig. A₁) ansteigen. Durch Vergrößerung der Kuppelhöhe auf 30 µm werden signifikant reduzierte Härten verzeichnet, welche sich auf ~ 507 HV₁₀ (Konfig. C₃) respektive ~ 489 HV₁₀ (Konfig. C₁) belaufen.

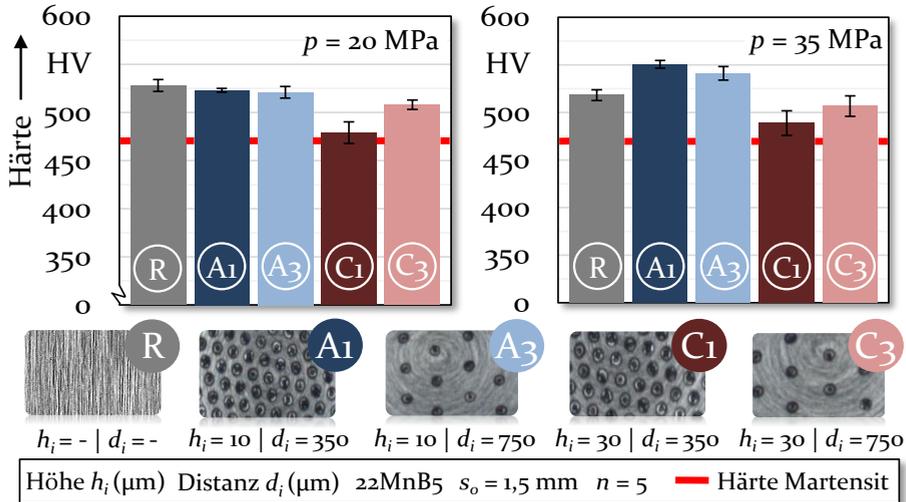


Bild 36: Gemessene Härten der abgeschreckten Platinen unter Verwendung konventioneller sowie laserimplantierter Werkzeugeinsätze mit variierenden Anpressdrücken

Die Ergebnisse der Härtemessungen belegen den direkten Einfluss des werkzeugspezifischen Wärmeübergangs auf die resultierende Phasenumwandlung und mechanischen Eigenschaften der pressgehärteten Bauteilkomponenten. Korrespondierend zu den Abschreckversuchen werden durch laserimplantierte Kontaktplatten mit 10 µm hohen Implantaten höhere Abkühlraten und Platinenhärten erzielt, als durch modifizierte Einsätze mit 30 µm Spothöhen. Während des Abschreckprozesses sind die laserimplantierten Werkzeuge mit Spothöhen von 10 µm vollständig im austenitisierten Werkstück verankert, wodurch ein beidseitiger metallischer Werkzeug-Werkstück-Kontakt mit dominierender Wärmeleitung und folglich hohen Abkühlraten hervorgerufen wird. Demgegenüber dringen die 30 µm hohen Implantatkuppeln nicht vollständig in die Platine ein, infolgedessen Luft­einschlüsse in den Zwischenräumen der modifizierten Kontaktplatten entstehen, die wiederum den Wärmetransport in Form von Strahlung und Konvektion hemmen. Es wird vermutet, dass mit abnehmender Implantatanzahl der Wärmeübergang in der Wirkfuge begünstigt wird, da lokal höhere Flächenpressungen und Eindringtiefen der Oberflächenmodifikationen vorliegen, wodurch das Luftvolumen und der Wärme-

stau zwischen Werkzeug und Werkstück minimiert wird. Das unterschiedliche Abkühlverhalten hat erheblichen Einfluss auf die resultierenden Gefügeeigenschaften der pressgehärteten Bauteile. Durch die erzwungene Abkühlung der austenitisierten Bor-Mangan-Platinen werden thermo-mechanischen Ausgleichsvorgänge im Materialgefüge unterbunden. Der Kohlenstoff verbleibt zwangsgelöst im Gitter, wodurch sich starke Verzerrungen in der Gitterstruktur ergeben. Mit zunehmender Abkühlgeschwindigkeiten steigen die Versetzungs- und Diffusionsbehinderungen im Material an, was zu stärkeren Gitterverzerrungen und folglich zu steigenden Härten im Halbzeug führt [151]. Da laserimplantierte Werkzeuge mit Höhen von $10\ \mu\text{m}$ den Wärmeaustausch in der Wirkfuge begünstigen, werden insbesondere durch diese Werkzeugkonfigurationen hohe Härten im Werkstück erzielt.

Untersuchungen von Svec [35] bestätigen die Auswirkung unterschiedlicher Kontaktbedingungen und Abkühlgeschwindigkeiten auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften der warmumgeformten Bauteile. Für die Versuche wurde eine $1,5\ \text{mm}$ dicke Bor-Mangan-Platine für $180\ \text{s}$ bei $900\ ^\circ\text{C}$ austenitisiert und anschließend in einem partiell beheizten Abschreckwerkzeug mit einer wassergekühlten ($T_{Wkz} = 20\ ^\circ\text{C}$) sowie beheizten Zone ($T_{Wkz} = 400\ ^\circ\text{C}$) unter definierten Kontaktnormalkräften von $5\ \text{MPa}$ sowie $10\ \text{MPa}$ abgeschreckt. Bei beiden Anpressdrücken wurden die höchsten Abkühlraten in der gekühlten Werkzeughälfte erzielt, was wiederum zu einem martensitischem Materialgefüge mit Härten von $\sim 550\ \text{HV}_{0,1}$ führte. Demgegenüber verringerte sich durch die beheizte Werkzeugzone die Temperaturdifferenz und somit die Abkühlrate zwischen Werkzeug und Werkstück signifikant, infolgedessen ein bainitisches Gefüge mit Härtewerten von $\sim 400\ \text{HV}_{0,1}$ ausgebildet worden ist.

Trotz divergierender Abkühlraten der konventionellen und laserimplantierten Werkzeuge wird von allen Probenkörper die Mindesthärte für Martensit ($\sim 474\ \text{HV}_{10}$ [13]) überschritten. Im Zuge dessen wird eine signifikante Erhöhung des plastischen Fließverhaltens der warmumgeformten Bauteile erwartet, was für die Herstellung sicherheitsrelevanter Karosseriekomponenten in Bezug auf deren Intrusionswiderstand von entscheidender Bedeutung ist. Zur Verifizierung dieser Annahme werden Sekundärproben aus den abgeschreckten Halbzeugen mittels Laserbeschnitt entnommen, die im Anschluss anhand uniaxialer Zugversuche geprüft werden. Hierdurch können weitere Erkenntnisse hinsichtlich dem plastischen Deformationsverhalten der warmumgeformten Proben gewonnen

werden. Die ermittelten Fließkurven der abgeschreckten Proben in Abhängigkeit der applizierten Flächenpressung und Werkzeugkonfiguration sind in Bild 37 dargestellt.

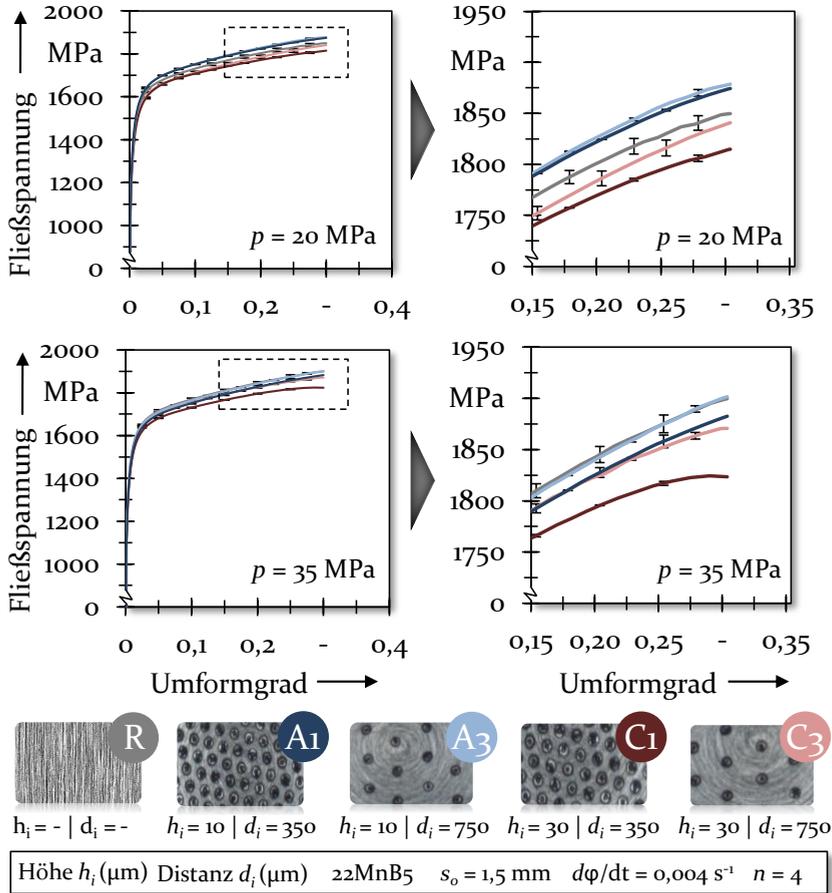


Bild 37: Ermittelte Fließkurven der abgeschreckten Proben in Abhängigkeit der Werkzeugkonfiguration und der applizierten Flächenpressung

Aus den Fließkurvenverläufen geht hervor, dass die verwendeten Werkzeugeinsätze das plastische Formänderungsvermögen der Vergütungsstähle nachhaltig beeinflussen. Korrespondierend zu den Härtemessungen lässt sich diese Verhaltensweise durch die unterschiedlichen Kontaktbedingungen und thermischen Wechselwirkungen der Werkzeugkonfigurationen erklären. Aufgrund des schnellen Wärmetransfers wird durch das Abschrecken mittels konventioneller sowie laserimplantierter Werkzeugtopographien mit $10 \mu\text{m}$ Sporthöhe ein höheres Fließspannungsniveau erreicht als durch den Einsatz modifizierter Kontaktplatten mit $30 \mu\text{m}$ hohen

Implantaten. Die niedrigsten Abkühlgeschwindigkeiten respektive Fließspannungen werden anhand modifizierter Werkzeuge mit Spothöhen von 30 μm und Implantatabständen von 350 μm (Konfig. C1) hervorgerufen, wohingegen durch Verwendung laserimplantierter Kontaktplatten mit Spothöhen von 10 μm und Implantatdistanzen von 750 μm (Konfig. A3) tendenziell der größte Widerstand gegen eine irreversible Formänderung erreicht wird. Die veränderten mechanischen Werkstoffeigenschaften können durch die unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten erklärt werden. Entscheidend für die martensitische Gefügeumwandlung beim Presshärten ist die Abkühlrate, welche die Triebkraft zur Gefügetransformation ist. Je schneller der austenitisierte Stahl abgekühlt wird, desto weniger Zeit steht für die Diffusion zur Verfügung. Der Austenitkristall wird in zunehmenden Maße unterkühlt. Der Kohlenstoff bleibt somit zwangsgelöst und verzerrt das Gitter tetragonal. Mit steigender Abkühlgeschwindigkeit steigt daher die Festigkeit des Materials an [151].

Hoff [24] konnte anhand ihrer Untersuchungen die Wechselwirkung zwischen Abkühlgeschwindigkeit und resultierendem Formänderungsvermögen im Presshärteprozess bestätigen. Für die Versuchsdurchführung wurden 2,5 mm dicke 22MnB5 Platinen für 180 s bei 950 °C austenitisiert und im Anschluss unter variierenden Ziehspalten (0 mm - 5,5 mm) in einem Abschreckwerkzeug abgekühlt. Aus den gehärteten Platinen wurden nachfolgend A₅₀-Zuproben mittels Laserbeschnitt entnommen, um die mechanischen Eigenschaftsprofile mit Hilfe einer Universalprüfmaschine vom Typ LFEM 300 (Fa. Walter+Bai) zu analysieren. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass mit abnehmendem Spaltabstand das Luftvolumen zwischen Werkzeug und Werkstück verringert worden ist, was wiederum zu höheren Abkühlgeschwindigkeiten und folglich zu steigenden Fließspannungen, Zugfestigkeiten und Streckgrenzen führte. Um das Fließverhalten direkt pressgehärteter Bauteile zu analysieren, wurden von Hunkel et al. [152] dehnratenabhängige Zugversuche durchgeführt. Zur Kennwertermittlung wurde der Bor-Mangan-Stahl MBW® 1500 mit einer Blechdicke von 1,5 mm eingesetzt, der ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit verwendet worden ist. Die Ergebnisse der Werkstoffcharakterisierung zeigten, dass die warmumgeformten Bauteile über ein Fließspannungsniveau von ~ 1800 MPa verfügen, was mit den ermittelten Fließkurven aus Bild 37 korrespondiert.

Anhand der Ergebnisse kann die Aussage getroffen werden, dass die erforderlichen Bauteilfestigkeiten der pressgehärteten Komponenten, trotz divergierender Kontaktbedingungen und Abkühlraten der laserimplantierten Werkzeugkonfigurationen, stets erreicht werden.

6.2 Zusammenfassende Bewertung des Einsatzverhaltens der Oberflächenmodifikationen für den Presshärteprozess

Im Rahmen der vorherigen Abschnitte wurde ein grundlegendes Prozessverständnis im Hinblick auf das tribologische und thermische Einsatzverhalten der laserimplantierten Oberflächen erarbeitet. Hierzu wurde der Abstand sowie die Geometrie der Implantate gezielt variiert, um deren Einsatzverhalten im Presshärteprozess zu analysieren. Mit Hilfe der generierten Wissensbasis kann eine Bewertung vorgenommen werden, in der das grundlegende Potenzial der Oberflächenmodifikationen zur Reibungsbeflussung, Verschleißreduktion und Wärmeübertragung beurteilt wird.

Bewertung des tribologischen Einsatzverhalten

Zur Untersuchung des tribologischen Einsatzverhaltens unter Presshärtebedingungen wurden sowohl experimentelle als auch simulationsgetriebene Untersuchungen durchgeführt. Wesentliche Faktoren zur Bewertung des tribologischen Verhaltens bilden die ermittelten Reibzahlen sowie die Verschleißvolumina der modifizierten Pin-on-Disk Tests, welche in Bild 38 zusammenfassend dargestellt sind.

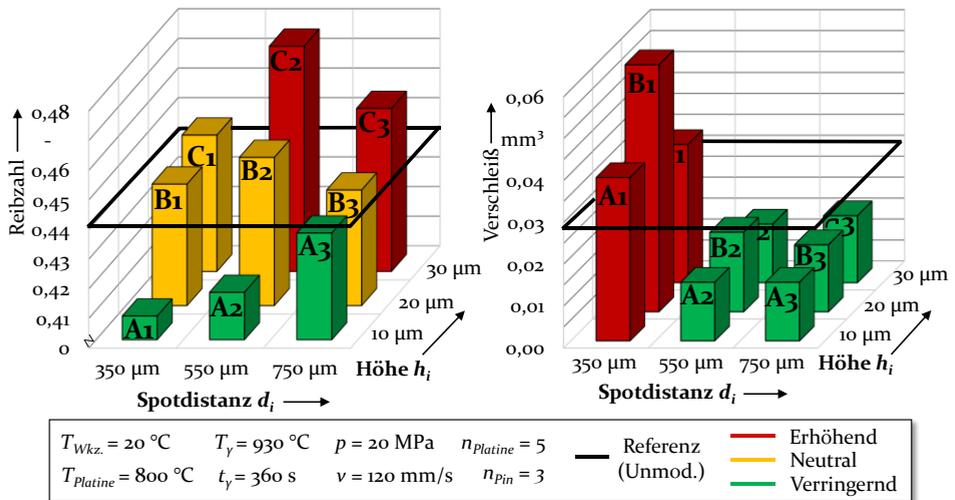


Bild 38: a) Mittlere Reibzahlen und b) Verschleißvolumina der Implantatkonfigurationen

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass in Abhängigkeit der gewählten Implantatkonfiguration die tribologischen Bedingungen unterschiedlich stark beeinflusst werden. Hinsichtlich der Reibzahlen weisen insbesondere laser-

implantierte Oberflächen mit Höhen von $10\ \mu\text{m}$ entgegen dem Referenzwert reibungsreduzierende Eigenschaften auf. Als Ursache für die verbesserten Reibverhältnisse kann die geringe plastische Deformation der Platine angeführt werden, welche in Kombination mit der lokal signifikanten Reduzierung der Kontaktfläche verminderte Scherkräfte infolge des verringerten mechanischen Verhakens der Rauheitsspitzen bewirkt. Analog dazu zeigen die Verschleißmessungen, dass laserimplantierte Oberflächen mit Abständen $\geq 550\ \mu\text{m}$ verschleißreduzierende Eigenschaften unabhängig der gewählten Implantathöhe besitzen. Durch das lokale Laserdispargieren der keramischen TiB_2 -Partikel in die duktile Werkstoffmatrix werden sowohl die Kontaktverhältnisse als auch die Materialeigenschaften der Werkzeugtopographie adaptiert, infolgedessen die metallischen Bindungskräfte in der Wirkfuge verringert sowie die chemische Affinität zur Adhäsionsbildung reduziert wird. Basierend auf den tribologischen Untersuchungen kann die Aussage getroffen werden, dass vor allem laserimplantierte Werkzeugoberflächen mit Implantathöhen von $10\ \mu\text{m}$ und Spotabständen $\geq 550\ \mu\text{m}$ sowohl die Reibbedingungen als auch das Verschleißverhalten im Presshärteprozess begünstigen. Ferner belegen die optischen Vergleichsmessungen sowie die EDX-Analysen, dass alle lasergenerierten Strukturen eine hohe Beständigkeit gegen Abrasion und Oberflächenermüdung aufweisen, da weder Fehlstellen noch abgeplatzte Titanfragmente detektiert werden konnten.

Bewertung des Abkühlverhaltens

Die Qualitätsgüte der pressgehärteten Bauteile ist neben dem tribologischen Verhalten auch von den thermischen Wechselwirkungen im Werkzeug-Werkstück-Kontakt abhängig. Eine vollständige Gefügeumwandlung zu Martensit kann nur gewährleistet werden, sofern das austenitisierte Halbzeug die Mindestabkühlgeschwindigkeit $\dot{T}_{krit.} > 27\ \text{°C/s}$ überschreitet. In diesem Zusammenhang wurde das vorliegende Abkühlvermögen der unterschiedlichen Werkzeugkonfigurationen anhand von Abschreckversuchen ermittelt. Bild 39 veranschaulicht die erzielten Abkühlgeschwindigkeiten der untersuchten Werkzeugkonfigurationen.

Die Versuchsergebnisse belegen, dass durch die laserimplantierten Oberflächen die thermischen Wechselwirkungen im Presshärteprozess beeinflusst werden. Insbesondere Implantathöhen von $10\ \mu\text{m}$ begünstigen die Wärmeübertragung zwischen Werkzeug und Werkstück, was durch ein vollständiges Eindringen in das austenitisierte Werkstück und folglich einem erhöhten konduktiven Wärmetransport erklärt wird. Hinsichtlich des Einflusses des Spotabstandes lassen sich lediglich bei Implantathöhen

von ~ 30 μm signifikante Abhängigkeiten erkennen. Hierbei erweisen sich Abstände > 350 μm als vorteilhaft, da höhere lokale Flächenpressungen und folglich steigende Eindringtiefen und Abkühlraten erreicht werden. Zusammenfassend sind insbesondere niedrige Implantathöhen von 10 μm mit Spotabständen > 350 μm geeignet, um geringe Taktzeiten im Presshärteprozess zu realisieren sowie die geforderte martensitische Gefügeumwandlung prozesssicher zu bewerkstelligen. Demgegenüber wird durch Implantate mit Höhen von 30 μm und Abständen \leq 350 μm der Wärmetransfer in der Wirkfuge aufgrund von Lufteinschlüssen reduziert, was vor allem vor Beginn des Umformprozesses vorteilhaft ist, um lokal niedrigere Kühlraten und Fließspannungen im Flansch der Platine zu erzielen.

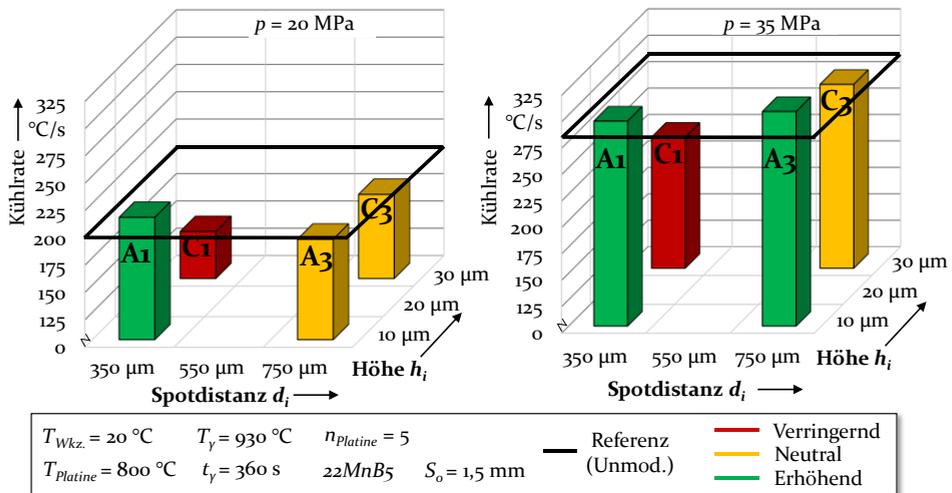


Bild 39: Mittlere Abkühlraten in Abhängigkeit der gewählten Werkzeugkonfiguration

Bewertung der Anforderungsprofile für die Werkzeugmodifikation

Um die eingangs proklamierte Zielsetzung der erhöhten Werkzeugstandzeit und der verbesserten Bauteilqualität zu erreichen, müssen die Kontaktbedingungen in den Wirkflächen gezielt adaptiert werden, sodass eine Verringerung der Werkzeugbelastung sowie eine Verbesserung des Stoffflusses herbeigeführt wird. Durch die Laborversuche konnte nachgewiesen werden, dass durch Verwendung laserimplantierter Oberflächen das Reib- und Verschleißverhalten begünstigt sowie der Wärmetransfer in der Wirkfuge gezielt gesteuert werden kann. Insbesondere niedrige Implantathöhen von 10 μm und Spotabstände \geq 550 μm erweisen sich als vorteilhaft, um die Reibkräfte in hochbeanspruchten Kontaktbereichen zu reduzieren und die

Verschleißbeständigkeit der Werkzeuge zu erhöhen, ohne die erforderliche Mindestabkühlrate ($\dot{T}_{krit.} > 27 \text{ °C/s}$) zur martensitischen Gefügeumwandlung zu unterschreiten. Ferner konnte anhand optischer Vergleichsmessungen und EDX-Analysen belegt werden, dass die Funktionstüchtigkeit der Oberflächenmodifikationen unter Presshärtebedingungen gewährleistet ist, da weder Fehlerstellen noch titanhaltige Partikel ausbrüche detektiert worden sind. Bild 40 zeigt exemplarisch das verbesserte Prozessfenster in Hinblick auf Reibung, Verschleiß und Kühlrate, welches durch Verwendung laserimplantierter Werkzeugoberflächen mit Spothöhen von $10 \text{ }\mu\text{m}$ und Spotabständen von $550 \text{ }\mu\text{m}$ (Konfig. A2) erreicht wird.

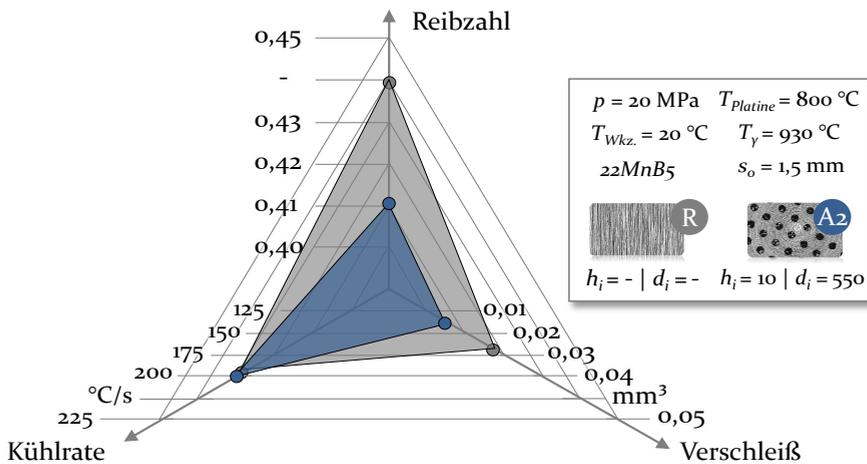


Bild 40: Begünstigung des Prozessfensters mittels laserimplantierter Oberflächen

Basierend auf den numerisch-experimentellen Versuchsdurchführungen lassen sich in Bezug auf die Geometrie und dem Abstand der Oberflächenmodifikationen die in Tabelle 5 dargestellten Prämissen ableiten. Die Laborversuche belegen, dass laserimplantierte Oberflächen das Potenzial besitzen, in Abhängigkeit der gewählten Spothöhe und -distanz das tribologische und thermische Einsatzverhalten von Presshärtewerkzeugen zu begünstigen. Aktuell können jedoch keine Aussagen getroffen werden, ob das erarbeitete Wissen auf eine industriennahe Werkzeuggeometrie mit variierenden Kontaktverhältnissen und Beanspruchungskollektiven transferiert werden kann. Darüber hinaus ist bis dato lediglich bekannt, inwiefern eine Abstands- und die Höhenvariation der Oberflächenmodifikationen das Einsatzverhalten der Presshärtewerkzeuge beeinflusst.

Tabelle 5: Implantathöhe und -abstand zur Beeinflussung der tribologischen und thermischen Wechselwirkungen im Presshärteprozess

	Reibung	Verschleiß	Wärmetransfer
Spot- höhe 	<ul style="list-style-type: none"> • Flächenpressung ↓ • Eindringtiefe ↓ • Scherkräfte ↓ <p>Reibung ↓</p>	<p>Keine Wechselwirkungen identifiziert</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Intermetallischer Kontakt ↑ • Wärmeleitung ↑ <p>Wärmetransfer ↑</p>
Spot- distanz 	<ul style="list-style-type: none"> • Flächenpressung ↓ • Eindringtiefe ↓ • Scherkräfte ↓ <p>Reibung ↓</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kontaktfläche ↑ • Verhakung von Rauheitsspitzen ↑ <p>Verschleiß ↑</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Flächenpressung ↓ • Eindringtiefe ↓ • Lufteinschlüsse ↑ <p>Wärmetransfer ↓</p>
<p>Legende: Steigend ↑ Abnehmend ↓ Keine Auswirkung —</p>			

In diesem Zusammenhang wird vermutet, dass eine gezielte Variation der Implantationsmuster ein weiteres Potenzial bietet, um hochbeanspruchte, verschleißkritische Bereiche lokal zu begünstigen. Vor diesem Hintergrund werden zusätzliche Untersuchungen erforderlich, um auf Basis bestehender Kenntnisse tribologisch günstige Strukturanordnungen in Abhängigkeit des vorliegenden Beanspruchungskollektivs zu identifizieren und deren Einsatzverhalten anhand experimenteller Rechtecknapfzugversuche zu verifizieren.

7 Erarbeitung von funktionsoptimierten Oberflächenmodifikationen

Durch die simulationsgestützte Prozessanalyse in Kapitel 5 konnte gezeigt werden, dass variierende Einlaufradien zu differierenden Spannungs- und Kontaktzuständen während des Umformprozesses führen, die folglich das tribologische Verhalten in der Umformzone unterschiedlich beeinflussen. Vor diesem Hintergrund wurden in Kapitel 6 zunächst Grundlagenuntersuchungen zum Einsatzverhalten implantierter Oberflächen durchgeführt, anhand derer das Potenzial der Oberflächentechnologie aufgezeigt sowie funktionale Zusammenhänge hinsichtlich dem Reib-, Verschleiß- und Abkühlverhalten abgeleitet werden konnten. Im Folgenden gilt es, die aufgestellten Wirkprinzipien um die sowohl lokal als auch zeitlich veränderlichen Kontaktbedingungen in tribologisch hochbelasteten Werkzeugbereichen zu erweitern, um maßgeschneiderte Oberflächenmodifikationen in Abhängigkeit des vorliegenden Beanspruchungskollektivs zu generieren. Im Zuge dessen werden weiterführende Untersuchungen zum Einsatzverhalten der implantierten Oberflächen unter tribologisch hochbeanspruchten Kontaktbedingungen erforderlich. Da bestehende Anlagensysteme die numerisch identifizierten Beanspruchungskollektive nicht abbilden können, müssen zunächst Strategien zur anforderungsgerechten Analyse tribologisch hochbelasteter Werkzeugoberflächen erarbeitet werden. Hierauf aufbauend werden lokal angepasste deterministische Strukturierungsmuster identifiziert, die in Abhängigkeit des vorliegenden Belastungskollektivs das Reib- und Verschleißverhalten im Umformprozess begünstigen. In diesem Kontext wird die Möglichkeit genutzt, die Anordnung der Implantate innerhalb definierter Muster zu gradieren, wodurch die Kontaktverhältnisse hinsichtlich der tribologischen Wechselwirkungen in der Wirkfuge gezielt angepasst werden können. Basierend auf den identifizierten Implantationsmustern erfolgt abschließend die anforderungsgerechte Auswahl und Platzierung der Strukturen auf einen industrienahen Rechtecknapfdemonstrator, um die Prämissen der erhöhten Werkzeugstandzeit und verbesserten Qualitätsgüte der pressgehärteten Bauteilkomponenten zu verifizieren.

7.1 Anforderungsgerechte Abbildung und Analyse hochbeanspruchter Kontaktbedingungen

Unter Zuhilfenahme des validierten FE-Modells wurden in Abschnitt 5.2 die doppelt gekrümmten Eckradien der Rechtecknapfmatrize als tribologisch höchstbeanspruchten Werkzeugflächen identifiziert, da in diesen Umformzonen lange Gleitwege verbunden mit hohen Kontaktnormalspannungen von ~ 35 MPa lokalisiert worden sind. Mit dem bisherigen Verschleißprüfstand besteht jedoch nicht die Möglichkeit, vertiefende Analysen unter eben diesen Versuchsbedingungen durchzuführen. Die bisherige Anlagenapparatur ist aufgrund des begrenzten Bauraums auf eine maximale Kontaktnormalspannung von 20 MPa limitiert, wodurch tribologisch hochbelastete Werkzeugbereiche nicht hinreichend abgebildet werden können. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden grundlegende Anforderungsprofile an den Verschleißprüfstand definiert, um die tribologischen Wechselwirkungen in der Wirkfuge unter hochbeanspruchten Kontaktbedingungen gezielt charakterisieren zu können.

Für eine prozessnahe Versuchsdurchführung werden zunächst Strategien benötigt, um die numerisch identifizierten Flächenpressungen ≤ 35 MPa adäquat abbilden zu können. Darüber hinaus muss eine hohe Reproduzierbarkeit der Versuchsreihen gewährleistet sein, sodass unter gleichbleibenden Beanspruchungskollektiven ($T_{Wkst.}$, v , $p = \text{konst.}$) mindestens fünf Wiederholversuche mit Schwankungen ≤ 10 % durchgeführt werden können. Ferner müssen für eine anforderungsgerechte Prozessanalyse die Reibzahlen und die Verschleißvolumina quantifizierbar sein, um weiterführende Kenntnisse hinsichtlich den tribologischen Wirkzusammenhängen bei hohen Kontaktnormalspannungen und langen Verschleißstrecken zu erlangen. Um diese Anforderungsprofile zu erfüllen, wird im Folgenden eine Prüfmethode zur anforderungsgerechten Abbildung und Analyse hochbeanspruchter Kontaktbedingungen erarbeitet.

Erarbeitung einer Prüfmethode zur beanspruchungsgerechten Prozessabbildung und -analyse

Zur Bewertung des tribologischen Verhaltens der Oberflächenmodifikationen wurde in Kapitel 6 ein modifizierter Tribotesteraufbau genutzt, der an einen konventionellen Pin-on-Disk Test angelehnt ist. Vor Versuchsbeginn wurde die zu übertragende Normalkraft F_N anhand von Gewichtskombinationen angepasst, um die geforderten Kontaktnormalspannungen am Werkzeugpin zu übertragen. Der Verschleißprüfstand ist aufgrund des limitierten Bauraums auf eine maximale Flächenpressung von 20 MPa begrenzt, wodurch tribologisch hochbeanspruchte Kontaktbedingungen

nicht hinreichend abgebildet werden können. Eine ledigliche Verkleinerung der Werkzeugkontaktfläche zur Erhöhung der Flächenpressung ist nicht zielführend, da ein Mindestmaß an Auflagefläche vorliegen muss, um unterschiedliche Strukturierungsmuster mit variierenden Spotabständen auf die Werkzeugoberfläche zu implantieren. Vor diesem Hintergrund ist eine zusätzliche Prüfmethode erforderlich, um tribologisch hochbeanspruchte Kontaktbedingungen anforderungsgerecht abbilden zu können.

Schwingenschlögl [73] konzipierte, konstruierte und qualifizierte einen einseitigen Flachbahnstreichversuch, mit dem die tribologischen Wechselwirkungen im industriellen Presshärteprozess präzise abgebildet werden können. Bei dem Hochtemperaturverschleißprüfstand wird das Werkzeug durch eine Reibbacke und das Werkstück durch einen Blechstreifen simuliert. Zur Analyse der tribologischen Bedingungen wird die Reibbacke mit einem vorprogrammierten Kraft- und Temperaturprofil (p , $T_{Wkz.}$) auf dem temperierten Blechstreifen ($T_{Platine.}$) verfahren, der in Anschluss mit einer definierten Relativgeschwindigkeit (v) in horizontaler Richtung bewegt wird. Der Prüfstand bietet die Möglichkeit, die prozessseitigen Einflussfaktoren ($T_{Wkz.}$, $T_{Platine.}$, p , v) isoliert und unabhängig voneinander zu variieren. Zwar lassen sich durch den Verschleißprüfstand längere Gleitwege (~ 300 mm) als beim modifizierten Tribotesteraufbau (~ 150 mm) realisieren, jedoch ist der Prüfstand auf eine maximale Flächenpressung von 7,5 MPa begrenzt ist, weshalb die Grundlagenuntersuchungen in Kapitel 6 nicht mit diesem Anlagensystem durchgeführt worden sind. Ebenso wurde die vorzeitige Modifikation des Prüfaufbaus zur Realisierung höherer Flächenpressungen als nicht zielführend erachtet, ohne zuvor die tribologische Wirksamkeit der lasergenerierten Strukturen bei niedrigeren Kontaktnormalspannungen verifiziert zu haben.

Im Gegensatz zum modifizierten Tribotester wird die Normalkraft F_N der Warmstreichanlage nicht mit Gewichtskombinationen, sondern mit Hilfe eines hydraulischen Zylinders übertragen, dessen Kraftbereich zwischen 5 - 120 kN liegt. Durch die verwendeten Reibbacken mit den Abmessungen 50 mm x 40 mm ($A = 2000$ mm²) können theoretisch Flächenpressungen von bis zu 60 MPa eingestellt werden. Bei der Ermittlung des anlagenseitigen Prozessfensters zeigte Schwingenschlögl [73] jedoch, dass bei Kontaktnormalspannungen $> 7,5$ MPa exzessive Aufschweißungen auf der Werkzeugoberfläche hervorgerufen werden, die zu einem sofortigen Versuchsabbruch führen. Durch die Applikation derartiger Flächenpressungen wurden über die gesamte Kontaktfläche hinweg Materialfragmente aus der Werkstückbeschichtung herausgerissen, die wiederum an der Werkzeug-

oberfläche haften blieben und dessen horizontale Abzugsbewegung blockierten. Da Ghiotti et al. [96] und Tomala et al. [153] nachgewiesen haben, dass die Analyse höherer Kontaktnormalkräfte > 20 MPa unter Presshärtebedingungen möglich ist, liegen folglich keine prozesseitigen Einschränkungen vor. Die Autoren nutzten für die tribologischen Untersuchungen erheblich geringere Werkzeugkontaktflächen, wodurch exzessive Materialanhaftungen unterbunden werden konnten. Diese Kenntnisse lassen den Rückschluss zu, dass das Zusammenspiel zwischen Normalkrafteinheit und Reibbackengeometrie gezielt adaptiert werden muss, um die bestehenden anlagenseitigen Limitierungen zu überwinden.

Als Anforderungsprofil zur beanspruchungsgerechten Prozessabbildung und -analyse wurde eingangs die vollständige Quantifizierbarkeit der werkzeugseitigen Verschleißerscheinungen definiert. Aufgrund der großen Kontaktfläche von $A = 2000 \text{ mm}^2$ und dem damit verbundenen hohen Zeitbedarf beschränkte sich Schwingenschlögl [73] darauf, die Oberflächen der Reibbacken nur lokal mittels Perthometermessungen und Mikroskopaufnahmen zu analysieren, um grundlegende Tendenzen im Hinblick auf das Verschleißverhalten der Werkzeuge abzuleiten. Im Gegensatz dazu wurde bei den Werkzeugpins der Tribotesterversuche (Abschnitt 6.1) eine Kontaktfläche von $A = 25 \text{ mm}^2$ genutzt, wodurch ein guter Kompromiss zwischen Ergebnisqualität und erforderlicher Messzeit zur vollständigen Oberflächenanalyse erreicht wurde. Vor diesem Hintergrund muss die Reibbackengeometrie für die Warmstreifenziehversuche ähnliche geometrische Dimensionen aufweisen, um eine Vielzahl unterschiedlicher Strukturierungsvarianten sowohl effizient als auch vollumfänglich analysieren zu können. Diesbezüglich wird die Geometrie der Reibbacke auf eine Abmessung von $5 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ($A = 30 \text{ mm}^2$) reduziert, um analog zu den modifizierten Tribotesterversuchen vergleichbare Versuchsbedingungen zu schaffen. Ferner wird erwartet, dass durch die Verkleinerung der Kontaktfläche die lokalen Aufschweißungen massiv verringert werden, wodurch Kontaktnormalspannungen > 20 MPa, analog zu Ghiotti et al. [96] und Tomala et al. [153], analysierbar sind. Die angepasste Geometrie der Reibbacke ist in Bild 41 a) dargestellt.

Infolge der Adaption der Kontaktfläche ($A = 30 \text{ mm}^2$) wird eine niedrigere Normalkraft F_N von 1050 N benötigt, um die geforderte Flächenpressung von 35 MPa zu erreichen. Mit dem bestehenden Hydraulikzylinder können jedoch die anvisierten Normalkräfte nicht realisiert werden, da der Kraftbereich des Zylinders ($5 - 120 \text{ kN}$) unterschritten wird. Vor diesem Hintergrund wird in das bestehende Anlagensystem ein Elektrozyylinder (Typ

YJKP, Fa. Festo) integriert, mit diesem ein Kraftprofil von 1 - 4000 N angesteuert werden kann. Durch die Anlagenerweiterung ist eine präzise Abbildung des erforderlichen Kraftniveaus sowie eine kontinuierliche Regelung prozessseitiger Kraftschwankungen möglich, um die geforderten Flächenpressungen mit hoher Konstanz und Reproduzierbarkeit abzubilden. Die Führung des Elektrozyinders erfolgt über zwei Säulengestelle, die mit einer wassergekühlten Traversenplatte verbunden sind. Hierdurch werden thermische Einflüsse und wärmebedingte Ausdehnungen der Normkraftmodule infolge der hohen Prozesstemperaturen unterbunden. Weiterhin ist am Endstück des Elektrozyinders eine Reibbackenaufnahme mit einer Keilführung montiert, wodurch ein sicherer Halt und homogene Verteilung der Flächenpressungen der Reibbackeneinheit gewährleistet wird. Bild 41 b) zeigt den adaptierten Aufbau mit integriertem Elektrozyylinder, der wassergekühlten Traverse und der Reibbackenaufnahme.

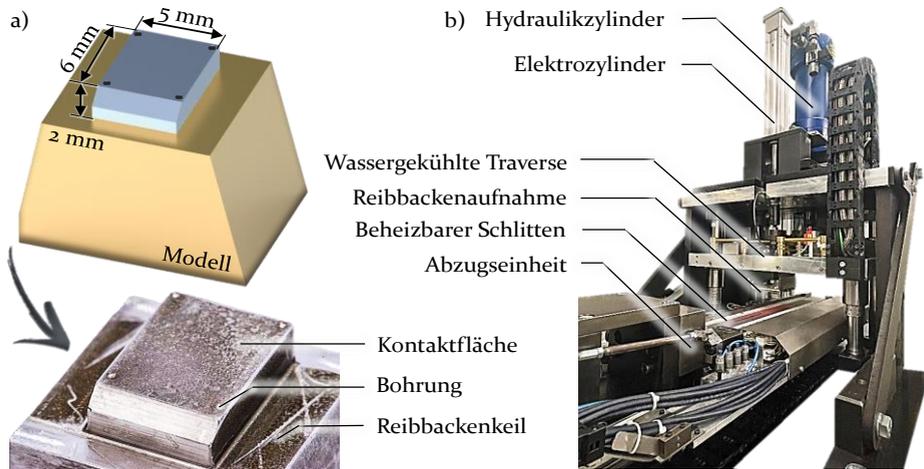


Bild 41: a) Adaption der Reibbackengeometrie und b) des Prüfaufbaus

Qualifizierung des Reib- und Verschleißverhalten

Zur Qualifizierung des adaptierten Prüfaufbaus werden tribologische Untersuchungen unter hochbeanspruchten Kontaktbedingungen durchgeführt. Um eine bestmögliche Übertragung der Ergebnisse sicherzustellen, werden industriennahe Prozessparameter und Werkstoffe gewählt. Für die Versuchsdurchführung werden Reibbacken aus dem Warmarbeitsstahl 1.2367 mit einer Härte von 54 ± 2 HRC genutzt sowie AlSi-beschichtete 22MnB5 Platinen ($l = 550$ mm, $b = 50$ mm, $d = 1,5$ mm) als Halbzeuge verwendet. Vor Versuchsbeginn wird die Homogenität der Flächenpressung zwischen Reibbacke und Blechstreifen mittels einer Druckmessfolie (Prescale, Fa. Fujifilm) kontrolliert. Anschließend erfolgt die vollständige

Austenitisierung des Werkstücks in einem separaten Kammerofen (Typ ME87/3, Fa. Rhode) für $t_Y = 360$ s bei $T_Y = 930$ °C. Nach Ablauf der Verweilzeit wird der Streifen auf den 800 °C beheizten Schlitten innerhalb von 3-5 s transferiert und der Prozessablauf gestartet. Die Reibbacke wird mit Hilfe des elektrischen Zylinders auf den temperierten Blechstreifen verfahren. Als Kraftprofile werden sowohl 600 N als auch 1050 N eingestellt, um Flächenpressungen von 20 MPa und 35 MPa zu realisieren. Anschließend wird der Schlitten mit einer Relativgeschwindigkeit von $v = 60$ mm/s linear in horizontaler Richtung mit einer Abzugslänge von 190 mm bewegt. Während der Versuchsdurchführung wird die Reib- (F_R) und Normalkraft (F_N) anhand von Kraftmessdosen (Typ 9371 BU, Fa. Kistler) aufgezeichnet, sodass die Reibzahl gemäß Coulomb (Gl. 1) quantifizierbar ist. Zur Analyse der Konstanz und Reproduzierbarkeit der Streifenziehversuche werden pro Flächenpressung jeweils fünf Versuchsreihen durchgeführt und deren Werte im Anschluss gemittelt. In jeder Versuchsreihe wird eine Reibbacke über fünf AlSi-beschichtete Platinen mit einer Abzugslänge von jeweils 190 mm gezogen, sodass pro Versuchsreihe fünf Normal- und Reibkraftprofile durch die integrierten Kraftmessdosen aufgezeichnet werden. Die berechneten Mittelwerte der aufgezeichneten Normal- und Reibkräfte der Versuchsreihen sind in Bild 42 gegenübergestellt.

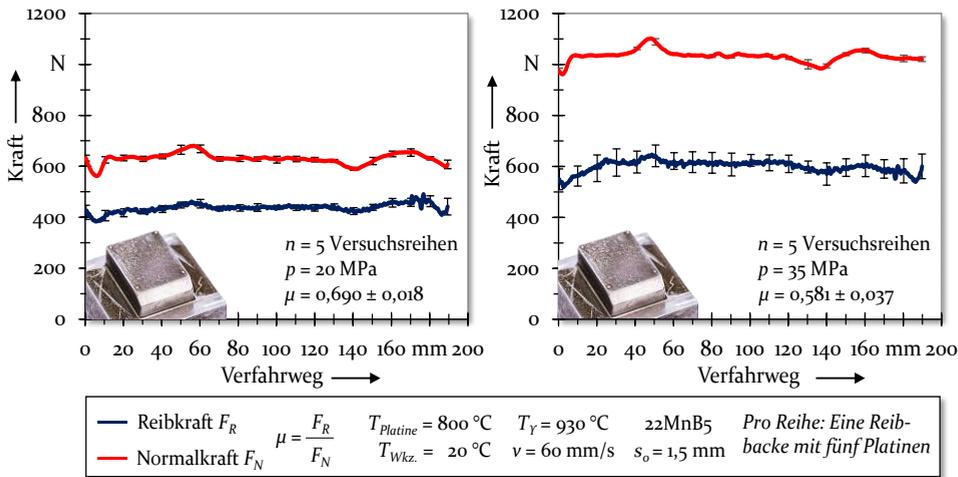


Bild 42: Ermittelte Normal- und Reibkräfte unter tribologisch hochbeanspruchten Kontaktbedingungen

Durch die Erweiterung des bestehenden Verschleißprüfstandes gelang es, hochbeanspruchten Kontaktbedingungen von 20 MPa und 35 MPa ohne Abbruch des Prozessablaufes abzubilden. Um die Konstanz der Reibkraft-

messung sowie die Reproduzierbarkeit der ermittelten Reibzahlen zu analysieren, werden über fünf Versuchsreihen die im Mittel erzeugten Normal- und Reibkräfte analysiert (Tabelle 6).

Tabelle 6: Gemittelte Normal- und Reibkräfte über $n = 5$ Versuchsreihen

Normalkraft F_N			
Flächenpressung	Soll-Wert	Ist-Wert	Soll-Abweichung
20 MPa	600 N	631 ± 8 N	31 N (+ 5,2%)
35 MPa	1050 N	1033 ± 3 N	17 N (- 1,6%)
Reibkraft F_R			
Flächenpressung	Ist-Wert		Schwankungen
20 MPa	435 ± 9 N		± 2 %
35 MPa	600 ± 37 N		± 6 %

Die Ergebnisse zeigen, dass die geforderte Normalkraft F_N von 600 N (20 MPa) im Mittel 5,2% übertroffen sowie das eingestellte Kraftprofil von 1050 N (35 MPa) um durchschnittlich 1,6 % unterschritten wird. Die geringen prozentualen Abweichungen vom Soll-Wert belegen, dass auftretende Kraftschwankungen ausgeglichen und gleichbleibende Normalkrafteinstellungen über mehrere Messreihen gewährleistet werden können. Analog dazu lassen sich ähnlich niedrige Schwankungen bei den aufgezeichneten Reibkräfte F_R identifizieren. Die eingestellten Flächenpressungen von 20 MPa und 35 MPa weisen eine mittlere Reibkraft F_R von 435 ± 9 N respektive 600 ± 37 N auf. Durch den adaptierten Anlagenaufbau lassen sich robuste Normal- und Reibkraftprofile mit Schwankungen < 10 % prüfen, was eine hohe Konstanz und gute Reproduzierbarkeit der Untersuchungen belegt sowie eine objektive Beurteilung der Reibungsbedingung ermöglicht.

Unter Anwendung des Reibgesetzes von Coulomb wird bei 20 MPa eine Reibzahl von $0,690 \pm 0,018$ und bei 35 MPa ein Wert von $0,581 \pm 0,037$ berechnet. Um die Plausibilität der berechneten Reibzahlen einschätzen zu können, erfolgt zunächst ein Abgleich mit bereits veröffentlichten Kennwerten aus der Literatur. Die Messauswertungen zeigen, dass zunehmende Kontaktnormalspannungen zu niedrigeren Reibzahlen führen. Identische Verhaltensweisen konnten Schwingenschlögl [73] und Ghiotti et al. [96] in ihren Arbeiten belegen. Die Autoren nutzten Bor-Mangan-Stähle, die mit Flächenpressung von 2,5 - 7,5 MPa [73] respektive 5 - 25 MPa [96] unter Presshärtebedingungen beansprucht worden sind. Die Abnahme der Reibzahl mit ansteigender Flächenpressung wurde von den Autoren durch die zunehmende Einglättung der Rauheitsspitzen in der Wirkfuge erklärt, infolgedessen weniger Verhakungen und niedrigere Kräfte während der Abzugsbewegung hervorgerufen worden sind. Hinsichtlich der Ausprägung

des Reibzahlenniveaus lassen sich nur qualitative Aussagen treffen, da in der Literatur verschiedene Prüfstände und Parameterkombinationen, wie Werkzeug- und Werkstückwerkstoffe, Flächenpressungen, Temperaturen und Abziehggeschwindigkeiten analysiert worden sind. Neubauer [75], Ghiotti et al. [96] und Medea et al. [93] verwendeten Pin-on-Disk Tests, um das Reibverhalten eines AlSi-beschichteten Bor-Mangan-Stahls 22MnB5 bei variierenden Flächenpressungen von 5 - 25 MPa zu analysieren. Die ermittelten Reibzahlen der Autoren lagen, je nach gewählter Pingschwindigkeit (1 - 120 mm/s), Werkzeug- und (20 - 150 °C), Blechtemperatur (500 - 800 °C) in einem Bereich zwischen 0,4 und 0,8. Zur prozessnahen Qualifizierung der Reibzahl beim Presshärten wurden von Lechler [61] Napfzugversuche mit einer Werkzeugtemperatur von 25 °C, einer Blechtemperatur von ~ 700 °C sowie einer Stempelgeschwindigkeit von 10 mm/s durchgeführt. Basierend auf der Ziehkraftformel von Siebel wurde ein Reibzahl von ~ 0,6 berechnet. Die Kennwerte der Autoren sind in grundlegender Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Streifenziehversuche, was wiederum die Plausibilität der Versuchsdaten belegt. Dennoch ist zu berücksichtigen, dass die ermittelten Reibzahlen als rein technische Werte betrachtet werden müssen, da der zulässige Grenzwert des Coulomb'schen Reibgesetzes (gemäß von Mises: $\mu_{max} \sim 0,577$) überschritten wird.

In der Blechumformung wird zur Annäherung an die tribologischen Prozessbedingungen für gewöhnlich das Coulomb'sche Reibgesetz genutzt, bei diesem die Reibzahl μ aus dem Quotienten zwischen Reibkraft F_R und Normalkraft F_N berechnet wird. Der Proportionalitätsfaktor ist die Reibzahl μ , die als konstant während des Reibvorganges und über die Reibfläche angesehen wird. Somit beruht das Gesetz auf der Annahme, dass die Reibkraft proportional zur Normalkraft F_N und unabhängig von der Kontaktfläche, dem Abzugsweg und der Gleitgeschwindigkeit ist [154]. Untersuchungen belegen jedoch, dass die Größe der Reibzahl z. B. auch von der Geometrie der Kontaktfläche und den in der Wirkfuge auftretenden physikalischen und mechanischen Einflussgrößen wie Gleitgeschwindigkeit, Druck und Temperatur beeinflusst wird [154]. Die Gegenüberstellung der Reibzahlen zwischen den Pin-on-Disk Tests ($0,439 \pm 0,004$) aus Kapitel 6 und den durchgeführten Warmstreifenziehversuchen ($0,690 \pm 0,018$) bestätigen diese Annahmen, da durch letzteren Prüfstand deutlich höhere Werte erzielt werden, obwohl gleiche Normalkrafteinstellungen F_N (respektive Flächenpressungen $p = 20$ MPa) an beiden Prüfanlagen vorgenommen worden sind. Ursache der Reibzahlerhöhung könnte die vergrößerte Kontaktfläche sowie die fast viermal längere Abzugsstrecke sein, infolgedessen vermehrt intermetallische Verhakungen und demzufolge höherer Reibkräfte im

Werkzeug-Werkstück-Kontakt erzielt werden. Dies begünstigt weiterhin den Abtrag und Transfer von Oxidpartikeln vom Blechhalbzeug auf die Werkzeugoberfläche, wodurch die wahre Kontaktfläche größeren dynamischen Veränderungen unterliegt und somit die Reibverhältnisse in der Wirkfuge beeinflusst. Ferner wurden die Streifenziehversuche mit niedrigerer Relativgeschwindigkeit durchgeführt, was einen höheren Widerstand der Werkstückoberfläche gegen Deformation bewirkt und steigende Reibzahlen verursacht [72]. Die Anwendung des Reibfaktorengesetzes, welches für gewöhnlich in der Massivumformung verwendet wird, erweist sich als nicht zielführend, da diese Gesetzmäßigkeit lediglich bei Umformprozessen mit deutlich höheren Kontaktnormalspannungen (z. B. Gesenkschmieden) Gültigkeit hat [154]. Da die Zielsetzung der Untersuchungen darin besteht, das tribologische Einsatzverhalten verschiedener Werkzeugkonfigurationen bei identischen Prozessparametern, wie Temperatur, Geschwindigkeit und Flächenpressung, zu evaluieren, werden die ermittelten Kennwerte als quantitatives Vergleichskriterium herangezogen. Hierdurch können die vorliegenden Reibbedingungen der unterschiedlichen Werkzeugkonfigurationen objektiv beurteilt sowie gegenüberstellend eingeordnet und bewertet werden.

Die Quantifizierung der Verschleißvolumina basiert auf der Methode, die bereits für die modifizierten Pin-on-Disk Versuche (Abschnitt 6.1.3) angewandt worden ist. Die Zielsetzung besteht darin, die Volumendifferenz und somit den Oberflächenverschleiß zwischen der unbenutzten und verschlissenen Werkzeugoberfläche mittels computerbasierter Flächenüberlagerung zu ermitteln. Vor diesem Hintergrund werden die Kontaktflächen der Reibbacken jeweils vor und nach den tribologischen Untersuchungen anhand eines Laser-Scanning Mikroskops (Keyence VK-X200) vermessen und anschließend mit einem Softwareprogramm (Keyence VK-Analyse) analysiert. Durch die computergestützte Überlagerung der unverschlissenen und verschlissenen Topographie kann die resultierende geometrische Abweichung berechnet werden. Voraussetzung ist jedoch eine präzise Ausrichtung der beiden Kontaktzonen, um eine exakte Ermittlung der Verschleißvolumina sicherzustellen. Im Zuge dessen werden vor der Versuchsdurchführung vier Bohrungen ($t = 100 \mu\text{m}$, $\varnothing = 30 \mu\text{m}$) in die Werkzeugkontaktfläche mikroerodiert (SARIX SX-200-HPM), um Referenzebenen für die optische Vergleichsmessung zu erhalten. Anhand der integrierten Bohrungen wird eine präzise Ausrichtung der beiden Kontaktzonen gewährleistet, was eine exakte Berechnung des Verschleißes garantiert. Bild 43 veranschaulicht die Vorgehensweise zur Verschleißmessung.

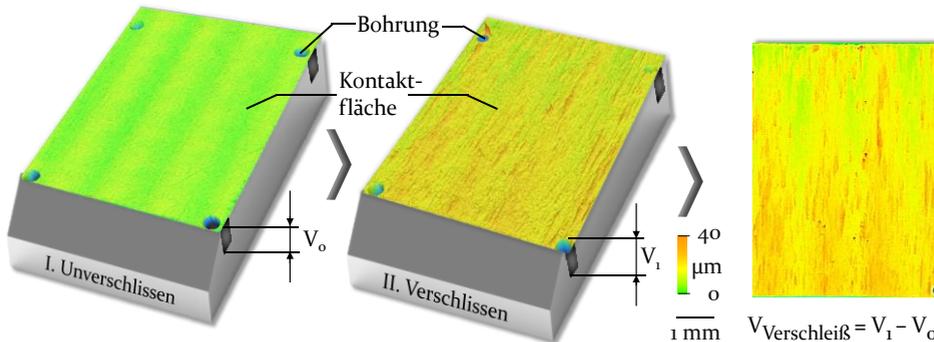


Bild 43: Quantifizierung der Verschleißvolumina über gesamten Kontaktbereich der Reibbacke mittels optischer Vergleichsmessungen

Basierend auf der optischen Vergleichsanalyse der Werkzeugoberflächen wird Adhäsion als primärer Verschleißmechanismus identifiziert, was wiederum mit den Beobachtungen von Vilaseca et al. [103], Neubauer [75] und Ghiotti et al. [146] korrespondiert. Als Ursache des dominierenden, adhäsiven Verschleißeffektes werden die kombiniert auftretenden Normal- und Tangentialkräfte der Reibbacke vermutet, die ein sukzessives Abscheren der Verschleißpartikel von der Halbzeugoberfläche und Anhaften auf die Werkzeugtopographie bewirken. Die Gegenüberstellung der Verschleißvolumina der Werkzeugtopographien zeigt (Bild 44), dass bei 20 MPa im Mittel $\sim 0,046 \text{ mm}^3$ und bei 35 MPa höhere Werte von $\sim 0,053 \text{ mm}^3$ erzielt werden. Im Vergleich zu den Pin-on-Disk Tests ($\sim 0,27 \text{ mm}^3$) in Abschnitt 6.1.3 entstehen durch die Warmstreifenziehversuche erhöhte Verschleißvolumina, was durch die Verlängerung der Abzugsstrecke und Vergrößerung der Werkzeugkontaktfläche erklärt werden könnte.

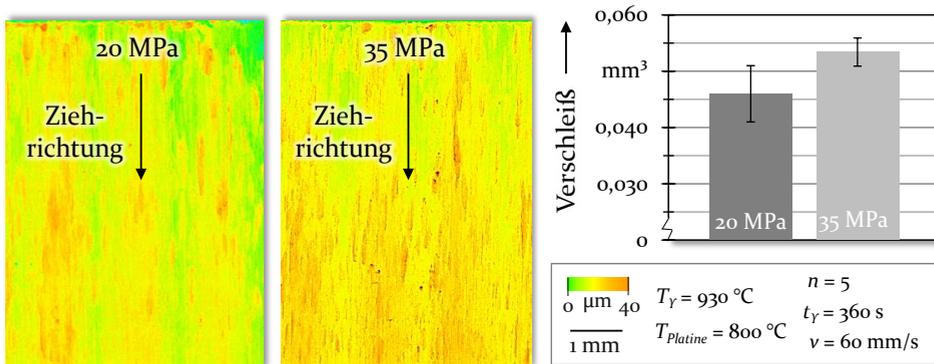


Bild 44: Quantifizierte Verschleißvolumina unmodifizierter Reibbacken

Zusammenfassende Bewertung der erarbeiteten Prüfmethode zur beanspruchungsgerechten Prozessabbildung und -analyse

Im Rahmen des Abschnittes ist eine Prüfmethode zur anforderungsgerechten Abbildung und Analyse tribologisch hochbeanspruchter Kontaktbedingungen erarbeitet worden. In diesem Zusammenhang wurden einleitend Strategien vorgestellt, um auf Basis einer bestehenden Warmstreifenzieh-anlage Druckbeanspruchungen ≤ 35 MPa abbilden zu können. Durch die Prüfung mehrerer Versuchsreihen bei variierenden Flächenpressungen konnte nachgewiesen werden, dass eine hohe Konstanz und Reproduzierbarkeit der Untersuchungen mit Schwankungen < 10 % gewährleistet wird. Ferner wurden die Anforderungsprofile einer vollständigen Quantifizierbarkeit der Verschleißvolumina sowie die Ermittlung der Reibzahlen über den gesamten Gleitweg erfüllt und mit Literaturkennwerten belegt. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass die ermittelten Reibzahlen den zulässigen Grenzwert gemäß dem Reibzahlgengesetz nach Coulomb überschreiten und somit als rein technische Werte betrachtet werden müssen. Aufgrund der hohen Konstanz der Normal- (F_N) und Reibkraftmessung (F_R) bei 20 MPa und 35 MPa Flächenpressung kann jedoch ein quantitativer Vergleich der ermittelten Werte herangezogen werden, um die vorliegenden Reibbedingungen objektiv zu beurteilen und gegenüberstellend zu bewerten. Ghiotti et al. [96] verwendeten Pin-on-Disk Versuche, um das Reibverhalten bei Werkstücktemperaturen von 500 °C und variierenden Flächenpressungen von 5 - 25 MPa zu analysieren. In den Versuchen wurden ähnliche Reibzahlen erzielt, die in einem Bereich von $\sim 0,6$ (25 MPa) bis $\sim 0,8$ (5 MPa) lagen. Die experimentell ermittelten Kennwerte wurden ebenfalls als quantitatives Vergleichskriterium herangezogen, um die Reibbedingungen im Presshärteprozess bei variierenden Beanspruchungskollektiven zu analysieren. Die erarbeitete Prüfmethode ist somit geeignet, um das tribologische Einsatzverhalten unterschiedlicher Werkzeugkonfigurationen unter hochbeanspruchten Kontaktbedingungen zu untersuchen und zu vergleichen. Hierdurch sind die grundlegenden Voraussetzungen geschaffen, um die Wirkweisen deterministischer Strukturanordnung in Abhängigkeit des Beanspruchungskollektivs identifizieren und bewerten zu können.

7.2 Ermittlung reibungs- und verschleißreduzierender Implantationsmuster in Abhängigkeit des Beanspruchungskollektivs

Durch die erarbeitete Prüfmethode ist die Möglichkeit gegeben, unterschiedliche Oberflächenmodifikationen unter hochbeanspruchten Kontaktbedingungen zu analysieren und evaluieren. Im Folgenden gilt es, deterministische Strukturierungsmuster zu identifizieren, die in Abhängigkeit des Belastungskollektivs das Reib- und Verschleißverhalten während des Umformprozesses begünstigen. Vor diesem Hintergrund wird die Anordnung der Implantate innerhalb definierter Muster gradiert, deren tribologischen Einsatzverhalten unter Presshärtebedingungen analysiert sowie Ursache-Wirkzusammenhänge hinsichtlich der Kontaktverhältnisse und tribologischen Wechselwirkungen der Oberflächenmodifikationen eruiert. Hierdurch kann eine abschließende Bewertung vorgenommen werden, in dieser reibungs- und verschleißreduzierende Implantationsmuster in Abhängigkeit des Beanspruchungskollektivs identifiziert werden.

Ermittlung tribologisch günstiger Strukturanordnung

Die numerischen und experimentellen Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen (Kapitel 6) zeigen, dass laserimplantierte Werkzeugoberflächen reibungs- und verschleißmindernde Mechanismen aufweisen, deren jeweilige Dominanz von der Geometrie und des Abstandes der Implantate bestimmt wird. Ein weiteres Potenzial zur Verbesserung des tribologischen Verhaltens wird durch die gezielte Variation der Strukturierungsanordnung vermutet, dessen Ursache-Wirkzusammenhänge bis dato noch nicht analysiert worden sind. Es wird erwartet, dass Implantationsmuster mit lokal angepassten Kontaktverhältnissen verringerte Werkstückdeformationen und Scherbelastungen induzieren, wodurch der Stofffluss in der Umformzone weiter begünstigt wird. In der Literatur zeigt sich, dass die Wahl der Strukturanordnung bei makro- und mikrostrukturierten Werkzeugen einen signifikanten Einfluss auf das tribologische Einsatzverhalten besitzt. Mousavi et al. [113] belegten in ihren Untersuchungen, dass die Adaption der Werkzeugkontaktfläche mittels linienförmiger Strukturen reibungs- und verschleißmindernde Effekte aufgrund verringerter Scherkräfte verursacht. Simultan dazu konnten Roch et al. [117] und Gachot et al. [155] nachweisen, dass die Orientierung der Linienmuster einen signifikanten Einfluss auf das tribologische Einsatzverhalten ausübt. Die Autoren stellten jedoch widersprüchliche Verhaltensweisen in Bezug auf die Liniensorientierung fest, da eine Ausrichtung von 90° zur Ziehrichtung bei Roch et al. [117] reibungs-

höhende Eigenschaften bewirkte, wohingegen Gachot et al. [155] reibungsreduzierende Mechanismen feststellen konnten. Neben der Ausrichtung und Anordnung der Oberflächenmodifikationen wurde ebenfalls ein Einfluss des Deckungsgrades der Werkzeugstrukturierungen identifiziert. Tenner [115] belegte in diesem Zusammenhang, dass mit Zunahme der Spurenanzahl ein verbessertes tribologisches Einsatzverhalten aufgrund des verstärkten Einglätzens der Rauheitsspitzen hervorgerufen worden ist. Bei zu hohen Deckungsgraden wurden jedoch verstärkt Schereffekte erzwungen, die wiederum steigende Reibkräften und Materialanhaftungen bewirkten. Alle angeführten Oberflächenmodifikationen der Autoren konzentrierten sich auf das Trockentiefziehen, welches analog zum Presshärten ohne Schmierstoffsysteme arbeitet.

Auswahl und Herstellung der lasergenerierten Strukturen

Für die tribologischen Untersuchungen gilt es im Folgenden zu klären, ob sich die Erkenntnisse der Trockenumformung auf den Presshärteprozess unter Anwendung der Laserimplantation übertragen lassen. Im Zuge dessen werden Implantate in linienförmig angeordneten Clustern strukturiert und deren Ausrichtung mit 0° respektive 90° zur Ziehrichtung variiert. Um den Einfluss der Spurenanzahl zu untersuchen, werden zudem Implantationsmuster mit lokal angepassten Spurenversatz untersucht. Im Gegensatz zu den linienförmigen Strukturen sind alle Implantate nicht in Reihe sortiert, sondern versetzt angeordnet, sodass jede Oberflächenmodifikation stets in Interaktion mit unverschlissenen Blechmaterial ist. Weiterhin werden gleichmäßig verteilte, hexagonale Strukturanordnungen analysiert, da diese in den bisherigen Grundlagenuntersuchungen ein vielversprechendes Einsatzverhalten zeigten. Um lediglich den Einfluss der Strukturanordnung auf das tribologische Verhalten zu untersuchen, werden alle Werkzeugkonfigurationen mit konstanter Implantatanzahl ($n_i = 45$) und Reibbackenkontaktfläche ($A = 30 \text{ mm}^2$) laserimplantiert. Ferner werden die Erkenntnisse der Grundlagenuntersuchungen (Kapitel 6) genutzt, die bereits in Abhängigkeit der Implantatgeometrie und -anzahl eine Begünstigung des Reib- und Verschleißverhaltens aufzeigten. In diesem Kontext müssen die Strukturanordnungen eine Spothöhe h_i von $10 \mu\text{m}$ und einen Mindestabstand $d_i \geq 550 \mu\text{m}$ (Konfig. A2) aufweisen, da bei diesen Oberflächenkonfigurationen reibungs- und verschleißreduzierende Eigenschaften unter Einhaltung hoher Abkühlraten identifiziert worden sind (Abschnitt 6.1). Basierend auf den Erkenntnissen der Literatur sowie dem zuvor erarbeiteten Wissen werden vier verschiedene Konfigurationen konzipiert (Bild 45) und auf jeweils $n = 10$ Reibbacken laserimplantiert.

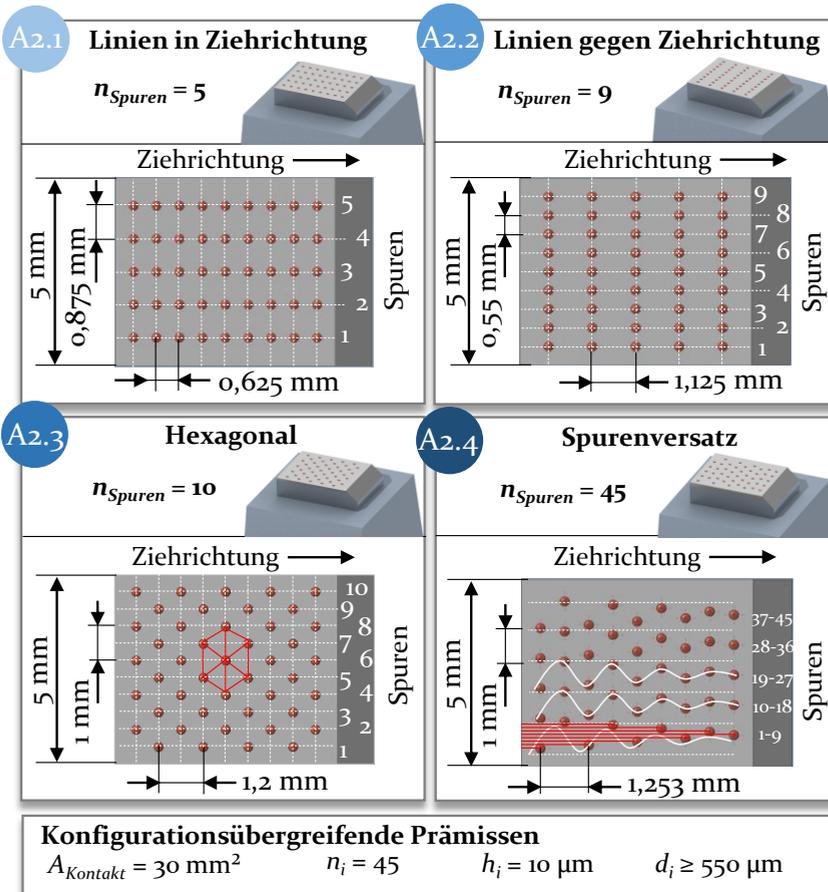


Bild 45: Laserimplantierte Werkzeugkonfigurationen mit angepasster Strukturanordnung

Durchführung tribologischer Untersuchungen

Zur qualitativen und quantitativen Bewertung des tribologischen Einsatzverhaltens der Werkzeugkonfigurationen wird die adaptierte Warmstreifenzieh-anlage (Abschnitt 7.1) genutzt. Um das tribologische Verhalten der Oberflächenmodifikationen zu evaluieren, werden zudem Referenzversuche an unmodifizierten Reibbacken vorgenommen. Die Austenitisierung der AlSi-beschichteten Bor-Mangan-Stähle erfolgt bei $T_\gamma = 930 \text{ }^\circ\text{C}$ für $t_\gamma = 360 \text{ s}$ in einem separaten Kammerofen der Firma Rhode (Typ ME 87/13). Nach Ablauf der Wärmebehandlung wird die Platine auf die $800 \text{ }^\circ\text{C}$ beheizten Auflageplatten des Verschleißprüfstandes transferiert. Um das Ziel einer maßgeschneiderten Werkzeugstrukturierung zu erreichen, werden korrespondierend zu den in Abschnitt 5.2 numerisch identifizierten,

umformkritischen Flächenpressungen der Rechtecknapfmatrize äquivalente Kontaktnormalspannungen am Verschleißprüfstand eingestellt. Vor diesem Hintergrund erfolgt die Versuchsdurchführung sowohl bei $p = 20 \text{ MPa}$ ($\hat{=}$ Quer- und Längsseite der Matrize) als auch bei $p = 35 \text{ MPa}$ ($\hat{=}$ Matrizenradius). Ferner wird als Abziehggeschwindigkeit $v = 60 \text{ mm/s}$ gewählt, da dieser Wert die maximale Geschwindigkeit der hydraulischen Tiefziehpresse (TSP100 So, Fa. Lasco Umformtechnik) entspricht, welche für das Presshärten der Rechtecknäpfe genutzt wird. Zur statistischen Absicherung werden für jede Werkzeugkonfiguration fünf Reibbacken verwendet, die mit einer Abzugslänge von 190 mm auf jeweils fünf Platinen getestet werden. Hierdurch ergibt sich pro Werkzeugkonfiguration eine Reib- und Verschleißstrecke von 4750 mm. Bild 46 zeigt exemplarische Aufnahme einer Reibbacke und Blechplatine nach Durchführung der tribologischen Untersuchungen.

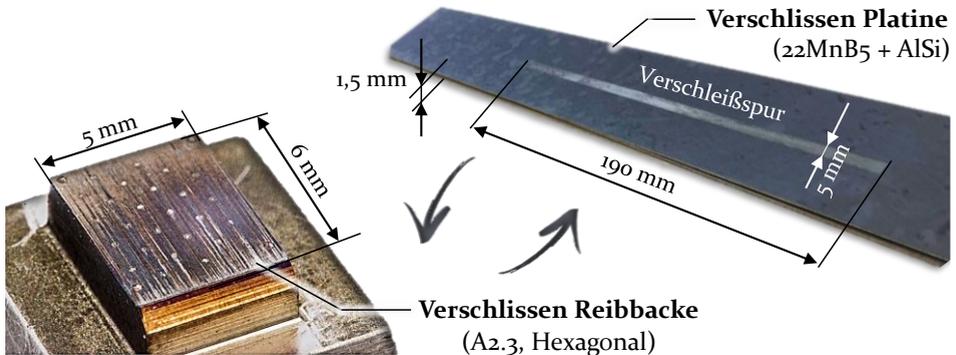


Bild 46: Exemplarische Aufnahmen einer verschlissenen Reibbacke und Blechplatine

Zur Identifizierung von reibungs- und verschleißmindernden Strukturordnungen müssen die Wechselwirkungen im Werkzeug-Werkstück-Kontakt näher untersucht werden. In diesem Zusammenhang werden die berechneten Reibzahlen, die optisch und taktil gemessenen Oberflächen der verschlissenen Platinen sowie die quantifizierten Verschleißvolumina der Werkzeuge gegenübergestellt und analysiert.

7.2.1 Analyse des Reibverhaltens

Die Analyse der Reibzahlen und Rauheiten der verschlissenen Platinen lässt wesentliche Unterschiede in Abhängigkeit der gewählten Flächenpressung und Werkzeugkonfiguration erkennen. In Bild 47 werden zunächst die berechneten Reibzahlen und taktil gemessenen Mittenrauwerte bei Kontaktnormalspannungen von 20 MPa dargestellt.

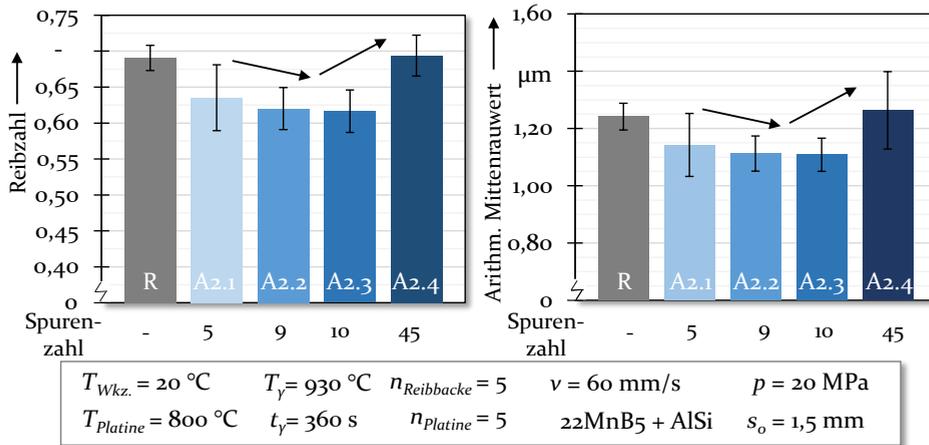


Bild 47: Ermittelte Reibzahlen der Konfigurationen bei 20 MPa Flächenpressungen

Die Gegenüberstellung der berechneten Reibzahlen zeigt, dass unmodifizierte Werkzeugoberflächen einen gemittelten Wert von $0,690 \pm 0,018$ aufweisen, wohingegen der niedrigste Reibzahlwert von $0,616 \pm 0,030$ für laserimplantierte Werkzeuge mit hexagonalen Mustern (Konfig. A 2.3) erreicht wird. Es ist zu berücksichtigen, dass die ermittelten Reibzahlen den zulässigen Grenzwert gemäß dem Reibzahlengesetz nach Coulomb überschreiten und somit als technische Werte gelten, die zum quantitativen Vergleich herangezogen werden. Die Versuchsergebnisse bestätigen die reibungsreduzierende Wirkung der hexagonalen Strukturen, welche auch bei den modifizierten Pin-on-Disk Tests (Abschnitt 6.1.1) nachgewiesen werden konnten. Ferner lässt sich die Tendenz erkennen, dass mit Zunahme von 5 auf 10 Spuren abnehmende Reibzahlen hervorgerufen werden, jedoch eine weitere Erhöhung auf 45 Spuren (Konfig. A2.4) eine signifikante Steigerung der Reibzahl auf $0,694 \pm 0,029$ verursacht. Korrespondierende Effekte werden an den gemessenen Mittenrauwerte der verschlissenen Platine sichtbar. Sowohl unmodifizierte als auch laserimplantierte Werkzeuge mit maximalen Spurenversatz (Konfig. 2.4) zeigen die größten Oberflächenrauheiten von $1,24 \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$ respektive $1,26 \pm 0,14\text{ }\mu\text{m}$ auf, während hexagonale Strukturen, analog zu den Reibzahlen, tendenziell die niedrigsten Werte von $1,11 \pm 0,06\text{ }\mu\text{m}$ herbeiführen.

Zur Verifizierung der Ergebnisse und zur weiteren Analyse der Ursache-Wirkbeziehungen werden zusätzliche Messungen an den verschlissenen Platinen mit Hilfe eines Laser-Scanning Mikroskops (VK-X 200, Fa. Keyence) durchgeführt. Bild 48 zeigt exemplarisch die aufgenommenen Topographien der Verschleißbahnen. In Abhängigkeit der verwendeten

Werkzeugkonfiguration lassen sich an den Platinenoberflächen unterschiedliche Höhenprofile erkennen. Die höchsten Einkerbungen werden an den Werkstücken detektiert, die mit niedrigen Spureanzahlen (Konfig. A2.1) beansprucht worden sind. Übereinstimmend mit den taktilen Messergebnissen zeigt sich, dass mit Zunahme der Spureanzahl (Konfig. A2.3) die Eindringtiefe der Implantate in die Platine abnimmt, was wiederum zu einem homogeneren Oberflächenflächenprofil mit niedrigeren Rauheiten führt. Demgegenüber nimmt bei weiterer Erhöhung der Spureanzahl (Konfig. 2.4) der Materialabtrag an der Platinenoberfläche sukzessive zu, was durch vielzählige, kompakt angeordnete Riefen ersichtlich wird.

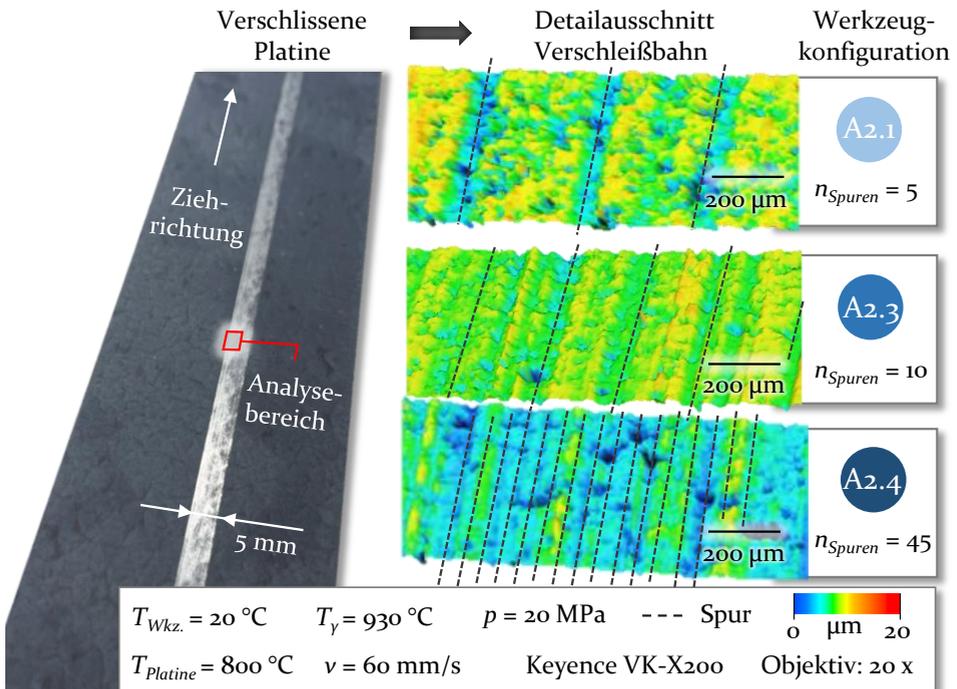


Bild 48: Optische Analyse der Verschleißbahnen der Platinen in Abhängigkeit der verwendeten Werkzeugkonfiguration

Für alle Testreihen werden einheitliche Normalkräfte ($F_N = 600 \text{ N}$) am Versuchsprüfstand eingestellt sowie identische Kontaktflächen ($A = 30 \text{ mm}^2$) und Implantanzahlen ($n_i = 45$) verwendet. Dies impliziert, dass an allen Oberflächenmodifikationen übereinstimmende nominelle Kontaktnormalspannungen vorliegen müssen. Dennoch zeigt sich anhand der Perthometermessungen, dass in Abhängigkeit der gewählten Werkzeugstrukturierung unterschiedliche Oberflächenrauheiten und folglich Eindringtiefen in den Platinenwerkstoff hervorgerufen werden. Dies lässt den

Rückschluss zu, dass die Variation der Strukturanordnung reibungserhöhende oder -mindernde Mechanismen bewirkt, deren jeweilige Dominanz von der Anzahl der Verschleißspuren bestimmt wird. Bild 49 zeigt eine schematische Darstellung der Wechselwirkungen in Abhängigkeit verschiedener Spuranzahlen.

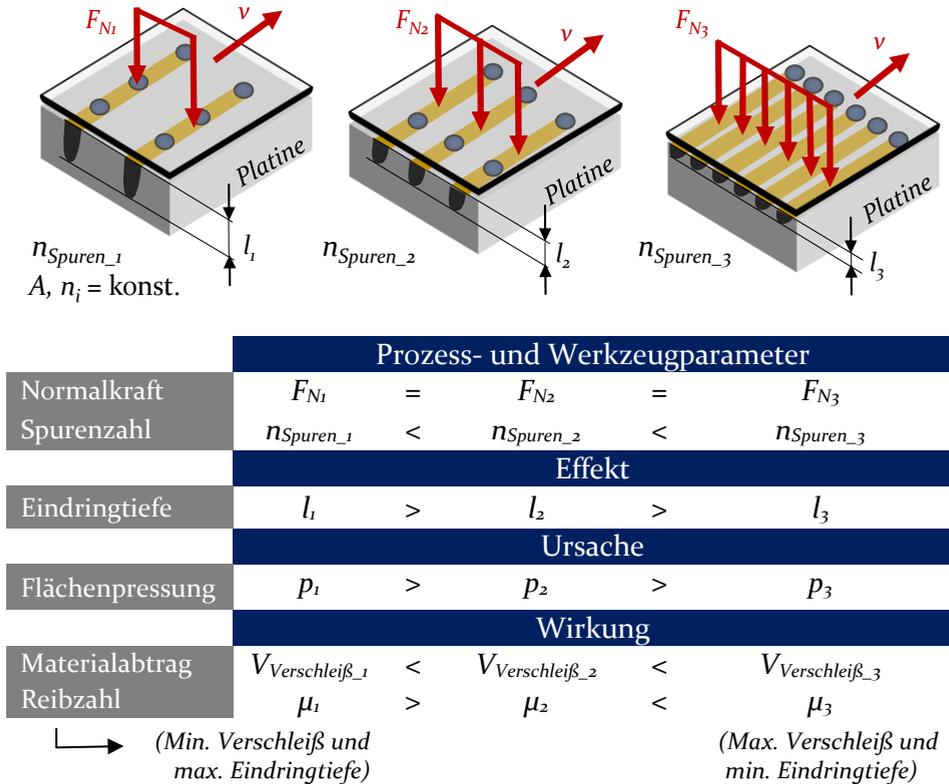


Bild 49: Schematische Darstellung des Einflusses unterschiedlicher Spuranzahlen auf das Reibverhalten

Mit Zunahme der Spurenzahl (Konfig. A2.1-A2.3) wird die global wirkende Normalkraft gleichmäßiger über die gesamte Werkzeug-Werkstück-Kontaktfläche verteilt, wodurch der Effekt des lokalen Eindringens und Pflügens der Implantate reduziert und folglich die Oberflächenrauheiten und Scherkräfte im tribologischen System verringert werden. Demgegenüber zeigt sich, dass mit steigender Spurenzahl zwar die Eindringtiefe der Oberflächenmodifikationen abnimmt, jedoch zugleich mehr unverschlissenes Blechmaterial durch die Implantate verdrängt werden muss, was bei Überschreitung eines Grenzwertes wiederum zu steigenden Reibkräften

und Reibzahlen führt (Konfig. A2.4). Das resultierende tribologische Verhalten der Spuranzahlen hängt folglich davon ab, ob der reibungsreduzierende Effekt des verringerten Eindringens der Implantate oder der reibungserhöhende Mechanismus des zunehmenden Scherens mit unver-schlissenen Blechmaterial dominiert.

Ähnliche Verhaltensweisen konnte Tenner [115] mittels lokal angepasster, mikrostrukturierter Werkzeugoberflächen unter schmierstofffreien Tief-ziehbedingungen beobachten. Die Autorin nutzte eine Streifenzieh-anlage, mit der sie variierende Flächendeckungen an Oberflächenmodifikationen von 10 %, 35 % und 50 % bei gleichbleibenden Kontaktnormalspannungen von $p = 4,5$ MPa untersuchte. Mit Zunahme des Deckungsgrades von 10 % auf 35 % ergaben sich zunächst reibungsreduzierende Mechanismen, was durch ein verstärktes Einglätten der Rauheitsspitzen erklärt worden ist. Durch eine weitere Erhöhung auf 50 % wurde jedoch ein Anstieg der Reibzahl verzeichnet. Als Ursache wurde das verstärkte Abscheren der Rauheitsspitzen an den versetzt angeordneten Strukturkanten angeführt, was wiederum einen erhöhten Bewegungswiderstand mit steigenden Reibkräften bewirkte. In diesem Zusammenhang resümierte die Autorin, dass der Anteil der Scherwirkung an der Gesamtreibung davon abhängt, wie viele Strukturkanten entgegen der Ziehrichtung durch das Blechmaterial überwunden werden müssen [115].

Um weitere Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses der Struktur-anordnung unter hochbeanspruchten Kontaktbedingungen zu erlangen, werden tribologische Untersuchungen bei 35 MPa Flächenpressung durchgeführt. Bild 50 zeigt die berechneten Reibzahlen und taktill gemessenen Rauheitskennwerte der verschlissenen Platine. Analog zu den vorherigen Versuchen mit 20 MPa Flächenpressung sind die Reibzahlen als technische Werte ein-zuordnen, die zum quantitativen Vergleich der Werkzeugkonfigurationen verwendet werden. Die Messergebnisse belegen, dass eine Erhöhung der Kontaktnormalspannung von 20 MPa auf 35 MPa eine Verringerung der Reibzahlen unabhängig der gewählten Werkzeugkonfigurationen bewirkt. Exemplarisch weisen konventionelle Werkzeugoberflächen eine Reibzahl von $0,581 \pm 0,037$ ($0,690 \pm 0,018$ bei 20 MPa) auf, während der niedrigste Wert von $0,537 \pm 0,018$ ($0,620 \pm 0,029$ bei 20 MPa) für modifizierte Werkzeuge mit linienförmigen Strukturen 90° zur Ziehrichtung (Konfig. A2.2) erreicht wird. Der Effekt der Reibungsverringerung mit zunehmender Kontaktnormalspannung wurde bereits durch Ghiotti et al. [96] und Schwingenschlögl [73] beobachtet und durch das verstärkte Einglätten der interagierenden Rauheitsspitzen erklärt, was den Bewegungswiderstand und somit die Reibung reduziert. Die Gegenüberstellung der Reibzahlen

zeigt weiterhin auf, dass alle laserimplantierten Werkzeuge ähnliche Messergebnisse erreichen und folglich keine Abhängigkeiten hinsichtlich der verwendeten Spurenanzahl vorliegen. Korrespondierend dazu belegen die Perthometermessungen, dass alle laserimplantierten Werkzeugkonfigurationen ähnliche Eindringtiefen von 1,06 - 1,12 μm hervorrufen. Die höchste Rauheit wird von unmodifizierten Reibbacken ($1,25 \pm 0,16 \mu\text{m}$) erzielt, wohingegen laserimplantierte Werkzeuge mit $n = 9$ Spuren (Konfig. A2.2) tendenziell die niedrigsten Mittenrauwerte ($1,06 \pm 0,09 \mu\text{m}$) bewirken.

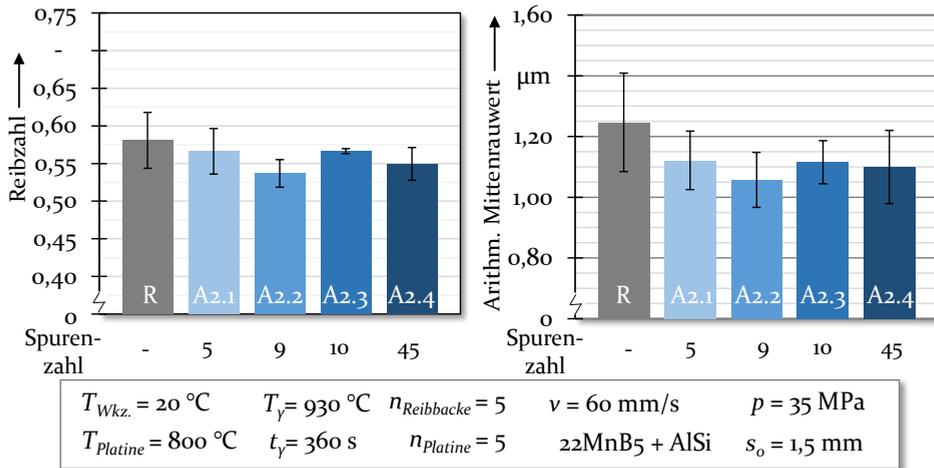


Bild 50: Ermittelte Reibzahlen der Konfigurationen bei 35 MPa Flächenpressungen

Weder die Reibzahlanalyse noch die Charakterisierung der Platinenoberfläche lassen einen Einfluss der Spurenanzahl auf das tribologische Einsatzverhalten erkennen. Es wird vermutet, dass die annähernde Verdopplung der global wirkenden Normalkraft einen signifikanten Anstieg der lokal vorliegenden Flächenpressungen der Oberflächenmodifikationen bewirkt, wodurch ein gleichmäßiges Eindringen der Implantate in den heißen und folglich weichen Platinenwerkstoff unabhängig der gewählten Werkzeugkonfiguration erzwungen wird. Ähnliche Verhaltensweisen wurden bereits bei der Analyse der thermo-mechanischen Wechselwirkungen in Abschnitt 6.1.4 beobachtet. Während bei 20 MPa Flächenpressungen unterschiedliche Eindringtiefen in Abhängigkeit des gewählten Implantatabstandes hervorgerufen worden sind, wurden bei 35 MPa tiefere und fast identische Einkerbungen in der Platine unabhängig der gewählten Werkzeugkonfiguration verursacht. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass mit zunehmender Kontaktnormalspannung die tribologische Wirksamkeit der Oberflächenmodifikationen aufgrund des verstärkten Eindringens in den Platinenwerk-

stoff zwar verringert wird, aber dennoch reibungsreduzierende Eigenschaften erzielt werden können. Da zur seriennahen Abbildung von Presshärtebedingungen für gewöhnlich Kontaktnormalspannungen von bis zu 40 MPa betrachtet werden [61], ist durch die Verwendung laserimplantierter Oberflächen die grundsätzliche Eignung zur Reibungsreduzierung bei industriellen Presshärtewerkzeuge gegeben. In diesem Zusammenhang ist zu erwarten, dass sowohl die Laserimplantation der hochbeanspruchten Quer- und Längsseite ($p = 20$ MPa), als auch die Modifikation der höchstbeanspruchten Eckradien der Rechtecknapfmatrize ($p = 35$ MPa) mittels hexagonalen Implantationsmustern reibungsreduzierende Eigenschaften hervorruft.

7.2.2 Untersuchung der Verschleißausbildung

Die Ergebnisse der Oberflächen- und Reibzahlanalyse belegen, dass durch die Relativbewegung der Reibbacken sowohl örtlich als auch zeitlich variierende Kontaktverhältnisse vorliegen, die in Abhängigkeit der gewählten Werkzeugkonfiguration und Flächenpressung differierende Furchungseffekte und Reibzahlen bedingen. Aufgrund der physikalischen Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und Werkstück, wird neben den unterschiedlichen Oberflächen- und Reibverhältnissen auch ein signifikanter Einfluss auf das Verschleißverhalten der Werkzeuge vermutet. Zur Verifizierung der Annahme werden optische Messungen der Werkzeugtopographien sowohl vor als auch nach den Versuchsdurchführungen mit Hilfe eines Laser-Scanning Mikroskops (VK-X200, Fa. Keyence) veranlasst. Durch die softwarebasierte Überlagerung der beiden Werkzeugtopographien (VK-Analyse Modul, Fa. Keyence) kann die Volumendifferenz und folglich der resultierende Oberflächenverschleiß quantifiziert werden. Bild 51 zeigt exemplarische Aufnahmen konventioneller sowie laserimplantierter Werkzeugkonfigurationen, die mit einer Verschleißstrecke von 950 mm sowie eine Kontaktnormalspannung von 20 MPa respektive 35 MPa beansprucht worden sind. Korrespondierend zu den Verschleißuntersuchungen der modifizierten Pin-on-Disk Tests (Abschnitt 6.1.3) treten über die gesamte Kontaktfläche der Reibbacken konzentrierte Materialanhaftungen auf, deren Konturen in Ziehrichtung des Werkzeuges orientiert sind. Nach [87] wird dieser adhäsive Verschleißeffekte infolge der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück verursacht, da aufgrund der hohen Normal- und Tangentialkräfte überwiegend Materialfragmente vom kohäsiv schwächer gebundenen Halbzeug abgeschert und auf die kohäsiv stärker gebundene Werkzeugoberfläche transferiert werden. Obwohl die tribologischen Untersuchungen im Labormaßstab durchgeführt worden sind, tritt dieses

Phänomen auch bei industriellen Presshärteprozessen als primärer Verschleißmechanismus auf [19]. Ebenso weisen die optischen Messungen den Trend auf, dass steigende Spureanzahlen sowie Flächenpressung zunehmende Verschleißanhaftungen auf der Werkzeuoberfläche verursachen.

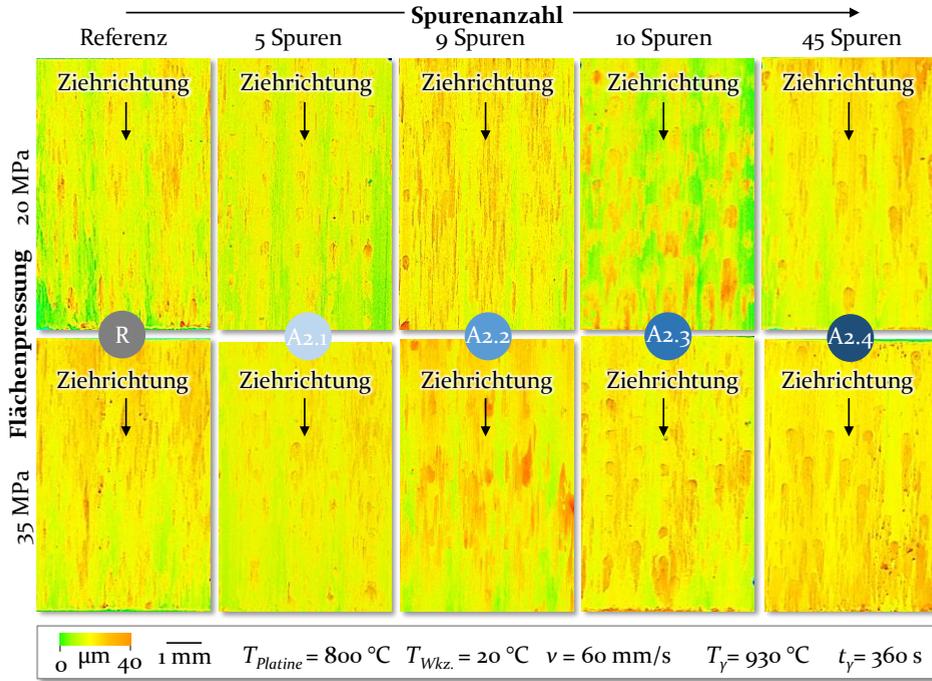


Bild 51: Aufnahmen der verschlissenen Werkzeugkonfigurationen bei unterschiedlichen Kontaktnormalspannungen

Um diese Annahmen zu bestätigen, wird im Folgenden das Verschleißaufkommen aller Werkzeugkonfigurationen computergestützt quantifiziert. Bild 52 zeigt die Verschleißvolumina der Werkzeuge, für deren Berechnung fünf Reibbacken pro Variante und Flächenpressung herangezogen werden. In Abhängigkeit der gewählten Werkzeugkonfiguration und Flächenpressung lassen sich signifikante Unterschiede hinsichtlich dem vorliegenden Verschleißverhalten erkennen. Bei 20 MPa weisen konventionelle Werkzeuoberflächen ein gemittelt Verschleißvolumen von $\sim 0,046 \text{ mm}^3$ auf, während laserimplantierte Reibbacken mit hexagonalen Anordnungen (Konfig. A2.3) die wenigsten Materialanhaftungen von $\sim 0,036 \text{ mm}^3$ umfassen. Dem entgegen bewirken laserimplantierte Werkzeuge mit maximalen Spurenversatz (Konfig. A2.4) eine signifikante Steigerung des Verschleißaufkommens auf $\sim 0,050 \text{ mm}^3$. Der Vergleich der quantifizierten Ver-

schleißvolumina bei 20 MPa und 35 MPa bestätigt die Vermutung, dass zunehmende Kontaktnormalspannungen steigende Materialanhaftungen an den Werkzeugoberflächen verursachen. Es wird angenommen, dass höhere Flächenpressungen steigende Normal- und Tangentialkräfte in der Wirkfuge bedingen, was aufgrund der Relativbewegung des Werkzeuges ein verstärktes Abscheren der Rauheitsspitzen mit erhöhtem Materialabtrag zur Folge hat. Trotz zunehmenden Flächenpressungen und erhöhtem Materialtransfer lässt sich ein ähnliches Verschleißverhalten der modifizierten Werkzeugkonfigurationen identifizieren. Das niedrigste Verschleißaufkommen von $\sim 0,050 \text{ mm}^3$ wird bei 35 MPa wiederum für hexagonale Strukturanordnung verzeichnet, wohingegen die höchsten Verschleißvolumina von $\sim 0,062 \text{ mm}^3$ bei laserimplantierten Werkzeugen mit maximalen Spurenversatz vorliegen. Demgegenüber weisen konventionelle Werkzeugoberflächen ein Verschleißvolumen von $\sim 0,053 \text{ mm}^3$ auf.

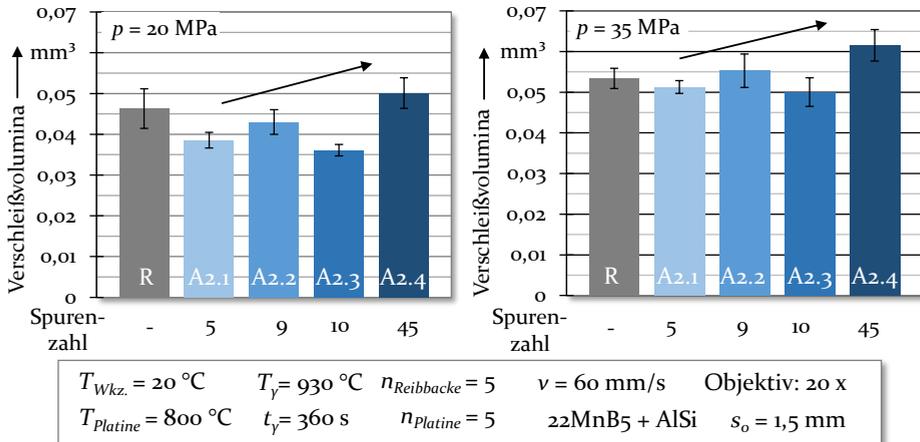


Bild 52: Ermittelte Verschleißvolumina der Werkzeugkonfigurationen in Abhängigkeit unterschiedlicher Flächenpressungen

Im Presshärteprozess wird die Ausbildung adhäsiven Verschleißes sowohl von den Kontaktverhältnissen als auch von stofflichen Wechselwirkungen der interagierenden Reibpartner beeinflusst [73]. Korrespondierend zu diesen Erkenntnissen zeigt sich, dass in Abhängigkeit der gewählten Anordnung der laserimplantierten Strukturen verschleißerhöhende oder -mindernde Mechanismen hervorgerufen werden. Es ist die Tendenz ersichtlich, dass mit zunehmender Spuranzahl ein Anstieg der metallischen Adhäsion auf der Werkzeugoberfläche verursacht wird. Lediglich hexagonale Strukturen und folglich gleichmäßig verteilte Muster stehen dieser Entwicklung entgegen, da trotz hoher Spuranzahlen und variierender

Belastungskollektive stets die niedrigsten Verschleißvolumina erzielt werden. Die ansteigende Verschleißausbildung mit anwachsender Spurenanzahl könnte durch die zunehmende Scherwirkung der Oberflächenmodifikationen erklärt werden. Da mit steigender Spurenanzahl mehr unverschlossenes Blechmaterial durch die Implantate verdrängt werden muss, werden mehr Materialfragmente aus der Grenzschicht der Halbzeuge herausgerissen, welche sich wiederum in den kompakt gruppierten Zwischenräumen der linienförmigen respektive lokal versetzten Implantatanordnungen ansammeln. Ähnliche Verhaltensweisen konnten Roch et al. [117] anhand von Ball-on-Disk Experimenten unter schmierstofffreien Umformbedingungen nachweisen. Die Autoren belegten, dass in Abhängigkeit der Strukturausrichtung unterschiedliche tribologische Mechanismen hervorgerufen werden. Insbesondere wurden reibungs- und verschleißerhöhende Wechselwirkungen identifiziert, sobald Linienmuster in 90°-Orientierung zur Relativbewegung ausgerichtet worden sind. Als Ursache wurde die zunehmende Scherung des Blechhalbzeuges an den Strukturkanten angeführt. Vor diesem Hintergrund gilt es, die Berührungsverhältnisse der beiden Reibpartner gezielt anzupassen, sodass eine möglichst geringe Schädigung der Blechplatine verursacht wird. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass durch eine gleichmäßig, hexagonale Anordnung der Oberflächenmodifikationen diese lokal konzentrierten Verschleißanhaftungen maßgeblich reduziert werden. Es wird angenommen, dass aufgrund der gleichmäßigen Verteilung der Implantate die Verschleißpartikel effektiver aus der Wirkfuge entfernt werden. Ebenso wird die Gefahr des Werkstoffabtrags und des unmittelbaren Konglomerierens der Materialanhaftungen in den Zwischenräumen reduziert. Weiterhin wird aus der Verschleiß- und Oberflächenanalyse ersichtlich, dass mit ansteigender Flächenpressung die verschleißreduzierende Wirkung der Implantate abnimmt. Aufgrund der steigenden Kontaktnormalspannungen wird ein tieferes Eindringen der Oberflächenmodifikationen in den duktilen Platinenwerkstoff unabhängig der gewählten Werkzeugkonfiguration erzwungen. Während der horizontalen Abzugsbewegung der Reibbacke werden demnach mehr Materialfragmente aus der Randschicht des Blechhalbzeuges entfernt, was wiederum steigende Verschleißvolumina impliziert. Trotz der unterschiedlichen tribologischen Wirkung der laserimplantierten Werkzeuge weisen hexagonale Anordnungen, entgegen dem unmodifizierten Referenzwert, verschleißmindernde Eigenschaften sowohl bei 20 MPa als auch bei 35 MPa auf.

7.2.3 Zusammenfassende Bewertung

Im Rahmen der Untersuchung wurde die Anordnung der Oberflächenmodifikationen innerhalb definierter Strukturierungsmuster gradiert, um die Berührungsverhältnisse und folglich das Reib- und Verschleißverhalten im Werkzeug-Werkstück-Kontakt gezielt zu adaptieren und zu analysieren. Die Wahl der Strukturordnung orientiert sich an den Merkmalen, für welche in der Literatur bereits eine Beeinflussung des tribologischen Verhaltens identifiziert worden sind. In diesem Zusammenhang wurden jeweils $n_i = 45$ Implantate in linienförmigen Cluster mit 0° ($n_{\text{Spuren}} = 5$) und 90° ($n_{\text{Spuren}} = 9$) zur Ziehrichtung, hexagonale Muster ($n_{\text{Spuren}} = 10$) sowie Strukturordnungen mit maximalen Spurenversatz ($n_{\text{Spuren}} = 45$) unter Presshärtebedingungen bei $p = 20$ MPa sowie $p = 35$ MPa analysiert. Die quantifizierten Verschleißvolumina und Reibzahlen in Abhängigkeit der genutzten Werkzeugkonfiguration sind in Bild 53 zusammengefasst.

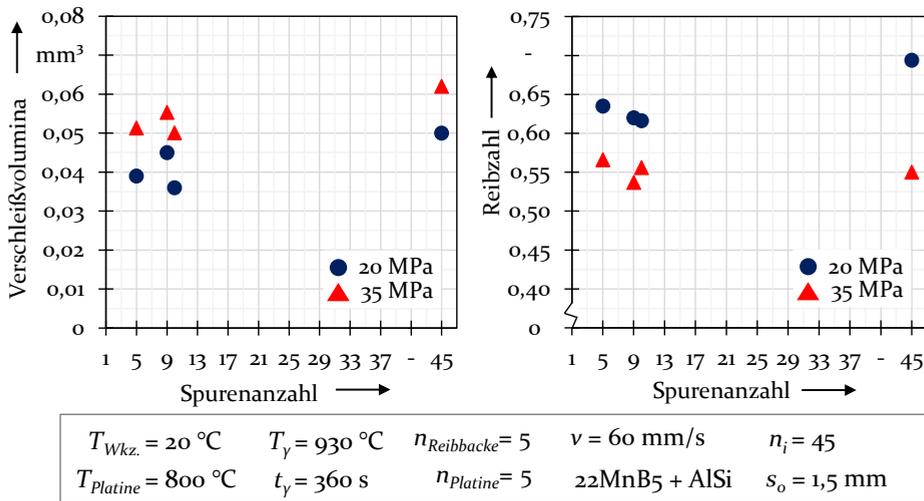


Bild 53: Gegenüberstellung der Verschleißvolumina und Reibzahlen der Werkzeugkonfigurationen in Abhängigkeit unterschiedlicher Kontaktnormalspannungen

Die Versuchsergebnisse belegen, dass die Werkzeugkonfigurationen reibungs- und verschleißmindernde Mechanismen bewirken, deren jeweilige Dominanz von der Anzahl der Spuren abhängig ist. Mit Zunahme der Spuren wird sowohl bei 20 MPa als auch bei 35 MPa der Trend einer ansteigenden Verschleißausbildung auf der Werkzeugoberfläche sichtbar. Da mit steigender Flächendeckung mehr unverschlissenes Blechmaterial durch die Oberflächenmodifikationen verdrängt werden muss, werden mehr Verschleißpartikel aus den Grenzschichten der Halbzeuge abgetragen und in die Zwischenräume der Implantate angesammelt. Als vorteilhaft zeigen

sich, trotz höherer Spuranzahlen, hexagonale Strukturen, da diese eine gleichmäßige Verteilungen der Implantate aufweisen, infolgedessen Verschleißpartikel effektiver aus der Wirkfuge transportiert sowie die Gefahr des Konglomerierens der Materialanhaftungen reduziert wird.

Die Reibzahlanalyse lässt bei Flächenpressung von 20 MPa erkennen, dass mit zunehmender Spurenanzahl zunächst abnehmende Reibzahlen herbeigeführt werden, jedoch bei zu hohem Spurenversatz wiederum steigende Reibkräfte verzeichnet werden. Es wird angenommen, dass mit ansteigender Flächendeckung der Strukturen die global wirkende Normalkraft gleichmäßiger in der Wirkfuge verteilt wird, wodurch der Effekt des Eindringens und Pflügens der Implantate reduziert wird. Gleichzeitig muss mit ansteigender Spuranzahl jedoch mehr unverschlissenes Blechmaterial durch die Implantate verdrängt werden, was bei Überschreitung eines kritischen Schwellwertes wiederum reibungserhöhende Mechanismen zur Folge hat. Durch die Erhöhung der Flächenpressung auf 35 MPa wird die reibungsreduzierende Wirkung der unterschiedlichen Strukturordnungen zunehmend gemindert. Es wird angenommen, dass die Erhöhung der Kontaktnormalspannung ein tieferes und gleichmäßiges Eindringen der Implantate in das heiße und folglich weiche Blechhalbzeug unabhängig der gewählten Werkzeugkonfiguration bewirkt, wodurch der tribologisch begünstigenden Effekt der lokal adaptierten Strukturordnung verringert wird. Bei den ermittelten Reibzahlen ist zu berücksichtigen, dass gegenüber den Pin-on-Disk Versuchen in Kapitel 5 der zulässige Grenzwert des Coulomb'schen Reibgesetzes überschritten wird. Ursache der Reibzahlerhöhung könnte die vergrößerte Kontaktfläche, die fast viermal längere Abzugsstrecke sowie die verringerte Abzugsgeschwindigkeit sein, infolgedessen in der Wirkfuge die Anzahl an intermetallischen Verhakungen zunimmt und somit steigende Reibkräfte mit erhöhten Materialabtrag verursacht werden. Die geringen Schwankungen der Normal- (F_N) und Reibkraftmessung (F_R) belegen jedoch, dass eine hohe Konstanz und Reproduzierbarkeit der Versuchsreihen vorliegt und somit die Versuchsdurchführung geeignet ist das tribologische Verhalten unter hochbeanspruchten Kontaktbedingungen objektiv zu beurteilen. Die Kennwerte werden daher als quantitatives Vergleichskriterium herangezogen, um die Reibbedingungen der Werkzeuge gegenüberstellend zu bewerten.

Zusammenfassung der ermittelten Wirkprinzipien zur beanspruchungsgerechten Werkzeugmodifikation

Durch die Synthese der identifizierten Implantatgeometrie und -abstände (Kapitel 6) sowie den ermittelten Strategien zur beanspruchungsgerechten

Anordnung der Strukturen (Kapitel 7) sind die grundlegenden Voraussetzung zur zielgerichteten Modifikation hochbeanspruchter Werkzeugbereiche geschaffen. Die Grundlagenuntersuchungen belegen, dass laserimplantierte Werkzeuge mit Spothöhen von $10\ \mu\text{m}$ und Implantatabständen $\geq 550\ \mu\text{m}$ sowohl die tribologischen als auch die thermischen Wechselwirkungen im Presshärteprozess begünstigen. Ferner kann durch Oberflächenmodifikationen mit Höhen von $30\ \mu\text{m}$ und Abständen $\leq 350\ \mu\text{m}$ der Wärmetransfer in der Wirkfuge aufgrund von Lufteinschlüssen reduziert werden, was zu Beginn des Presshärteprozesses vorteilhaft ist, um lokal niedrige Kühlraten und Fließspannungen im Flanschbereich zu erreichen. Daran anknüpfend zeigt die Analyse der Oberflächenmodifikationen unter hochbeanspruchter Kontaktbedingungen auf, dass vor allem Implantationsmuster mit gleichmäßiger, hexagonaler Strukturanordnung verringerte Werkstückdeformationen und Scherbelastungen induzieren, wodurch das tribologische Verhalten in der Umformzone verbessert wird. Tabelle 7 fasst die erarbeiteten Kenntnisse zur beanspruchungsgerechten Laserimplantation zusammen.

Anhand der ermittelten Wechselwirkungen lässt sich ableiten, dass zur Modifikation tribologisch hochbeanspruchter Werkzeugbereiche niedrige Implantathöhen erfordert werden, um die Reibung zu reduzieren sowie den Wärmetransfer in der Wirkfuge zu erhöhen. Analog dazu begünstigen weite Spottedistanzen die Wärmeübertragung im Werkzeug-Werkstück-Kontakt, wohingegen zu hohe Implantatabstände negative Auswirkung auf die resultierenden Reibbedingungen besitzen. Konträre Verhaltensweisen sind auch bei der Wahl der Strukturierungsmuster sichtbar. Die Versuchsergebnisse belegen, dass eine Mindestanzahl an Spuren vorliegen muss, um tribologisch begünstigende Eigenschaften zu erreichen. Bei zu hohen Spurenanzahlen werden jedoch reibungs- und verschleißerhöhende Mechanismen aufgrund des verstärkten Materialabtrages der laserimplantierten Strukturen hervorgerufen. Allerdings wirkt sich eine gleichmäßige Verteilung der Strukturen vorteilhaft auf das Reib- und Verschleißverhalten aus, da Verschleißpartikel effektiver aus der Wirkfuge entfernt werden können und weniger Verhakungen der Rauheitsspitzen entstehen. Weiterhin zeigen die Laboruntersuchungen, dass mit zunehmender Kontaktnormalspannung die tribologische Wirksamkeit der Oberflächenmodifikationen aufgrund des verstärkten Eindringens und Werkstoffabtrages der Implantate abnimmt, aber dennoch reibungs- und verschleißreduzierende Eigenschaften hervorgerufen werden.

Um das erarbeitete Wissen sowie das proklamierte Potenzial der laserimplantierten Strukturen anhand eines industrienahen Demonstrators zu verifizieren, wird im Folgenden ein Rechtecknapfzugwerkzeug in tribologisch kritischen Umformzonen maßgeschneidert modifiziert. Anschließend werden Presshärteversuchen durchgeführt und dessen Einsatzverhalten mit einem unmodifizierten Referenzwerkzeug verglichen.

Tabelle 7: Einfluss der Implantathöhe, -distanz und -spurenanzahl sowie der Flächenpressung auf das Reib-, Verschleiß-, und Abkühlverhalten im Presshärteprozess

	Reibung	Verschleiß	Wärmetransfer
Spot- höhe 	<ul style="list-style-type: none"> • Flächenpressung ↓ • Eindringtiefe ↓ • Scherkräfte ↓ Reibung ↓	Keine Wechselwirkungen identifiziert	<ul style="list-style-type: none"> • Intermetallischer Kontakt ↑ • Wärmeleitung ↑ Wärmetransfer ↑
Spot- distanz 	<ul style="list-style-type: none"> • Flächenpressung ↓ • Eindringtiefe ↓ • Scherkräfte ↓ Reibung ↓	<ul style="list-style-type: none"> • Kontaktfläche ↑ • Verhakung von Rauheitsspitzen ↑ Verschleiß ↑	<ul style="list-style-type: none"> • Flächenpressung ↓ • Eindringtiefe ↓ • Lufteinschlüsse ↑ Wärmetransfer ↓
Spuren- zahl 	<ul style="list-style-type: none"> • Flächendeckung ↓ • Verhakungen vs. Eindringtiefe ↑ Reibung ↓↑	<ul style="list-style-type: none"> • Kontaktfläche ↓ • Verhakung von Rauheitsspitzen ↓ Verschleiß ↓	Keine Wechselwirkungen identifiziert
Flächen- pressung 	<ul style="list-style-type: none"> • Eindringtiefe ↑ • Einglättung ↑ • Verhakungen ↓ Reibung ↓	<ul style="list-style-type: none"> • Eindringtiefe ↑ • Scherwirkung ↑ • Materialabtrag ↑ Verschleiß ↑	<ul style="list-style-type: none"> • Eindringtiefe ↑ • Kontaktfläche ↑ • Wärmeleitung ↑ Wärmetransfer ↑
Legende: Steigend ↑ Abnehmend ↓ Keine Auswirkung —			

8 Transfer der Erkenntnisse aus den Modellversuchen auf eine industriennahe Demonstratorgeometrie

Die im Labormaßstab ermittelten Anforderungsprofile zur beanspruchungsgerechten Werkzeugmodifikation bilden die Grundlage, um Werkzeuggeometrien maßgeschneidert zu laserimplantieren. Die Zielsetzung besteht nun darin, die Übertragbarkeit der identifizierten Wirkmechanismen anhand von Rechtecknapfzugversuchen zu verifizieren. Im Zuge dessen werden lokal angepasste Strukturierungsmuster auf die Matrize des Napfzugwerkzeuges appliziert und deren Einfluss auf das Reib-, Verschleiß- und Abkühlverhalten ermittelt. Zur qualitativen und quantitativen Bewertung der Ergebnisse werden zudem Versuche anhand eines unmodifizierten Werkzeugsatzes durchgeführt. Hierdurch lässt sich das proklamierte Potenzial der maßgeschneiderten Oberflächenmodifizierung prüfen sowie deren tatsächliche Steigerung der Bauteilqualität und Verschleißbeständigkeit im Vergleich zu konventionellen Werkzeugen untersuchen.

8.1 Anforderungsgerechte Auswahl und Platzierung der Oberflächenmodifikationen

Im Presshärteprozess liegen zeitlich und örtlich variierende Kontaktverhältnisse vor, die sowohl die Abkühlbedingungen als auch das Reib- und Verschleißverhalten zwischen Werkzeug und Werkstück beeinflussen. Für eine belastungsangepasste, maßgeschneiderte Modifikation der Rechtecknapfmatrize werden die Ergebnisse aus den Laborversuchen zur funktionsgerechten Gestaltung der Oberflächenmodifikationen genutzt. Die beanspruchungsgerechte Auslegung und Platzierung der Oberflächenmodifikationen erfolgt in direkter Rückkopplung zu den in Kapitel 5 lokalisierten und quantifizierten Werkzeugbeanspruchungen und den in Kapitel 6 und 7 identifizierten Implantatkonfigurationen. Zur vollständigen Analyse des Potenzials der Oberflächentechnologie werden alle Werkzeugflächen einbezogen, die während der Umformung in Kontakt mit dem austenitisierten Halbzeug stehen. Kontaktflächen bilden sowohl die Stirnseite der Matrize, welche als Platinauflage zu Beginn des Prozesses fungiert, als auch die Einlaufradien der Matrizeinheit, welche die Formgebung des Halbzeuges bedingen. Bild 54 zeigt die Vorgehensweise zur anforderungsgerechten Auswahl und Platzierung der lasergenerierten Strukturen.

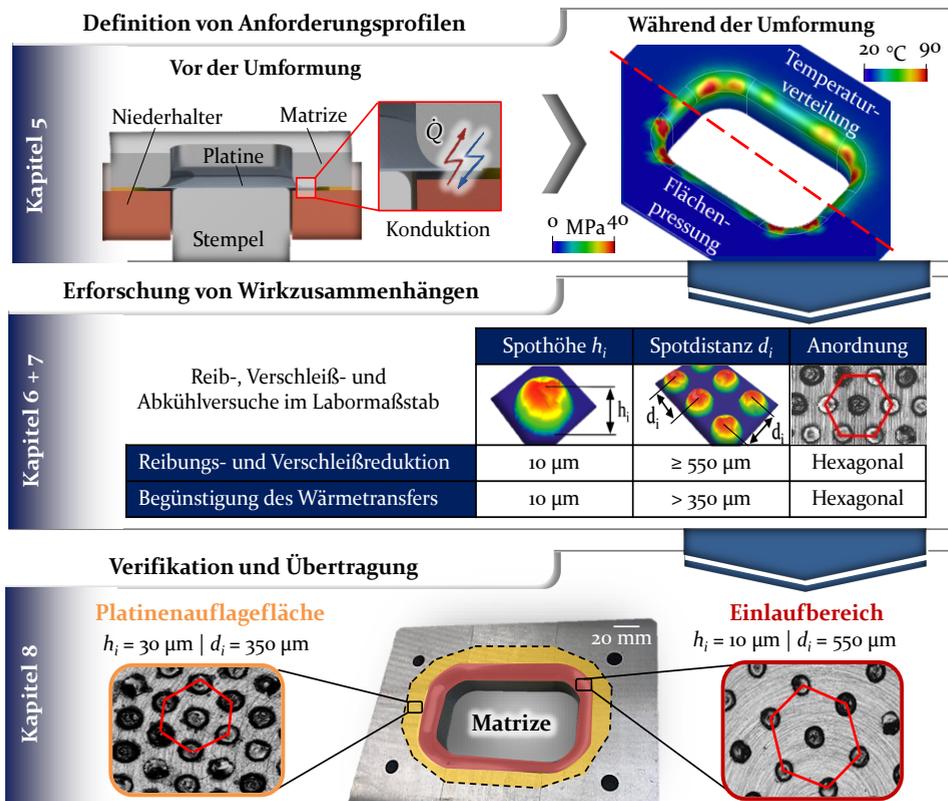


Bild 54: Beanspruchungsgerechte Auswahl und Platzierung der Oberflächenmodifikationen basierend auf den ermittelten Wirkprinzipien der FE-Analyse sowie den tribologischen und thermo-mechanischen Untersuchungen im Labormaßstab

Anforderungsgerechte Modifikation der Platinenaufgabefläche

Zu Beginn des Presshärteprozesses erfolgt die Wärmebehandlung der Blechplatine in einem separaten Kammerofen, wodurch eine vollständige Umwandlung des Materialgefüges in kubisch-flächenzentrierten Austenit veranlasst wird. Nach Abschluss des Austenitisierungsprozesses wird der Bor-Mangan-Stahl aus dem Ofen entnommen und auf gefederte Distanzstifte im Werkzeug positioniert, um eine vorzeitige Auskühlung und Phasenumwandlung der Platine zu unterbinden. Anschließend werden beide Werkzeughälften verschlossen und der Umformprozess gestartet. Die simulationsgestützte Prozessanalyse belegt (Abschnitt 5.2), dass Wärmeverluste im Flanschbereich durch den Kontakt mit der Matrizenstirnfläche entstehen und somit inhomogene Temperatur- und Festigkeitsverteilungen am Halbzeug vorliegen. Hierdurch wird die Kraftübertragung und das Nachfließen des Flanschbereiches während der Tiefziehbewegung des

Stempels gehemmt und folglich eine Ausdünnung der heißeren und weicheeren Zarge herbeigeführt [24]. Um die Prozessrobustheit zu erhöhen und die Gefahr des Einschnürens und der Rissbildung der Bauteile zu reduzieren, muss demnach vor der Umformung der Wärmetransfer zwischen Platine und der Stirnfläche der Matrize minimiert werden. Die Abschreckversuche in Abschnitt 6.1.4 zeigen, dass vor allem enge Spotabstände und hohe Implantathöhen sich prädestinieren, um den Wärmefluss zwischen Werkzeug und Werkstück zu verringern. Vor diesem Hintergrund wird die Auflagefläche der Platine mit hexagonalen Mustern laserimplantiert, deren Höhen $h_i = 30 \mu\text{m}$ und Abstände $d_i = 350 \mu\text{m}$ betragen. Bild 55 zeigt die laserimplantierten Auflageflächen der Werkzeugsegmente. Es wird erwartet, dass durch die Modifikation der Auflagefläche der Wärmetransfer vor der Umformung reduziert wird, wodurch die Auskühlung des Flansches verringert und folglich eine homogenere Temperaturverteilung der Platine mit niedrigeren Fließspannungen und besserer Formgebung erzielt wird.

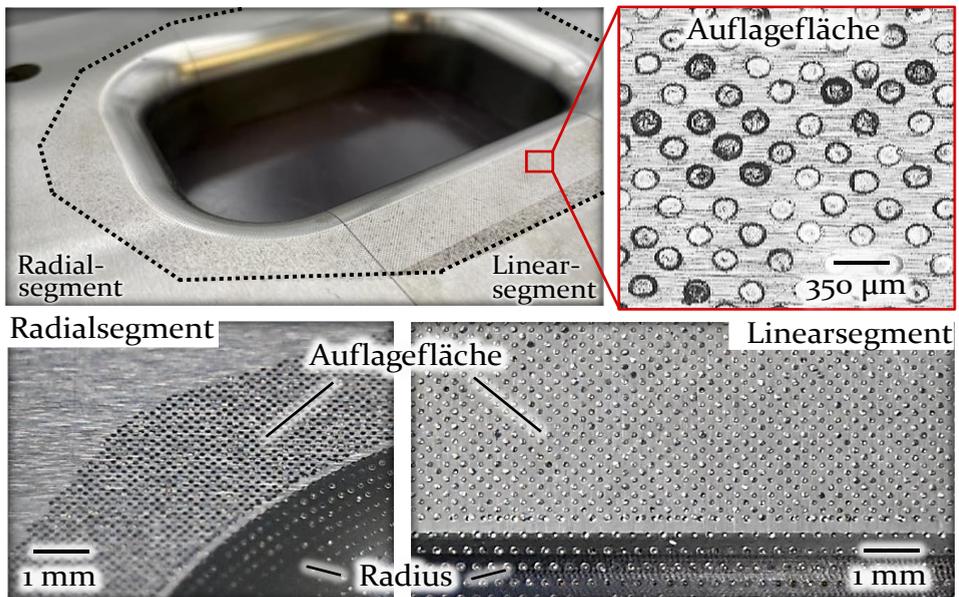


Bild 55: Laserimplantierte Auflagefläche der Rechtecknapfmatrize

Anforderungsgerechte Modifikation des Einlaufbereiches

Der Beginn des Tiefziehprozesses erfolgt, sobald der Stempel auf den Ziehteilboden der austenitisierten Platine auftrifft und die Formgebung des Bleches initiiert wird. Das experimentell validierte FE-Modell in Kapitel 5 belegt, dass bei der Umformung an den Matrizenkrümmungen hohe tribologische Beanspruchungen vorliegen, welche auf die variierenden Einlauf-

radien und differierenden Spannungs- und Kontaktzustände zurückzuführen sind. Die höchsten Flächenpressungen von ~ 35 MPa treten an den doppelt gekrümmten Eckradien auf, während niedrigere Kontaktnormalspannungen von ~ 20 MPa an den Quer- und Längsseiten verzeichnet werden. Um das tribologische Einsatzverhalten zu begünstigen, müssen folglich die Kontaktbedingungen im Matrizeinlaufbereich gezielt adaptiert werden, sodass eine Verringerung der Werkzeugbeanspruchung sowie eine Begünstigung des Werkstoffflusses hervorgerufen werden. Anhand von Pin-on-Disk Untersuchungen sowie Warmstreifenziehversuchen konnte nachgewiesen werden, dass vor allem hexagonal angeordnete Implantatkonfigurationen mit Höhen $h_i = 10 \mu\text{m}$ und Abständen $d_i \geq 550 \mu\text{m}$ reibungs- und verschleißreduzierende Eigenschaften unter eben diesen Beanspruchungskollektiven aufweisen. Darüber hinaus zeigten die Ergebnisse der Abschreckversuche, dass diese Konfiguration ebenfalls den Wärmetransfer in der Wirkfuge begünstigen, wodurch eine schnelle, prozesssichere Auskühlung nach der Umformung mit niedrigen Zykluszeiten gewährleistet wird. Basierend auf den ermittelten Ergebnissen der Laborversuche und den daraus abgeleiteten Wirkprinzipien werden sowohl die Einlaufradien der Linear- und Radialsegmente mit hexagonalen Mustern, deren Spotabstände $d_i = 550 \mu\text{m}$ und Höhen $h_i = 10 \mu\text{m}$ betragen, laserimplantiert. Die adaptierten Einlaufradien sind in Bild 56 dargestellt. Insgesamt wurden zur maßgeschneiderten Modifikation der Rechtecknapfmatrize ~ 23.000 Implantate auf den Werkzeugoberflächen appliziert.

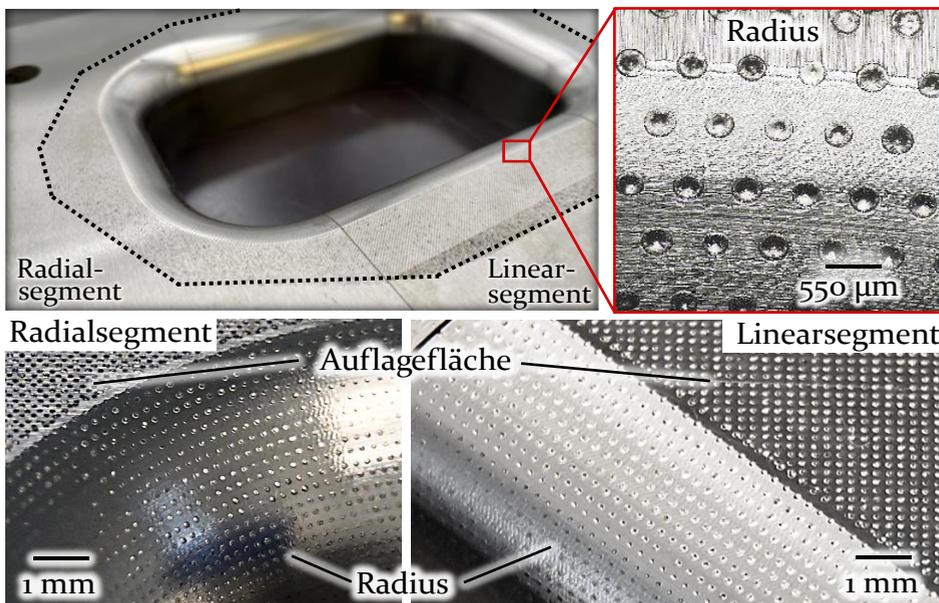


Bild 56: Laserimplantierter Einlaufbereich der Rechtecknapfmatrize

8.2 Qualifizierung des thermo-mechanischen und tribologischen Einsatzverhaltens

Die Durchführung der Presshärteversuche erfolgt an der hydraulischen Tiefziehpresse Lasco TSP 1000So (Fa. Lasco Umformtechnik). Zur Qualifizierung des thermo-mechanischen und tribologischen Einsatzverhaltens werden $n = 60$ Hübe sowohl mit einer unmodifizierten als auch mit der maßgeschneidert laserimplantierten Matrize durchgeführt. In der industriellen Praxis ist die Zahl an Umformzyklen bis zu erforderlichen Wartungsintervallen zwar wesentlich höher, jedoch werden nach Wieland [42] bereits nach 20 Abpressungen lokale Materialanhaftungen an Presshärtewerkzeugen sichtbar, infolgedessen grundlegende Aussagen hinsichtlich des Einflusses der Oberflächenmodifizierung auf die Verschleißbeständigkeit getroffen werden können. Um darauf basierend eine gesicherte Bewertung hinsichtlich der tribologischen Wirkung der Oberflächenmodifikationen vornehmen zu können, wird die dreifache Anzahl an Presshärtezyklen vorgenommen. Die Wahl der Prozessparameter richtet sich nach dem industriellen Standard. Vor diesem Hintergrund wird vor Versuchsbeginn jede Bor-Mangan-Platine für 360 s bei einer Temperatur von 930 °C in einem Kammerofen (Typ ME 17, Fa. Rhode) austenitisiert. Anschließend erfolgt der manuelle Transfer des Bleches auf die gefederten Distanzstifte des Niederhalters. Für die Bauteilumformung wird die maximale Pressengeschwindigkeit von 60 mm/s eingestellt, wobei der Stößel weggeregelt verfährt, sodass eine Napfhöhe von 20 mm erreicht wird. Das Umformverhalten der Bauteile ist neben den tribologischen Randbedingungen auch maßgeblich von den thermischen Wechselwirkungen in der Wirkfuge abhängig. Zur Beurteilung des Einflusses der Oberflächenmodifikationen auf das Abkühlverhalten und folglich den mechanischen Eigenschaften und dem Formgebungsvermögen der Halbzeuge werden unmittelbar vor und nach dem Umformprozess die Temperaturverteilungen am Werkstück erfasst. Für die thermische Analyse wird eine Infrarotkamera (SC7600, Fa. FLIR) hinter das Werkzeugsystem platziert. Zur Kalibrierung des Pyrometers wurden vor Versuchsbeginn mehrere Vergleichsmessungen mit einem taktilen Temperaturmessgerät durchgeführt. Hierdurch konnte ein Emissionskoeffizient von 0,86 ermittelt werden.

Analyse des thermo-mechanischen Einsatzverhaltens

Der Wärmetransport stellt einen zeit- sowie kontaktabhängigen dynamischen Vorgang dar, der im Presshärteprozess das Formgebungsvermögen der Bauteile signifikant beeinflusst. Um vertiefende Kenntnisse hinsicht-

lich den thermischen Wechselwirkungen der konventionellen und laserimplantierten Werkzeugkonfiguration zu erhalten, wird zunächst die Wärmeverteilung des Werkstücks unmittelbar vor und nach Verschluss der beiden Werkzeughälften analysiert. Um statistische Abweichungen zu berücksichtigen, wird nach jedem 20. Hub eine Temperaturmessung vorgenommen. In Bild 57 sind die gemittelten Temperaturen der Ronde sowie des umgeformten Rechtecknapfes exemplarisch dargestellt.

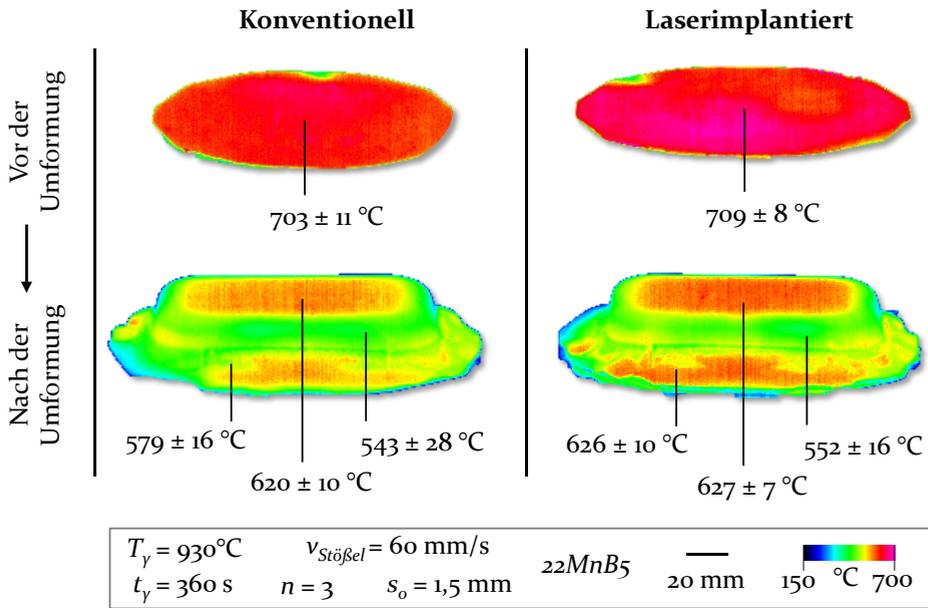


Bild 57: Gemittelte Temperaturen am Werkstück vor und nach dem Umformprozess

Nachdem der Austenitisierungsprozess abgeschlossen ist, erfolgt innerhalb von 6 - 8 s der manuelle Transfer des Halbzeuges vom Kammerofen auf die gefederten Distanzstifte des Niederhalters. Mit Hilfe der Thermokamera werden Einlegtemperatures von ~ 706 °C gemessen. Während das Werkzeug innerhalb von 2 s geschlossen und die Stößelbewegung gestartet wird, kühlt das Bauteil aufgrund von Strahlungs- und Konvektionseffekten um weitere ~ 35 °C ab, sodass die Temperatur im Platinenzentrum vor der Umformung ~ 671 °C beträgt. Die Pyrometermessungen belegen, dass unabhängig von der gewählten Werkzeugkonfiguration annähernd übereinstimmende, initiale Platinentemperaturen vorherrschen, die wiederum mit den industriellen Serienbedingungen (650 - 850 °C) korrespondieren [28].

Demgegenüber zeigen die Pyrometermessungen nach der Bauteilumformung, dass in Abhängigkeit des gewählten Werkzeugsystems unterschied-

lich Temperaturverteilungen vorliegen. Zur besseren Beurteilung der Bauteilabkühlung werden drei Messbereiche (Flansch, Zarge und Boden) im Messfeld der Thermokamera definiert, die unmittelbar nach Öffnen der beiden Werkzeughälften analysiert werden. Bei Verwendung des laserimplantierten Werkzeuges wird im Flansch des Rechtecknapfes eine durchschnittliche Temperatur von $626 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ erzielt, wohingegen das unmodifizierte Referenzwerkzeuge niedrigere Temperaturen ($579 \pm 16 \text{ }^\circ\text{C}$) in diesem Bauteilbereich hervorruft. Gleiche Verhaltensweisen werden im Zargenbereich der pressgehärteten Rechtecknäpfe sichtbar. Während durch Verwendung laserimplantierter Werkzeug die Zarge auf $552 \pm 16 \text{ }^\circ\text{C}$ abkühlt, wird ein geringeres Temperaturniveau ($543 \pm 28 \text{ }^\circ\text{C}$) durch Einsatz des konventionellen Werkzeugsystems verursacht. Am Bauteilboden werden ähnliche Temperaturen bei Verwendung der laserimplantierten ($627 \pm 7 \text{ }^\circ\text{C}$) und konventionellen ($620 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) Matrize herbeigeführt.

Im Umformprozess liegen zeitlich und örtlich variierende Kontaktbedingungen zwischen Werkzeug und Werkstück vor, die signifikante Auswirkung auf das resultierende Abkühlverhalten besitzen. Die vergleichsweise geringe Abkühlung im Bauteilboden lässt sich darauf zurückführen, dass kein direkter metallischer Werkzeug-Werkstück-Kontakt besteht. Sobald die Platine auf der Matrizenstirnfläche aufliegt und die Stempelradien auf die Ronde auftreffen, wölbt sich das Zentrum des Werkstücks in Ziehrichtung auf, infolgedessen lediglich Strahlungs- und Konvektionseffekte hervorgerufen werden, die nur geringe Abkühlraten bedingen. Demgegenüber werden signifikant höhere Kühlraten im Flansch und in der Zarge aufgrund des metallischen Werkzeug-Werkstück-Kontaktes und dem dominierenden konduktivem Wärmetransport erzielt. Bild 58 zeigt die Kontakt- und Abkühlbedingungen während des Umformprozesses schematisch auf.

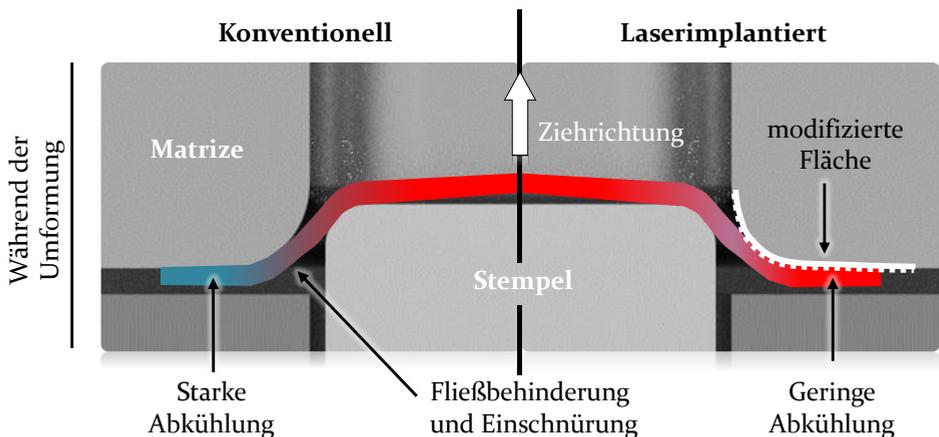


Bild 58: Kontakt- und Abkühlbedingungen während des Umformprozesses

Die Messergebnisse belegen, dass durch Verwendung laserimplantierter Werkzeuge tendenziell niedrigere Abkühlraten im Flansch- und Zargenbereich erzielt werden. Die hexagonal strukturierte Matrizenauflage mit Implantathöhen $h_i = 30 \mu\text{m}$ und -abständen $d_i = 350 \mu\text{m}$ hemmt den Wärmetransport in der Wirkfuge, der aufgrund von Lufteinschlüssen in den Zwischenräumen der Oberflächenmodifikationen verringert wird. Durch den isolierenden Effekt der Luftschicht sowie der signifikant reduzierten Werkzeugfläche wird der metallische Kontakt in der Wirkfuge minimiert und der konduktive Wärmetransfer verringert. Die niedrigeren Temperaturen im Flansch und in der Zarge bestätigen die Ergebnisse der Abschreckversuche (Abschnitt 6.1.4), welche ebenfalls eine lokale Reduzierung des Abkühlvermögens durch Verwendung laserimplantierter Werkzeuge mit Implantathöhen $h_i = 30 \mu\text{m}$ und -abständen $d_i = 350 \mu\text{m}$ aufzeigten.

Da die Temperaturhistorie während des Presshärteprozesses Auswirkung auf die Gefügeumwandlung und die mechanischen Eigenschaften der Bauteile besitzt, wird im Folgenden ermittelt, ob das laserimplantierte Werkzeugsystem veränderte mechanische Kennwerte im warmumgeformten Bauteil hervorruft. Vor diesem Hintergrund werden Härtemessungen im Flansch der pressgehärteten Rechteckknöpfe vorgenommen, da in diesem Bauteilbereich die größten Temperaturunterschiede bei Verwendung einer konventionellen und laserimplantierten Matrize detektiert worden sind. Die Probenhärte wird mit Hilfe der Universal Härteprüfmaschine Digi-Testor 930/250 der Firma Instron Wolpert quantifiziert. Die Werkstoffprüfung erfolgt nach Norm DIN-EN-ISO 6507. Die ermittelten Kennwerte der Härteprüfung sind in Bild 59 gegenübergestellt.

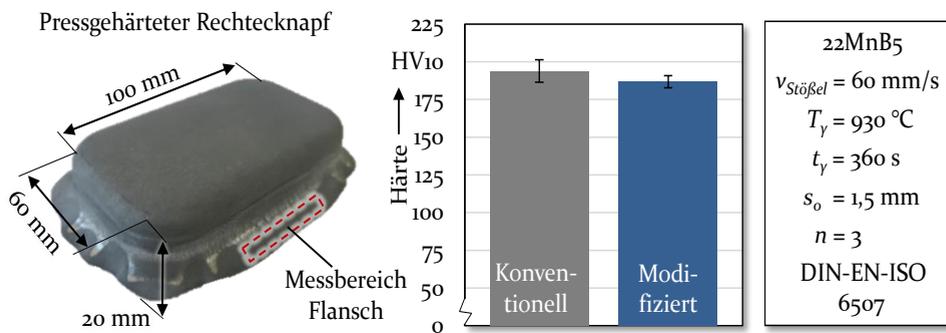


Bild 59: Gemessene Bauteilhärten im Flansch der Rechteckknöpfe unter Verwendung eines konventionellen und laserimplantierten Werkzeugsystems

Unter Verwendung des konventionellen Werkzeugsystems wird im Flansch des Rechteckknopfes eine durchschnittliche Härte von $193,9 \pm 7,4 \text{ HV}_{10}$ erzielt, wohingegen laserimplantierte Werkzeuge geringfügig niedrigere

Härten von $186,7 \pm 4$ HV₁₀ herbeiführen. Die Ergebnisse der Härtemessungen belegen den Einfluss des werkzeugspezifischen Wärmeübergangs auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften der pressgehärteten Bauteilkomponenten. Korrespondierend zu den Messergebnissen der Thermografiekamera weisen konventionell pressgehärtete Rechtecknäpfe tendenziell höhere Bauteilhärten auf, da höhere Abkühlraten aufgrund des vollflächigen metallischen Werkzeug-Werkstückkontaktes und dem dadurch verstärktem konduktivem Wärmetransport vorliegen. Die veränderten mechanischen Eigenschaften sind darin begründet, dass mit zunehmender Abkühlgeschwindigkeit steigende Gitterverzerrungen im Materialgefüge hervorgerufen werden, welche die Bildung von Gleitebenen verhindern und die plastische Deformation zunehmend erschweren [151]. Trotz unterschiedlicher Kontaktbedingungen und Abkühlraten verringern sich bei laserimplantierten Werkzeugsystemen die Bauteilhärten in den Bereichen mit den größten Temperaturunterschieden um lediglich 4%, weshalb über das gesamte Bauteil hinweg von vergleichbaren mechanischen Eigenschaftsprofilen ausgegangen werden kann.

Untersuchung des Formgebungsvermögens und der tribologischen Wechselwirkungen

Durch die veränderten thermischen Wechselwirkungen werden neben den mechanischen Eigenschaften auch die Fließbedingungen des Werkstoffes während des Umformprozesses beeinflusst. Mit steigender Platinentemperatur nimmt das Fließspannungsniveau sowie der Fließbeginn des Werkstoffes ab, was die Duktilität des Werkstückes erhöht und folglich eine bessere Umformbarkeit des Bauteils mit niedrigeren Prozesskräften und höheren Umformgraden ermöglicht. Dieser Effekt ist darin begründet, dass mit zunehmender thermischer Aktivierung die Beweglichkeit der Versetzungen zunimmt, wodurch Hindernisse, wie Klettern oder Quergleiten von Stufenversetzungen, leichter überwunden werden [61]. Hoff [24] nutzte diesen Effekt, um das Formgebungsvermögen von pressgehärteten Rundnäpfen zu erhöhen. Durch Vergrößerung des Blechhalterabstandes von 3 mm auf 6 mm konnte die Abkühlgeschwindigkeit im Flanschbereich verlangsamt werden, was wiederum eine geringere Verfestigung und ein besseres Nachfließen des Werkstoffes während der Tiefziehbewegung des Stempels bewirkte. Weiterhin zeigten topometrische Messungen der abgepressten Rundnäpfe, dass durch den lokal reduzierten Wärmetransfer niedrigere Blechdünnungen im umformkritischen Zargenbereich hervorgerufen worden sind. Durch die Anpassungen der Abkühlbedingungen konnte Hoff das Grenzziehverhältnis der Bauteile von 1,8 auf 1,9 steigern.

Es wird vermutet, dass laserimplantierte Werkzeuge ähnliche Verhaltensweisen hervorrufen. Aufgrund der strukturierten Auflagefläche werden geringere Abkühlraten im Flanschbereich angesichts limitierter Kontaktbedingungen und Wärmetransportvorgänge erzielt. Dies impliziert eine niedrigere Fließspannung, was wiederum das Formgebungsvermögen des Vergütungsstahls begünstigt. Darüber hinaus wird angenommen, dass die laserimplantierten Strukturen eine reibungs- und verschleißreduzierende Wirkung im Kontakt mit dem austenitisierten Bor-Mangan-Stahl besitzen. Daher wird erwartet, dass durch Verwendung des modifizierten Werkzeuges niedrigere Prozesskräfte und höhere Blechdicken in umformkritischen Bauteilbereichen erzielt werden. Zur Verifizierung dieser Annahmen wird eine Analyse und Bewertung der maximalen Stempelkräfte sowie der Blechdickenverteilung der pressgehärteten Rechtecknäpfe vorgenommen.

Eine direkte Ermittlung der Reibzahl aus dem Umformprozess ist aufgrund zeitlich und örtlich variierender Kontakt- und Spannungszustände nur schwer möglich. Zur Evaluation des tribologischen Einsatzverhaltens werden daher die maximal erreichten Umformkräfte der beiden Werkzeugsysteme analysiert und gegenübergestellt. Zunehmende Umformkräfte gelten als Indikator für eine Reibungserhöhung, da mit fortschreitender Hubanzahl sowohl der Verschleiß als auch die Oberflächenrauheiten ansteigen, die wiederum als bewegungshemmende Widerstandskraft fungieren und höhere Umformkräfte bewirken. Eine im Stempel eingebaute Kraftmessdose (Typ 9371 BU, Fa. Kistler) ermöglicht die Aufzeichnung der Ziehkraft F_z während der Versuche. Bild 60 zeigt die Stempelkraftverläufe unter Verwendung des konventionellen und laserimplantierten Werkzeugsystems.

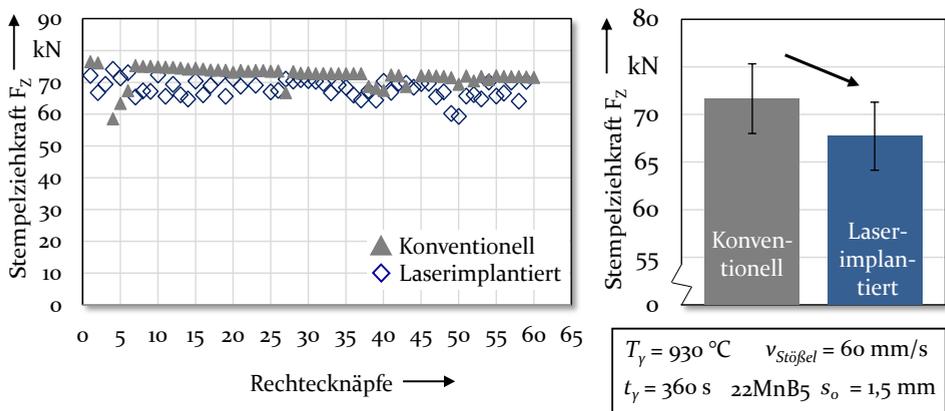


Bild 60: Maximale Stempelkräfte unter Verwendung einer konventionellen und laserimplantierten Matrize

Die Gegenüberstellung der beiden Werkzeugsysteme zeigt, dass das modifizierte Werkzeug tendenziell niedrigere Prozesskräfte bedingt. Unter Verwendung des laserimplantierten Werkzeuges werden im Mittel Stempelkräfte von $67,7 \text{ kN} \pm 3,6 \text{ kN}$ erreicht, wohingegen die durchschnittliche Umformkraft bei Verwendung der unmodifizierten Matrize $71,7 \text{ kN} \pm 3,7 \text{ kN}$ beträgt. Die Ergebnisse korrespondieren mit den modifizierten Pinon-Disk und Warmstreifenziehversuchen (Abschnitt 6.1 und 7.2), bei diesen ebenfalls reibungs- und verschleißreduzierende Mechanismen durch Einsatz hexagonal angeordneter Implantatmuster mit Höhen $h_i = 10 \text{ }\mu\text{m}$ und Abständen $d_i = 550 \text{ }\mu\text{m}$ hervorgerufen worden sind. Ursache für den verringerten Kraftbedarf sind die in Kapitel 6 und 7 identifizierten Wirkzusammenhänge, welche eine Reduzierung der Prozesskräfte und Verbesserung des Umformverhaltens herbeiführen. In diesem Zusammenhang weisen die laserimplantierten Einlaufradien eine signifikant reduzierte Kontaktfläche auf, infolgedessen ein verringertes mechanisches Verhaken der Rauheitsspitzen gegenüber dem unmodifizierten Werkzeug verursacht und folglich ein kontinuierliches Nachfließen des Werkstoffes in die Umformzone erleichtert wird. Ferner besitzen die Implantate einen hohen Anteil feindispersierter keramischer Hartstoffpartikel mit hohen Härten, weshalb eine reduzierte chemische Affinität zur Adhäsionsbildung in der Wirkfuge vorliegt. Da die Ausbildung adhäsiver Verschleißanhaftungen auf Werkzeugstähle umgekehrt proportional zu deren Härteeigenschaften ist [73], ist TiB_2 , als härtester Verbundwerkstoff aller Metallboride, besonders zur Verschleißreduktion geeignet. Des Weiteren liegen aufgrund der hexagonal strukturierten Auflagefläche ($h_i = 30 \text{ }\mu\text{m}$, $d_i = 350 \text{ }\mu\text{m}$) höhere initiale Halbzeugtemperaturen angesichts limitierter Kontaktbedingungen und Wärmetransportvorgänge vor. Dies impliziert am Werkstück eine niedrigere Fließspannung, was wiederum eine bessere Umformbarkeit des Bauteils mit verringerten Prozesskräften bewirkt. Aus diesem Grund werden neben dem verringerten Kraftbedarf auch höhere Blechdicken in den umformkritischen Ecksegmenten der Demonstratoren erwartet. Zur Verifizierung dieser Annahme erfolgt eine Bewertung der Bauteilqualität basierend auf der Blechdickenverteilung der pressgehärteten Rechtecknäpfe.

Zur Analyse der Bauteilqualität werden topometrische Messungen (ATOS Core 300, Fa. GOM mbH) an den pressgehärteten Demonstratoren durchgeführt. Durch die Visualisierung der Blechdickenverteilung können umformkritische Bauteilzonen detektiert, analysiert und verglichen werden. Die Messanalyse wird nach jedem 15. Hub wiederholt, um vertiefende Aussagen hinsichtlich dem Umformverhalten der Werkzeuge treffen zu können. Die Blechdickenverteilungen der Bauteile sind in Bild 61 dargestellt.

Die Messungen belegen, dass die höchste Blechdickenreduzierung stets in den Eckradien auftritt. Dies lässt sich auf die am Werkstück anliegenden Spannungszustände zurückführen, die wiederum Einfluss auf das Formgebungsvermögen und die resultierende Bauteilqualität im Umformprozess besitzen. Da in den Eckradien sowohl tangentielle Druck- als auch radiale Zugspannungen vorherrschen, unterliegen diese Bereiche einer hohen mechanischen Beanspruchung mit erhöhten plastischen Deformationen. Die Messungen der Blechdickenverteilung korrespondieren mit den Erkenntnissen der numerischen Simulation (Abschnitt 5.1), bei dieser ebenfalls die höchste Ausdünnung in den hochbeanspruchten Eckradien der Demonstratoren prognostiziert worden ist.

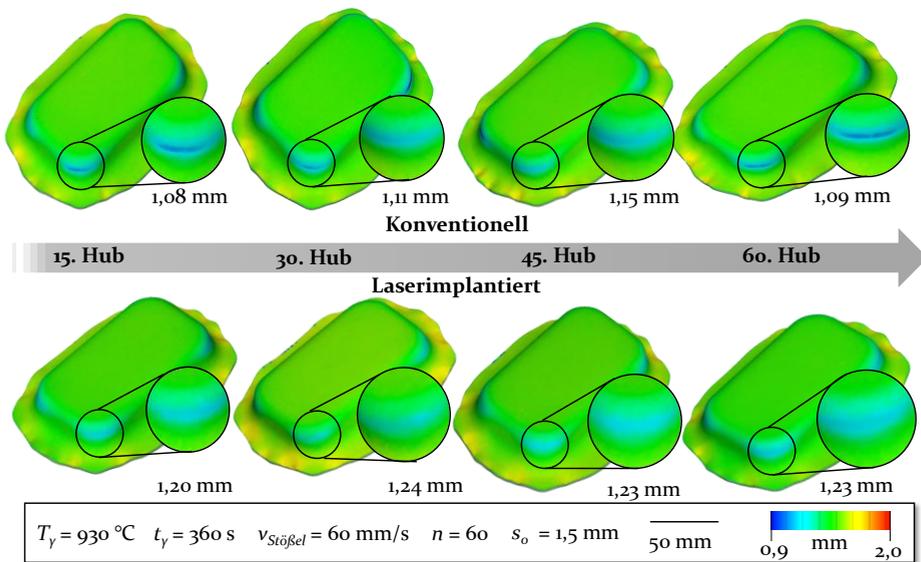


Bild 61: Blechdickverteilung der pressgehärteten Bauteile unter Verwendung einer konventionellen und laserimplantierten Matrize

Die Gegenüberstellung der Blechdickenverteilung der pressgehärteten Rechteckknöpfe bestätigt die Annahme, dass das unmodifizierte Werkzeug maßgeblich höhere Ausdünnungen in den Eckradien der Demonstratoren verursacht als das laserimplantierte Pendant. Unter Verwendung der unmodifizierten Matrize wird die initiale Blechdicke von $s_0 = 1,5 \text{ mm}$ auf ein Minimum von $\sim 1,10 \text{ mm}$ reduziert, was wiederum einer durchschnittlichen Ausdünnung von 27 % entspricht. Im Gegensatz dazu ist bei Verwendung der laserimplantierten Matrize die niedrigste Ausdünnung $\sim 1,22 \text{ mm}$, was einer Blechdickenreduzierung von 18 % gleicht. Das verbesserte Fließverhalten des Blechs in den hochbeanspruchten Bereichen kann auf die zuvor beschriebenen Wirkmechanismen der reduzierten Auflagefläche und der

adhäsionsabweisenden Wirkung der eingebetteten TiB_2 zurückgeführt werden, die eine Begünstigung des tribologischen und thermischen Verhaltens bedingen. Durch das laserimplantierte Werkzeugsystem werden lokale Einschnürungen um durchschnittlich 9 % reduziert, was wiederum die vorzeitige Entstehung von Rissen unterbindet. Selbst mikroskopische Risse können in hochbeanspruchten Bereichen bei gezielter Krafteinleitung eine schnelle Rissfortpflanzung bewirken, infolgedessen ein vorzeitiger Materialbruch oder Totalversagen der Baugruppe herbeigeführt wird [156]. Aufgrund der Verringerung der Einschnürungen in den umformkritischen Zonen kann das eingangs proklamierte Potenzial der gesteigerten Bauteilqualität durch Verwendung laserimplantierter Werkzeuge verifiziert werden. Um weiterführende Kenntnisse hinsichtlich dem Verschleißverhalten zu erlangen, werden die Oberflächen der beiden Werkzeugsysteme nach Durchführung der gesamten Versuchsreihe analysiert.

Zur Analyse des Werkzeugverschleißes werden optische Messungen an den Einlaufradien der Werkzeugsegmente vorgenommen, um adhäsive Anhaftungen und plastische Deformationen infolge der tribologischen Beanspruchung zu identifizieren. Verschleiß entsteht bereits infolge des ersten Hubes und nimmt mit steigender Anzahl an Umformzyklen kontinuierlich zu [73]. Darüber hinaus ist aus der Literatur bekannt, dass Verschleißerscheinungen primär in Werkzeugbereichen mit höchsten Kontaktnormalspannungen [143] und thermischer Beanspruchung [42] auftreten. Vor diesem Hintergrund werden die Eckradien und Querseiten der Rechtecknapfmatrizen analysiert und verglichen, da in diesen Segmenten die höchsten Kontaktnormalspannungen und Temperaturspitzen simulationsgetrieben (Abschnitt 5.2) identifiziert worden sind. In Bild 62 sind die Aufnahmen der verschlissenen Werkzeugsegmente gegenüberstellt.

Die optischen Messaufnahmen belegen, dass sowohl die unmodifizierte als auch die laserimplantierte Matrize sichtbare Materialanhaftungen bereits nach 60 Bauteilabpressungen aufzeigt. Die Verschleißanhaftungen entstehen durch die Relativbewegung des Werkzeuges, infolgedessen vielzählige Oxidpartikel aus dem Halbzeug herausgebrochen und auf die Werkzeugtopographie übertragen werden. Durch das Agglomerieren dieser Partikel mit zunehmenden Umformzyklen steigen die Materialanhaftungen sukzessive an, wodurch längliche, dunkel gefärbte Konturen entstehen, die sich in Ziehrichtung erstrecken. Der Effekt des adhäsiven Materialübertrages wurde ebenfalls von Hardell et al. [79] und Neubauer [75] beobachtet und als kontinuierliches Ansammeln und Aufschmieren der abgeplatzten Verschleißpartikel auf den Prüfkörpern beschrieben.

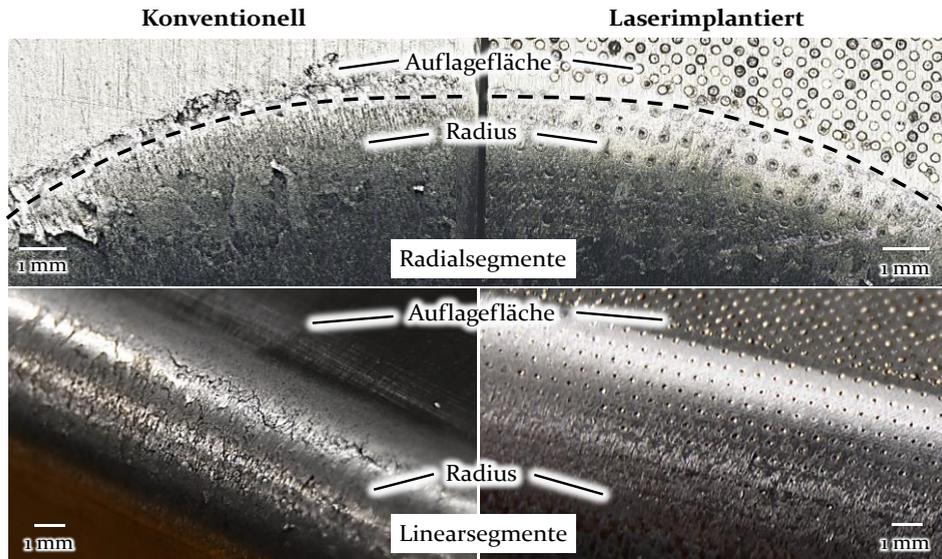


Bild 62: Gegenüberstellung der verschlissenen Radial- und Linearsegmente

Zwar weisen beide Werkzeugkonfigurationen sichtbare Materialanhaftungen auf, jedoch wird durch die qualitative Analyse der optischen Messungen erkenntlich, dass die laserimplantierte Matrize eine höhere Verschleißbeständigkeit besitzt. Im Einlauf des modifizierten Werkzeuges lassen sich deutlich weniger Materialanhaftungen als bei dem konventionellen Werkzeugsystem erkennen. Durch das lokale Laserdispergieren der keramischen TiB₂-Partikel in die duktile Werkzeugmatrix werden sowohl die Materialeigenschaften als auch die Kontaktverhältnisse des Werkzeuges adaptiert. Aufgrund der reduzierten Kontaktfläche der laserimplantierten Matrize werden weniger Verschleißpartikel aus dem Blechwerkstoff abgetragen. Ferner wird durch das Einbetten des titanbasierten Werkstoffes die chemische Affinität zur Adhäsion verringert, was wiederum die metallischen Bindungskräfte zwischen Werkzeug und Werkstück reduziert und die Gefahr des ungewollten Materialübertrags mindert. Die ermittelten Wirkzusammenhänge und Ergebnisse der Pin-on-Disk und Warmstreifenziehversuche werden durch die qualitative Messanalyse bestätigt. Ferner wird das eingangs proklamierte Potenzial der erhöhten Verschleißbeständigkeit der laserimplantierten Werkzeugsysteme verifiziert. Eine Erhöhung der Standmenge und somit der Effizienz und Wirtschaftlichkeit von Presshärtewerkzeugen ist verwirklichtbar.

8.3 Verifizierung der Maßnahmen zur Begünstigung der thermischen und tribologischen Wechselwirkungen

Durch das Presshärten der Rechtecknapfdemonstratoren konnte sowohl die Übertragbarkeit der im Labormaßstab eruierten Wirkzusammenhänge belegt, als auch die eingangs postulierten Effekte hinsichtlich einer möglichen Steigerung der Verschleißbeständigkeit und Verbesserung des Umformverhaltens durch implantierte Werkzeugoberflächen nachgewiesen werden. Die Auswertung der Temperatur-Zeit-Verläufe der umgeformten Bauteile zeigt, dass die Werkzeugmodifikation die Steuerung des Wärmetransfers in der Wirkfuge ermöglicht. Aufgrund der strukturierten Auflagefläche mit Spothöhen $h_i = 30 \mu\text{m}$ und -abständen $d_i = 350 \mu\text{m}$ wird der Wärmetransport angesichts limitierter Kontaktbedingungen und isolierend wirkender Luftreservoirs in den Implantatzwischenräumen gehemmt. Dies führt im Flansch zu geringeren Temperaturverlusten, infolgedessen niedrigere Fließspannungen sowie ein besseres Formgebungsvermögen während des Tiefziehprozesses erreicht wird. Demgegenüber konnte anhand von Abschreck- und Zugversuchen belegt werden, dass niedrige Implantathöhen ($h_i = 10 \mu\text{m}$) und weite Spotabstände ($d_i > 350 \mu\text{m}$) die konduktive Wärmeübertragung aufgrund höherer Eindringtiefen begünstigen, wodurch martensitisches Gefüge mit gleichbleibenden respektive höheren Zugfestigkeiten, Fließspannungen und Streckgrenzen erzeugt wird. Die Sicherung der Funktionstüchtigkeit der Oberflächenmodifikationen unter schmierstofffreien Warmumformbedingungen konnte anhand optischer Analysen und EDX-Messungen belegt werden. Aufgrund des Metall-Matrix Charakters und der damit verbundenen tiefen Verankerung der Implantate können auftretende Normal- und Scherkräfte effektiv in die duktile Werkzeugmatrix abgeleitet werden. In diesem Zusammenhang wird eine gleichbleibende Oberflächengestalt und dauerhafte Tragfähigkeit der lasergenerierten Strukturen ermöglicht. Analog dazu zeigt die Analyse der tribologischen Wechselwirkungen, dass die modifizierten Einlaufradien zu einer Begünstigung des Reibverhaltens führen, da tendenziell niedrigere Stempelkräfte verzeichnet und höhere Blechdicken in den umformkritischen Eckradien erzielt werden. Aufgrund der signifikanten Reduzierung der Kontaktfläche liegt ein verringertes mechanisches Verhaken der Rauheitsspitzen im Werkzeug-Werkstück-Kontakt vor, was wiederum geringere Scher- und Reibkräften verursacht. Ferner wird durch das lokale Laserdispargieren der keramischen TiB_2 -Partikel die Materialeigenschaft der Werkzeugtopographie adaptiert, infolgedessen die metallische Bindungskraft in der Wirkfuge sowie die chemische Affinität zur Adhäsionsbildung

abnimmt. Dies führt zu einer Erhöhung der Verschleißbeständigkeit der Presshärtewerkzeuge, was durch verringerte adhäsive Verschleißanhaftungen an den modifizierten Einlaufradien der Matrize belegt werden kann.

Basierend auf den Rechtecknapfzugversuchen kann sowohl das proklamierte Potenzial der maßgeschneiderten Werkzeugstrukturierung verifiziert, als auch die Erhöhung der Standzeit der Werkzeuge und Verbesserung der Qualitätsgüte der pressgehärteten Bauteile belegt werden. Im Hinblick auf die in Abschnitt 5.2 definierten Prämissen werden demnach alle Anforderungen an die Implantatcharakteristika erfüllt (Bild 63), wodurch die Wirksamkeit der Oberflächentechnologie nachgewiesen ist.

Anforderungen an die Implantatcharakteristika

-  **Lokale Steuerung des Wärmetransfers:** Verringerung der Temperaturverluste an der Stirnfläche zur Begünstigung des Fließverhaltens sowie Überschreitung der Mindestabkühlrate im Matrixeinlauf ($\dot{T}_{krit.} > 27 \text{ °C/s}$) zur Erzeugung von Martensit
-  **Sicherung der Funktionstüchtigkeit:** Gewährleistung einer gleichbleibenden Oberflächengestalt und dauerhaften Tragfähigkeit der Implantate unter mechanischer ($p \geq 20 \text{ MPa}$) und thermischer ($T \leq 150 \text{ °C}$) Beanspruchung im schmierstofffreiem Kontakt
-  **Begünstigung des Reibverhaltens:** Verringerung der Reibkräfte in Abhängigkeit der Werkzeugbeanspruchung ($p_{Quer,Längs} \sim 20 \text{ MPa}$; $p_{Radius} \sim 35 \text{ MPa}$) zur Förderung des Stoffflusses in umformkritischen Bereichen (z. B. Eckradien)
-  **Erhöhung der Verschleißbeständigkeit:** Reduzierung der Verschleißerscheinungen in den hochbeanspruchten Einlaufradien der Matrize

Bild 63: Anforderungsprofile an die Implantatcharakteristika für eine beanspruchungsgerechte Modifikation von Presshärtewerkzeuge

8.4 Abschließende Bewertung der Oberflächenmodifikationen hinsichtlich deren industrieller Relevanz

Im Presshärteprozess sind die Werkzeugsysteme hohen Beanspruchungen ausgesetzt, deren Ursachen in den fehlenden Schmiersystemen sowie in den zyklisch wirkenden thermo-mechanischen Wechselbelastungen begründet sind. Trotz Verwendung hochlegierter Werkzeugstähle werden im

industriellen Einsatz sowohl Materialanhaftungen am Presshärtewerkzeug, als auch hohe Reibzahlen in der Wirkfuge hervorgerufen, was die Qualität der Bauteile sowie die Standzeit der Werkzeuge maßgeblich reduziert. Um die industrielle Leichtbaubestrebung weiter zu intensivieren und die Effizienz des Presshärteprozesses nachhaltig zu steigern, wurden im Rahmen der Arbeit keramische Hartstoffpartikel mittels gepulster Laserstrahlung in die Werkzeugoberfläche implantiert, um das Reibverhalten sowie die Verschleißbeständigkeit der Presshärtewerkzeuge zu verbessern. Zur Analyse und Evaluation der thermischen, mechanischen und tribologischen Wechselwirkungen der lasergenerierten Oberflächenmodifikationen wurden Abschreck-, Zug-, Warmstreifenzieh- sowie Pin-on-Disk Versuche durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden genutzt, um die Übertragbarkeit der identifizierten Wirkmechanismen anhand von industrienahen Demonstratorbauteilen zu verifizieren sowie das Potenzial der Oberflächentechnologie zur Beeinflussung des thermischen und tribologischen Einsatzverhaltens zu bewerten.

Potenzial zur Beeinflussung der thermischen Wechselwirkungen

Die Abschreckversuche sowie Thermografieaufnahmen der pressgehärteten Demonstratoren belegen, dass durch die Variation der Geometrie und des Abstandes der Implantate die thermischen Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und Werkstück beeinflussbar sind. Durch die Modifikation der Werkzeugauflageflächen mittels Implantathöhen $\geq 30 \mu\text{m}$ und Spotabständen $< 750 \mu\text{m}$ können die Wärmeverluste in der Wirkfuge in Form von Konvektion und Strahlung aufgrund limitierter Kontaktbedingungen und isolierend wirkender Luftreservoirs in den Implantatzwischenräumen maßgeblich verringert werden. Durch die verlangsamte Platinenabkühlung wird eine niedrigere Fließspannung im Flansch unmittelbar vor Beginn der Bauteilumformung erreicht, infolgedessen das Formgebungsvermögen der Halbzeuge erweitert wird. Konträre Forderungen hinsichtlich des Wärmetransports ergeben sich mit Beginn der Bauteilumformung. Während des hybriden Umform- und Abschreckprozesses werden hohe Kühlraten ($\dot{T}_{krit.} > 27 \text{ }^\circ\text{C/s}$) benötigt, um eine vollständige martensitische Gefügeumwandlung zu gewährleisten. Durch die Laserimplantation der Einlaufradien der Werkzeuge mittels Spothöhen von $10 \mu\text{m}$ und Abständen $> 350 \mu\text{m}$ kann dieser Forderung nachgekommen werden, da diese Implantatkonfigurationen die Wärmeübertragung zwischen Werkzeug und Werkstück begünstigen. Niedrige Implantathöhen von $10 \mu\text{m}$ führen zu einem vollständigen Eindringen in das austenitisierte Werkstück, wodurch das Volumen der isolierend wirkenden Lufteinschlüsse maßgeblich reduziert

wird. Ferner erweisen sich Abstände $> 350 \mu\text{m}$ als vorteilhaft, da lokal höhere Flächenpressungen erzielt werden, was wiederum die Wärmeleitung in der Wirkfuge erhöht und steigende Abkühlraten zur Folge hat. Zusammenfassend besteht die Möglichkeit, durch Verwendung laserimplantierter Oberflächen die Temperaturführung im Prozessablauf lokal zu beeinflussen. Neben der Erhöhung des Formgebungsvermögens und der Gewährleistung der geforderten mechanischen Eigenschaften der pressgehärteten Komponenten, ergibt sich somit auch das Potenzial, maßgeschneiderte Bauteile mit unterschiedlichen Eigenschaftsprofilen, sogenannte Tailored Blanks, durch eine gezielte Temperaturführung herzustellen, wodurch derzeitige Entwicklungen und Markttrends (Abschnitt 2.2) adressiert werden.

Potenzial zur Beeinflussung des tribologischen Einsatzverhaltens

Die Ergebnisse der Warmstreifenzieh- und Pin-on-Disk Versuche zeigen, dass implantierte Oberflächen mit Höhen von $10 \mu\text{m}$ und Abständen $> 550 \mu\text{m}$ reibungs- und verschleißmindernde Eigenschaften unter Presshärtebedingungen aufweisen. Durch das lokale Dispergieren der keramischen TiB_2 -Partikel in die duktile Werkstoffmatrix wird sowohl die Materialeigenschaft als auch die Oberflächengestalt der Werkzeugtopographie adaptiert, infolgedessen die metallischen Bindungskräfte in der Wirkfuge verringert sowie die chemische Affinität zur Adhäsionsbildung reduziert wird. Anhand der experimentellen Untersuchungen mit einer Rechtecknapfgeometrie konnte nachgewiesen werden, dass die ermittelten Wirkzusammenhänge aus den Laborversuchen auf industriennahe Demonstratoren übertragbar sind. Vor diesem Hintergrund wurde sowohl eine Verringerung des Werkzeugverschleißes als auch eine Verbesserung des Stoffflusses erreicht, was durch geringere adhäsive Materialanhaftungen auf der Werkzeugtopographie und gleichmäßigere Blechdickenverteilungen in umformkritischen Bauteilzonen erkenntlich wurde. Zusammenfassend kann sowohl das eingangs proklamierte Potenzial der maßgeschneiderten Werkzeugstrukturierung verifiziert, als auch die Erhöhung der Verschleißbeständigkeit der Werkzeuge und Verbesserung der Qualitätsgüte der pressgehärteten Bauteile belegt werden. Hierdurch können die industriellen Leichtbaubestrebungen intensiviert sowie ökonomische und ökologische Vorteile in Form von niedrigeren Ausschussquoten und längeren Maschinenstandzeiten generiert werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Derzeitige Bestrebungen der Automobilindustrie bestehen darin, die zunehmend verschärften Umweltbedingungen durch Umsetzung innovativer Leichtbaustrategien zu bewältigen. Ein Ansatz zur Realisierung dieses Vorhabens stellt die Substitution klassischer Tiefziehstähle durch hoch- und höchstfeste Stahlwerkstoffe dar. Im Zuge dessen hat sich das Presshärteverfahren weltweit etabliert, um diese Hochleistungsstähle ressourceneffizient zu verarbeiten. Während der Umformoperation treten jedoch hohe Reibungs- und Verschleißerscheinungen an den interagierenden Werkzeug- und Werkstückwirkflächen auf, die wiederum die Bauteilqualität und Maschinenstandzeit nachhaltig beeinträchtigen. Ein neuartiger Forschungsansatz zur Erweiterung dieser Verfahrensgrenzen stellt die Modifikation der Presshärtewerkzeuge mittels Laserimplantation dar. Das Grundprinzip der Technologie besteht darin, keramische Hartstoffpartikel mittels gepulster Laserstrahlung in die Werkzeugoberfläche zu dispergieren, infolgedessen kuppelförmige, hochfeste sowie verschleißresistente Strukturen im Mikrometerbereich entstehen. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein grundlegendes Prozessverständnis hinsichtlich den thermischen und tribologischen Wechselwirkungen der laserimplantierten Strukturen unter Presshärtebedingungen zu generieren und darauf basierend gezielt Maßnahmen zur Verbesserung des Einsatzverhaltens von Presshärtewerkzeugen abzuleiten. Im Zuge dessen wurden zunächst umformkritische Bereiche eines Rechtecknapfwerkzeuges lokalisiert und deren thermo-mechanischen Belastungsspitzen quantifiziert, um sowohl grundlegende Anforderungsprofile an die Implantatcharakteristika zu definieren als auch eine belastungsangepasste Modifikation der Presshärtewerkzeuge zu erreichen. Die Analyse der thermischen und mechanischen Wechselwirkung belegt, dass an den Werkzeugwirkflächen inhomogene Temperatur- und Flächenpressungsverteilungen vorliegen, die maßgeblich von der Geometrie der Rechtecknapfmatrix und den daraus resultierenden Kontakt- und Spannungszuständen abhängig sind. Maximale Beanspruchungen liegen in den Eckradien der Matrix vor, die sowohl tangentielle Druck- als auch radiale Zugspannungen aufweisen und folglich eine hohe Verschleißanfälligkeit bedingen. Um Maßnahmen zur Verbesserung des Einsatzverhaltens ableiten zu können, wurden zunächst die tribologischen und thermo-mechanischen Wechselwirkungen zwischen Werkstück und laserimplantierten Werkzeug mittels Pin-on-Disk, Warmstreifenzieh- sowie Abschreckversuche analysiert. Die tribologischen Untersuchungen belegen, dass in

Abhängigkeit der Geometrie, des Abstandes und der Anordnung der Mikrostrukturen das Reib- und Verschleißverhalten gezielt beeinflusst werden kann. Insbesondere hexagonal angeordnete Implantatkonfigurationen mit Höhen $h_i = 10 \mu\text{m}$ und Abständen $d_i \geq 550 \mu\text{m}$ begünstigen das tribologische Verhalten der Presshärtewerkzeuge. Als Ursache wird die signifikante Reduzierung der Werkzeug-Werkstück-Kontaktfläche vermutet, infolgedessen verminderte Scherkräfte aufgrund des verringerten mechanischen Verhakens der interagierenden Rauheitsspitzen entstehen. Neben den Kontaktverhältnissen wird durch das lokale Laserdispargieren der keramischen TiB_2 -Partikel auch die Materialeigenschaft der Werkzeugtopographie adaptiert, weshalb die metallischen Bindungskräfte in der Wirkfuge verringert sowie die chemische Affinität zur Adhäsionsbildung reduziert wird. Die exponierten Oberflächenmodifikationen zeigten aufgrund des Metall-Matrix-Verbundes zudem eine hohe Beständigkeit gegen Abrasion und Oberflächenermüdung, da weder Materialausbrüche mittels optischen Messungen, noch Titanfragmente in den Verschleißanhaftungen anhand von EDX-Messungen detektiert werden konnten. Um das Abkühlvermögen der Implantate zu beurteilen, wurden ferner Abschreckversuche unter Presshärtebedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse belegen, dass laserimplantierte Oberflächen die thermischen Wechselwirkungen in der Wirkfuge beeinflussen können. Vor allem niedrige Implantathöhen von $10 \mu\text{m}$ und Spotabständen $> 350 \mu\text{m}$ begünstigen die Wärmeübertragung zwischen Werkzeug und Werkstück, da ein tieferes Eindringen in das austenitisierte Werkstück und folglich ein höherer konduktiver Wärmetransport erreicht wird. Im Gegensatz dazu besteht die Möglichkeit, durch Implantate mit Höhen $h_i = 30 \mu\text{m}$ und Abständen $d_i \leq 350 \mu\text{m}$ den Wärmetransfer in der Wirkfuge zu reduzieren, um lokal niedrigere Kühlraten und Festigkeiten vor Umformbeginn zu erzielen. Die im Labormaßstab identifizierten Wirkmechanismen wurden abschließend mittels Rechtecknapfzugversuchen verifiziert. Hierdurch konnte das proklamierte Potenzial der maßgeschneiderten Oberflächenmodifizierung überprüft sowie deren tatsächliche Steigerung der Bauteilqualität und Verschleißbeständigkeit gegenüber konventionelle Werkzeugsysteme nachgewiesen werden. In weiterführenden Forschungsaktivitäten wird die Übertragung der erarbeiteten Erkenntnisse auf industrielle Serienprozesse angestrebt. In diesem Zusammenhang werden umfassende Untersuchungen hinsichtlich dem Langzeitverschleißverhalten und der Stabilität der laserimplantierten Werkzeuge durchgeführt, um den nachhaltigen ökonomischen und ökologischen Nutzen der Oberflächentechnologie zu quantifizieren.

10 Summary and Outlook

In the automotive industry, lightweight construction of car body components has become a key technology, in order to face the increasingly tightened environmental restrictions. One approach to realize this strategy is the substitution of conventional deep-drawing sheets with high-strength or ultra-high-strength steels. In this regard, hot stamping has been established as a resource-efficient process for manufacturing such steel grades. During the forming operation, however, high friction and wear appear at the blank-die interface, which negatively affects the part quality and the tool lifetime. To extend these limits, a novel approach named laser-implantation process has been investigated. The technology is based on the generation of separated, elevated and highly wear resistant microfeatures on tool surfaces in consequence of a localized dispersing of ceramic particles via pulsed laser radiation. The aim of this research work was to generate a fundamental process understanding regarding the thermal and tribological interactions of laser-implanted surfaces under hot stamping conditions. Furthermore, measures for improving the forming behavior of hot stamping tools were derived from the identified cause-effect relations. In order to determine basic requirements of the surface engineering technology, highly loaded areas of a rectangular cup tool were localized and quantified. The analysis of the thermal and mechanical interactions reveal that inhomogeneous temperature and surface pressure distributions occur, which are highly dependent on the geometry of the tool and the resulting contact and stress conditions. Maximum stresses were identified in the corner radii of the die, which are subjected to both tangential compressive and radial tensile stresses. Consequently, these areas are highly susceptible to wear. To improve the forming behavior of these highly loaded tool areas, the tribological and thermal interactions between the workpiece and the laser-implanted tool were analyzed by means of a modified pin-on-disk, hot strip drawing as well as quenching tests. The tribological investigations reveal that friction and wear at the blank-die interface can be influenced by varying the geometry, distance and arrangement of the microfeatures. In particular, hexagonal arranged implant configurations with heights $h_i = 10 \mu\text{m}$ and distances $d_i \geq 550 \mu\text{m}$ improve the tribological performance of the hot stamping tools. This effect is caused by the significant reduction of the tool contact area, resulting in decreased shear forces due to the reduced mechanical interlocking of the interacting roughness peaks. Besides the minimized tool contact area, the embedding of hard ceramic TiB_2 particles also

adapts the material properties of the tool topography. As a consequence, the metallic bonding forces at the blank-die interface as well as the chemical affinity for adhesion are reduced. The surface modifications also showed a high resistance to abrasion and surface fatigue due to the metal matrix composite character (MMC), as neither titanium fragments in the wear layers by means of Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) analysis nor implant cracking by means of optical measurements could be detected. In order to analyze the thermal behavior of the implants, quenching tests were carried out under hot stamping conditions. The results reveal that laser-implanted tool surfaces can influence the thermal interactions at the blank-die interface. In particular, small implant heights of $10\ \mu\text{m}$ and spot distances $> 350\ \mu\text{m}$ improve the heat transfer between tool and workpiece, as a deeper penetration of the spots into the austenized blank and consequently a higher conductive heat transfer is achieved. In contrast, implants with heights $h_i = 30\ \mu\text{m}$ and distances $d_i \leq 350\ \mu\text{m}$ reduce the thermal interactions, in order to achieve decreasing cooling rates and sheet strength before forming. The identified cause-effect relations on laboratory scale were verified by hot stamping rectangular cups. Due to the improved part quality and wear resistance of the modified tooling system, the potential of the surface modification technology could finally be demonstrated and confirmed. In further research work, the transfer of the cause-effect relations to industrial processes is aspired. In this context, further investigations regarding the long-term wear behavior and stability of the laser-implanted tools will be carried out, in order to quantify the economic and ecologic benefit of the surface engineering technology.

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klima: Automobilindustrie. www.bmwk.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-automobilindustrie.html (aufgerufen am 22.03.2021)
- [2] Bernhart, W.: "M.A.D.E"-Trends und Implikationen. Deutschland im internationalen Vergleich. In: Siebenpfeiffer, W. (Hrsg.): Mobilität der Zukunft. Intermodale Verkehrskonzepte. ATZ/MTZ-Fachbuch. Berlin: Springer Vieweg, 2021, S. 17–57
- [3] Hüls, C.; Thies, C.; Spengler, T. S.; Kieckhäfer, K.: Strategische Planung der Antriebsportfoliotransformation von Automobilherstellern. In: Proff, H. (Hrsg.): Neue Dimensionen der Mobilität. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, S. 81–93
- [4] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Infografiken zur Klimabilanz. Emissions-Entwicklung 1990 - 2020. <http://www.bmu.de/media/infografiken-zur-klimabilanz/> (aufgerufen am 22.03.2021)
- [5] Kraftfahrt-Bundesamt: Anzahl zugelassener PKW in Deutschland von 1960 bis 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12131/umfrage/pkw-bestand-in-deutschland/> (aufgerufen am 22.03.2021)
- [6] Braess, H.-H.; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, 7. Auflage
- [7] Dröder, K.; Goede, M.: Leichtbaustrategien für zukünftige Fahrzeuggenerationen. *Leichtbau Technologie* 4(2011)
- [8] Brauser, S.; Pepke, L. A.; Weber, G.; Rethmeier, M.: Deformation behaviour of spot-welded high strength steels for automotive applications. *Materials Science and Engineering: A* 527(2010) 26, S. 7099–7108
- [9] Bruckner, J.; Trommer, G.: Lichtbogenfügen von Stahl und Aluminium. *Lightweight Design* 5(2012) 4, S. 52–56
- [10] Merklein, M.: Charakterisierung von Blechwerkstoffen für den Leichtbau. Habilitation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2006

- [11] Neugebauer, R.; Altan, T.; Geiger, M.; Kleiner, M.; Sterzing, A.: Sheet metal forming at elevated temperatures. *CIRP Annals* 55(2006) 2, S. 793–816
- [12] Mori, K.; Bariani, P. F.; Behrens, B.-A.; Brosius, A.; Bruschi, S.; Maeno, T.; Merklein, M.; Yanagimoto, J.: Hot stamping of ultra-high strength steel parts. *CIRP Annals* 66(2017) 2, S. 755–777
- [13] Billur, E.: *Hot Stamping of Ultra High-Strength Steels*. Cham: Springer International Publishing, 2019
- [14] Karbasian, H.; Tekkaya, A. E.: A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology* 210(2010) 15, S. 2103–2118
- [15] Venema, J.; Hazrati, J.; Matthews, D.; van den Boogaard, T.: An Insight in Friction and Wear Mechanisms during Hot Stamping. *Key Engineering Materials* 767(2018), S. 131–138
- [16] Pelcastre, L.: *Hot forming tribology. Galling of tools and associated problems*. Licentiate thesis, Luleå University of Technology, 2011
- [17] Shihomatsu, A.; Button, S. T.; Silva, I. B. d.: Tribological Behavior of Laser Textured Hot Stamping Dies. *Advances in Tribology* 2016(2016) 1, S. 1–15
- [18] Hilgenberg, K.; Rethmeier, M.; Steinhoff, K.: Surface Structuring by Pulsed Laser Implantation. *Materials Science Forum* 879(2016), S. 750–755
- [19] Bruschi, S.; Ghiotti, A.: Hot Stamping. In: *Comprehensive Materials Processing*. Elsevier, 2014, S. 27–54
- [20] Schmidt, W.; Puri, W.: Systematische Entwicklung gewichtsoptimierter Bauteile. 11. Symposium "Design for X"(2000), S. 37–40
- [21] Bold, J.; Feuser, P.; Zapf, J.: Erweiterung des Einsatzspektrums von pressgehärteten Bauteilen durch neue Werkstoffkonzepte. In: Merklein, M. (Hrsg.): 12. Erlanger Workshop Warmblechumformung. Bamberg: Meisenbach GmbH Verlag, 2017, S. 159–169
- [22] voestalpine Steel Division: phs-ultraform Materialkenndaten, 2018
- [23] Feuser, P.: Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge, Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2012

- [24] Hoff, C.: Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2008
- [25] Karbasian, H.: Formgenauigkeit und mechanische Eigenschaften pressgehärteter Bauteile. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2010
- [26] Lehmann, H.: Roller Hearth Furnaces for Hot-Form Hardening. In: Kolleck, R. (Hrsg.): Proceedings of tools and technologies for the processing of ultra-high strength steels, S. 131–140
- [27] Hein, P.; Kefferstein, R.; Dahan, Y.: Presshärten von USIBOR 1500P®: Simulationsbasierte Bauteil- und Prozessanalyse. In: Liewald, M. (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Blechumformung. Stuttgart, 2006, S. 171–183
- [28] Wilsius, J.; Hein, P.; Kefferstein, R.: Status and future trends of hot stamping of USIBOR 1500P®. In: Geiger, M., Merklein, M. (Hrsg.): 1. Erlanger Workshop Warmblechumformung. Bamberg: Meisenbach GmbH Verlag, 2006, S. 82–101
- [29] Aspacher, J.: Formhärten ein wichtiges Verfahren der Zukunft. In: Liewald, M. (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Blechumformung. Stuttgart, 2006, S. 473–485
- [30] Somani, M. C.; Karjalainen, L. P.; Eriksson, M.; Oldenburg, M.: Dimensional Changes and Microstructural Evolution in a B-bearing Steel in the Simulated Forming and Quenching Process. ISIJ International 41(2001) 4, S. 361–367
- [31] Merklein, M.; Lechler, J.: Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels. Journal of Materials Processing Technology 177(2006) 1-3, S. 452–455
- [32] Gerhardt, K. W.: Untersuchungen zur konduktiven Erwärmung für Warmzugversuche an Blechen. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2015
- [33] thyssenkrupp Steel Europe AG: MBW® - Materialkenndaten Mangan-Bor-Stähle für die Warmumformung, 2020
- [34] Hein, P.; Kefferstein, R.; Dahan, Y.: Hot Stamping of USIBOR 1500P®: Part and Process Analysis Based on Numerical Simulations. In: Liewald, M. (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Blechumformung. Stuttgart, 2006, S. 1–13

- [35] Svec, T.: Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärtprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2015
- [36] Hippchen, P.: Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2014
- [37] Hu, P.; Ying, L.; He, B.: Hot Stamping Advanced Manufacturing Technology of Lightweight Car Body. Singapore: Springer Singapore, 2017
- [38] Henning, F.; Moeller, E.: Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung. München: Hanser, 2011
- [39] Naderi, M.: Hot Stamping of Ultra High Strength Steels. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2007
- [40] Arcelor Mittal S.A.: Hot forming Steels Materialdaten - Usibor®, 2016
- [41] Zhou, J.; Wang, B.; Huang, M.; Cui, D.: Effect of hot stamping parameters on the mechanical properties and microstructure of cold-rolled 22MnB5 steel strips. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials 21(2014) 6, S. 544–555
- [42] Wieland, M.: Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2015
- [43] Suehiro, M.; Kusumi, K.; Miyakoshi, T.; Maki, J.; Ohgami, M.: Properties of Aluminium-coated Steels for Hot-forming. Nippon Steel Technical Report 88(2003), S. 16–21
- [44] Veit, R.; Hofmann, H.; Kolleck, R.; Sikora, S.; Chinesta, F.; Chastel, Y.; El Mansori, M.: Investigation of the Phase Formation of AlSi-Coatings for Hot Stamping of Boron Alloyed Steel. Material Science(2010) 1, S. 769–774
- [45] Chun, E.-J.; Lim, S.-S.; Kim, Y.-T.; Nam, K.-S.; Kim, Y.-M.; Park, Y.-W.; Murugan, S. P.; Park, Y.-D.: Influence of heat-treated Al-Si coating on the weldability and microstructural inhomogeneity for hot stamped steel resistance nut projection welds. Metals and Materials International 25(2019) 1, S. 179–192

- [46] Faderl, J.; Vehof, R.: Presshärtender Stahl (PHS) von voestalpine: Innovation bei Beschichtung und Prozess. In: Palkowski, H. (Hrsg.): Tagungsband zum 5. Industriekolloquium Fertigen in Feinblech SFB 362. Clausthal-Zellerfeld: Piepersche Druckerei & Verlag GmbH, 2005, S. 189–194
- [47] Schönherr, J.; Landgrebe, D.; Polubinski, S.: Entwicklungen beim Presshärten. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112(2017) 1-2, S. 33–36
- [48] Burglund, G.: The history of hardening of boron steel in northern Sweden. In: Steinhoff, K. (Hrsg.): Proceedings of the 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel. Kassel, 2008, S. 175–177
- [49] Aspacher, J.: Forming hardening concepts. In: Steinhoff, K. (Hrsg.): Proceedings of the 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel. Kassel, 2008, S. 77–81
- [50] Kuhn, D.: Formhärten als Trendthema des automobilen Leichtbaus. MaschinenMarkt 14(2013), S. 21–22
- [51] Steinhoff, K.; Maikranz-Valentin, M.; Weiding, U.; Paar, U.; Gücker, E.: Bauteile mit maßgeschneiderten Eigenschaften durch neuartige thermo-mechanische Prozessstrategien in der Warmblechumformung. In: Geiger, M., Merklein, M. (Hrsg.): 2. Erlanger Workshop Warmblechumformung. Bamberg: Meisenbach, 2007, S. 1–12
- [52] Feuser, P.: Simulation eines partiellen Presshärteprozesses unter Berücksichtigung thermomechanischer und metallurgischer Zusammenhänge. In: Merklein, M. (Hrsg.): 6. Erlanger Workshop Warmblechumformung. Bamberg: Meisenbach, 2011, S. 37–59
- [53] Ghiotti, A.; Pellegrini, D.; Bruschi, S.: Feasibility of Producing Tailored Microstructures in Hot Stamping Sheet Components. International Deep Drawing Research Group(2009), S. 941–950
- [54] Lenze, F.-J.; Sikora, S.; Sauer, D.; Straube, O.: Materials and process developments on the field of hot stamping technology. In: Oldenburg, M. (Hrsg.): Hot sheet metal forming of high-performance steel. Auerbach: Wissenschaftliche Skripten, 2009, S. 211–219
- [55] Feuser, P.; Schweiker, T.: Tailored Tempered Parts – Einsatzpotentiale und funktionale Untersuchung. In: Merklein, M. (Hrsg.): 5. Erlanger Workshop Warmblechumformung. Bamberg: Meisenbach, 2010, S. 1–14

- [56] 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, S. 151–164
- [57] Lamprecht, K.; Geiger, M.: Experimental and Numerical Investigation of the Formability of Laser Welded Patchwork Blanks. *Advanced Materials Research* 6-8(2005), S. 689–696
- [58] Knabe, E.: Ziehen von Blechformteilen aus zusammengeschweißten Platinen unterschiedlicher Blechdicke und Güte. Dissertation, Universität Stuttgart, 1997
- [59] Hardell, J.: Tribology of hot forming tool and high strength steels. Dissertation, Luleå University of Technology, 2009
- [60] Venema, J.; Hazrati, J.; Matthews, D.; Stegeman, R. A.; van den Boogaard, A. H.: The effects of temperature on friction and wear mechanisms during direct press hardening of Al-Si coated ultra-high strength steel. *Wear* 406-407(2018) 9, S. 149–155
- [61] Lechler, J.: Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2009
- [62] Langeheinecke, K.; Kaufmann, A.; Langeheinecke, K.; Thieleke, G.: *Thermodynamik für Ingenieure*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020
- [63] Barth, F.-M.: *Thermodynamik für Maschinenbauer*. München: Oldenbourg, 2012
- [64] Rosochowska, M.; Balendra, R.; Chodnikiewicz, K.: Measurements of thermal contact conductance. *Journal of Materials Processing Technology* 135(2003) 2-3, S. 204–210
- [65] Merklein, M.; Stoehr, T.; Svec, T.; Wieland, M.: Investigations on parameters influencing thermal and frictional properties within hot stamping. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 66(2011) 6, S. 335–341
- [66] Svec, T.; Merklein, M.: Auswirkungen spezifischer Abkühlbedingungen auf den Wärmeübergang bei Presshärtprozessen. In: Merklein, M. (Hrsg.): 5. Erlanger Workshop Warmblechumformung. Bamberg: Meisenbach, 2010, S. 121–141

- [67] Niemann, G.: Schmierstoffe. In: Niemann, G. (Hrsg.): Grundlagen, Verbindungen, Lager Wellen und Zubehör. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1950, S. 261–268
- [68] Vilaseca, M.; Pujante, J.; Casellas, D.: Wear measurement methodology and test facility to increase the efficiency of hot stamping for high performance component production. Publications Office of the European Union, 2014
- [69] Bauer, F.: Tribologie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021
- [70] Sommer, K.; Heinz, R.; Schöfer, J.: Verschleiß metallischer Werkstoffe. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
- [71] Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch. Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2020, 5. Auflage
- [72] Lange, K.: Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Berlin: Springer, 2002, 2. Auflage
- [73] Schwingenschlögl, P.: Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Pressehäerten. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2019
- [74] Kondratiuk, J.; Kuhn, P.: Tribological investigation on friction and wear behaviour of coatings for hot sheet metal forming. *Wear* 270(2011) 11-12, S. 839–849
- [75] Neubauer, F.: Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärtprozess. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2021
- [76] Güner, A.; Hol, J.; Venema, J.; Sigvant, M.: Advanced Friction Modelling in Hot Stamping Simulations: Application to A-Pillar Reinforcement of a Volvo passenger car. In: Merklein, M. (Hrsg.): 15. Erlanger Workshop Warmblechumformung. Eggolsheim: Druck Inform, 2020, S. 77–87
- [77] Borsetto, F.; Ghiotti, A.; Bruschi, S.: Investigation of the High Strength Steel Al-Si Coating during Hot Stamping Operations. *Key Engineering Materials* 410-411(2009), S. 289–296

- [78] Hochholdinger, B.: Simulation des Presshärteprozesses und Vorhersage der mechanischen Bauteileigenschaften nach dem Härten. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2012
- [79] Hardell, J.; Prakash, B.: High-temperature friction and wear behaviour of different tool steels during sliding against Al-Si-coated high-strength steel. *Tribology International* 41(2008) 7, S. 663–671
- [80] Wieland, M.; Merklein, M.: Investigations on Austenitization Parameters Influencing Wear Behavior Within Hot Stamping. *Procedia Engineering* 81(2014), S. 1695–1700
- [81] Neubauer, F.; Merklein, M.: Tribological and Thermal Investigation of Modified Hot Stamping Tools. *Tribology in Industry* 41(2019) 1, S. 76–89
- [82] Yanagida, A.; Azushima, A.: Evaluation of coefficients of friction in hot stamping by hot flat drawing test. *CIRP Annals* 58(2009) 1, S. 247–250
- [83] Gracia-Escosa, E.; García, I.; Damborenea, J. J. d.; Conde, A.: Friction and wear behaviour of tool steels sliding against 22MnB5 steel. *Journal of Materials Research and Technology* 6(2017) 3, S. 241–250
- [84] Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Characterization of tribological conditions within direct hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology* 278(2020), S. 116–134
- [85] Wang, B.; Bourne, G. R.; Korenyi-Both, A. L.; Monroe, A. K.; Midson, S. P.; Kaufman, M. J.: Method to evaluate the adhesion behavior of aluminum-based alloys on various materials and coatings for lube-free die casting. *Journal of Materials Processing Technology* 237(2016), S. 386–393
- [86] Buckley, D.: Surface effects in adhesion, friction, wear, and lubrication. Tribology series. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing, 2010
- [87] Molgaard, J.: Die Entwicklung von Verschleißprozeßthesen. *Schmiertechnik, Tribologie* 23(1970) 5, S. 126–130
- [88] Schwingenschlögl, P.; Steiner, J.; Gauglitz, S.; Merklein, M.: Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die tribologischen Bedingungen beim Presshärten. In: Merklein, M. (Hrsg.): 11. Erlanger Workshop Warmblechumformung. Bamberg: Meisenbach, 2016, S. 45–62

- [89] Pelcastre, L.; Hardell, J.; Prakash, B.: Galling mechanisms during interaction of tool steel and Al-Si coated ultra-high strength steel at elevated temperature. *Tribology International* 67(2013), S. 263–271
- [90] Venema, J.; Matthews, D.; Hazrati, J.; Wörmann, J.; van den Boogaard, A. H.: Friction and wear mechanisms during hot stamping of AlSi coated press hardening steel. *Wear* 380-381(2017) 5, S. 137–145
- [91] Hardell, J.; Kassfeldt, E.; Prakash, B.: Friction and wear behaviour of high strength boron steel at elevated temperatures of up to 800°C. *Wear* 264(2008) 9-10, S. 788–799
- [92] Geiger, M.; Merklein, M.; Lechler, J.: Determination of tribological conditions within hot stamping. *Production Engineering* 2(2008) 3, S. 269–276
- [93] Medea, F.; Venturato, G.; Ghiotti, A.; Bruschi, S.: Tribological performances of new steel grades for hot stamping tools. *Journal of Physics* 896(2017), S. 120–129
- [94] Ademaj, A.; Weiding, U.; Steinhoff, K.: Phenomenological Thermo-Physical Approach on Process Monitoring in Hot Stamping of Coated Boron Steel. In: Oldenburg, M., Steinhoff, K. (Hrsg.): 4th International Conference Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel. Auerbach: Wissenschaftliche Skripten, 2013, S. 239–247
- [95] Wang, Z.; Luo, X.; He, W.; Zhang, Y.: Investigation into the tribological behaviors of press hardening steels on the tailored conditions. *Science China Technological Sciences* 58(2015) 1, S. 97–106
- [96] Ghiotti, A.; Bruschi, S.; Borsetto, F.: Tribological characteristics of high strength steel sheets under hot stamping conditions. *Journal of Materials Processing Technology* 211(2011) 11, S. 1694–1700
- [97] Borsetto, F.; Ghiotti, A.; Bruschi, S.; Stoehr, T.; Lechler, J.; Merklein, M.: Interlaboratory Comparison of Friction Conditions in Hot Stamping Operations. *Key Engineering Materials* 438(2010), S. 97–105
- [98] Tian, X.; Zhang, Y.; Li, J.: Investigation on Tribological Behavior of Advanced High Strength Steels: Influence of Hot Stamping Process Parameters. *Tribology Letters* 45(2012) 3, S. 489–495

- [99] Lange, K.: Fließpressen. Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke. Berlin, New York: Springer, 2008
- [100] Müller, K.-P.: Dünnschichttechnologie. In: Müller, K.-P. (Hrsg.): Praktische Oberflächentechnik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2003, S. 439–470
- [101] Kondratiuk, J.; Kuhn, P.: Tribological investigation on friction and wear behaviour of coatings for hot sheet metal forming. *Wear* 270(2011) 11-12, S. 839–849
- [102] Wieland, M.; Merklein, M.: Verschleißigenschaften unbeschichteter und beschichteter Werkzeuge in Abhängigkeit unterschiedlicher Werkzeugbeanspruchungen. In: Merklein, M. (Hrsg.): 5. Erlanger Workshop Warmblechumformung. Bamberg: Meisenbach, 2010, S. 185–198
- [103] Vilaseca, M.; Pujante, J.; Ramírez, G.; Casellas, D.: Investigation into adhesive wear of PVD coated and uncoated hot stamping production tools. *Wear* 308(2013) 1-2, S. 148–154
- [104] Pelcastre, L.; Hardell, J.; Prakash, B.: Galling mechanisms during interaction of tool steel and Al-Si coated ultra-high strength steel at elevated temperature. *Tribology International* 67(2013), S. 263–271
- [105] Birol, Y.; İslar, D.: Response to thermal cycling of CAPVD (Al,Cr)N-coated hot work tool steel. *Surface and Coatings Technology* 205(2010) 2, S. 275–280
- [106] Geiger, M.; Kleiner, M.; Eckstein, R.; Tiesler, N.; Engel, U.: Microforming. *CIRP Annals* 50(2001) 2, S. 445–462
- [107] Eichenhüller, B.: Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2014
- [108] Hoffmann, H.: Handbuch Umformen. Edition Handbuch der Fertigungstechnik. München: Hanser Verlag, 2012
- [109] Steen, W. M.: Laser Material Processing. Springer eBook Collection. London: Springer, 2003, Third Edition
- [110] Spranger, F.: Untersuchungen zur Beeinflussung der Geometrie und Werkstoffeigenschaften laserimplantierter Werkzeugstahl-oberflächen sowie zum tribologischen Einsatzverhalten. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2021

- [111] Coblas, D. G.; Fatu, A.; Maoui, A.; Hajjam, M.: Manufacturing textured surfaces: State of art and recent developments. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 229(2015) 1, S. 3–29
- [112] Ibatan, T.; Uddin, M. S.; Chowdhury, M.: Recent development on surface texturing in enhancing tribological performance of bearing sliders. Surface and Coatings Technology 272(2015), S. 102–120
- [113] Mousavi, A.; Kunze, T.; Roch, T.; Lasagni, A.; Brosius, A.: Deep drawing process without lubrication – an adapted tool for a stable, economic and environmentally friendly process. Procedia Engineering 207(2017), S. 48–53
- [114] Brosius, A.; Mousavi, A.: Lubricant free deep drawing process by macro structured tools. CIRP Annals 65(2016) 1, S. 253–256
- [115] Tenner, J.: Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2019
- [116] 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 and Coatings Technology 232(2013), S. 504–514
- [117] Roch, T.; Weihnacht, V.; Scheibe, H.-J.; Roch, A.; Lasagni, A. F.: Direct Laser Interference Patterning of tetrahedral amorphous carbon films for tribological applications. Diamond and Related Materials 33(2013), S. 20–26
- [118] Shihomatsu, A.; Button, S. T.; Da Silva, I. B.: Tribological Behavior of Laser Textured Hot Stamping Dies. Advances in Tribology 2016(2016), S. 1–15
- [119] Weißbach, W.: Korrosion, Verschleiß und Schutzmaßnahmen. In: Böge, A., Böge, W. (Hrsg.): Handbuch Maschinenbau. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 477–484
- [120] Hilgenberg, K.; Behler, K.; Steinhoff, K.: Localized dispersing of ceramic particles in tool steel surfaces by pulsed laser radiation. Applied Surface Science 305(2014), S. 575–580
- [121] Steinhoff, K.; Schuleit, N.; Fletcher, I.; Kapoor, A.: Thermal implantation of metal carbide particles: a new surface treatment for cold forging tools. VDI-Berichte 1555(2000), S. 243–259

- [122] Hilgenberg, K.: Investigation of the self-organising behaviour of laser implanted tool surfaces. Dissertation, Universität Kassel, 2014
- [123] Spranger, F.: Anwendung der Laserimplantation zur Strukturierung verschleißgefährdender Umformwerkzeuge. BAM Alumni Kolloquium 9.3(2017), S. 7
- [124] Spranger, F.; Oliveira Lopes, M. de; Schirdewahn, S.; Degner, J.; Merklein, M.; Hilgenberg, K.: Microstructural evolution and geometrical properties of TiB₂ metal matrix composite protrusions on hot work tool steel surfaces manufactured by laser implantation. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 106(2020) 1-2, S. 481–501
- [125] Sigl, L.: Verbundwerkstoffe auf der Basis von Titandiborid und Verfahren zu ihrer Herstellung. Europäisches Patent, 0600255 A1(1993), Elektroschmelzwerk Kempten GmbH;
- [126] Hilgenberg, K.; Steinhoff, K.: Texturing of skin-pass rolls by pulsed laser dispersing. Journal of Materials Processing Technology 225(2015), S. 84–92
- [127] Albert, A.: Pressgehärtete Karosserieteile machen Autos leichter und sicherer. MaschinenMark 3(2013) 4, S. 30–33
- [128] Bartz, W. J.: Tribologie und Schmierung bei der Massivumformung. Handbuch der Tribologie und Schmierungstechnik. Renningen, 2004
- [129] ABRAMS Industries GmbH & Co. KG: Materialkenndaten War-meitsstahl X38CrMoV5-3 (PREMIUM 1.2367)
- [130] Spranger, F.; Schirdewahn, S.; Kromm, A.; Merklein, M.; Hilgenberg, K.: On the influence of TiB₂, TiC, and TiN hard particles on the microstructure of localized laser dispersed AISI D2 tool steel surfaces. Journal of Laser Applications 32(2020) 2, S. 22028
- [131] Munro, R. G.: Material Properties of Titanium Diboride. Journal of research of the National Institute of Standards and Technology 105(2000) 5, S. 709–720
- [132] Briehl, H.: Chemie der Werkstoffe. Wiesbaden: GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008, 2. Auflage

- [133] Schirdewahn, S.; Spranger, F.; Hilgenberg, K.; Merklein, M.: Localized Laser Dispersing of Titanium-Based Particles for Improving the Tribological Performance of Hot Stamping Tools. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 4(2020) 3, S. 68
- [134] Kollenberg, W.: *Technische Keramik. Grundlagen, Werkstoffe, Verfahrenstechnik*. Essen: Vulkan-Verlag, 2009, 2. Auflage
- [135] Spranger, F.; Schirdewahn, S.; Oliveira Lopes, M. de; Merklein, M.; Hilgenberg, K.: Investigations on TaC Localized Dispersed X38CrMoV5-3 Surfaces with Regard to the Manufacturing of Wear Resistant Protruded Surface Textures. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* 7(2020) 1, S. 38–58
- [136] Mahr GmbH: *Taktile Messtechnik in neuer Generation - Datenblatt*
- [137] Bauch, J.; Rosenkranz, R.: EDX - Energiedispersive Röntgenspektroskopie. In: Bauch, J., Rosenkranz, R. (Hrsg.): *Physikalische Werkstoffdiagnostik*. Berlin: Springer, 2017, S. 60–61
- [138] IMP-Ingenieurgesellschaft mbH: *Datenblatt Universal-Härteprüfgeräte Digi-Testor 930/250*
- [139] Müller, G.; Groth, C.: *FEM für Praktiker*. Edition expertsoft, Bd. 23. Renningen: Expert-Verl., 2007, 8., neu bearb. Aufl.
- [140] Kraus, M.; Hufnagel, T.; Merklein, M.: Accuracy of Conventional Finite Element Models in Bulk-Forming of Micropins From Sheet Metal. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing* 7(2019) 1
- [141] Kim, H. S.: On the rule of mixtures for the hardness of particle reinforced composites. *Materials Science and Engineering: A* 289(2000) 1-2, S. 30–33
- [142] Güner, A.; Hol, J.; Venema, J.; Sigvant, M.; Dobrowolski, F.; Komodromos, A.; Tekkaya, A. E.: Application of an Advanced Friction Model in Hot Stamping Simulations: A Numerical and Experimental Investigation of an A-Pillar Reinforcement Panel from Volvo Cars. *Materials Science and Engineering* 1157(2021) 1
- [143] Pereira, M. P.; Yan, W.; Rolfe, B. F.: Contact pressure evolution and its relation to wear in sheet metal forming. *Wear* 265(2008) 11-12, S. 1687–1699

- [144] Neubauer, F.; Tenner, J.; Andres, K.; Merklein, M.: Investigation of the Adhesive Wear Behavior of Alloyed and Not Alloyed Hot Stamping Tools in Contact with 22MnB5. In: Oldenburg, M. (Hrsg.): 6th International Conference Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel. Warrendale: Association for Iron & Steel Technology, S. 443-452
- [145] zum Gahr, K.-H.: Microstructure and wear of materials. Tribology series. Amsterdam, New York: Elsevier, 1987
- [146] Ghiotti, A.; Bruschi, S.; Medea, F.: Comparison of tribological and wear performances of AlSi and Zn coatings in hot stamping of boron steel sheets. *Wear* 332-333(2015), S. 810-821
- [147] Adewoye, O. O.; Page, T. F.: Electron microscopy study of surface and subsurface friction damage in single-crystal SiC. *Wear* 73(1981) 2, S. 247-260
- [148] Wang, K.; Gui, Z.; Liu, P.; Wang, Y.; Zhang, Y.: Cracking Behavior of Al-Si Coating on Hot Stamping Boron Steel Sheet. *Procedia Engineering* 81(2014), S. 1713-1718
- [149] Mozgovoy, S.; Hardell, J.; Prakash, B.: High Temperature Friction and Wear Performance of PVD Coatings under Press Hardening Contact Conditions. *Advances in Tribology 2019(2019)*, S. 1-15
- [150] Kron, P. B.: Verschleißschutz durch Laseroberflächenbearbeitung von Kalt- und Warmarbeitsstählen. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1996
- [151] Bargel, H.-J. (Hrsg.): Werkstoffkunde. VDI. Berlin: Springer, 2008
- [152] Hunekl, M.; Lütjens, J.; Hofmann, M.; Ellmer, F.: UmCra - Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Vorgeschichte bei hochfesten Stählen. *FAT-Schriftenreihe* 273(2015)
- [153] Tomala, A.; Ripoll, M. R.; Badisch, E.: Tool - Solid Lubricant - Workpiece Interactions in High Temperatures Applications. *Procedia Engineering* 68(2013), S. 626-633
- [154] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 4. Umformen. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006

- [155] 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(2013) 1, S. 193–202
- [156] Gross, D.; Seelig, T.: *Bruchmechanik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Schirdewahn, S.; Spranger, F.; Hilgenberg, K., Merklein, M.: Untersuchung des tribologischen Einsatzverhaltens von lokal dispergierten Presshärtewerkzeugoberflächen. In: Merklein, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 14. Erlanger Workshop Warmblechumformung, Druck Inform GmbH, 2019, S. 169-178
- [P2] Schirdewahn, S.; Spranger, F.; Hilgenberg, K., Merklein, M.: Tribological performance of localized dispersed X38CrMoV5-3 surfaces for hot stamping of AlSi coated 22MnB5 sheets. In: Oldenburg, M.; Hardell, J.; Caellas, D. (Hrsg.): Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel – CHS², Wissenschaftliche Skripten, 2019, S. 357-364
- [P3] Spranger, F.; Schirdewahn, S.; Kromm, A.; Merklein, M., Hilgenberg, K.: On the influence of TiB₂, TiC and TiN hard particles on the microstructure of localized laser dispersed AISI D2 tool steel surfaces. *Journal of Laser Applications* 32 (2020)
- [P4] Spranger, F.; de Oliveira Lopes, M.; Schirdewahn, S.; Degner, J.; Merklein, M., Hilgenberg, K.: Microstructural evolution and geometrical properties of TiB₂ metal matrix composite protrusions on hot work tool steel surfaces manufactured by laser implantation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106 (2020), S. 481-501
- [P5] Spranger, F.; Schirdewahn, S.; de Oliveira Lopes, M.; Merklein, M., Hilgenberg, K.: Investigations on TaC Localized Dispersed X38CrMoV5-3 Surfaces with Regard to the Manufacturing of Wear Resistant Protruded Surface Textures. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* 7 (2020), S. 38-58
- [P6] Schirdewahn, S.; Spranger, F.; Hilgenberg, K., Merklein, M.: Localized laser dispersing of titanium-based particles for improving the tribological performance of hot stamping tools. In: *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 4 (2020) 3
- [P7] Schirdewahn, S.; Spranger, F.; Hilgenberg, K., Merklein, M.: Laser implantation of niobium and titanium-based particles on hot working tool surfaces for improving the tribological performance within hot stamping. In: *Defect and Diffusion Forum* 404 (2020), S. 117-123

- [P8] Schirdewahn, S.; Spranger, F.; Hilgenberg, K., Merklein, M.: Localized dispersing of TiB₂ and TiN particles via pulsed laser radiation for improving the tribological performance of hot stamping tools. In: Schmid, M.; Vollertsen, F.; Govekar, E. (Hrsg.): *Procedia CIRP* (2020), S. 901 – 904
- [P9] Schirdewahn, S.; Spranger, F.; Hilgenberg, K., Merklein, M.: Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens von Presshärte-werkzeugen durch Laserimplantation titanbasierter Hartstoffpartikel. In: Merklein, M. (Hrsg.): *Tagungsband zum 15. Erlanger Workshop Warmblechumformung*, Druck Inform GmbH (2020), S. 165-176
- [P10] Schirdewahn, S.; Spranger, F.; Hilgenberg, K., Merklein, M.: Investigation of the thermal and tribological performance of localized laser dispersed tool surfaces under hot stamping conditions. In: *Wear*, 476 (2021)
- [P11] Schirdewahn, S.; Spranger, F.; Hilgenberg, K., Merklein, M.: Tribological and thermal behavior of laser implanted tool surfaces for hot stamping AlSi coated 22MnB₅ sheets. In: *Defect and Diffusion Forum* 414 (2022), S. 69-74
- [P12] Schirdewahn, S.; Carstensen N.; Spranger, F.; Hilgenberg, K., Merklein, M.: Discontinuous laser dispersing of titanium nitride based hard ceramic particles for improving the tribological behavior of hot stamping tools. In: Oldenburg, M.; Hardell, J.; Caellas, D. (Hrsg.): *Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel – CHS²*, Wissenschaftliche Skripten, 2022, S. 187-194
- [P13] Schirdewahn, S.; Carstensen, N.; Spranger, F.; Hilgenberg, K., Merklein, M.: Investigation on the thermo-mechanical properties of hot stamped parts by using laser-implanted tool surfaces. In: *The 19th International Conference on Metal Forming*, IOP Conference Series: *Material Science Engineering* 1270 (2022)
- [P14] Schirdewahn, S.; Carstensen, N.; Spranger, F.; Hilgenberg, K., Merklein, M.: Laser implantation of ceramic particles into hot working tool surfaces for improving the tribological performance within hot stamping. In: *6th European Steel Technology and Application Days*, 2023

- [P15] Schirdewahn, S.; Carstensen, N.; Spranger, F.; Hilgenberg, K., Merklein, M.: Laser implantation of titanium-based particles into hot stamping tools for improving the tribological performance during hot sheet metal forming. In: Proceedings of the 14th International Conference on the Technology of Plasticity - Current Trends in the Technology of Plasticity, 2024

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] Bär, D.: Simulationsbasierte Prozessauslegung zur Ermittlung prozesskritischer Werkzeugbereiche beim Presshärten. Projektarbeit. Erlangen, 2019
- [S2] Axtmann, R.: Experimentelle und numerische Untersuchung des thermo-mechanischen Einsatzverhaltens von laserimplantierten Presshärtewerkzeugen. Bachelorarbeit. Erlangen, 2019
- [S3] Nattermann, L.: Experimentelle Untersuchung des tribologischen Einsatzverhaltens von laserimplantierten Werkzeugoberflächen für den Presshärteprozess. Projektarbeit. Erlangen, 2019
- [S4] Winhart, P.: Simulationsbasierte Untersuchung des tribologischen Einsatzverhaltens von lokal angepassten Implantationsmuster für den Presshärteprozess. Projektarbeit. Erlangen, 2020
- [S5] Tost, F.: Experimentelle Untersuchung des tribologischen Einsatzverhaltens lokal dispergierter Werkzeugoberflächen unter Presshärtebedingungen. Masterarbeit. Erlangen, 2020
- [S6] Weber, D.: Experimentelle Untersuchung des tribologischen Einsatzverhaltens lokal dispergierter Werkzeugoberflächen unter Presshärtebedingungen. Bachelorarbeit. Erlangen, 2020
- [S7] Axtmann, R.: Experimentelle und simulative Untersuchung des thermo-mechanischen Einsatzverhaltens lokal angepasster Implantationmuster für den Presshärteprozess. Projektarbeit. Erlangen, 2021
- [S8] Winhart, P.: Experimentelle und numerische Untersuchung tribologisch optimierter Implantationsmuster für den Presshärteprozess. Masterarbeit. Erlangen, 2022

Reihenübersicht

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

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

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

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

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

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

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

Band 1: Andreas Hemberger

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

Band 2: Detlef Classe

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

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

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

Band 4: Karsten Schlüter

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

Band 5: Shir-Kuan Lin

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

Band 6: Rudolf Nuss

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

Band 7: Wolfgang Scholz

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

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

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

Band 9: Rainer Eisele

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

Band 10: Rolf Pfeiffer

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

Band 11: Herbert Fischer

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

Band 12: Gerhard Kleineidam

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

Band 13: Frank Vollertsen

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

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

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

Band 16: Frank Oswald Hake

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

Band 17: Herbert Reichel

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

Band 18: Josef Scheller

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

Band 19: Arnold vom Ende

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

Band 20: Joachim Schmid

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

Band 21: Egon Sommer

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

Band 22: Georg Geyer

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

Band 23: Rainer Flohr

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

Band 24: Alfons Rief

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

Band 25: Christoph Thim

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

Band 26: Roland Müller

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

Band 27: Günther Schäfer

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

Band 28: Martin Hoffmann

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

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann

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

Band 36: Harald Kolléra

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

Band 37: Stephanie Abels

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

Band 38: Robert Schmidt-Heibel

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

Band 39: Norbert Lutz

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

Band 40: Konrad Grampp

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

Band 41: Martin Koch

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

Band 42: Armin Gropp

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

Band 43: Werner Heckel

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

Band 44: Armin Rothhaupt

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

Band 45: Bernd Zöllner

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

Band 46: Bodo Vormann

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

Band 47: Peter Schnepf

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

Band 48: Rainer Klotzbücher

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

Band 49: Wolfgang Greska

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

Band 50: Jörg Franke

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

Band 51: Franz-Josef Zeller

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

Band 52: Michael Solvie

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

Band 53: Robert Hopperdietzel

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

Band 54: Thomas Rebhahn

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

Band 55: Henning Hanebuth

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

Band 56: Uwe Schönherr

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

Band 57: Stefan Holzer

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

Band 58: Markus Schultz

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

Band 59: Thomas Krebs

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

Band 60: Jürgen Sturm

Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-082-8.

Band 61: Andreas Brand

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

Band 62: Michael Kauf

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

Band 63: Peter Steinwasser

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

Band 64: Georg Liedl

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

Band 65: Andreas Otto

Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.
1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl

Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf

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

Band 68: Frank Backes

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

Band 69: Jürgen Kraus

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

Band 70: Norbert Neubauer

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

Band 71: Michael Steber

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

Band 72: Markus Pfestorf

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

Band 73: Volker Franke

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

Band 74: Herbert Scheller

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

Band 75: Arthur Meßner

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

Band 76: Mathias Glasmacher

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

Band 77: Michael Schwind

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

Band 78: Manfred Gerhard

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

Band 79: Elke Rauh

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

Band 80: Sorin Niederkorn

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

Band 81: Stefan Schubert

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

Band 82: Armando Walter Colombo

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

Band 83: Otto Meedt

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

Band 84: Knuth Götz

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

Band 85: Ralf Luchs

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

Band 86: Frank Pöhlau

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

Band 87: Roland T. A. Kals

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

Band 88: Gerhard Luhn

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

Band 89: Axel Sprenger

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

Band 90: Hans-Jörg Pucher

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

Band 91: Horst Arnet

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

Band 92: Doris Schubart

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

Band 93: Adrianus L. P.

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

Band 94: Hans-Martin Biehler

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

Band 95: Wolfgang Becker

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

Band 96: Philipp Hein

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

Band 97: Gunter Beitinger

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

Band 98: Jürgen Knobloch

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

Band 99: Frank Breitenbach

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

Band 100: Bernd Falk

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

Band 101: Wolfgang Schlögl

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

Band 102: Christian Hinsel

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

Band 103: Stefan Bobbert

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

Band 104: Harald Rottbauer

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

Band 105: Thomas Hennige

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

Band 106: Thomas Menzel

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

Band 107: Thomas Stöckel

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

Band 108: Frank Pitter

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

Band 109: Markus Korneli

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

Band 110: Burkhard Müller

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

Band 111: Jürgen Göhringer

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

Band 112: Robert Feuerstein

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

Band 113: Marcus Reichenberger

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

Band 114: Alexander Huber

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

Band 115: Sami Krimi

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

Band 116: Marion Merklein

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

Band 117: Thomas Collisi

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

Band 118: Markus Koch

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

Band 119: Michael Schmidt

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

Band 120: Nicolas Tiesler

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

Band 121: Lars Pursche

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

Band 122: Jan-Oliver Brassel

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

Band 123: Mark Geisel

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

Band 124: Gerd Eßer

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

Band 125: Marc Fleckenstein

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

Band 126: Stefan Kaufmann

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

Band 127: Thomas Fröhlich

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

Band 128: Achim Hofmann

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

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

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

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

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen

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

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern

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

Band 132: Matthias Negendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen

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

Band 133: Oliver Kreis

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

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

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten

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

Band 135: Roland Meier

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

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

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme

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

Band 137: Stefan Novotny

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

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

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter

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

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen

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

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion

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

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen

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

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten

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

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie

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

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen

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

Band 145: Stefan Hierl

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

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

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung

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

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze

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

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz

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

Band 149: Thomas Wurm

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 175: Peter Wölflick

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

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

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

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

Band 177: Uwe Popp

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

Band 178: Veit Rückel

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

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustier-technik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

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

Band 181: Stefan Lang

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

Band 182: Hans-Joachim Krauß

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

Band 183: Stefan Junker

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

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechum-formprozesse

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

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßge-schneiderter Halbzeuge

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

Band 186: Bernd Zolleiß

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

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessausle-gung für das Umformen lokal wär-mebehandelter Aluminiumplati-nen
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

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

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestim-menden Strahl-Stoff-Wechselwir-kungen beim Laserstrahlschwei-ßen von Kunststoffen
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht

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

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

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

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

Band 192: Massimo Tolazzi

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

Band 193: Cornelia Hoff

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

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

Band 194: Christian Alvarez

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

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

Band 195: Andreas Kunze

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

FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

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

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

Band 197: Thomas Bigl

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

Band 198: Stephan Roth

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

Band 199: Artur Giera

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

Band 200: Jürgen Lechler

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

Band 201: Andreas Blankl

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

Band 202: Andreas Schaller

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

Band 203: Claudius Schimpf

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

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahlreischweißen
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

Rührreischweißen 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 Crashtaughigkeit von höchstfesten Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

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

Band 211: Detlev Staud

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

Band 212: Jens Ackermann

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

Band 213: Stephan Weidel

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

Band 214: Stefan Geißdörfer

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

Band 215: Christian Matzner

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

Band 216: Florian Schüßler

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

Band 217: Massimo Cojutti

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

Band 218: Raoul Plettke

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 264: Matthias Domke

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

Band 265: Johannes Götz

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

Band 266: Hung Nguyen

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

Band 267: Andreas Kuppert

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

Band 268: Kathleen Klaus

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

Band 269: Thomas Svec

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

Band 270: Tobias Schrader

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

Band 271: Matthäus Brela

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

Band 272: Michael Wieland

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

Band 273: René Schramm

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

Band 274: Michael Lechner

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

Band 275: Kolja Andreas

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

Band 276: Marcus Baum

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

Band 277: Thomas Schneider

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

Band 278: Jochen Merhof

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

Band 279: Fabian Zöller

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

Band 280: Christian Hezler

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

Band 281: Jochen Bönig

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

Band 282: Johannes Kohl

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

Band 283: Peter Bechtold

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

Band 284: Stefan Berger

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 324: Susan Zöller
Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfK, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 347: Philipp Amend

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

Band 348: Matthias Ehlert

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

Band 349: Thomas Sander

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

Band 350: Florian Pilz

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

Band 351: Sebastian Josef Katona

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

Band 352: Jürgen Herrmann

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

Band 353: Christof Küstner

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

Band 354: Tobias Gläfel

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

Band 355: Andreas Meinel

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

Band 356: Hannah Riedle

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

Band 357: Maximilian Landgraf

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

Band 358: Alireza Esfandiyari

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

Band 359: Christian Sand

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

Band 360: Ralf Merkl

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

Band 361: Thomas Reitberger

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

Band 362: Marius Christian

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

Band 363: Franziska Neubauer

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

Band 364: Eike Wolfram Schäfer

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

Band 365: Daniel Gross

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

Band 366: Daniel Junker

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

Band 367: Tallal Javied

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

Band 368: David Marco Hochrein

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

Band 369: Daniel Gräf

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

Band 370: Andreas Gröschl

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

Band 371: Johann Tüchsen

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

Band 372: Max Marian

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

Band 373: Johannes Strauß

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

Band 374: Martin Hohmann

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

Band 375: Timo Kordaß

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

Band 376: Philipp Kestel

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

Band 377: Martin Lerchen

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

Band 378: Michael Schneider

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

Band 379: Tobias Sprügel

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

Band 380: Tom Häfner

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

Band 381: Björn Heling

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

Band 382: Tobias Kolb

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

Band 383: Mario Meinhardt

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

Band 384: Felix Bauer

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

Band 385: Jochen Zeitler

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

Band 386: Vincent Mann

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

Band 387: Chen Chen

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

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

ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

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

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

ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

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

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

ISBN 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

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

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

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

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

ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

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

ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

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

ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

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

ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

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

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

ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

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

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

ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

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

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

ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer

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

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

ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

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

ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

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

ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

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

ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

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

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

ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

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

ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

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

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

ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

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

ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

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

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

ISBN 978-3-96147-583-4.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 428: Markus Lieret

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

Band 429: Petar Vukovic

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

Band 430: Fabian Knieps

Finite Elemente Simulation dünnschichtiger Verpackungsstähle: Entwicklung einer geeigneten Charakterisierungs- und Validierungsstrategie
LFT, xix, 189 Seiten, 122 Bilder, 17 Tab. 2023
ISBN 978-3-96147-689-3

Band 431: Julian Seßner

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

Band 432: Benjamin Samuel

Lutz

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

Band 433: Michael Jüttner

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

Band 434: Sebastian Wiesemayer

Untersuchungen zur Stoffflusssteuerung beim Fügen durch Umformen von hochfesten Aluminiumlegierungen mittels lokaler Kurzzeitwärmebehandlung
LFT, xii u. 197 Seiten, 81 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-715-9.

Band 435: Clara-Maria Kuball

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

Band 436: Martin Roth

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

Band 437: Stephan Schirdewahn

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

Abstract

Hot stamping has been established as key technology for a resource-efficient production of safety-relevant car body components. During the forming operation, however, high friction coefficients and wear occur on the interacting tool and workpiece surfaces, which have a lasting effect on the part quality and tool lifetime. To extend the process limits, an innovative surface engineering technology named laser implantation process was used within this research work. The technology is based on the localized dispersing of hard ceramic particles into the tool surface, which results in high-strength and protruded spots in micrometer range. Due to the significant reduction of the contact area and the high wear resistance of the TiB_2 hard materials, an improved tribological behavior is expected under hot stamping conditions. For this purpose, friction, wear and quenching tests were carried out to identify the cause-effect relationships. Finally, the effectiveness of the technology was tested by hot stamping industrial related components with a tailored laser-implanted tool geometry. Based on the knowledge, it is possible to produce hot stamped components in a resource-efficient and stress-optimized manner, which creates sustainable economic and ecological benefits in the form of higher component quality, lower reject rates and longer tool life.

Das Presshärteverfahren ist eine Schlüsseltechnologie zur ressourceneffizienten Herstellung sicherheitsrelevanter Karosserieteile. Während der Umformung treten jedoch hohe Reibungs- und Verschleißerscheinungen an den interagierenden Werkzeug- und Werkstückwirkflächen auf, die sowohl die Bauteilqualität als auch die Maschinenstandzeit nachhaltig beeinträchtigen. Um die bestehenden Verfahrensgrenzen zu erweitern, wird daher eine Modifikation der Presshärtewerkzeuge mittels Laserimplantation angestrebt. Das Verfahren basiert auf dem lokalen Dispergieren keramischer Hartstoffpartikel in die Werkzeugoberfläche, infolgedessen hochfeste und erhabene Strukturen im Mikrometerbereich entstehen. Aufgrund der signifikanten Reduzierung der Kontaktfläche sowie der hohen Verschleißbeständigkeit der eingesetzten TiB_2 -Hartstoffe wird ein verbessertes tribologisches Einsatzverhalten unter presshärte-typischen Prozessbedingungen erwartet. Anhand von Reib-, Verschleiß- und Abkühlversuchen konnten Ursache-Wirkzusammenhänge identifiziert und maßgeschneiderte Oberflächenmodifikationen generiert werden. Die Wirksamkeit der Technologie wurde abschließend mittels Presshärteversuchen unter Verwendung eines industrienahen Demonstrators verifiziert. Mit dem erarbeiteten Wissen ist die Möglichkeit gegeben, pressgehärtete Bauteile ressourceneffizient und beanspruchungsgerecht herzustellen, wodurch ein nachhaltiger ökonomischer und ökologischer Nutzen in Form höherer Bauteilqualitäten, niedriger Ausschussquoten und längerer Werkzeugstandzeiten geschaffen wird.

