

FAU Studien aus dem Maschinenbau 341

Patrik Schwingenschlögl

Erarbeitung eines Prozess-
verständnisses zur Verbesserung
der tribologischen Bedingungen
beim Presshärten



Patrik Schwingenschlög

Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung
der tribologischen Bedingungen beim Presshärten

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 341

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Patrik Schwingenschlögl

**Erarbeitung eines
Prozessverständnisses
zur Verbesserung der
tribologischen Bedingungen
beim Presshärten**

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

Erlangen
FAU University Press
2020

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

Bitte zitieren als

Schwingenschlögl, Patrik. 2020. *Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 341. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-298-7.

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

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

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-297-0 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-298-7 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-298-7

**Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur
Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim
Presshärten**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Patrik Schwingenschlögl, M.Sc.

aus Rosenheim

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

Tag der mündlichen

Prüfung: 18.12.2019

Vorsitzender des

Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Paul Fröba

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Prof. Dr.-Ing. habil. Verena Kräusel,
TU Chemnitz

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein, Ordinaria des LFT, für das in mich gesetzte Vertrauen und die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit. Vielen Dank für die erfolgreiche und tolle Zusammenarbeit, konstruktive Diskussionen und engagierte Unterstützung, die ganz wesentlich zu meiner persönlichen und fachlichen Entwicklung beigetragen haben.

Bedanken möchte ich mich darüber hinaus bei Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Verena Kräusel für die Übernahme des Koreferats und ihr Interesse an meiner Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Ingo Hahn danke ich für die Übernahme des fachfremden Gutachtens. Herzlichen Dank außerdem an Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Manfred Geiger für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterhin gilt mein Dank allen technischen Mitarbeitern und den Teams aus Sekretariat, Buchhaltung und Systemadministration. Außerdem bedanke ich mich bei allen Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, welche durch ihren Einsatz zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ganz besonders möchte ich mich zudem bei Dr.-Ing. Sven Hildering, Dr.-Ing. Jennifer Tenner, Johannes Henneberg, Stephan Schirdewahn, Alexander Horn, Dr.-Ing. Christoph Kiener und Florian Pilz für die vielen fachlichen (und auch nicht fachlichen) Diskussionen und Gespräche sowie die vertrauensvolle Zusammenarbeit bedanken.

Abschließend gilt mein Dank meinen Eltern, meinem Bruder, meiner Freundin und meinen Freunden für die uneingeschränkte und bedingungslose Unterstützung sowie ihren Rat bei allen wichtigen Entscheidungen auf meinem bisherigen Lebensweg und dafür, dass sie mich stets motiviert und so diese Arbeit ermöglicht haben.

Erlangen, im Dezember 2019

Patrik Schwingenschlögl

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik und Forschung	3
2.1 Verfahrensvarianten und Werkzeugwerkstoffe beim Presshärten	3
2.2 Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen in der Warmumformung	6
2.2.1 Aktuelle Trends bei der Herstellung pressgehärteter Komponenten.....	6
2.2.2 Herausforderungen beim Presshärten.....	7
2.3 Verschleiß und Reibung beim Presshärten	9
2.3.1 Das tribologische System	9
2.3.2 Verschleiß- und Reibungsmechanismen.....	10
2.3.3 Einflussfaktoren auf die tribologischen Bedingungen	14
2.4 Zusammenfassende Bewertung	22
3 Zielsetzung und methodische Vorgehensweise	25
4 Verwendete Werkstoffe, Versuchsanlagen und Methoden....	29
4.1 Versuchswerkstoffe	29
4.1.1 Werkstückwerkstoff 22MnB5 mit AlSi-Beschichtung	29
4.1.2 Werkzeugwerkstoffe und Werkzeugoberflächen	30
4.2 Messeinrichtungen zur Bauteilcharakterisierung.....	33
4.2.1 Härteprüfanlagen	33
4.2.2 Perthometer	34
4.2.3 Konfokalmikroskop	34
4.2.4 Optisches Messsystem ATOS	35
4.2.5 Rasterelektronenmikroskop.....	36
4.3 Glüh- und Härteofen.....	36
4.4 B-Säulen-Werkzeug im Labormaßstab.....	36
4.4.1 Bauteilgeometrie	37
4.4.2 Aufbau und Funktionsweise des Demonstratorwerkzeugs	38
5 Erarbeitung einer Methodik zur Charakterisierung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten.....	41
5.1 Anforderungen an den Prüfstand	41
5.2 Konzeptionierung und Aufbau des Prüfstands	43

5.3	Auswertemethodik bei Flachbahnstreifenziehversuchen	48
5.3.1	Reibzahlbestimmung	48
5.3.2	Verschleißcharakterisierung	51
5.3.3	Ermittlung eines Prozessfensters für Streifenziehversuche	54
5.4	Qualifizierung der Auswertemethodik.....	60
5.5	Zusammenfassende Bewertung der Methodik zur Reibungs- und Verschleißcharakterisierung.....	65
6	Schaffung eines Prozessverständnisses beim Presshärten im Laborversuch	67
6.1	Identifikation relevanter Einflussgrößen	67
6.2	Experimentelle Erforschung der Einflussgrößen.....	69
6.2.1	Werkstücktemperatur.....	69
6.2.2	Werkzeugtemperatur	76
6.2.3	Geschwindigkeit	81
6.2.4	Flächenpressung	87
6.3	Ableitung grundlegender Erkenntnisse in Bezug auf den Einfluss der Prozessführung.....	92
6.4	Zusammenfassende Bewertung des Prozessverständnisses	98
7	Analyse werkzeugseitiger Maßnahmen zur Reibungs- und Verschleißreduzierung.....	101
7.1	Identifikation werkzeugseitiger Maßnahmen	101
7.2	Experimentelle Erforschung der Maßnahmen	103
7.2.1	Oberflächenendbearbeitung	103
7.2.2	Legierungszusammensetzung	107
7.2.3	Wärmebehandlung des Werkzeugwerkstoffs.....	113
7.2.4	Beschichtung der Werkzeugoberfläche	121
7.3	Zusammenfassende Bewertung der werkzeug-seitigen Maßnahmen	127
8	Übertragung der Erkenntnisse aus den Flachbahnstreifenziehversuchen auf den Presshärteprozess	131
8.1	Festlegung der zu untersuchenden Werkzeugkonfigurationen	131
8.2	Methodik zur Charakterisierung der tribologischen Bedingungen anhand einer B-Säulen-Geometrie.....	133
8.3	Verifizierung der Maßnahmen zur Reibungs- und Verschleißreduzierung aus den Laborversuchen anhand einer Demonstratorgeometrie.....	141
8.4	Abschließende Bewertung von Maßnahmen zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärteprozess	148

9	Zusammenfassung und Ausblick.....	151
10	Summary and outlook.....	153
	Literaturverzeichnis.....	155

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
h	μm	Profilamplitude
h_{nachher}	μm	Profilamplitude vor Versuchsdurchführung
h_{vorher}	μm	Profilamplitude nach Versuchsdurchführung
n	-	Anzahl der Wiederholungen
$n_{\text{Messungen}}$	-	Anzahl der Messungen
n_{Proben}	-	Anzahl der Proben
p_{N}	N/mm^2	Flächenpressung
$t_{\text{Abschreck}}$	s	Abschreckzeit
t_{Ofen}	s	Verweilzeit des Bauteils im Ofen
t_{Transfer}	s	Transferzeit
t_{Werkzeug}	s	Zeit im Werkzeug bevor Umformung
v_{Rel}	mm/s	Relativgeschwindigkeit
$v_{\text{Stößel}}$	mm/s	Stößelgeschwindigkeit
$F_{\text{Abschreck}}$	N	Stößelkraft während der Abschreckphase
F_{N}	N	Normalkraft
F_{R}	N	Reibkraft
$F_{\text{Stößel}}$	N	Stößelkraft
R_a	μm	Arithmetischer Mittenrauwert
R_m	N/mm^2	Zugfestigkeit
R_{pk}	μm	Reduzierte Spitzenhöhe
R_z	μm	Gemittelte Rautiefe
T_{Ofen}	$^{\circ}\text{C}$	Ofentemperatur
T_{WS}	$^{\circ}\text{C}$	Werkstücktemperatur
T_{WZ}	$^{\circ}\text{C}$	Werkzeugtemperatur
μ	-	Reibzahl

<i>Abkürzung</i>	<i>Beschreibung</i>
a-C:H	Amorphe wasserstoffhaltige Kohlenstoffschicht
a-C:H:N	Amorphe wasserstoffhaltige Kohlenstoffschicht mit Stickstoffdotierung
Ac ₃	Endtemperatur für die Austenitbildung bei Erwärmung
AlCrN	Aluminiumchromnitrid
ATOS	Advanced Topometric Sensor
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge-Coupled Device
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CrCN	Chromcarbonitrid
CrN	Chromnitrid
DLC	Diamond-like carbon
EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Energiedispersive Röntgenspektroskopie)
EHT	Electron high tension / accelerating voltage (Elektronenhochspannung / Beschleunigungsspannung)
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
HRC	Härte nach dem Rockwell-Eindringverfahren
HSC	High speed cutting (Hochgeschwindigkeitszerspannung)
HV	Härte nach dem Vickers-Eindringverfahren
Max	Maximum
Min	Minimum
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential-Regler
PkW	Personenkraftwagen
PVD	Physical Vapour Deposition (Beschichtung durch physikalische Abscheidung aus der Dampfphase)
REM	Rasterelektronenmikroskopie
TiAlN	Titanaluminiumnitrid
TiCN	Titancarbonitrid
TiN	Titannitrid

1 Einleitung

Die Automobilindustrie ist mit einem Umsatz von rund 423 Milliarden Euro im Jahr 2017 der mit Abstand bedeutendste Industriezweig in Deutschland [1]. Die Unternehmen der Branche beschäftigen direkt über 820.000 Personen und sind damit von zentraler Bedeutung für Wohlstand und Beschäftigung [1]. Die Anzahl der Personenkraftwagen (Pkw) ist in den letzten 10 Jahren um 12,5 % auf rund 46,5 Millionen in Deutschland angewachsen [2]. Bei der Reduzierung des weltweiten CO₂-Ausstoßes mit Blick auf die Eindämmung der Erderwärmung kommt der Automobilindustrie daher eine kritische Rolle zu [3]. Bis 2020 fordert die Europäische Kommission eine Reduzierung des CO₂-Ausstoßes von neuzugelassenen Pkw auf durchschnittlich 95 g/km [4]. Die gesetzlichen Vorgaben zur Reduzierung der Emissionswerte stellen die Automobilindustrie vor große technische und wirtschaftliche Herausforderungen [1].

Neben der Erforschung neuer Antriebstechnologien, wie z.B. Elektroantriebe, bietet Leichtbau ein großes Potenzial zur Effizienzverbesserung moderner Fahrzeuge [5]. Bis zu 12 % des Kraftstoffverbrauchs sind auf die Fahrzeugmasse zurückzuführen [6]. Da die Karosserie bis zu 40 % der Fahrzeugmasse ausmacht, bietet die Gewichtsreduzierung der Rohkarosserie mittels Leichtbau ein großes Einsparpotenzial [7]. Eine Gewichtseinsparung um 100 kg führt demnach zu einer Verringerung des CO₂-Ausstoßes um 9 g/km [8] und 0,5 Liter durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch pro 100 km [9]. Darüber hinaus bewirkt jede Gewichtseinsparung bei der Fahrzeugkarosserie eine Verlängerung der Reichweite von Elektrofahrzeugen [9]. Für die Leichtbauweise moderner Fahrzeugkarosserien ist der Einsatz neuartiger und hochfester Stahlgüten essentiell [10]. Obwohl eine Vielzahl von Technologien und Materialien für die Umsetzung der Leichtbauweise zur Verfügung stehen, hat sich speziell für die Herstellung sicherheitsrelevanter Bauteile das Presshärten durchgesetzt [11]. Hierbei wird höchstfester Bor-Mangan Stahl wie z.B. 22MnB5 in einem Ofen wärmebehandelt, bevor die finale Bauteilgeometrie in einem kombinierten Umform- und Abschreckvorgang im Werkzeug hergestellt wird [12].

Durch die gestiegenen Anforderungen an moderne Fahrzeugkarosserien hinsichtlich Verwindungssteifigkeit und Insassenschutz hat Presshärten im Automobilbau zunehmend an Bedeutung gewonnen [13]. Hohe Temperaturen während der Umformung verhindern den Einsatz von Schmierstoffen aufgrund unzureichender Temperaturfestigkeit der Schmiermittel [14]. Hierdurch kommt dem tribologischen System beim Presshärten in der

Serienfertigung eine zentrale Bedeutung zu, da hohe Reibkräfte resultieren. Diese wirken sich auf den Stofffluss und die Formgebungsgrenzen aus [15]. Als Konsequenz werden die resultierenden mechanischen und geometrischen Eigenschaften der Bauteile sowie deren Oberflächenqualität beeinflusst [15]. Die Reibung wird maßgeblich durch die Adhäsionsneigung zwischen dem Werkzeug und dem Blech verursacht [16]. Die Funktionsweise der adhäsiven Vorgänge ist bisher jedoch nicht vollständig geklärt [17]. Die hohe Adhäsionsneigung führt dazu, dass die Werkstückoberfläche zu Anhaftungen an der Werkzeugoberfläche neigt [18]. Hierdurch wird die Oberflächenqualität des Werkstücks verschlechtert, da die Materialanhaftungen während der Umformung durch das Werkstück furchen [15]. Zusätzlich verschlechtert der adhäsive Verschleiß den Werkstofffluss und dadurch die geometrische Genauigkeit des Bauteils. Um dies zu vermeiden, ist häufiges Nacharbeiten der Werkzeugoberflächen notwendig, woraus hohe Kosten durch Stillstandzeiten verursacht werden [19]. Aus anderen Umformverfahren ist bekannt, dass Werkzeugbeschichtungen eine effektive Maßnahme sind, um adhäsiven Verschleiß zu verringern. Die in der Kaltumformung erfolgreich eingesetzten Werkzeugbeschichtungen wie Titanitrid (TiN), Titancarbonitrid (TiCN) oder Chromnitrid (CrN) sind für das Presshärten aufgrund ihrer limitierten Temperaturbeständigkeit und den daraus resultierenden schlechten Reibeigenschaften jedoch nicht für das Presshärten geeignet [20].

Um künftig effektive Maßnahmen zur Verringerung von Reibung und Verschleiß beim Presshärten entwickeln zu können, wird im Rahmen dieser Arbeit ein grundlegendes Prozessverständnis in Bezug auf das tribologische System beim Presshärten geschaffen. Hierzu wird eine Methodik zur Charakterisierung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten erarbeitet. Basierend auf dieser Methodik werden die Ursache-Wirkzusammenhänge zwischen den reibungssensitiven Prozessparametern und dem resultierenden Reib- und Verschleißverhalten erforscht. Darüber hinaus werden werkzeugseitige Maßnahmen zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen bewertet. Abschließend werden die aus den Laborversuchen gewonnenen Erkenntnisse mithilfe eines B-Säulen Werkzeugs im Labormaßstab verifiziert, um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die industrielle Serienfertigung zu überprüfen.

2 Stand der Technik und Forschung

In diesem Kapitel wird der für die vorliegende Arbeit relevante Wissensstand zum Presshärten von höchstfesten Vergütungsstählen, den dabei eingesetzten Werkstoffen sowie den Herausforderungen in der Warmblechumformung dargestellt. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf den während der Umformung vorherrschenden Reib- und Verschleißbedingungen sowie den Einflussfaktoren hierauf.

2.1 Verfahrensvarianten und Werkzeugwerkstoffe beim Presshärten

Motiviert durch das Bestreben der Automobilindustrie, das Gewicht der Fahrzeugkarosserie zu reduzieren und gleichzeitig die Sicherheit der Fahrzeuginsassen zu erhöhen, hat der Einsatz von höher- sowie höchstfesten Stählen in den letzten Jahren stetig an Bedeutung gewonnen [21]. In diesem Zuge hat sich der Presshärteprozess für die Herstellung sicherheitsrelevanter Strukturbauteile, beispielsweise B-Säulen oder Dachrahmen, etabliert [22]. Durch die Kombination aus Warmumformung und Abschrecken können geometrisch komplexe Bauteile mit hoher Festigkeit und Genauigkeit gefertigt werden [23]. Das Verfahren wurde 1970 in Schweden erfunden [24]. Die ersten pressgehärteten Automobilkomponenten wurden 1984 vom schwedischen Autohersteller Saab aus gehärtetem Bor-Stahl produziert [25]. Heute wird das Verfahren auch von zahlreichen weiteren Herstellern eingesetzt und ist zentraler Bestandteil für die Fertigung von Strukturbauteilen für moderne Fahrzeugkarosserien [11].

Der Prozess wird in zwei grundlegende Varianten, das direkte und das indirekte Presshärten, unterschieden [26]. Darüber hinaus können maßgeschneiderte Bauteileigenschaften mittels unterschiedlicher Verfahrensstrategien des partiellen Presshärtens erzielt werden [26]. Bei allen Varianten wird üblicherweise der Bor-Mangan-Stahl 22MnB5 als Halbzeug eingesetzt [27]. Dieser besteht im Auslieferungszustand aus einem ferritisch-perlitischen Gefüge [21] und weist eine Streckgrenze $R_{p0,2}$ von ca. 400 MPa sowie eine Zugfestigkeit R_m von ca. 600 MPa auf [28]. Weiterhin ist der Werkstoff durch eine gute Warmumformbarkeit und eine geringe Rückfederung gekennzeichnet [29]. Um eine Verzunderung des Werkstücks infolge der Wärmebehandlung zu vermeiden, werden Werkstückbeschichtungen eingesetzt. Beim direkten Presshärten wird üblicherweise eine AlSi-Beschichtung verwendet [30]. Die Beschichtung wird mit 60 bis 150 g/m² über ein

Schmelztauchverfahren aufgebracht, sodass die Schichtdicke zwischen 10 - 25 μm beträgt [31]. Während des Schmelztauchverfahrens und der Austenitisierung des Werkstücks werden Al_xFe_y -Phasen durch die Diffusion von Fe aus dem Substrat in die Beschichtung gebildet [32]. Dies führt zu einem Anstieg der Schmelztemperatur der Beschichtung auf 1100 °C [32]. Aufgrund ihrer schlechten Kaltumformbarkeit sind AlSi-Beschichtungen nicht für den indirekten Presshärteprozess geeignet [25]. Hierfür werden Beschichtungen auf Basis von Zink (Zn) eingesetzt, die ebenfalls durch ein Schmelztauchverfahren aufgebracht werden [33] und sich durch eine gute Kaltumformbarkeit auszeichnen [27]. Die Schichtdicke beträgt in der Regel 15 μm im ungehärteten Zustand [34].

Direktes Presshärten

Das direkte Presshärten repräsentiert die weltweit verbreitetste Methode zur Erzeugung von Presshärtekomponenten [35]. Die zugeschnittene Platine wird in einem Ofen über die werkstoffspezifische Ac_3 Temperatur, 850 °C bei 22MnB5, erwärmt [36]. Durch die Wärmebehandlung wird das ferritisch-perlitische Ausgangsgefüge in vollständig austenitisches Gefüge umgewandelt [36]. In der Industrie sind hierfür Ofentemperaturen zwischen 900 °C und 950 °C üblich. Die Ofenverweilzeit des Werkstücks ist abhängig von der Blechdicke sowie der Zusammensetzung der Beschichtung. Im Anschluss an die Austenitisierung wird das Bauteil in die Presse transferiert, wo es gleichzeitig umgeformt und abgeschreckt wird [12]. Die Umformtemperaturen liegen zwischen 850 °C und 650 °C. Die Abkühlung erfolgt durch den Kontakt des Werkstücks mit dem Werkzeug [14]. Bei einer Werkstücktemperatur von 425 °C beginnt die Umwandlung des Gefüges von Austenit zu Martensit [28]. Voraussetzung für die Ausbildung von vollständigem Martensitgefüge ist, dass eine ausreichend hohe Abkühlgeschwindigkeit erzielt wird [30]. Nach Erreichen der erforderlichen Ziehtiefe bleibt das Werkzeug bis zur vollständigen Aushärtung des Bauteils geschlossen [37]. Bedingt durch die ausgebildete Martensitstruktur erreichen pressgehärtete Komponenten eine Festigkeit von bis zu 1500 MPa [22]. Abschließend wird das Bauteil bei einer Temperatur von ungefähr 150 °C entnommen und mittels Laser- oder Hartschneiden auf Endgeometrie zugeschnitten [14]. Da sich die vorliegende Arbeit auf das direkte Presshärten fokussiert, steht der Begriff Presshärten nachfolgend für das direkte Presshärten, sofern nicht gesondert auf spezielle Verfahrensvarianten hingewiesen wird.

Indirektes Presshärten

Im Gegensatz zum direkten Presshärten ist bei der indirekten Variante ein ein- oder mehrstufiger Kaltumformprozess vorgelagert [38]. Zu Beginn wird die zugeschnittene Platine bei Raumtemperatur auf 90 – 95 % der Endgeometrie umgeformt [38]. Anschließend erfolgen analog zum direkten Presshärteprozess die Wärmebehandlung in einem Ofen sowie das Abschrecken im Werkzeug [39]. Hierbei wird das Bauteil auf die finale Geometrie kalibriert und gehärtet [39].

Partielles Presshärten

Neben dem konventionellen (direkten oder indirekten) Presshärten, bei dem eine vollständige martensitische Gefügestruktur angestrebt wird, werden weitere Verfahrensvarianten des partiellen Presshärtens eingesetzt, um funktionsoptimierte Bauteile herzustellen [40]. Hierbei werden gezielt duktile Bereiche im Bauteil erzeugt, um beispielsweise die kinetische Energie im Falle eines Aufpralls durch lokale, plastische Deformation abzubauen [26]. Die Varianten des partiellen Presshärtens können in drei Gruppen gegliedert werden: Partielles Austenitisieren vor der Umformung, spezifische Abkühlung vor bzw. während der Umformung sowie partielles Anlassen nach der Umformung [26]. Im Falle der partiellen Austenitisierung werden nur lokale Bereiche des Halbzeugs während der Wärmebehandlung austenitisiert [35]. Nach dem Presshärten weisen diese ein martensitisches Gefüge und demzufolge hohe Festigkeiten auf, während die übrigen Bereiche eine höhere Duktilität besitzen [35]. Das Ziel der spezifischen Abkühlung ist die lokale Vermeidung von Abkühlraten über 26 K/s, sodass keine martensitische Gefügeumwandlung erreicht wird [41]. Eine weit verbreitete Möglichkeit zur Reduzierung der Abkühlgeschwindigkeiten ist beispielsweise partielles Beheizen von Werkzeugen [42]. Bei der dritten Variante des partiellen Presshärtens werden definierte mechanische Eigenschaften durch lokales Anlassen in einem zusätzlichen Prozessschritt im Anschluss an die Umformung erzielt [35].

Werkzeugwerkstoffe

Bei allen Presshärtevarianten sind aufgrund der hohen Umformtemperaturen und -kräfte vielseitige Anforderungen an den Werkzeugwerkstoff gestellt. Neben einer hohen Wärmeleitfähigkeit sind vor allem Warmfestigkeit und ein gutes tribologisches Einsatzverhalten gefordert [43]. Zusätzlich zu gegossenen Stählen werden pulvermetallurgisch hergestellte Werkzeugstähle eingesetzt [44]. Letztere zeichnen sich im Allgemeinen durch eine hohe thermische Leitfähigkeit und guten Verschleißwiderstand aus

[44]. Die Eigenschaften des Werkzeugstahls werden hauptsächlich über dessen Legierungselemente bestimmt. Mit zunehmendem C-Anteil nimmt sowohl die Festigkeit als auch die Härte zu, während die Bruchdehnung abnimmt [45]. Der Cr-Anteil führt nach [46] zu Karbidbildung, wodurch die Verschleißbeständigkeit erhöht und die Warmfestigkeit gesteigert wird. Gleichzeitig reduziert Cr die Wärmeleitfähigkeit sowie die Wärmeausdehnung [46]. In hoher Konzentration und in Verbindung mit Ni erhöht Cr außerdem die Korrosionsbeständigkeit [47]. Darüber hinaus beinhalten viele Werkzeugstähle Mo und V, die zu Feinkorn- und Karbidbildung führen und so die Härte sowie die Festigkeit steigern [47]. Als Beispiele für Warmarbeitsstähle, die in der Industrie häufig zum Einsatz kommen, sind 1.2344 oder 1.2367 zu nennen [43].

2.2 Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen in der Warmumformung

Vor dem Hintergrund der stetig wachsenden Anforderungen in Bezug auf die Sicherheit und Effizienz moderner Pkw, besteht sowohl seitens der Forschung als auch der Industrie hohes Interesse daran, neue Verfahrensvarianten des Presshärtens zu entwickeln, um den Prozess flexibler und effizienter zu gestalten. Darüber hinaus gilt es, einer Vielzahl an Herausforderungen zu begegnen, um die Robustheit des Presshärteprozesses weiter zu steigern.

2.2.1 Aktuelle Trends bei der Herstellung pressgehärteter Komponenten

Um das Einsatzspektrum von pressgehärteten Bauteilen weiter zu erhöhen, werden neue Verfahrensvarianten und Werkstoffkonzepte erforscht [48]. Bei der Entwicklung neuer Varianten des Presshärteprozesses ist speziell das partielle Presshärten im Fokus aktueller Forschungsarbeiten [49]. Eine Variante, die sich dabei nach [35] in der Industrie besonders durchsetzen konnte, ist das sogenannte Tailored Tempering Verfahren. Die Vorteile dieser Verfahrensvariante liegen darin, dass die resultierenden mechanischen Bauteileigenschaften flexibel und ohne einen weiteren Prozessschritt einstellbar sind [35].

Bei der Entwicklung von neuen Werkstoffkonzepten sind zwei gegenläufige Trends zu beobachten. Abhängig von den Anforderungen an das umgeformte Bauteil wird entweder eine Festigkeitssteigerung oder eine Duktilitätssteigerung angestrebt. Bauteile mit hoher Festigkeit bieten im

Falle eines Aufpralls direkten Schutz für Fahrzeuginsassen. Bauteile mit höherer Duktilität werden plastisch verformt und nehmen mehr kinetische Energie auf. [50]

In diesem Kontext ist die chemische Zusammensetzung des 22MnB5 von zentraler Bedeutung. So konnte beispielsweise eine Festigkeitssteigerung auf bis zu 2000 MPa durch die Hinzugabe von Ti bei höheren Aufheizraten und geringeren Ofentemperaturen erreicht werden [51]. Durch eine Verfeinerung der Austenitkörner kombiniert mit einer Erhöhung des C-Anteils können größere Zugfestigkeits- und Härtewerte bei gleichbleibender Duktilität erreicht werden [52].

Neben den weit verbreiteten Bor-Mangan Stählen wird die Eignung weiterer Werkstoffe erforscht [53]. Martensitische Edelstähle beispielsweise bieten den Vorteil, dass geringere Abkühlraten für die Martensitumwandlung benötigt werden [54]. Somit muss das Werkzeug nach der Umformung nicht bis zur vollständigen Martensitumwandlung geschlossen bleiben und es können höhere Taktzeiten realisiert werden [54]. Darüber hinaus ist der Werkstoff weniger anfällig gegenüber Oxidation, sodass keine Werkstückbeschichtungen eingesetzt werden müssen [55].

Auch mit martensitischen Edelstählen können Zugfestigkeiten von bis zu 1800 MPa [56] und geringere Festigkeiten von 1200 MPa [57] erzielt werden. Kohlenstoffmartensitische Chromstähle hingegen zeichnen sich durch eine hohe Duktilität aus [58]. Geringere kritische Abkühlgeschwindigkeiten ermöglichen zudem eine flexiblere Prozessgestaltung [58]. Aufgrund der hohen Materialkosten hat sich der flächendeckende Einsatz dieser Stähle bei pressgehärteten Automobilkomponenten bisher jedoch nicht durchgesetzt.

Um den Presshärteprozess zusätzlich robuster und effizienter zu gestalten, wird das Umformverhalten von neuen Werkstückbeschichtungen analysiert. Neue AlSi-Beschichtungen, die eine robustere Prozessführung versprechen [59], stehen hierbei ebenso im Fokus der Forschung wie die Verwendung von Zn-basierten Beschichtungen für den direkten Presshärteprozess [60].

2.2.2 Herausforderungen beim Presshärten

Aufgrund der Komplexität des Prozesses hat sich die numerisch basierte Prozessauslegung beim Presshärten etabliert. Mithilfe der Finiten-Elemente Methode (FEM) können kosten- und zeitintensive Trial-and-Error

Verfahren vermieden und Prozessgrenzen sowie –potentiale ermittelt werden [25]. Durch die detaillierte Charakterisierung des 22MnB5 kann das temperatur- und dehnratenabhängige Umformverhalten mit hoher Genauigkeit abgebildet werden [5]. Die finalen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile, welche signifikant von der Mikrostruktur des Gefüges beeinflusst werden, können in Abhängigkeit des Temperaturverlaufs numerisch ermittelt werden [61]. Unter Berücksichtigung physikalischer Effekte kann die Martensitbildung zuverlässig numerisch bestimmt werden [62]. Die werkstofflichen Grundlagen für die Abbildung des Umformverhaltens sowie der resultierenden mechanischen Bauteileigenschaften in Abhängigkeit der Prozessparameter beim Presshärten sind daher zum heutigen Stand ausgiebig erforscht. Die bestehenden Herausforderungen liegen zum einen in der numerischen Abbildung des Wärmeübergangs und zum anderen im mangelnden Prozessverständnis über die tribologischen Bedingungen.

Aufgrund des temperaturabhängigen Umformverhaltens des Werkstückwerkstoffs ist eine zuverlässige Modellierung des Wärmeübergangs zwischen Werkzeug und Werkstück Voraussetzung für eine robuste numerische Prozessauslegung [26]. Der Wärmeübergang beschreibt den Wärmeaustausch zwischen Werkzeug und Werkstück und ist maßgeblich durch die Flächenpressung sowie die Werkstücktemperatur beeinflusst [63]. Oberflächeneigenschaften wie Rauheit und Dicke der Werkstückbeschichtung verändern den Wärmeübergang [63]. Darüber hinaus zeigen Untersuchungen von Merklein et al. [64] und Boher et al. [65], dass der Wärmeübergang mit größeren Flächenpressungen ansteigt. Ausschlaggebend hierfür ist eine größere wahre Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück aufgrund einer Einglättung der Rauheitsspitzen [66]. Der Einfluss der wahren Kontaktfläche auf den Wärmeübergang wird zum gegenwärtigen Zeitpunkt in der numerischen Prozessauslegung, für die ein mittlerer Wärmeübergangskoeffizient verwendet wird, nicht ausreichend berücksichtigt. Vielmehr wäre für eine physikalische Modellierung des Wärmeübergangs eine Berücksichtigung der Oberflächenrauheit von Werkzeug und Werkstück in der Finite-Elemente-Simulation (FE-Simulation) notwendig.

Das Prozessverständnis über die tribologischen Bedingungen beim Presshärten ist bisher nicht ausreichend, um die Reibverhältnisse örtlich und zeitlich aufgelöst mithilfe der numerischen Simulation abzubilden. Die Reibzahl ist ein wichtiger Eingangsparameter für die numerische Simulation, da diese den Stofffluss des Materials signifikant beeinflusst [67]. Sowohl die Blechausdünnung als auch die resultierende Bauteilqualität ist direkt von der vorherrschenden Reibung abhängig [68]. In der Regel wird

für die Prozessauslegung eine konstante Reibzahl basierend auf dem Reibungsgesetz nach Coulomb verwendet. Um die Vorhersagegenauigkeit kommerzieller FE-Programme zu verbessern, wird ein Reibungsgesetz benötigt, das die Reibung lokal abhängig von Flächenpressung und Temperatur abbildet [67].

2.3 Verschleiß und Reibung beim Presshärten

Aufgrund der hohen Umformtemperaturen beim Presshärten ist ein Einsatz von momentan am Markt vorhandenen Schmierstoffen nicht möglich, da diese keine ausreichende Temperaturbeständigkeit aufweisen. Hierdurch resultieren herausfordernde tribologische Bedingungen, welche im nachfolgenden Abschnitt näher beschrieben werden. Im Anschluss an die Erläuterung des tribologischen Systems wird der aktuelle Stand der Forschung zu kritischen Einflussfaktoren auf die tribologischen Bedingungen analysiert und gängige Prüfverfahren zur Charakterisierung von Reibung und Verschleiß vorgestellt.

2.3.1 Das tribologische System

Tribologie ist die Wissenschaft von aufeinander einwirkenden Oberflächen, die zueinander in Relativbewegung stehen [69]. Hierbei werden Grenzflächenwechselwirkungen zwischen zwei Festkörpern sowie zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen miteinbezogen [70]. Grundsätzlich umfasst die Tribologie die Themengebiete Reibung, Verschleiß und Schmierung [70].

Die Tribologie als Bereich der Technikwissenschaft ist als interdisziplinäres Fachgebiet zur Optimierung mechanischer Technologien durch eine Reduzierung von reibungs- und verschleißbedingten Energie- und Stoffverlusten definiert. Ein tribologisches System umfasst Grundkörper, Gegenkörper, Zwischenstoff und Umgebungsmedium. Der Zwischenstoff kann dabei sowohl als Flüssigkeit oder als Festkörper vorliegen. [69]

Die Wirkflächen von Grund- und Gegenkörper berühren sich auf mikroskopischer Ebene örtlich und zeitlich stochastisch verteilt. Die wahre Kontaktfläche ist demnach die Summe aller Mikrokontaktflächen und dementsprechend kleiner als die geometrische Kontaktfläche [69]. Aufgrund der hohen Werkstücktemperaturen beim Presshärten erfolgt die Umformung schmiermittelfrei, sodass Festkörper- bzw. Grenzschichtreibung vorliegt [19]. Dies resultiert in herausfordernden tribologischen Bedingungen mit hohen Reibungskräften und erhöhtem Werkzeugverschleiß [71]. Während

des Umformprozesses beim Presshärten nehmen die tribologischen Bedingungen daher eine kritische Rolle ein. Neben dem Stofffluss werden die resultierende Bauteilqualität sowie die Verfahrensgrenzen signifikant durch die vorherrschenden Reibungs- und Verschleißbedingungen beeinflusst [68].

2.3.2 Verschleiß- und Reibungsmechanismen

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Prüfverfahren erläutert, die für die Charakterisierung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten eingesetzt werden. Anschließend wird auf die grundlegenden Verschleißmechanismen beim Presshärten eingegangen. Die dominierende Verschleißart ist dabei adhäsiver Verschleiß. In geringerem Maße treten Abrasion, thermische Ermüdung sowie Korrosion auf. Am Ende des Abschnitts werden die bisherigen Kenntnisse über Reibungsmechanismen beim Presshärten dargelegt, welche in starkem Maße von den auftretenden Verschleißmechanismen beeinflusst werden.

Prüfverfahren zur Charakterisierung der Reibungs- und Verschleißbedingungen beim Presshärten

Um Ansätze zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen zu entwickeln, ist es notwendig die grundlegenden Reibungs- und Verschleißmechanismen zu erforschen, die während des Presshärteprozesses auftreten. Voraussetzung dafür ist, dass einzelne Parameter unabhängig voneinander variiert und konstant gehalten werden können. Bruschi et al. [44] unterteilen die für die Charakterisierung der tribologischen Bedingungen gängigen Laborversuche in prozessnahe Versuche, Anlagen zur Materialprüfung, sowie Versuchsanlagen, die den Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück simulieren.

Prozessnahe Versuche zeichnen sich dadurch aus, dass die verwendeten Anlagen und Werkzeuge denen im industriellen Presshärteprozess ähneln. Hierdurch wird der Presshärteprozess abgebildet, ohne die Kinematik des Prozesses zu verändern [44]. Der Vorteil dieser Versuchsart liegt darin, dass Reibungs- und Verschleißbedingungen sehr prozessnah abgebildet werden [44]. Die Reibung wird hierbei in der Regel indirekt, wie zum Beispiel über die Vermessung der Bauteildeformationen ermittelt [72]. Ebenfalls verbreitet ist die inverse Bestimmung der Reibzahl über die FE-Simulation [73]. Untersuchungen mit prozessnahen, vereinfachten Werkzeugen werden zudem für Verschleißanalysen eingesetzt [74]. Der Verschleiß wird dabei anhand von Rauheitskenngrößen, Veränderung der

Matrizenradien sowie Topographieuntersuchungen charakterisiert [75]. Jedoch können mithilfe von prozessnahen Versuchen keine grundlegenden Erkenntnisse gewonnen werden, da zu viele unkontrollierbare Parameter mit einfließen [44].

Anlagen zur Materialprüfung basieren üblicherweise auf Pin-on-Disc bzw. Pin-on-Ball Tests [44]. Beim Pin-on-Disc Test wird ein zylindrischer Stempel unter einer Normalkraft auf eine rotierende Scheibe gedrückt. Der Stempel hat dabei entweder eine sphärische oder flache Kontaktfläche [76]. Mittels Sensoren werden während des Versuchs die Normalkraft sowie die Reibkraft aufgezeichnet, sodass Reibzahlen nach Coulomb ermittelt werden können [77]. Der Vorteil dieser Prüfanlagen liegt im vergleichsweise einfachen Versuchsaufbau [44]. Darüber hinaus kann in kurzer Zeit eine lange Verschleißstrecke erzeugt werden [44]. Da die Kontaktbedingungen zwischen Werkzeug und Werkstück bei diesem Versuchsprinzip jedoch deutlich vom Presshärteprozess abweichen, ist diese Kategorie von Prüfanlagen eher zu einer vergleichenden Untersuchung unterschiedlicher tribologischer Systeme geeignet [44].

Die dritte Kategorie der Prüfverfahren ist dafür konzipiert, den Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück bei Blechumformoperationen möglichst detailliert abzubilden [71]. Bei diesen Versuchen können relevante Prozessparameter wie Flächenpressung, Abziehlänge, Ziehgeschwindigkeit und Werkzeug- bzw. Werkstücktemperatur kontrolliert werden [44]. Die am weitesten verbreiteten Versuchsanlagen in dieser Kategorie sind Streifenziehversuche mit Umlenkung sowie flache Streifenziehversuche [44]. Reibungs- und Verschleißmechanismen, die bei Streifenziehversuchen unter Presshärtebedingungen auftreten, können nach aktuellem Stand der Forschung auf den industriellen Presshärteprozess übertragen werden [78].

Verschleißmechanismen

Hohe Beanspruchungen führen in der Umformtechnik häufig zu vorzeitigem Werkzeugversagen bedingt durch Verschleiß [79]. Dieser wird dabei im Allgemeinen durch tribologische Beanspruchung in Form von Kontakt und Relativbewegung eines Gegenkörpers verursacht [80] und durch unterschiedliche chemische sowie physikalische Prozesse hervorgerufen [81]. Die unterschiedlichen Verschleißmechanismen können anhand der elementaren Wechselwirkungen zwischen den in Kontakt stehenden Werkstoffen untergliedert werden.

Hohe Umformtemperaturen sowie das Fehlen von Schmiermitteln führen dazu, dass Presshärtewerkzeuge erhöhtem Verschleiß ausgesetzt sind [71].

Neben thermischer Ermüdung und Korrosion [71] treten Abrasion und vor allem Adhäsion auf [78]. Während Adhäsion und tribochemische Reaktionen meist auf atomaren und molekularen Wechselwirkungen basieren, ist Abrasion auf mechanische Wechselwirkungen zurückzuführen [69]. Der Hauptverschleiß wird bei industriellen Presshärtewerkzeugen durch einen adhäsiven Materialübertrag der AlSi-Beschichtung des Werkstücks auf die Werkzeugoberfläche verursacht [82]. Dies wurde ebenso in einer Reihe von Laborversuchen wie Pin-on-Disc Tests [83], Napfzugversuchen [84], Flachbahnstreifenziehversuchen [67] und Streifenziehversuchen mit Radius [65] beobachtet. Adhäsiver Verschleiß beim Presshärten wird dabei durch zwei unterschiedliche Wirkmechanismen hervorgerufen (adhäsiver Verschleiß 1. Art und 2. Art), die im Folgenden näher erläutert werden.

Bei adhäsivem Verschleiß 1. Art wird die AlSi-Beschichtung des Werkstücks während der Relativbewegung durch die starke Adhäsionsneigung zwischen Werkstückbeschichtung und Werkzeugwerkstoff abgesichert und haftet an der Werkzeugoberfläche [85]. Bei reinmetallischem Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück entstehen stoffliche Wechselwirkungen auf atomarer und molekularer Ebene [86]. Die dabei hervorgerufenen Bindungen können stärker sein als die Kohäsion im Inneren des Werkstückmaterials [87]. Während der Relativbewegung wird Material vom kohäsiv schwächer zum kohäsiv stärker gebundenen Kontaktpartner übertragen [88]. Demzufolge nimmt adhäsiver Verschleiß 1. Art mit steigender wahrer Kontaktfläche und sinkender Scherfestigkeit der Werkstückbeschichtung zu [89].

Adhäsiver Verschleiß 2. Art entsteht durch eine Ansammlung loser Verschleißpartikel in den Rauheitstälern der Werkzeugoberfläche, die aufgrund der hohen Drücke und Temperaturen verschweißen [65]. Der Abrieb setzt sich dabei aus intermetallischen AlSiFe_x - Partikel der AlSi-Beschichtung und abgelösten Oxidpartikeln der Werkzeugoberfläche zusammen [85]. Adhäsive Materialanhaftungen, die durch Verschleiß 1. Art hervorgerufen werden, verstärken adhäsiven Verschleiß 2. Art, da sich die losen Verschleißpartikel in den neu geschaffenen Rauheitstälern leichter sammeln [85]. Darüber hinaus fördern die Materialanhaftungen die Entstehung loser Verschleißpartikel durch Furchung an der Werkstückoberfläche [82].

Neben Adhäsion entsteht Abrasion bei industriellen Presshärtewerkzeugen in Bereichen, in denen viel Relativbewegung auftritt [82]. Die Ursachen für das Auftreten von Abrasion bei Presshärtewerkzeugen können in drei Wirkmechanismen unterteilt werden [78]. Zum einen kommt es aufgrund der hohen thermischen und mechanischen Beanspruchungen zu einem

Verschmieren der zuvor entstandenen adhäsiven Aufschweißungen. Diese Materialanhaftungen beinhalten unter anderem harte intermetallische Phasen [90] sowie harte Oxide [83] und können durch die Relativbewegung eine Deformation der Werkzeugoberfläche verursachen [78].

Zum anderen können Anhaftungen abbrechen und lose Verschleißpartikel erzeugen. Diese abrasiven Partikel führen daraufhin durch die Relativbewegung zu Kratzern an der Werkzeugoberfläche. Der dritte Wirkmechanismus, durch den Abrasion hervorgerufen werden kann, basiert auf eingebetteten Verschleißpartikeln in der Werkstückoberfläche. Diese können zu deutlich sichtbaren Schleifspuren auf der Werkzeugoberfläche führen. [78]

Reibungsmechanismen

Allgemein wird Reibung als Bewegungswiderstand beschrieben, der bei einer Relativbewegung von zwei sich berührenden Körpern unter Einwirkung einer Normalkraft überwunden werden muss [19]. Abhängig vom tribologischen System werden unterschiedliche Reibungsarten unterschieden, wobei beim Presshärten sowohl Grenzschichtreibung als auch Festkörperreibung auftreten [19]. Als Folge des hohen Verschleißes entstehen während der Umformung beim Presshärten hohe Reibkräfte [91]. Die Reibung kann grundlegend in eine Adhäsionskomponente sowie in eine Furchungskomponente unterteilt werden [71].

Die Adhäsionskomponente der Reibung ist maßgeblich durch die Kräfte definiert, die zum Überwinden der Adhäsion oder zum Abscheren der Beschichtung aufgebracht werden müssen. Die Adhäsionskraft ist dabei direkt proportional zur wahren Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück. Daher geht eine niedrige Härte mit einer Erhöhung der Reibung einher, da Rauheitsspitzen leichter eingeglättet werden und die wahre Kontaktfläche steigt. Darüber hinaus führt eine hohe Scherfestigkeit zu höherer Reibung. [89]

Untersuchungen von Kondratiuk et al. [74] zeigen den Einfluss der Adhäsionskomponente auf die Reibung bei Streifenziehversuchen. Zu Beginn eines Streifenziehversuchs wurden hohe Reibkräfte gemessen, die mit fortschreitender Ziehlänge auf ein konstantes Niveau absinken. Dies wird damit begründet, dass zu Beginn des Versuchs ein erhöhter Materialtransfer stattfindet. Weitere Untersuchungen von Venema et al. [67] zeigten ebenfalls, dass bei Streifenziehversuchen mit einem neuen Werkzeug zu Beginn hohe Reibzahlen mit einem erhöhten Materialtransfer einhergehen. Bei Werkzeugen, die eine Adhäsionsschicht auf der Oberfläche hatten, wurden hingegen niedrigere und konstante Reibzahlen gemessen.

Die Furchungskomponente ist durch die Kraft definiert, die für die Deformation der Werkstückbeschichtung notwendig ist. Durch Rauheitsspitzen sowie adhäsiven Verschleiß auf der Werkzeugoberfläche kommt es während der Relativbewegung zu einer signifikanten Furchung des Werkstücks, durch die erhöhte Reibkräfte resultieren. [92]

2.3.3 Einflussfaktoren auf die tribologischen Bedingungen

Nachdem auf die grundlegenden Reibungs- und Verschleißmechanismen beim Presshärten eingegangen wurde, werden im folgenden Abschnitt die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die tribologischen Bedingungen beschrieben. Diese lassen sich in prozesseitigen, werkstückseitigen und werkzeugseitigen Einfluss einteilen.

Prozesseitiger Einfluss

Die tribologischen Bedingungen beim Presshärten werden signifikant durch die sich während der Umformung zeitlich und örtlich verändernden Prozessparameter beeinflusst. Der prozesseitige Einfluss kann demnach untergliedert werden in den Einfluss der Werkstück- sowie Werkzeugtemperatur, der Flächenpressung sowie der Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück.

Sowohl adhäsiver als auch abrasiver Verschleiß werden durch die Werkstücktemperatur beeinflusst. Abhängig von der Werkstücktemperatur dominieren unterschiedliche Verschleißmechanismen. Bei Werkstücktemperaturen zwischen 500 und 700 °C tritt vermehrt adhäsiver Verschleiß auf, der mit steigenden Temperaturen zunimmt [67]. Dies ist durch einen Anstieg der Diffusionsrate zwischen den Atomen bei hohen Temperaturen begründet [93]. Hierdurch kommt es zu einer verstärkten Diffusion der Atome in den Kontaktflächen, sodass starke chemische Bindungen entstehen können [93]. Zudem steigt die Duktilität des Halbzeugs bei höheren Temperaturen an, sodass Oberflächenunebenheiten leichter eingeglättet werden und die wahre Kontaktfläche zunimmt [72]. Bei Werkstücktemperaturen über 700 °C beginnt Abrasion Adhäsion als dominierenden Verschleißmechanismus abzulösen [77]. Die hohen Temperaturen führen zu einer verringerten Oberflächenhärte des Werkzeugs und zu Oxidation an der Werkzeugoberfläche, durch die zusätzliche Verschleißpartikel entstehen [77]. Ferner bilden sich bei diesen hohen Temperaturen harte Fe-Al-Zwischenschichten in der Werkstückbeschichtung [94]. Diese können die gleiche Härte [32] oder sogar höhere Härtewerte [71] als das Werkzeug erreichen. In der Folge tritt vermehrt Abrasion durch lose Partikel auf,

die zusätzlich dadurch verstärkt wird, dass Verschleißpartikel in die weiche Werkstückbeschichtung eingebettet werden und zu Schleifspuren an der Werkzeugoberfläche führen [78]. Ab einer Werkstücktemperatur von 800 °C tritt hauptsächlich Abrasion auf [77].

Darüber hinaus wirkt sich die Werkstücktemperatur auf die vorherrschenden Reibverhältnisse aus. Eine Vielzahl der in Literatur veröffentlichten Untersuchungen beschreibt zunächst ein Absinken der Reibzahl mit steigenden Werkstücktemperaturen bis zu 600 °C [67]. Ursache hierfür ist eine reduzierte Scherfestigkeit der Beschichtung mit steigenden Temperaturen [91]. Zudem sinkt die Festigkeit des Werkstücks bzw. der AlSi-Beschichtung mit steigenden Temperaturen, sodass weniger Energie für die Deformation der Rauheitsspitzen auf der Werkstückoberfläche aufgebracht werden muss [77]. Vilaseca et al. [71] konnten in Untersuchungen dieselben Feststellungen machen. Ein weiterer Erklärungsansatz für die trotz steigendem Werkzeugverschleiß sinkende Reibung ist die Bildung einer schmierenden Oxidschicht auf der Werkstückoberfläche infolge der Temperaturerhöhung [95]. Hardell et al. [18] stellten auf der Werkstückoberfläche ebenfalls kompakte Schichten aus Oxiden und abrasiven Partikeln bei höheren Temperaturen fest, welche die Adhäsionskraft verringern und folglich reibungsreduzierend wirken. Werkstücktemperaturen von über 600 °C führen hingegen zu höheren Reibkräften [96]. Dies wurde ebenso in Streifenziehversuchen von Ademaj et al. [97], Medea et al. [77] und Venema et al. [67] festgestellt und ist auf den erhöhten adhäsiven Verschleiß zurückzuführen [93].

Neben der Temperatur des Werkstücks beeinflusst auch die Werkzeugtemperatur die tribologischen Bedingungen beim Presshärten. Zum einen wirkt sich die Werkzeugtemperatur auf die Abkühlung des Bauteils aus [98] und hat somit zunächst indirekt einen Einfluss auf das Reibungs- und Verschleißverhalten. Zum anderen führt ein Anstieg der Werkzeugtemperatur bei Streifenziehversuchen von Wang et al. [99] zu verstärktem adhäsivem Verschleiß und damit zu höheren Reibkräften. Weitere Untersuchungen, die den Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die tribologischen Bedingungen beim Presshärten analysiert haben, sind zum derzeitigen Stand nicht bekannt.

Die Flächenpressung ist ein weiterer Einflussfaktor, der Verschleiß und Reibung beeinflusst. Sowohl Adhäsion [85] als auch Abrasion [100] werden mit steigender Flächenpressung verstärkt. Hinsichtlich des Einflusses der Flächenpressung auf die Reibung sind in der Literatur jedoch widersprüchliche Ergebnisse zu finden. Bei Streifenziehversuchen von Dessain et al.

[101] führte eine Erhöhung der Flächenpressung von 10 auf 25 bzw. 50 MPa zu keiner Veränderung der Reibzahl. Zum gleichen Ergebnis kommen Kondratiuk et al. [74]. Aufgrund der relativ hohen Messchwankungen konnte bei Streifenziehversuchen mit 12,5 und 20 MPa kein signifikanter Einfluss der Flächenpressung festgestellt werden. Im Widerspruch dazu stehen Untersuchungen von Borsetto et al. [102], bei denen mithilfe von Pin-on-Disc Tests und Napfzugversuchen geringere Reibkräfte mit steigender Flächenpressung gemessen wurden. Ghiotti et al. [91] analysierten ebenfalls mit Pin-on-Disc Tests Flächenpressungen von 5, 15 und 25 MPa. Hierbei wurde eine vermehrte Einglättung der Werkstückoberfläche mit steigender Flächenpressung beobachtet. Dies führt dazu, dass das Werkzeug über eine glattere Oberfläche gleitet und die Reibung sinkt [91]. Hernandez et al. [95] stellten ebenso fest, dass das Reibverhalten durch die vorliegenden Kontaktspannungen beeinflusst wird. Bei Pin-on-Disc Tests mit 2 und 4 MPa ging zunächst eine Reibungsreduzierung mit steigenden Flächenpressungen einher. Sie begründeten dies mit einer verstärkten Furchenbildung auf der Werkstückoberfläche infolge der gestiegenen mechanischen Belastung. Innerhalb dieser Furchen sammelt sich Abrieb und führt zur Bildung einer verschleißreduzierenden Schutzschicht auf der Werkstückoberfläche. Ein weiterer Anstieg der Flächenpressung auf 6 MPa führte zu einem verstärkten Aufbrechen der Oxidschicht. Hierdurch entstehen lose Oxidpartikel, die Fremdkörperabration an der Werkzeugoberfläche verursachen und damit die Reibung erhöhen können [95].

Ebenfalls widersprüchlich sind die Erkenntnisse in Bezug auf den Einfluss der Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück. Untersuchungen auf Basis von Streifenziehversuchen zeigen, dass adhäsiver Verschleiß bei 25 mm/s größer ist als bei 75 mm/s Ziehgeschwindigkeit [103]. Dies wird durch das zeitabhängige Diffusionsverhalten der Atome begründet [103]. Bei Pin-on-Disc Tests von Borsetto et al. [102] wurde hingegen keine Veränderung der Reibung bei einem Anstieg der Geschwindigkeit von 3 auf 6 mm/s festgestellt. Darüber hinaus zeigten Streifenziehversuche mit 20, 60 und 120 mm/s keinen Zusammenhang zwischen Ziehgeschwindigkeit und Reibzahl [71]. Nach Osakada et al. [104] bewirkt eine erhöhte Pressengeschwindigkeit zwar eine bessere Umformbarkeit, dies wird jedoch auf die zeitabhängige Abkühlung des Bauteils zurückgeführt.

Werkstückseitiger Einfluss

Nachdem zuvor der aktuelle Kenntnisstand in Bezug auf den Einfluss der Prozessparameter auf Verschleiß und Reibung beim Presshärten dargelegt wurde, wird im Folgenden der werkstückseitige Einfluss erläutert. Hierbei

haben speziell die Wärmebehandlung bzw. die Auswirkungen der Wärmebehandlung auf die Werkstückbeschichtung signifikanten Einfluss auf das tribologische Einsatzverhalten. Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf dem direkten Presshärteprozess liegt, ist der folgende Überblick über den Einfluss des Werkstücks auf das Halbzeug 22MnB5 mit AlSi-Beschichtung beschränkt.

Bei der Wärmebehandlung des Werkstücks können die Ofentemperatur sowie die Verweilzeit im Ofen variiert werden. Zu niedrige Ofentemperaturen und zu kurze Haltezeiten führen zu instabilem Reibverhalten. Pin-on-Disc Tests führten bei einer Ofentemperatur von 700 °C und unterschiedlichen Haltezeiten von bis zu 20 min unabhängig von der Haltezeit zu starkem adhäsivem Verschleiß und instabilem Reibverhalten. Bei einer Erhöhung der Ofentemperatur auf 900 °C wurden hingegen ab einer Haltezeit von 4 min moderater adhäsiver Verschleiß sowie konstante Reibzahlen gemessen. [105]

Weitere Untersuchungen stellten eine höhere Reibung mit steigenden Ofentemperaturen bei 850, 925 und 1000 °C fest [99]. In Bezug auf den Einfluss der Haltezeit bei ausreichender Ofentemperatur sind in der Literatur widersprüchliche Erkenntnisse zu finden. Zu kurze Verweilzeiten bergen demzufolge das Risiko, dass nicht genug Eisen aus dem Grundmaterial in die Beschichtung diffundiert, wodurch erhöhter adhäsiver Verschleiß resultiert [14]. Ein Anstieg der Austenitisierungszeit zwischen 5 und 20 min führte bei Untersuchungen von Merklein et al. [106] zu einer Reibungsreduzierung. Im Gegensatz dazu hatte bei Pin-on-Disc Tests von Pelcastre et al. [105] eine Verlängerung der Verweilzeit im Ofen von 4 min auf 20 min keinen signifikanten Einfluss auf das tribologische Einsatzverhalten. Vilaseca et al. [71] stellten darüber hinaus sogar einen Anstieg der Reibung mit längerer Austenitisierungszeit fest.

Der Einfluss der Wärmebehandlung auf das tribologische Einsatzverhalten des Werkstücks ist durch die Ausbildung der Beschichtung während der Wärmebehandlung begründet. Während das Werkstück im Ofen ist, diffundiert Eisen aus dem Grundmaterial in die AlSi-Beschichtung, sodass sich eine temperatur- und verschleißbeständige Werkstückbeschichtung ausbildet [99]. Diese besteht infolge der Wärmebehandlung aus mehreren AlSiFe_x-Lagen [85]. Zu Beginn der Wärmebehandlung ist der Hauptbestandteil der Werkstückbeschichtung FeAl₂ [99]. Innerhalb der Beschichtung bilden sich unterschiedliche Fe_xAl_ySi_z-Phasen aus, die zum Teil die Einsatzhärte von Presshärtewerkzeugen überschreiten können [32].

Diese intermetallischen Verbindungen unterscheiden sich in ihrer Mikrostruktur, den mechanischen sowie den thermischen Eigenschaften. Mit steigender Temperatur diffundiert mehr Eisen aus dem Substrat in die Beschichtung. In der Folge kommt es hauptsächlich zur Ausbildung von zwei unterschiedlichen intermetallischen Phasen. Der Großteil der FeAl_2 -Verbindungen wird in weichere FeAl -Verbindungen umgewandelt. Während Bruchstücke der FeAl_2 -Lage an der Oberfläche der Beschichtung bleiben und zur Bildung einer reibungsreduzierenden Schicht führen können, fördert die weichere FeAl -Lage die Entstehung von adhäsivem Verschleiß. [99]

Bedingt durch die hohen thermischen und mechanischen Belastungen während des Presshärteprozesses können Teile der Beschichtung herausbrechen. [107] Die herausgebrochenen Verschleißpartikel verstärken die Entstehung von Abrasion [32] sowie adhäsiven Verschleiß 2. Art. [85]

Werkzeugseitiger Einfluss

Neben den prozesseitigen und werkstückseitigen Einflussfaktoren nimmt das Werkzeug eine zentrale Rolle in Bezug auf die tribologischen Bedingungen beim Presshärten ein. Basierend auf dem aktuellen Kenntnisstand der Forschung wird im Folgenden der Einfluss des Werkzeugwerkstoffs, der Werkzeughärte, der Werkzeugoberfläche sowie von Werkzeugbeschichtungen erläutert.

Das Reib- und Verschleißverhalten ist allgemein durch die chemische Zusammensetzung, die Wärmeleitfähigkeit sowie Härte eines Werkstoffs beeinflusst [69]. Hardell et al. [108] analysierten das Reib- und Verschleißverhalten von unterschiedlichen unbehandelten sowie plasmanitrierten Werkzeugwerkstoffen bei erhöhten Temperaturen. Hierbei wurde kein Einfluss der chemischen Zusammensetzung des Werkzeugwerkstoffs auf den Verschleiß festgestellt. Pin-on-Disc Tests mit zwei unterschiedliche Werkzeugstählen von Gracia-Escosa et al. [109] zeigten ebenfalls keinen Einfluss auf Reibung und Verschleiß. Boher et al. [65] analysierten das tribologische Einsatzverhalten von drei unterschiedlichen Werkzeugstählen bei Streifenziehversuchen mit Umlenkung. Die Versuche lassen die Vermutung zu, dass der Verschleiß bzw. die Art des Verschleißes beim Presshärten durch die chemische Zusammensetzung beeinflusst wird. Werkzeugstahl mit harten und großen Ti-Ausscheidungen nahe der Oberfläche tendiert eher zu Abrasion, während kleinere Ti-Ausscheidungen im Werkzeugstahl adhäsiven Verschleiß begünstigen. Keine der veröffentlichten Studien zeigt jedoch klare Ursachen-Wirkzusammenhänge zwischen

der chemischen Legierung und dem resultierenden Reib- und Verschleißverhalten.

Beide Verschleißarten, sowohl Abrasion als auch Adhäsion, werden durch die Werkzeughärte beeinflusst. Insbesondere bei höheren Flächenpressungen, nimmt die Bedeutung der Werkzeughärte zu. Bei Werkzeuoberflächen mit höherer Härte wird Abrasion am Werkzeug reduziert. Darüber hinaus sinkt die Adhäsionsneigung von Metallen mit steigenden Härtewerten. [69]

Der Einfluss der Oberflächenrauheit wurde von Plecastre et al. [110] anhand polierter, geschliffener sowie gefräster Oberflächen analysiert. Bei Flächenpressungen von 10 MPa hatte die Rauheit einen signifikanten Einfluss auf Reibung und Verschleiß. Oberflächen mit größerer Rauheit führten dabei zu höherer Reibung. Dies ist dadurch begründet, dass sich in den Rauheitstälern Abrieb ansammelt und zu Aufschweißungen (adhäsiver Verschleiß 2. Art) führt. Bei höheren Flächenpressungen von 20 MPa wurde kein Einfluss der Oberflächenrauheit auf Reibung und Verschleiß festgestellt. Streifenziehversuche von Azushima et al. [111] zeigten im Gegensatz dazu auch bei einer Flächenpressung von 5 MPa keinen Einfluss der Rauheit auf die Reibung. Neben der Rauheit ist die Bildung von Oxidschichten an der Werkzeuoberfläche ein weiterer Einflussfaktor auf das tribologische Verhalten. Aus der Literatur ist bekannt, dass Oxidschichten an der Werkzeuoberfläche Reibung- und Verschleiß beeinflussen [112]. Durch die Bildung von Oxidschichten auf der Werkzeuoberfläche wird adhäsiver Verschleiß und zunächst auch Abrasion reduziert [113]. Jedoch besteht speziell bei höherer Flächenpressung die Gefahr, dass diese Oxidschichten aufbrechen und lose Oxidpartikel Abrasion verstärken können [95].

Um den Werkzeugverschleiß gezielt zu verringern, wurde eine Reihe von Studien zum Reib- und Verschleißverhalten von Werkzeugbeschichtungen durchgeführt. Für das Presshärten eignen sich aufgrund ihrer Temperaturbeständigkeit insbesondere PVD-Beschichtungen [114]. Die Beschichtungen beinhalten in der Regel neben N als Reaktionsgas die Elemente Ti, Al und Cr in unterschiedlichen Anteilen [115]. Bei experimentellen Untersuchungen von Hardell et al. [89] zeigten Werkzeuge mit TiAlN-Beschichtung signifikant weniger adhäsiven Verschleiß als unbeschichtete Werkzeuge. Auch bei Streifenziehversuchen führte die Applikation von TiN- und TiAlN-Beschichtungen zu einer deutlichen Reibungs- und Verschleißreduzierung [116].

Untersuchungen auf Basis eines Pin-on-Disc Tests zeigten hingegen keine Verschleißreduzierung bei AlCrN- und TiAlN-beschichteten Werkzeugen.

Die beschichteten Oberflächen wiesen jedoch vornehmlich Adhäsion 1. Art auf. Dies könnte an der hohen chemischen Affinität zwischen der AlSi-Beschichtung des Werkstücks und den Werkzeugbeschichtungen liegen, welche beide Al-Anteile in ihrer chemischen Legierung aufweisen. Neben PVD Beschichtungen verbessern auch plasmanitrierte Oberflächen das Verschleißverhalten. Dieser Effekt wird auf die Entstehung einer Oxidschicht auf der Werkzeugoberfläche infolge des Nitriervorgangs zurückgeführt, die den direkten Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück verhindert, wodurch Adhäsion reduziert wird. [85]

Ein weiterer vielversprechender Ansatz zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten ist der Einsatz von diamantähnlichen Kohlenstoff-Beschichtungen (DLC-Beschichtungen). Werkzeuge mit a-C:H und a-C:H:N Beschichtungen weisen sowohl in Bezug auf Abrasion als auch Adhäsion einen signifikant geringeren Verschleiß auf als unbeschichtete Werkzeuge. [117]

Überblick über die Einflussfaktoren

Die tribologischen Bedingungen beim Presshärten werden durch prozessseitige, werkstückseitige sowie werkzeugseitige Einflussfaktoren signifikant beeinflusst. In der Literatur sind hierzu teilweise widersprüchliche Aussagen zu finden. In Bild 1 werden die Erkenntnisse bezüglich der unterschiedlichen Einflüsse zusammengefasst.

		Verschleiß	Reibung	Quellen
Prozesseitiger Einfluss	Werkstücktemperatur	↑	↓ (< 600 °C) ↑ (> 600 °C)	[18] [32] [67] [71] [72] [77] [78] [91] [93] [94] [95] [96]
	Werkzeugtemperatur	↑	↑	[98] [99]
	Flächenpressung	↑	↑↓	[74] [85] [91] [95] [100] [101] [102]
	Relativgeschwindigkeit	↓	↑↓	[71] [102] [103] [104]
Werkstückseitiger Einfluss	Ofentemperatur	↓	↑	[99] [105]
	Haltezeit	↑↓	↑↓	[14] [71] [85] [105] [106] [107]
Werkzeugseitiger Einfluss	Werkstoff	↑↓	↑↓	[65] [69] [108] [109]
	Härte	↓	o	[69]
	Oberflächenrauheit	↑↓	↑↓	[110] [111]
	Beschichtungen	↑↓	↑↓	[85] [89] [114] [116] [117]

↑↓ Nicht eindeutig ↓ Verringerung ↑ Anstieg o Keine Erkenntnisse

Bild 1: Übersicht der Erkenntnisse aus der Literatur hinsichtlich der Einflussfaktoren auf die tribologischen Bedingungen beim Presshärten

2.4 Zusammenfassende Bewertung

Presshärten von höchstfesten Bor-Mangan Stählen bietet die Möglichkeit, die Sicherheit moderner Fahrzeuge zu erhöhen und gleichzeitig das Gewicht der Karosseriebauteile zu reduzieren. Durch die erreichbaren Festigkeiten von bis zu 1500 MPa hat sich der Presshärteprozess speziell für die Herstellung sicherheitsrelevanter Bauteile, wie zum Beispiel der B-Säule, etabliert. Bedingt durch die hohen Umformtemperaturen ist der Einsatz von konventionellen Schmierstoffen nicht möglich, sodass während der Umformung hohe Reibkräfte auftreten und Presshärtewerkzeuge erhöhtem Verschleiß ausgesetzt sind. Dies reduziert sowohl die Standmenge der Werkzeuge als auch die resultierende Bauteilqualität.

Um Ansätze zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten zu entwickeln, werden die Reibungs- und Verschleißbedingungen mit unterschiedlichen Prüfverfahren untersucht. Die bekanntesten Kategorien dieser Laborversuche sind Pin-on-Disc Tests sowie Streifenziehversuche, wobei speziell letztere gut geeignet sind, den Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück möglichst prozessnah abzubilden. Darüber hinaus zeichnen sie sich durch eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse auf prozessnahe Geometrien aus. Bestehende Streifenziehanlagen basieren auf dem Prinzip des zweiseitigen Streifenziehversuchs, bei dem das Werkstück zwischen zwei Reibbacken gezogen wird. Aufgrund des Versuchsaufbaus ist eine aktive Temperierung des Werkstücks während des Versuchs nicht möglich, sodass das Werkstück bereits vor Kontakt mit dem Werkzeug auskühlt. Daher sind die beschriebenen Streifenziehanlagen nur bedingt in der Lage den Einfluss der Temperatur auf Reibung und Verschleiß beim Presshärten zu untersuchen.

Der dominierende Verschleißmechanismus ist neben abrasivem Verschleiß vor allem adhäsiver Verschleiß. Dieser wird durch einen Materialübertrag von der Werkstückbeschichtung auf die Werkzeugoberfläche infolge der starken Adhäsionsneigung verursacht. Aufgrund des hohen Verschleißes treten während der Umformung große Reibkräfte auf. Diese setzen sich nach aktuellem Kenntnisstand maßgeblich aus einer Adhäsionskomponente sowie einer Furchungskomponente zusammen.

Sowohl Reibung als auch Verschleiß werden signifikant durch die Prozessparameter beeinflusst. Als einer der Haupteinflussfaktoren auf Reibung und Verschleiß wurde die Werkstücktemperatur identifiziert. Weitere Einflussfaktoren sind die Werkzeugtemperatur, die Flächenpressung sowie die Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück. Speziell bezüglich des Einflusses von Flächenpressung und Relativgeschwindigkeit

auf die tribologischen Bedingungen beim Presshärten sind in der Literatur widersprüchliche Erkenntnisse zu finden, weshalb hier weiterer Forschungsbedarf besteht. Neben den prozessseitigen Einflussgrößen wurde der werkstückseitige Einfluss des üblicherweise verwendeten 22MnB5 mit AlSi-Beschichtung in der Literatur analysiert. Mit steigenden Ofentemperaturen wurden dabei erhöhter Verschleiß sowie ein Anstieg der Reibung beobachtet, während hinsichtlich der Haltezeit widersprüchliche Ergebnisse zu finden sind. Untersuchungen zum werkzeugseitigen Einfluss auf Reibung und Verschleiß fokussierten sich bisher auf die Rauheit der Werkzeugoberfläche sowie auf Werkzeugbeschichtungen. Die Auswirkungen des Werkzeugwerkstoffs wurden bisher nur vereinzelt analysiert. Grundlegende Ursache-Wirkzusammenhänge zwischen den Werkzeugeigenschaften sowie dem resultierenden Einsatzverhalten sind jedoch nach aktuellem Stand nicht bekannt, sodass hieraus keine neuen Erkenntnisse gewonnen werden können. Die veröffentlichten Studien basieren zudem zu einem Großteil auf Pin-on-Disc Tests, deren Ergebnisse sich ohne Verifizierung an einer prozessrelevanten Bauteilgeometrie nur bedingt auf den industriellen Presshärteprozess übertragen lassen.

Für die gezielte Entwicklung von Maßnahmen zur Verschleißreduktion bei industriellen Presshärte Werkzeugen ist ein umfassendes Prozessverständnis in Bezug auf Reibung und Verschleiß notwendig. Hierzu fehlt ein Versuchsstand, der eine aktive Temperierung des Werkstücks während der Versuchsdurchführung sowie eine prinzipielle Übertragbarkeit der Ergebnisse erlaubt. Darüber hinaus müssen die tribologischen Bedingungen beim Presshärten aufgrund der vielen Einflussfaktoren mithilfe einer Versuchsmethodik charakterisiert werden, die sowohl Reibverhalten als auch Verschleißverhalten analysiert, um Wechselwirkungen zwischen den Reibungs- und Verschleißmechanismen zu identifizieren und ein tiefgreifendes Prozessverständnis zu schaffen. Dieses kann als Grundlage dienen, werkzeugseitige Einflussfaktoren auf die tribologischen Bedingungen beim Presshärten zu identifizieren und Ursache-Wirk-zusammenhänge zwischen den Werkzeugeigenschaften sowie dem resultierenden Einsatzverhalten abzuleiten.

3 Zielsetzung und methodische Vorgehensweise

Vor dem Hintergrund der steigenden Bedeutung pressgehärteter Komponenten für moderne Fahrzeugkarosserien gilt es, die Prozessrobustheit zu erhöhen und den Verschleiß der Werkzeuge zu reduzieren. Daher ist das übergeordnete Forschungsziel der vorliegenden Dissertation die Erarbeitung von prozessseitigen sowie werkzeugseitigen Maßnahmen zur Verringerung von Reibung und Verschleiß beim Presshärten. Hierdurch wird ein Beitrag zur Steigerung der Prozessrobustheit sowie zur Erhöhung der resultierenden Bauteilqualität geleistet. Um Maßnahmen zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen gezielt zu analysieren, ist ein umfassendes Prozessverständnis in Bezug auf die grundlegenden Reibungs- und Verschleißmechanismen sowie den Einfluss der Werkzeugeigenschaften auf diese notwendig. In diesem Kontext werden Ursache-Wirk-zusammenhänge zwischen den Werkzeugeigenschaften und dem resultierenden Reib- und Verschleißverhalten ermittelt. Mithilfe dieser Kenntnisse wird ein Prozessverständnis erarbeitet, auf dessen Basis prozessseitige sowie werkzeugseitige Maßnahmen zur Verringerung von Reibung und Verschleiß bei Presshärte Werkzeugen abgeleitet werden. Die angewandte Vorgehensweise ist in Bild 2 schematisch dargestellt.

Zunächst wird eine Versuchsmethodik zur Analyse der kritischen Einflussfaktoren auf Reibung und Verschleiß basierend auf Streifenziehversuchen unter Presshärtebedingungen erarbeitet. Vor diesem Hintergrund nehmen die Prozessparameter Temperatur, Flächenpressung sowie Umformgeschwindigkeit eine zentrale Rolle ein. Hierbei ist eine kritische Anforderung, dass einzelne Prozessparameter isoliert voneinander variiert werden können, um deren Einfluss gezielt zu untersuchen. Darüber hinaus soll mithilfe der Versuchsmethodik sowohl das Reib- als auch das Verschleißverhalten charakterisiert werden. Anhand des Versuchsaufbaus wird anschließend ein umfassendes Prozessverständnis hinsichtlich Reibung und Verschleiß beim Presshärten erarbeitet. Im Vordergrund stehen die grundlegenden Mechanismen, welche die hohe Reibung sowie den hohen Verschleiß während der Umformung beim Presshärten verursachen. Hierzu wird der Einfluss der Prozessparameter Werkzeugtemperatur, Werkstücktemperatur, Flächenpressung und Geschwindigkeit auf Reibung und Verschleiß mit Flachbahnstreifenziehversuchen unter Presshärtebedingungen analysiert.

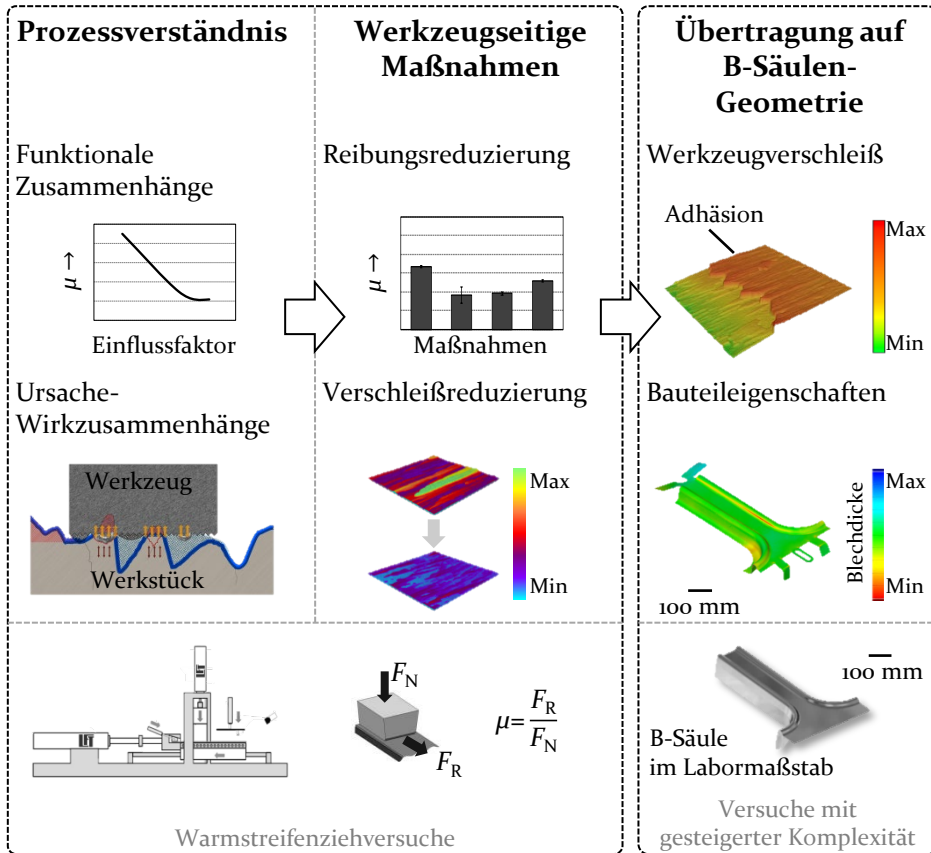


Bild 2: Schematische Darstellung der Vorgehensweise

Basierend auf diesen Erkenntnissen wird im Anschluss der werkzeugseitige Einfluss auf die zuvor identifizierten Reibungs- und Verschleißmechanismen untersucht. Das tribologische Einsatzverhalten wird für drei Werkzeugwerkstoffe charakterisiert, die sich signifikant in ihrer chemischen Legierung und der thermischen Leitfähigkeit unterscheiden. Die Werkzeugoberflächen werden mittels Polieren, Schleifen sowie HSC-Fräsen bearbeitet, um den Einfluss der Rauheit zu analysieren. Der Einfluss der Werkzeughärte wird untersucht, indem unterschiedliche Strategien der Wärmebehandlung für die Werkzeugwerkstoffe angewendet werden. Zudem wird das Reib- und Verschleißverhalten von drei PVD-Beschichtungen erforscht. Mithilfe der ermittelten Zusammenhänge zwischen den Werkzeugeigenschaften und dem resultierenden Reib- und Verschleißverhalten werden grundlegende Ansätze zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß bei Presshärtewerkzeugen identifiziert und anhand einer Einflussmatrix bewertet.

Abschließend werden die im Streifenziehversuch gewonnenen Erkenntnisse auf eine Bauteilgeometrie mit höherer Komplexität übertragen. Um die Wirksamkeit der identifizierten Ansätze zur Reduzierung der Reibung sowie zur Verbesserung der Verschleißbeständigkeit von Presshärte Werkzeugen zu verifizieren, wird exemplarisch eine B-Säulen-Geometrie im Labormaßstab abgepresst. Anhand der Bauteilabpressungen wird die Übertragbarkeit der am Flachbahnstreifenziehversuch untersuchten Ansätze auf eine industriennahe Bauteilgeometrie bewertet.

4 **Verwendete Werkstoffe, Versuchsanlagen und Methoden**

Im folgenden Kapitel werden die in der Arbeit untersuchten Werkstück- und Werkzeugwerkstoffe sowie die eingesetzten Werkzeugbeschichtungen beschrieben. Weiterhin werden die zur Bauteilcharakterisierung eingesetzten Messeinrichtungen erläutert. Zudem werden der für die Wärmebehandlung der Werkstücke verwendete Ofen und das für die Verifizierung der Ergebnisse genutzte B-Säulen-Werkzeug im Labormaßstab vorgestellt.

4.1 **Versuchswerkstoffe**

Die Eigenschaften von Werkzeug- und Werkstückwerkstoffen haben signifikanten Einfluss auf die tribologischen Bedingungen. In diesem Abschnitt werden die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Versuchswerkstoffe näher beschrieben. Zunächst wird auf den eingesetzten Werkstückwerkstoff eingegangen. Zudem werden die unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffe sowie die eingesetzten Werkzeugbeschichtungen erläutert.

4.1.1 **Werkstückwerkstoff 22MnB5 mit AlSi-Beschichtung**

Als Werkstückwerkstoff wurde 22MnB5 mit AlSi-Beschichtung und einer Blechdicke von 1,5 mm eingesetzt. Dieser hat sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt als Standardwerkstoff für Presshärteanwendungen in der Automobilindustrie etabliert und wird speziell für sicherheitsrelevante Bauteile in modernen Fahrzeugkarosserien eingesetzt [39]. Im Anlieferungszustand besitzt der Werkstoff ein feinkörniges, ferritisch-perlitisches Gefüge und eine Härte von 170 HV₁₀ [27].

Die Streckgrenze liegt zwischen 300 MPa und 550 MPa, die Zugfestigkeit zwischen 500 MPa bis 700 MPa mit einer Bruchdehnung von über 20 %. Bei martensitischem Gefüge werden Streckgrenzen von über 1100 MPa sowie Zugfestigkeiten von über 1500 MPa erreicht. Die maximale Härte liegt bei etwa 470 HV₁₀. Mit der Festigkeits- und Härtesteigerung geht eine Reduzierung der Restduktilität auf etwa 5 – 6 % einher. [14]

Die chemische Zusammensetzung des 22MnB5 ist in Tabelle 1 dargestellt. Die AlSi-Beschichtung wird mit 150 g/m² im Schmelztauchverfahren aufgebracht. Die typische Schichtdicke liegt bei 25 µm und schwankt maximal zwischen 19-33 µm [31]. Hierdurch ist der Grundwerkstoff sowohl

gegen Zunderbildung als auch gegen Abkühlung geschützt. Darüber hinaus bietet die Werkstückbeschichtung im Anschluss an die Warmumformung einen Korrosionsschutz durch Barrierewirkung.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung von 22MnB5 gemäß Datenblatt [31]

		Legierungselemente in Gew.-%								
		C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Cr+ Mo	B
22MnB5		0,25	0,4	1,4	0,025	0,01	0,015	0,05	0,50	0,005

4.1.2 Werkzeugwerkstoffe und Werkzeugoberflächen

Für die Untersuchung wurden drei Werkzeugwerkstoffe eingesetzt, die in aktuellen Presshärtewerkzeugen verbaut werden. Als Referenzwerkstoff dient der Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-3 (1.2367) der Firma Böhler. Dieser Werkstoff ist im Bereich des Presshärtens weit verbreitet und kann über eine Vielzahl von Herstellern bezogen werden. Als zweiter Werkstoff wurde der Kaltarbeitsstahl K353 der Firma Böhler ausgewählt, der ebenfalls in Presshärtewerkzeugen eingesetzt wird [118]. Der dritte Werkzeugwerkstoff, Thermodur 2383 Supercool (1.2383), ist ein speziell für das Presshärten entwickelter Stahl der Firma Deutsche Edelstahlwerke [119]. Die genannten Werkstoffe unterscheiden sich signifikant in ihrer chemischen Zusammensetzung, der vom Hersteller empfohlenen Einsatzhärte sowie ihrer thermischen Leitfähigkeit.

Chemische Legierung

Die chemische Zusammensetzung der ausgewählten Werkzeugwerkstoffe ist in Tabelle 2 aufgeführt. Die Angaben entsprechen den Herstellerangaben aus den Datenblättern. Der Referenzwerkstoff 1.2367 hat einen mittleren Cr-Gehalt sowie den höchsten Mo-Gehalt im Vergleich zu den beiden anderen Werkstoffen. Er zeichnet sich durch eine hohe Warmverschleißbeständigkeit, eine gute Härtebarkeit, Anlassbeständigkeit sowie Warmfestigkeit aus [120]. Der Kaltarbeitsstahl K353 hat im Versuchsfeld den größten Cr-Anteil. Darüber hinaus wurden geringe Mengen Si und Al hinzulegiert. Der K353 besitzt eine hohe Zähigkeit sowie adhäsive Verschleißbeständigkeit [118]. Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Werkstoffen weist der Spezialstahl 1.2383 kein Cr, den größten Anteil an Mn sowie als einziger der drei Werkstoffe Ni in seinen chemischen Legierungsbestandteilen auf [119].

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung der Werkzeugwerkstoffe 1.2367 [120], K353 [118] und 1.2383 [119] gemäß Herstellerangaben

	Legierungselemente in Gew.-%							
	C	Cr	Mo	V	Si	Mn	Al	Ni
1.2367	0,38	5,00	2,80	0,55	0,40	0,40	-	-
K353	0,82	8,00	1,60	0,60	0,70	0,40	< 0,1	-
1.2383	0,45	-	1,50	1,50	-	0,90	-	0,90

Mechanische Kennwerte

Aufgrund der Zähigkeit eignet sich 1.2367 als Werkstoff für Stempel und Matrizen in der Halb- bzw. Warmumformung. Die empfohlene Einsatzhärte liegt zwischen 52 – 57 HRC [120]. Der Kaltarbeitsstahl K353 kann Härtewerte von 56 – 61 HRC erreichen [118]. Die im Vergleich geringsten Härtewerte hat der Werkstoff 1.2383 mit einer empfohlenen Einsatzhärte von 48 – 52 HRC [119]. Bild 3 zeigt die Härtewerte der Werkstoffe in Abhängigkeit der Anlasstemperatur.

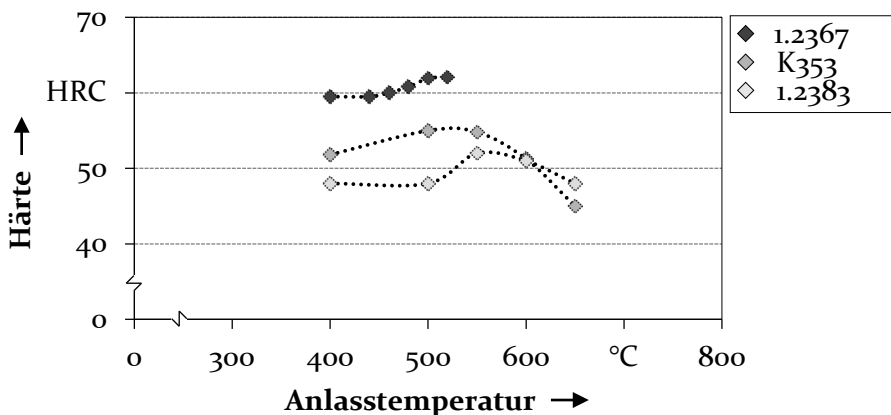


Bild 3: Härte der Werkzeugwerkstoffe 1.2367 [120], K353 [118] und 1.2383 [119]

Thermische Kennwerte

Speziell beim Presshärten ist die Warmfestigkeit ein kritischer Parameter für Werkzeugwerkstoffe. Die Hitzebeständigkeit der beiden Presshärtestähle, 1.2367 und 1.2383, ist bis zu einer Temperatur von 550 °C gegeben. Die Warmfestigkeit für den Kaltarbeitsstahl K353 liegt bei 520 °C. Neben der Warmfestigkeit ist die thermische Leitfähigkeit eine weitere zentrale

Eigenschaft von Werkzeugstählen für das Presshärten. Mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit ist es möglich, die Taktzeiten während des Presshärtens zu reduzieren und gleichzeitig die notwendigen Abkühlraten des Werkstücks zu gewährleisten. Bild 4 gibt einen Überblick über die thermische Leitfähigkeit der untersuchten Werkzeugwerkstoffe in Abhängigkeit der Temperatur.

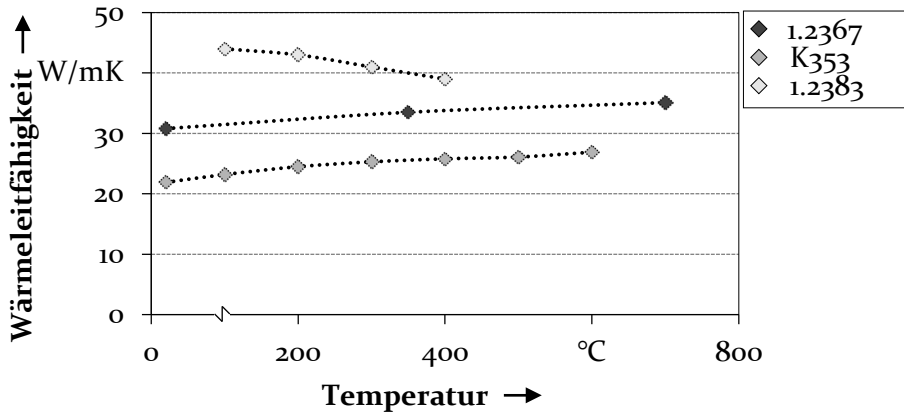


Bild 4: Thermische Leitfähigkeit der Werkzeugwerkstoffe 1.2367 [120], K353 [118] und 1.2383 [119]

Der Werkstoff 1.2383 weist mit 39 – 44 W/mK im Vergleich die höchste Wärmeleitfähigkeit auf. Der Warmarbeitsstahl 1.2367 hat mit 31 W/mK bis 35 W/mK eine mittlere und der Kaltarbeitsstahl K353 mit 22 – 27 W/mK die niedrigste Wärmeleitfähigkeit.

Werkzeugbeschichtungen

Neben den unbeschichteten Grundwerkstoffen wurden Werkzeugbeschichtungen analysiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei sogenannte Physical Vapour Deposition Beschichtungen (PVD-Beschichtungen) der Firma Eifeler untersucht. Bei diesen Beschichtungen werden metallische Bestandteile wie etwa Ti, Cr oder Al unter Einwirkung eines Plasmas bei Temperaturen zwischen 200 – 500 °C mit Stickstoff und Kohlenstoff in Verbindung gebracht [115]. Die so erzeugten Schichten erreichen Härtewerte zwischen 1000 – 3800 HV und Schichtdicken zwischen 1 – 10 µm [115]. Die PVD-Beschichtungen wurden im Duplex-Verfahren aufgebracht, um die Haftfestigkeit der Werkzeugbeschichtung zu erhöhen. Bei diesem Verfahren geht dem eigentlichen Beschichtungsprozess ein Plasmanitrierprozess voraus, wodurch keine störenden Verbindungsschichten zwischen dem

Grundmaterial und der Beschichtung entstehen [121]. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden AlCrTiN-, AlTiN- und CrCN-Beschichtungen aufgrund ihrer hohen Temperaturbeständigkeit und der damit verbundenen Eignung für die Warmumformung gewählt.

Alle drei Beschichtungen weisen signifikant höhere Härtewerte als der unbeschichtete Werkzeugwerkstoff auf. Mit 3400 HV ist AlCrTiN die härteste Beschichtung. Weiterhin ändert sich der Anteil der chemischen Legierungselemente an der Werkzeugoberfläche signifikant infolge des Beschichtungsprozesses. Die CrCN-Beschichtung weist mit bis zu 84 Gew.-% den größten Anteil an Cr auf. Die AlCrTiN-Beschichtung hingegen hat mit einem 34 Gew.-% einen deutlich geringeren Cr-Anteil. Darüber hinaus sind AlCrTiN- und AlTiN-Beschichtungen durch einen im Vergleich zum unbeschichteten Werkzeugwerkstoff hohen Al- und Ti-Anteil gekennzeichnet. Alle Beschichtungen wurden speziell für die Applikation auf Umformwerkzeugen entwickelt und zeichnen sich durch eine hohe Oxidationsbeständigkeit, Abriebfestigkeit und gute Gleiteigenschaften aus [122].

4.2 Messeinrichtungen zur Bauteilcharakterisierung

Bei der Charakterisierung der tribologischen Bedingungen kommt der Analyse der Proben im Anschluss an die Versuchsdurchführung eine entscheidende Bedeutung zu. Um grundlegende Ursache-Wirkzusammenhänge zwischen den Werkzeug- bzw. Werkstückeigenschaften und dem resultierenden tribologischen Verhalten zu identifizieren, ist eine zuverlässige Charakterisierung der Bauteile vor und nach den experimentellen Untersuchungen notwendig. Neben Härtemessungen zur Eingangscharakterisierung wurden insbesondere Verfahren für eine vollumfängliche Charakterisierung der Werkzeug- und Werkstückoberfläche angewendet. Zu diesem Zweck wurden sowohl taktile Prüfverfahren als auch optische Prüfverfahren eingesetzt. Für eine qualitative Untersuchung des Reib- und Verschleißverhaltens wurde ergänzend die Rasterelektronenmikroskopie verwendet.

4.2.1 Härteprüfanlagen

Für die Härtemessungen der Proben wurden zwei unterschiedliche Prüfanlagen verwendet. Die Härtewerte der unbeschichteten Werkzeuge wurden mithilfe des Prüfgeräts Testor 930/250D der Firma Instron Wolpert ermittelt. Hierbei wird die Härte anhand des Tiefenmessverfahrens nach Rock-

well analysiert. Dabei wird der Härtewert aus der Eindringtiefe eines Prüfkörpers ermittelt, der unter normierten Bedingungen in die Probe gedrückt wird. Das Verfahren ist nach der DIN EN ISO 6508 genormt [123].

Aufgrund der hohen Prüfkraft und der damit verbundenen Eindringtiefe ist das Verfahren nach Rockwell nicht für die Prüfung dünner Werkzeugbeschichtungen geeignet. Um eine Verfälschung des Messergebnisses zu vermeiden, wird zur Charakterisierung der eingesetzten PVD-Beschichtungen ein Mikrohärtemessgerät vom Typ Fischerscope HM2000 der Firma Fischer Technology eingesetzt. Während der Härteprüfung wird eine Diamantpyramide mit einem Öffnungswinkel von 136° als Eindringkörper in zuvor metallografisch präparierte Schiffe eingedrückt. Zur Ermittlung der Vickers-Härte wird die definierte Nennkraft von 80 N mit einer Eindringzeit und Haltezeit von insgesamt 20 s aufgebracht. Für die Berechnung der Vickers-Härte wird anschließend der Quotient aus Prüfkraft und Oberfläche des Eindrucks sowie einer Konstanten gebildet. Bei diesem Verfahren lassen sich Beschichtungen mit minimalen Schichtdicken von bis zu 2 μm analysieren.

4.2.2 Perthometer

Die taktile Rauheitsermittlung technischer Oberflächen mittels Tastschnittverfahren ist international standardisiert [124]. Dabei wird ein Messtaster über die zu messende Oberfläche geführt und erfasst ein Liniprofil. In dieser Arbeit wurden die taktilen Rauheitsmessungen mit einem Perthometer vom Typ MarSurf XR 20 der Firma Mahr durchgeführt. Zur Beurteilung der Werkzeugoberflächen im Ausgangszustand wurden die zweidimensionalen Oberflächenkenngrößen R_a und R_z ausgewertet.

R_a ist als der arithmetische Mittenrauwert definiert und mittelt einzelne Spitzen sowie Täler aus dem gemessenen Profil. Die gemittelte Rautiefe R_z ist der Mittelwert aus den Einzelrautiefen von fünf Messstrecken. Diese Werte repräsentieren den gegenwärtigen Standard, sodass eine hohe Vergleichbarkeit zu weiteren wissenschaftlichen Forschungsarbeiten gegeben ist. [125]

4.2.3 Konfokalmikroskop

Da die taktile Oberflächenanalyse keine dreidimensionalen Analysen erlaubt, wurde zur qualitativen sowie quantitativen Charakterisierung der Topographie von Werkzeug und Werkstück das optische konfokale Weißlichtmikroskop μSurf der Firma Nanofocus verwendet. Beim Verfahren der

konfokalen Messtechnik wird ein Lichtstrahl auf der Messoberfläche fokussiert und beim Auftreffen auf der Probe reflektiert. Mithilfe von Blenden wird der Anteil, der innerhalb der Schärfentiefe des Objektivs liegt, auf dem CCD-Chip der Kamera abgebildet. Die Topographie der gemessenen Oberfläche wird bestimmt, indem Aufnahmen aus mehreren Fokusebenen zusammengeführt werden. Hieraus können im Anschluss mithilfe einer Software Höheninformationen zu jedem Bildpunkt gewonnen werden. Für die Analyse der Oberflächen wurde ein 10x Objektiv verwendet. Dies erlaubt die Charakterisierung großer Messflächen, wodurch repräsentative Aussagen getroffen werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wurden qualitative Informationen über das Verschleißverhalten anhand der Topographieaufnahmen der verschlissenen Werkzeugoberflächen gewonnen. Darüber hinaus wurde das adhäsive Verschleißvolumen mithilfe der Topographieaufnahmen quantitativ bestimmt. Die optische Analyse der Werkstückoberflächen im Anschluss an die Versuchsdurchführung wurde genutzt, um grundlegende Reibungsmechanismen zu identifizieren.

4.2.4 Optisches Messsystem ATOS

Zur Digitalisierung der Werkzeug- und Werkstückgeometrie des Demonstratorwerkzeugs (siehe Abschnitt 4.4) wurde das optische Messsystem ATOS der Fa. GOM [126] eingesetzt. Hiermit kann adhäsiver Verschleiß auf der Werkzeugoberfläche erfasst werden. Zudem kann beispielsweise die Blechdickenverteilung abgepresster B-Säulen-Geometrien bestimmt werden. Dabei werden mittels zweier hochauflösender CCD-Kameras Aufnahmen des auf die zu vermessenden Teile projizierten Streifenmusters gemacht. Basierend auf dem physikalischen Prinzip der Triangulation werden für jeden Kamerapixel die 3D-Koordinaten bestimmt. Anschließend wird über numerische Verfahren aus der erfassten Punktwolke ein Polygonnetz generiert. Das Polygonnetz besteht aus Dreieckselementen und stellt die Kontur und die Geometrie des vermessenen Objekts dar. Die Auflösung des Messsystems liegt bei 0,01 mm, sodass eine Änderung der analysierten Kontur mit hoher Genauigkeit erfasst werden kann [126]. Zur optischen Vermessung der Werkstückgeometrien wird in der Regel ein Entwickler-spray zur zerstörungsfreien Oberflächenprüfung eingesetzt, um das Bauteil von Spiegelungen zu befreien [127]. Für die Analyse der Werkzeugoberflächen wurde kein Spray verwendet, um eine Veränderung der Verschleißfläche zu vermeiden.

4.2.5 Rasterelektronenmikroskop

Ergänzend zur optischen Analyse der Werkzeug- sowie Werkstückoberflächen wurde die Rasterelektronenmikroskopie für eine qualitative Beurteilung der Oberflächen herangezogen. Hierfür kommt das Rasterelektronenmikroskop (REM) Philips XL30 SEM zum Einsatz. Anhand der Aufnahmen mit großer Tiefenschärfe können grundlegende Reibungs- und Verschleißmechanismen in der Wirkfuge zwischen Werkzeug und Werkstück identifiziert werden und zu einer Verbesserung des Prozessverständnisses beitragen. Zur Charakterisierung der Werkzeugbeschichtungen wurden zusätzlich energiedispersive Röntgenanalysen (EDX) anhand des Elektronenmikroskops JSM-6400 der Firma JEOL eingesetzt. Hierbei trifft ein Elektronenstrahl auf die zu untersuchende Oberfläche, wodurch die Atome der Probe ein charakteristisches Röntgenspektrum emittieren. Zusammen mit der Strahlung, die an den energiedispersiven Detektoren gemessen wurde, kann so die chemische Zusammensetzung der untersuchten Fläche bestimmt werden.

4.3 Glüh- und Härteofen

Grundvoraussetzung für die Durchführung von Laborversuchen unter Presshärtebedingungen ist die Austenitisierung des 22MnB5 oberhalb der werkstoffspezifischen Ac_3 -Temperatur von 850 °C [128]. In dieser Arbeit wurde für die Wärmebehandlung der Werkstücke der elektrisch betriebene Glüh- und Härteofen vom Typ ME 87/13 der Firma RHODE verwendet. Der Ofen ist für einen maximalen Temperaturbereich von 1300 °C konzipiert [129]. Eine dreiseitig umlaufende Tragrohrbeheizung sorgt für eine gleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb des Brennraums. Zugleich vermindert ein zweischichtiger Isolationsaufbau die entstehende Abstrahlungswärme. Das Werkstückmaterial wurde bei einer Ofentemperatur von 930 °C für 6 Minuten wärmebehandelt. Dies entspricht den Herstellerangaben für die Wärmebehandlung, die auch in der Industrie bei Bauteilen mit einer Blechstärke von 1,5 mm verwendet werden.

4.4 B-Säulen-Werkzeug im Labormaßstab

Die Erarbeitung eines Prozessverständnisses sowie die Untersuchung von werkzeugseitigen Maßnahmen zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß beim Presshärten erfolgten auf Basis des Flachbahnstrieferenzversuchs. Um die Übertragbarkeit der dabei gewonnenen Erkenntnisse auf eine Bauteilgeometrie mit erhöhter Komplexität zu zeigen, wurden

Bauteile mit einem B-Säulen Werkzeug im Labormaßstab unter Presshärtebedingungen abgepresst. Die Bauteilabpressungen wurden mit einer dreifachwirkenden Universalpresse des Typs Hydrap HPDZb 630 mit einer maximalen Stößelkraft von 6300 kN durchgeführt.

4.4.1 Bauteilgeometrie

Die Geometrie des Demonstratorbauteils orientiert sich an einem serienrelevanten Bauteil, der B-Säule. Die ziehkritischen Bauteilzonen einer B-Säule sind im Bereich der Dachanbindung zu finden. In diesem Bereich ist der Werkstoff während der Umformung zwei kritischen Spannungszuständen ausgesetzt. Neben uniaxialen Zugspannungen im Stegbereich treten im Bereich der Dachanbindung biaxiale Zug-Druckspannungen auf. Aus diesem Grund ist in dieser Zone mit einer erhöhten Blechausdünnung zu rechnen. Bild 5 zeigt den Platinenzuschnitt und die Geometrie des Demonstratorbauteils.

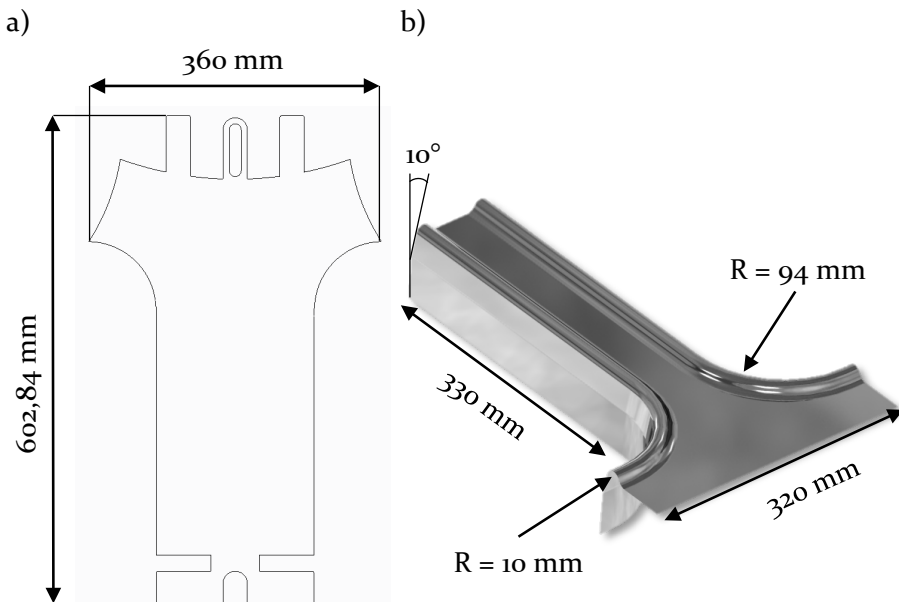


Bild 5: Platinenzuschnitt (a) und Bauteilgeometrie (b) des Demonstratorbauteils

Der Zuschnitt ist jeweils mit Laschen am Fuß- und Kopfende versehen. Mit Hilfe dieser Laschen wird die Platine auf gefederten Pins gelagert, sodass ein vorzeitiges Auskühlen des Werkstücks vor der Umformung verringert wird. Um eine gleichmäßige Auskühlung des umgeformten Bauteils im geschlossenen Werkzeug sicherzustellen, ist ein Zargenwinkel von 10° vorgesehen. Dies ermöglicht einen vollflächigen Kontakt des Bauteils mit dem

Werkzeug, sodass die für die Martensitumwandlung notwendigen Abkühlraten erreicht werden. Die im Bauteil auftretenden Radien und Winkel orientieren sich an einer realen B-Säulen-Geometrie der Firma Daimler. Aufgrund der ähnlichen Geometrie zu einem seriennahen Bauteil und den vorherrschenden Spannungszuständen ist eine Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen mit dem B-Säulenwerkzeug im Labormaßstab auf industrielle Presshärteprozesse gegeben.

4.4.2 Aufbau und Funktionsweise des Demonstratorwerkzeugs

Bei der Konzeptionierung des B-Säulen Werkzeugs wurde besonderes Augenmerk auf die Untersuchung des tribologischen Einsatzverhaltens gelegt. Aus diesem Grund wurden die Aktivteile des Werkzeugs in Form von modularen Einsätzen realisiert. Mithilfe dieser Einsätze können sowohl unterschiedliche Werkzeugwerkstoffe als auch beschichtete Werkzeugoberflächen analysiert werden. Ferner sind die Einsätze einzeln entnehmbar und können anhand der zuvor vorgestellten taktilen und optischen Methoden zur Oberflächencharakterisierung untersucht werden. Die mithilfe der Laborversuche identifizierten Reibungs- und Verschleißmechanismen sowie die Wirksamkeit der werkzeugseitigen Maßnahmen zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß können daher anhand eines Demonstratorwerkzeugs mit komplexer Geometrie verifiziert werden. Bild 6 zeigt den Aufbau des B-Säulenwerkzeugs. Die Platine wird nach der Wärmebehandlung manuell in das Werkzeug eingelegt und über zwei Stifte positioniert. Die Positionierstifte sind jeweils mit einer Feder versehen, auf welchen das Blech aufliegt. Dies verhindert eine vorzeitige Auskühlung der Platine vor der Umformung. Der Niederhalter wird über Gasdruckfedern angesteuert und mittels Distanzscheiben auf einem definierten und flexibel einstellbaren Abstand zur Platine gehalten. Hierdurch wird, wie in der industriellen Praxis üblich, ein vorzeitiges Abkühlen des Flansches vor der Umformung vermieden. Die Aktivteile der Matrize sind auf einer Basisplatte aufgebracht, die mit Kühlbohrungen versehen ist. Zur Temperierung zwischen den Bauteilabpressungen wird das Werkzeug geschlossen und auf eine konstante Ausgangstemperatur gebracht, sodass reproduzierbare Werkzeugtemperaturen beim Einlegen der Platine gewährleistet sind.

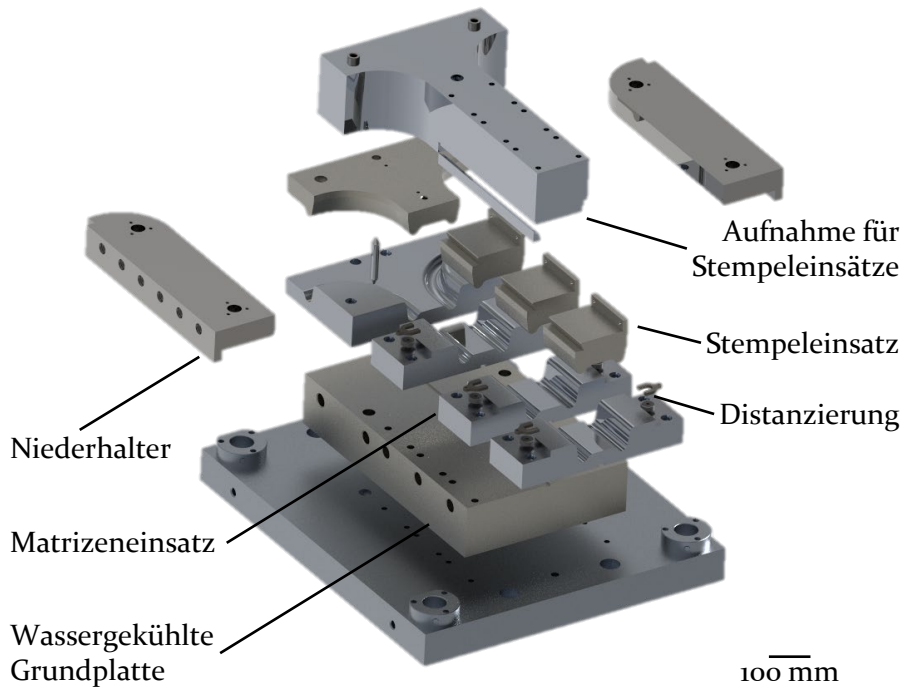


Bild 6: Aufbau des Demonstratorwerkzeugs (CAD-Modell)

5 Erarbeitung einer Methodik zur Charakterisierung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten

In diesem Kapitel wird die Entwicklung einer Methodik zur Charakterisierung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten beschrieben. Zu Beginn werden die Anforderungen an einen Prüfstand formuliert. Basierend hierauf werden im Anschluss die Konzeptionierung sowie der Aufbau einer Warmstreifenziehmaschine dargestellt. Mithilfe der Versuchsanlage sollen Ursache-Wirkzusammenhänge zwischen kritischen Einflussfaktoren und dem resultierenden tribologischen Einsatzverhalten identifiziert werden. Daher wird zunächst eine Auswertemethodik bei Flachbahnstreifenziehversuchen zur Charakterisierung der Reib- und Verschleißverhältnisse vorgestellt. Nach der Definition eines Prozessfensters für Streifenziehversuche unter Presshärtebedingungen wird die Qualifizierung des Prüfstands im Vergleich mit aktueller Literatur diskutiert.

5.1 Anforderungen an den Prüfstand

Bei der Entwicklung einer geeigneten Versuchsmethodik zur Untersuchung der Reib- und Verschleißbedingungen beim Presshärten gilt es, eine Reihe von Anforderungen zu berücksichtigen. Im Besonderen sind spezifische Anforderungen hinsichtlich der Temperaturführung des Werkzeugs sowie des Werkstücks, der Flächenpressung und der Relativgeschwindigkeit zu beachten. Darüber hinaus muss eine bestmögliche Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf prozessrelevante Bauteilgeometrien sichergestellt werden.

Mithilfe der Versuchsmethodik sollen der prozesseitige, der werkstück- und der werkzeugseitige Einfluss auf Reibung und Verschleiß beim Presshärten untersucht werden. Eine grundlegende Voraussetzung hierfür ist, dass prozesseitige Einflussfaktoren isoliert und unabhängig voneinander variiert werden können. Hierdurch ist es möglich, die Auswirkung der einzelnen Parameter auf Reibung und Verschleiß zu analysieren. Zudem müssen unterschiedliche Werkzeug- bzw. Werkstückwerkstoffe verwendet werden können. Um die tribologischen Bedingungen des industriellen Presshärteprozesses möglichst exakt im Laborversuch abbilden zu können, sind darüber hinaus die thermischen und mechanischen Versuchsbedingungen dem realen Prozess anzunähern.

Der Temperaturführung des Werkstücks kommt daher eine zentrale Bedeutung zu. Da die Umformtemperatur beim Presshärten abhängig von der Transferdauer zwischen Ofen und Presse in einem Bereich zwischen 650 – 850 °C liegt, sollte dieser Temperaturbereich im Rahmen der Laborversuche erreicht werden [130]. Die Temperatur ist zudem während der Versuchsdurchführung möglichst konstant zu halten, um den Einfluss der Werkstücktemperatur gezielt analysieren zu können. Dadurch kann das Reibverhalten über eine längere Auswertestrecke bei konstanten Bedingungen untersucht werden. Die Regelung der Werkzeugtemperatur ist sowohl für den konventionellen als auch für den partiellen Presshärteprozess wichtig. Für das direkte Presshärten werden in der Regel wassergekühlte Werkzeuge eingesetzt [131]. Hierdurch wird dem Bauteil während bzw. nach der Umformung Wärme entzogen, sodass die für die Martensitumwandlung notwendige Mindestabkühlrate erreicht wird. Im Falle des partiellen Presshärtens werden hingegen für die Einstellung lokal unterschiedlicher Abkühlraten beheizte Werkzeuge eingesetzt. Der zu entwickelnde Prüfstand muss daher eine aktive Beheizung sowie Kühlung des Werkzeugs ermöglichen. In Bezug auf die Flächenpressung ist zu beachten, dass ein homogener Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück herrscht, um definierte Kontaktbedingungen während der experimentellen Untersuchungen sicherzustellen. Bei prozessrelevanten Geometrien werden Flächenpressungen von bis zu 20 MPa erreicht [22]. Daher ist dieser Wert als obere Grenze für den Prüfstand definiert. Die Flächenpressung sollte darüber hinaus während der Versuchsdurchführung konstant bleiben. Moderne Pressen erreichen hohe Umformgeschwindigkeiten, um die Auskühlung des Bauteils während der Umformung gering zu halten [132]. Aus diesem Grund wird eine Relativgeschwindigkeit von 120 mm/s als Maximum für den Prüfstand definiert. Die Geschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück muss innerhalb des Auswertebereichs konstant bleiben.

Um eine bestmögliche Vergleichbarkeit mit dem Stand der Forschung zu gewährleisten, wird das Reibverhalten basierend auf dem Reibgesetz nach Coulomb analysiert. Dieses beschreibt die Reibung über eine konstante Reibzahl, die sich aus dem Verhältnis von Reibkraft F_R zu Normalkraft F_N ergibt [133].

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

Bei konstanter Relativgeschwindigkeit entspricht die Reibkraft F_R der für die Relativbewegung notwendigen Abziehungskraft F_z . Daher werden während

der Versuchsdurchführung die Normalkraft sowie die Abziehkraft aufgenommen.

Ein direkter Transfer der Ergebnisse bezüglich des Reib- und Verschleißverhaltens von Laborversuchen auf prozessrelevante Geometrien ist in der Regel aufgrund unterschiedlicher tribologischer Systeme schwierig. Aktuelle Untersuchungen von Vilaseca et al. [71] haben jedoch gezeigt, dass Flachbahnstreifenziehversuche dazu geeignet sind, den Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück nachzubilden. Darüber hinaus können die Ergebnisse aus Streifenziehversuchen hinsichtlich Reibung und Verschleiß auf den industriellen Presshärteprozess übertragen werden [78]. Aus diesem Grund und aufgrund der Möglichkeit, kritische Prozessparameter isoliert voneinander zu variieren, wurde in der vorliegenden Arbeit eine Versuchsmethodik zur Charakterisierung der tribologischen Bedingungen auf Basis des Flachbahnstreifenziehversuchs entwickelt. Dessen Funktionsprinzip ist in Bild 7 dargestellt.

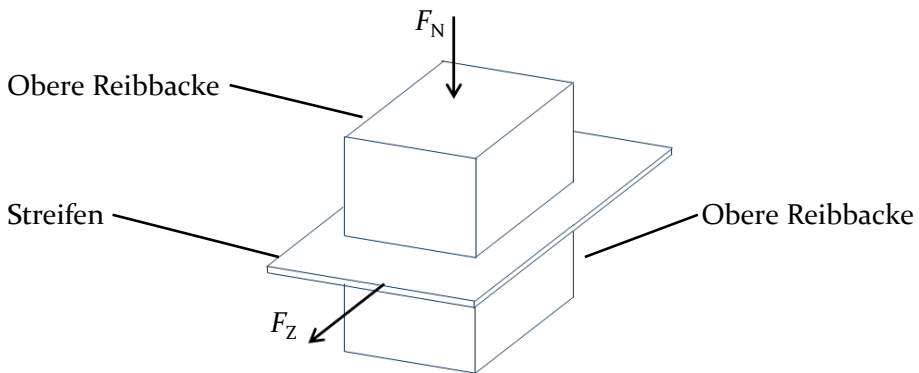


Bild 7: Prinzip eines zweiseitigen Streifenziehversuchs

5.2 Konzeptionierung und Aufbau des Prüfstands

Im folgenden Abschnitt werden der prinzipielle Aufbau sowie die einzelnen Funktionseinheiten der entwickelten Warmstreifenziehanlage vorgestellt. Diese lassen sich in Normalkrafteinheit, Abzugskrafteinheit sowie beheizbarer Schlitten mit Temperaturregelung untergliedern. Abschließend wird die Geometrie der Reibbacken sowie der Streifen beschrieben.

Anhand der gesammelten Anforderungen wurde das Konzept für eine Warmstreifenziehanlage entwickelt. Der schematische Aufbau der Warmstreifenziehanlage ist in Bild 8 gezeigt.

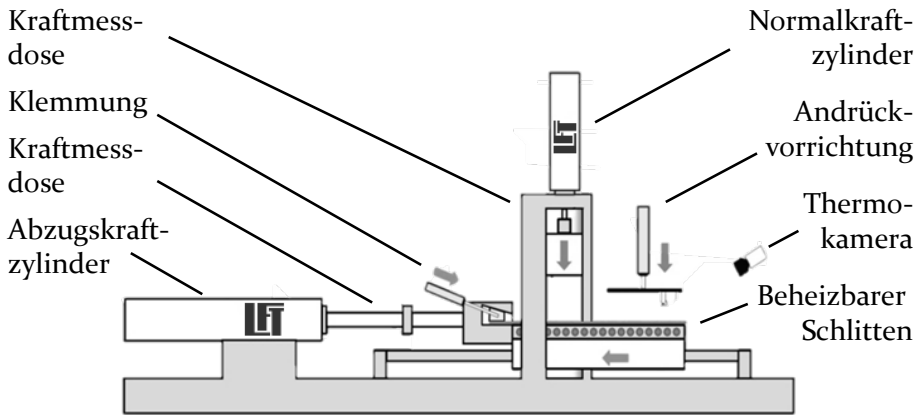


Bild 8: Schematischer Aufbau der Warmstreifenziehvorrichtung

Mithilfe dieser Versuchsanlage können Flachbahnstreifenziehversuche unter Presshärtebedingungen durchgeführt werden. Hierbei wird das Werkzeug durch eine Reibbacke und das Werkstück durch einen Blechstreifen simuliert. In Anlehnung an den industriellen Presshärteprozess erfolgt die Wärmebehandlung des Werkstücks in einem separaten Kammerofen. Nach erfolgter Austenitisierung wird der Streifen manuell zur Warmstreifenziehvorrichtung transferiert, wo die Temperatur des Streifens mithilfe eines beheizbaren Schlittens auf die Versuchstemperatur geregelt wird. Um eine Auskühlung des Streifens vor Kontakt mit der Reibbacke zu verhindern, wurde die Versuchsanlage als einseitiger Streifenziehversuch konzipiert. Dies ermöglicht die aktive Regelung der Streifentemperatur während des gesamten Versuchsablaufs. Um homogene Werkstücktemperaturen sicherzustellen, wird die Temperatur des Streifens über eine Infrarotkamera vom Typ PI 1M der Firma Optris überwacht. Ein Niederhalter mit Kugellagern stellt gleichmäßigen Kontakt zwischen Streifen und dem beheizbaren Schlitten her, sodass ein reproduzierbarer und homogener Wärmeübergang stattfindet. Nach Erreichen der Versuchstemperatur wird über die Normalkrafteinheit eine definierte Flächenpressung zwischen Reibbacke und Streifen aufgebracht und die Relativbewegung über die Abzugskrafteinheit gestartet. Während des Versuchs werden die Normalkraft sowie die Abzugskraft über Sensoren zur Kraftmessung aufgezeichnet, um Reibzahlen nach Coulomb ermitteln zu können. Die Funktionseinheiten für die Aufbringung der Normalkraft, der Abziehungskraft sowie der Schlitten für die Temperierung des Streifens während der Versuchsdurchführung werden im Folgenden detailliert erklärt. (Bild 9)

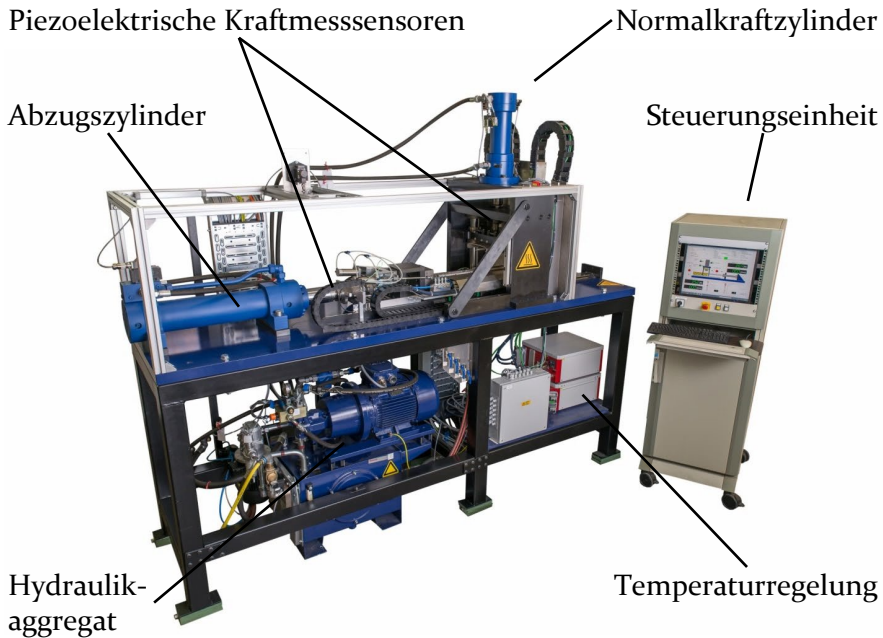


Bild 9: Funktionseinheiten der Warmstreifenziehanlage

Normalkrafteinheit

Mithilfe der Normalkrafteinheit wird über die Reibbacke eine definierte Flächenpressung auf den Streifen aufgebracht. Diese soll zum einen homogen über die Reibbackenoberfläche verteilt sein und zum anderen während des Streifenziehversuchs konstant bleiben. Für den Antrieb der Normalkrafteinheit wird ein hydraulischer Zylinder von Bosch Rexroth verwendet, dessen Maximalkraft bei 120 kN liegt. Die Ansteuerung erfolgt über ein Hydraulikaggregat. Die Positionierung des Zylinders erfolgt über Taster, welche die Start- und Endlage des Zylinders definieren, und über inkrementelle Wegmessung anhand eines Glasmaßstabs. Mithilfe der inkrementellen Wegmessung kann der Zylinder im Eilgang verfahren, bis der Zylinder kurz vor Erreichen des Streifens kraftgeregelt angesteuert wird. Für die Kraft-Regelung des Zylinders wird ein digitaler PID-Regler eingesetzt. Diese Art Regler ist durch einen Proportional-, einen Integral- sowie einen Differentialanteil definiert und zeichnet sich durch eine hochdynamische Regelung sowie eine kurze Einschwingphase aus [134]. Dies erlaubt es, zum einen die Sollkraft zu Beginn des Versuchs zügig und ohne große Überschinger zu erreichen. Zum anderen kann die Kraft während des Versuchs auf einem konstanten Wert gehalten werden. Für die Messung der Normalkraft wird eine piezoelektrische Kraftmessdose vom Typ 9363 AU der Firma

Kistler verwendet, die für eine maximale Kraft von 120 kN ausgelegt ist. Um die Auflösung bei der Messung der Normalkraft zu erhöhen, wurde der Messbereich jedoch auf eine maximale Kraft von 36 kN kalibriert.

Die Führung des Zylinders erfolgt über eine zweiseitige Säulenführung, die mit einer wassergekühlten Traverse verbunden ist. Hierdurch wird eine wärmebedingte Ausdehnung der Traverse sowie der Säulenführung verhindert. Um zusätzliche Wärmeeinbringung über die Reibbacke zu begrenzen, ist zwischen Reibbackenaufnahme und Zylinder eine thermische Isolation vorhanden. Diese besteht aus dem Isolationsmaterial Dotherm 800 M und dient aufgrund seiner Elastizität gleichzeitig dazu, eine eventuelle Verkipfung zwischen Reibbacke und Streifen auszugleichen. Hierdurch wird eine homogene Verteilung der Flächenpressung über die gesamte Reibbackenfläche sichergestellt. Die aktive Temperierung der Reibbacke erfolgt über drei Heizpatronen mit jeweils 800 W Heizleistung, die in die Reibbackenaufnahme integriert sind.

Abzugskrafteinheit

Die Horizontalbewegung wird über einen hydraulischen Zylinder der Firma Bosch Rexroth erzeugt. Die Steuerung erfolgt über inkrementelle Wegmessung anhand eines Glasmaßstabs. Der Zylinder kann eine Ziehgeschwindigkeit von bis zu 120 mm/s aufbringen. Die Ziehkraft wird über eine Kraftmessdose vom Typ 9371BU der Firma Kistler gemessen, die auf 21,9 kN kalibriert. Während des Versuchs klemmt eine mechanische Vorrichtung den Streifen und die Klemmvorrichtung wird zusammen mit dem beheizbaren Schlitten verfahren. Hierbei erfolgt die Regelung des Zylinders geschwindigkeitsbasiert, um konstante Ziehgeschwindigkeiten innerhalb des Auswertebereichs zu gewährleisten.

Beheizbarer Schlitten mit Temperaturregelung

Nach der Wärmebehandlung im Ofen wird die Temperatur des Streifens während des Versuchs über einen beheizbaren Schlitten geregelt. Hierdurch wird ein vorzeitiges Auskühlen des Streifens verhindert, sodass der Einfluss der Prozessparameter bei reproduzierbaren Werkstücktemperaturen ermittelt werden kann (Bild 10 a). Darüber hinaus ermöglicht die aktive Temperaturkontrolle des Streifens die Untersuchung des Temperatureinflusses auf Reibung und Verschleiß über eine längere Auswertestrecke. Der Grundaufbau des Schlittens ist auf eine Linearführung montiert und wird mittels Wasserkühlung und zusätzlicher Isolierkeramik auf konstanter Temperatur gehalten.

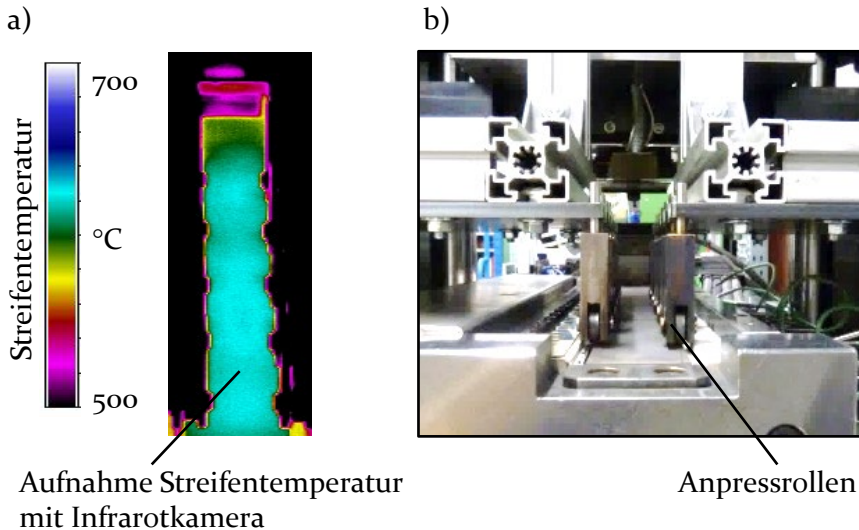


Bild 10: Beheizbarer Schlitten mit homogener Streifentemperatur (a) und Andrückvorrichtung (b)

Für die Temperierung des Streifens werden Heizelemente aus Siliziumnitrid mit 260 W Heizleistung und einer Maximaltemperatur von 950 °C verwendet. Die Wärme wird über Auflageplatten aus dem Material Nicrofer 5520 Co auf den Streifen übertragen, dessen Temperatur über eine Infrarotkamera überwacht wird. Eine mit gelagerten Anpressrollen versehene Andrückvorrichtung (Bild 10 b) stellt einen gleichmäßigen Kontakt zwischen Streifen und Auflageplatten her, sodass eine homogene Temperaturverteilung gewährleistet ist.

Reibbacken- und Streifengeometrie

Das Werkzeug wird über die Reibbacke abgebildet, während der Streifen das Bauteil simuliert. Die Geometrie der Reibbacken ist in Bild 11 dargestellt. Die Reibfläche beträgt 2000 mm² und ist in Einlaufrichtung mit einer 45 ° Fase versehen. Mit einer Breite von 40 mm ist die Reibbacke schmaler als die Streifengeometrie, die eine Breite von 50 mm und eine Länge von 796 mm hat. Hierdurch wird ein Einfluss der Schnittkanten der Streifen auf das tribologische Einsatzverhalten vermieden. Die Reibbacke wird über einen Keil in der Reibbackenaufnahme fixiert. Hierdurch ist ein hoher Wärmeaustausch zwischen der gekühlten bzw. beheizten Aufnahme möglich, sodass die Temperatur der Reibbacke gezielt eingestellt werden kann.

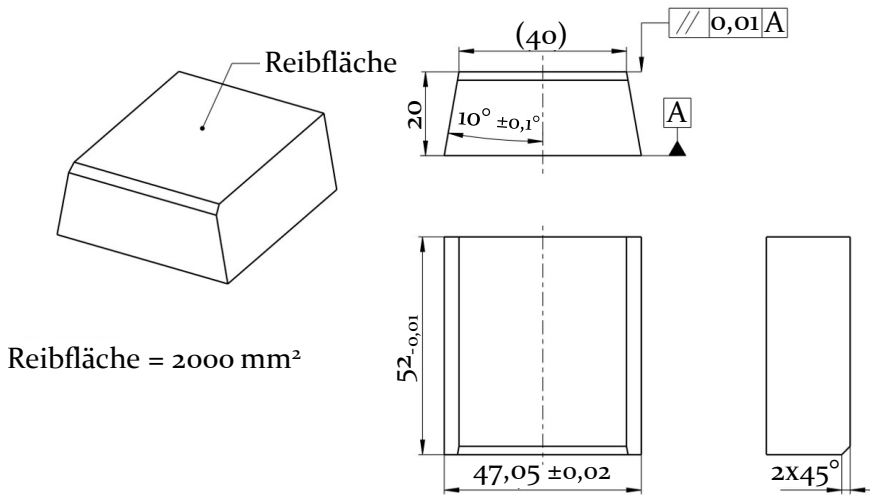


Bild 11: Geometrie der Reibbacken

5.3 Auswertemethodik bei Flachbahnstreifenziehversuchen

Das Reib- und Verschleißverhalten wird basierend auf experimentellen Untersuchungen mit der entwickelten Warmstreifenziehanlage analysiert. Die hierbei verwendete Auswertemethodik wird im Folgenden näher beschrieben. Zunächst wird die Vorgehensweise zur Bestimmung der Reibzahl erläutert, bevor im Anschluss eine Methodik zur Charakterisierung des adhäsiven Verschleißes vorgestellt wird. Abschließend erfolgt die Ermittlung eines Prozessfensters, in dem die Reib- und Verschleißbedingungen zuverlässig ermittelt werden können.

5.3.1 Reibzahlbestimmung

Um reproduzierbare Bedingungen für die Ermittlung der Reibzahl zu gewährleisten, erfolgt die Versuchsdurchführung anhand eines festgelegten Ablaufs, der nachfolgend beschrieben wird. Zudem wird auf die Temperaturführung des Werkstücks eingegangen, die für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Presshärteprozess eine zentrale Rolle einnimmt. Anschließend wird die Auswertemethodik der Kraft-Weg-Verläufe zur Ermittlung der Reibzahl auf Basis des Reibungsgesetzes nach Coulomb erläutert.

Die Versuchsdurchführung ist an den Abläufen des industriellen Presshärtprozesses orientiert, um eine bestmögliche Übertragbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Bild 12 zeigt den schematischen Temperatur-Zeit-Verlauf während der Versuchsdurchführung.

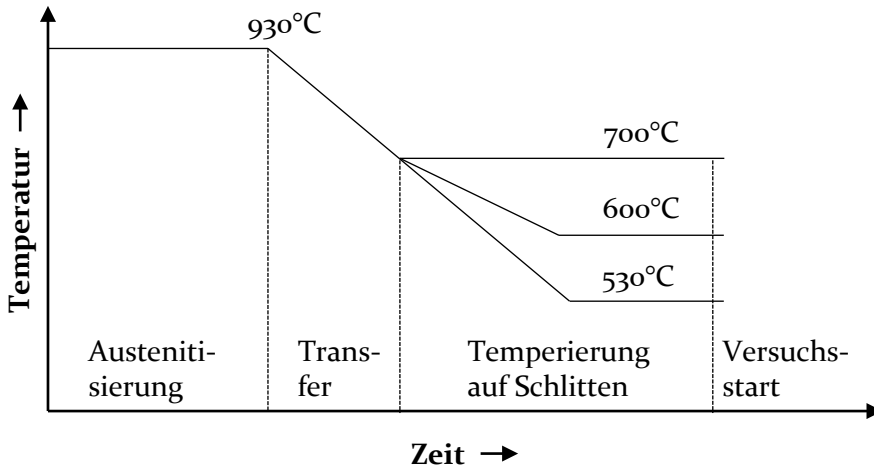
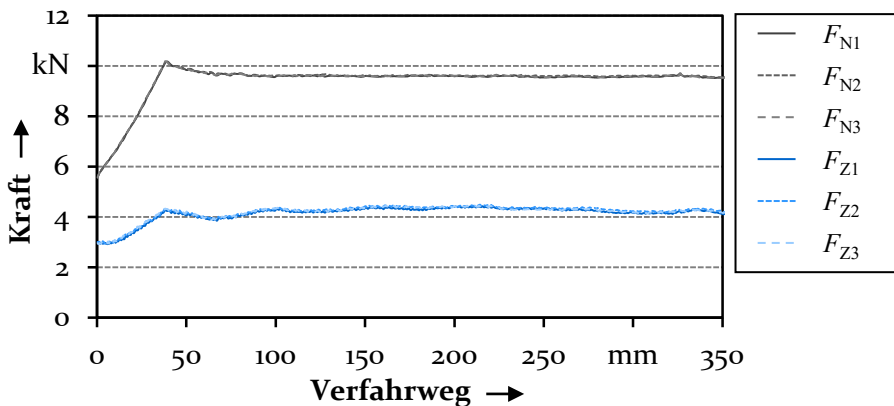


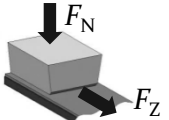
Bild 12: Schematischer Temperatur-Zeit Verlauf während der Versuchsdurchführung

Vor der Versuchsdurchführung wird die Homogenität der Flächenpressung zwischen Reibbacke und Streifen mithilfe einer Druckmessfolie des Typs Prescale von der Firma Fujifilm überprüft. Der Streifen wird anschließend in einem separaten Kammerofen der Firma Rohde wärmebehandelt. Die Parameter für die Wärmebehandlung sind allgemein abhängig von der Blechdicke sowie der eingesetzten Beschichtung. Für den verwendeten Werkstoff 22MnB5 mit AlSi-Beschichtung und einer Blechdicke von 1,5 mm erfolgt die Wärmebehandlung entsprechend der Herstellerangaben bei einer Ofentemperatur von 930°C . Nachdem die Austenitisierungstemperatur von 930°C nach ca. 3 min erreicht ist, wird der Streifen für weitere 3 min im Ofen auf Temperatur gehalten. Nach einer Verweilzeit von 6 min ist das Gefüge vollständig in Austenit umgewandelt. Zudem hat sich eine Fe-Al-Si-Schicht auf der Oberfläche ausgebildet [5]. Im Anschluss erfolgt der manuelle Transfer innerhalb von 3 - 5 s auf den beheizbaren Schlitten zur Temperierung des Werkstücks auf die Versuchstemperatur. Sobald die Temperatur des Streifens die Versuchstemperatur erreicht hat, wird der Streifenziehversuch gestartet. Über den Normkraftzylinder wird die Flächenpressung aufgebracht. Ab einer Normkraft von 60 % des Sollwerts initiiert der Abzugszylinder die Ziehbewegung. Hierdurch werden ein

vorzeitiges Aufheizen der Reibbacke und hohe Haftreibungswerte bei erhöhten Temperaturen vermieden. Sobald 100 % der Normalkraft aufgebracht wurden, erreicht die Abziehungskraft nach einer kurzen Einlaufphase von 80 - 100 mm ein konstantes Niveau mit nur geringen Schwankungen. Bild 13 zeigt den Kraft-Weg Verlauf von drei Streifenziehversuchen exemplarisch.



Werkstoffe		Versuchsparameter	
Werkzeug:	1.2367, geschliffen	$T_{WZ} =$	RT
Werkstück:	22MnB5 + AlSi	$T_{WS} =$	600 °C
		$v_{Rel} =$	50 mm/s
		$p_N =$	5,0 MPa



$F_Z = F_R$

Bild 13: Exemplarische Kraft-Weg Verläufe von drei Streifenziehversuchen

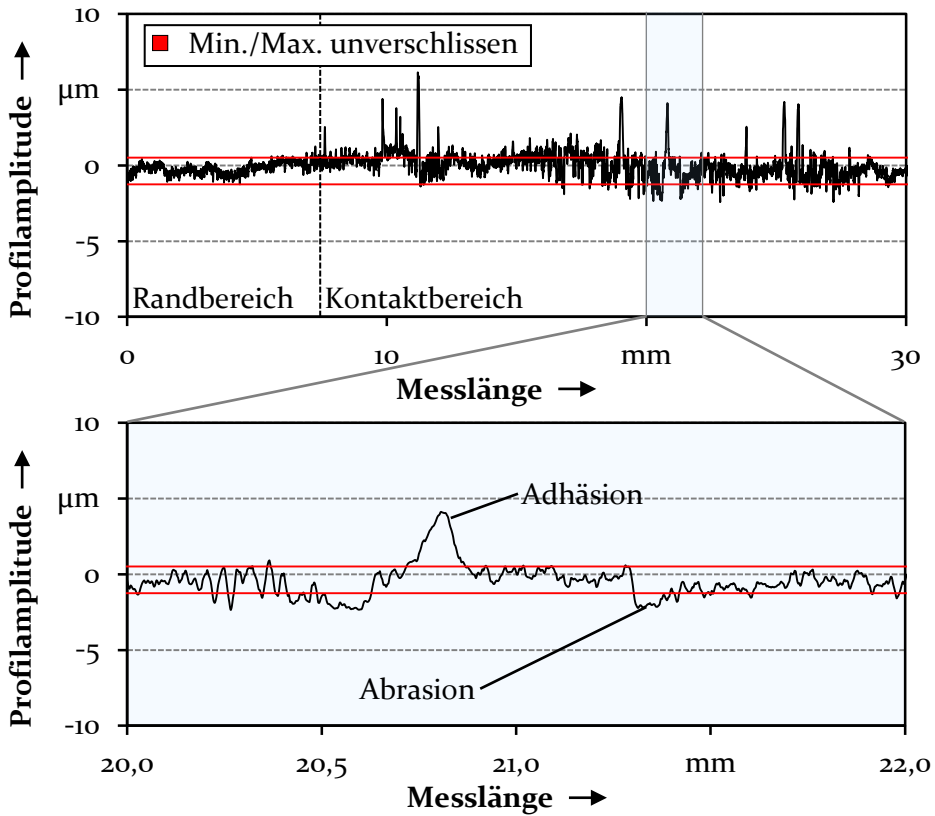
Die Ermittlung der Reibzahl nach dem Coulombschen Reibungsgesetz setzt eine konstante Abziehggeschwindigkeit voraus. Daher wurde der Auswertebereich zwischen 150 - 250 mm Verfahrweg definiert. Innerhalb dieser Strecke werden die Normalkraft sowie die Abziehungskraft für die Berechnung der Reibzahl herangezogen. Mithilfe der relativ langen Auswertestrecke von 100 mm können zuverlässige und robuste Reibzahlen ermittelt werden, die eine objektive Beurteilung der Reibungsbedingungen ermöglichen. Eine zentrale Voraussetzung hierfür ist, dass innerhalb der Auswertestrecke eine konstante Flächenpressung sowie homogene Werkstücktemperaturen vorliegen.

5.3.2 Verschleißcharakterisierung

Zur Analyse der Ursachen für das beobachtete Reibverhalten ist eine Charakterisierung des Werkzeugverschleißes zwingend notwendig. Grundlage hierfür ist zunächst eine Analyse der während der Laborversuche auftretenden Verschleißmechanismen. Darauf aufbauend wurde eine Methodik zur Charakterisierung des Verschleißes anhand von Konfokalmikroskopaufnahmen entwickelt, die im Folgenden vorgestellt wird.

Für die Entwicklung einer zuverlässigen Methode zur Charakterisierung des Werkzeugverschleißes müssen zu Beginn die im Laborversuch auftretenden Verschleißarten identifiziert werden. Hierfür wurden Streifenziehversuche mit einer speziellen Streifengeometrie durchgeführt, die mit einer Breite von 20 mm über die gesamte Verfahrlänge schmaler ist als die Werkzeuggeometrie mit einer Breite von 40 mm. Durch die veränderte Streifengeometrie bleibt der Rand der Reibbackenoberfläche unverschlissen, sodass sowohl der verschlissene als auch der ursprüngliche Teil der Oberfläche analysiert werden können. Dies ermöglicht eine zuverlässige Unterscheidung zwischen abrasivem und adhäsivem Verschleiß. Um Einflüsse der Schnittkanten an den Rändern des Streifens zu vermeiden, wurden alle Kanten vor Versuchsdurchführung entgratet. Für die Analyse der auftretenden Verschleißmechanismen wurden sechs Streifenziehversuche bei 600 °C Werkstücktemperatur, unbeheiztem Werkzeug, 5 MPa Flächenpressung und einer Ziehgeschwindigkeit von 50 mm/s durchgeführt. Im Anschluss an die Versuchsdurchführung wurde die Werkzeugtopographie an vier Stellen über die vollständige Werkzeugbreite mithilfe von Konfokalmikroskopaufnahmen charakterisiert. In Bild 14 ist ein gemessenes Profil der Werkzeugoberfläche nach sechs Streifenziehversuchen exemplarisch dargestellt. Die Analyse der Werkzeugprofile zeigt, dass sowohl abrasiver als auch adhäsiver Verschleiß nach sechs Streifenziehversuchen auftritt, wobei Adhäsion dominiert. Zudem überlagern sich beide Verschleißarten, sodass adhäsiver Verschleiß auf abrasiv verschlissenen Werkzeugoberflächen entsteht.

Nachdem die im Rahmen der experimentellen Versuche auftretenden Verschleißarten identifiziert wurden, wird im Folgenden die Vorgehensweise für die Charakterisierung des Werkzeugverschleißes exemplarisch beschrieben. Da die absolute Höhe des adhäsiven Verschleißes teilweise unterhalb der Ausgangshöhe des Werkzeugprofils liegt, ist eine quantitative Bestimmung des adhäsiven Verschleißvolumens für eine Beurteilung des Verschleißverhaltens nicht aussagekräftig.



Werkstoffe		Versuchsparameter	
Werkzeug:	1.2367, geschliffen	T_{WZ} =	RT
Werkstück:	22MnB5 + AlSi	T_{WS} =	600 °C
Konfokalmikroskopie		v_{Rel} =	50 mm/s
Objektiv:	10X	p_N =	5,0 MPa
Ausrichtung:	Polynom 2. Grades		

Bild 14: Profil der Werkzeugoberfläche nach Streifenziehversuchen mit verjüngter Streifen-geometrie

Die Verschleißcharakterisierung basiert daher auf Topographieaufnahmen, die eine qualitative Analyse der Werkzeugoberfläche ermöglichen. Hierdurch können Rückschlüsse auf das Verschleißerscheinungsbild und den Anteil der adhäsiv verschlissenen Werkzeugoberfläche gezogen werden. Bild 15 zeigt eine exemplarische Topographieaufnahme der Reibbackenoberfläche vor und nach sechs Streifenziehversuchen.

durch einzelne Rauheitsspitzen oder Messfehler auszuschließen, werden die jeweils unteren und oberen 5 % der Messwerte nicht berücksichtigt.

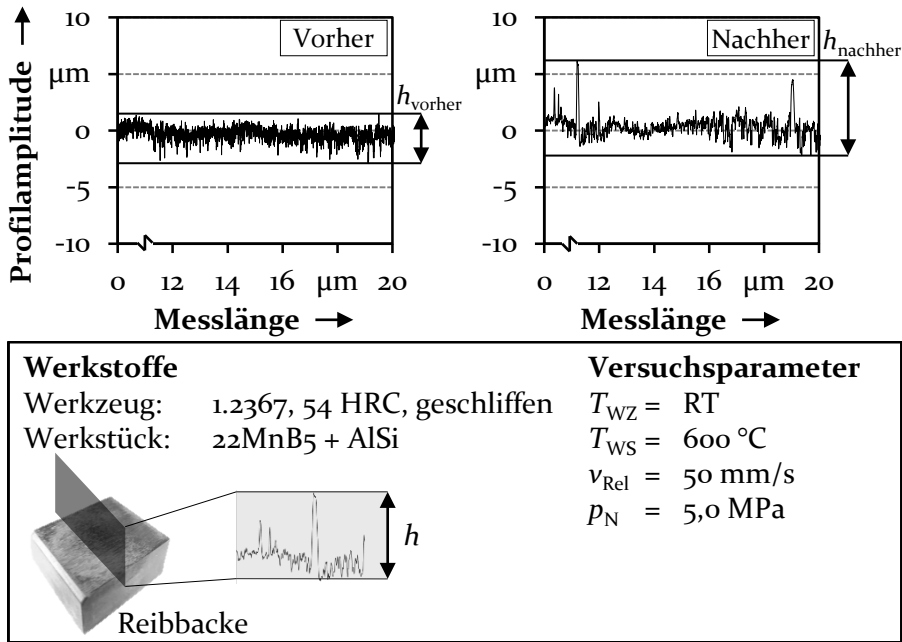


Bild 16: Visueller Nachweis des Einfluss von adhäsivem Verschleiß auf die Profilamplitude der Reibbackenoberfläche

5.3.3 Ermittlung eines Prozessfensters für Streifenziehversuche

Im Anschluss an die Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung der Reibzahl sowie der Verschleißcharakterisierung wurde ein Prozessfenster ermittelt, in dem die tribologischen Bedingungen beim Presshärten zuverlässig und reproduzierbar charakterisiert werden können. Das Prozessfenster wird dabei durch anlagenseitige sowie werkstückseitige Grenzen definiert.

Anlagenseitig wird das Prozessfenster durch die erreichbaren Werkstück- und Werkzeugtemperaturen sowie die Flächenpressungen und Abziehggeschwindigkeiten eingeschränkt. Die Heizleistung der Keramikheizelemente auf dem Schlitten ermöglicht maximale Temperaturen von bis zu 950 °C. Mithilfe der Andrückvorrichtung auf dem beheizbaren Schlitten wird darüber hinaus ein ausreichender und homogener Wärmeübergang

sichergestellt, sodass Werkstücktemperaturen von bis zu 900 °C erreicht werden können.

Die maximale Werkzeugtemperatur liegt bei 450 °C, sodass mithilfe der Anlage auch die tribologischen Bedingungen beim partiellen Presshärten untersucht werden können. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Temperatur auf der Reibbackenoberfläche während eines Streifenziehversuchs durch den Kontakt mit dem Werkstück kurzzeitig ansteigt und die Warmfestigkeit des Werkstoffs von 550 °C nicht überschritten werden darf [120].

Die aufgebrachte Flächenpressung wird zum einen über die Normalkraft des hydraulischen Zylinders und zum anderen über die Reibfläche des Werkzeugs eingestellt. Bei einer maximalen Normalkraft von 120 kN und der definierten Reibfläche von 2000 mm² kann demnach eine Flächenpressung von bis zu 60 MPa eingestellt werden.

Die erreichbare Ziehgeschwindigkeit liegt bei 120 mm/s und ermöglicht damit die Untersuchung von prozessrelevanten Relativgeschwindigkeiten [135]. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die anlagenseitigen Prozessgrenzen.

Tabelle 3: Anlagenseitige Prozessgrenzen

	Anlagenseitige Prozessgrenzen
Werkstücktemperatur T_{WS}	500 - 900 °C
Werkzeugtemperatur T_{WZ}	RT - 450 °C
Ziehgeschwindigkeit v_{Rel}	10 - 120 mm/s
Normalkraft F_N	5 - 120 kN

Werkstückseitige Prozessgrenzen sind dadurch begründet, dass für die Ermittlung reproduzierbarer und auf den Presshärteprozess übertragbarer Reibzahlen Gleitreibung während der Streifenziehversuche vorherrschen muss. Sobald der Streifen plastisch deformiert wird, wird die Messung der Reibkraft durch zusätzliche infolge der Deformation entstehende Kräfte verfälscht. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden zwei unterschiedliche Schädigungsverhalten identifiziert. Aufgrund zu hoher Temperaturen und Flächenpressungen kommt es zu einem Abscheren der AlSi-Beschichtung des Streifens, wie in Bild 17 gezeigt.

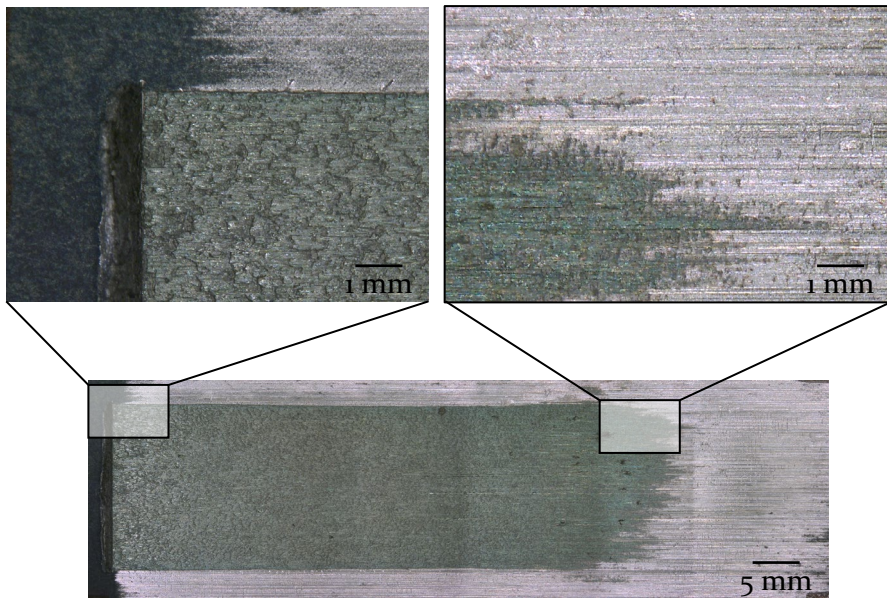


Bild 17: Werkstückoberfläche mit abgescherter AlSi-Beschichtung infolge zu hoher thermisch-mechanischer Belastung

Infolge einer Kombination aus zu hoher thermischer sowie mechanischer Belastung wird die Werkstückbeschichtung während des Streifenziehversuchs von der Reibbacke abgeschert. Die Ursache hierfür liegt in der geringeren Festigkeit der Beschichtung bei hohen Temperaturen [32]. Daher sind bei höheren Werkstück- sowie Werkzeugtemperaturen geringere Scherkräfte, hervorgerufen durch die aufgebrachte Flächenpressung sowie die Relativbewegung, ausreichend, um Teile der Beschichtung vom Grundmaterial abzulösen. In der Summe wird das Abscheren der Werkstückbeschichtung durch zu hohe Temperaturen, zu hohe Flächenpressungen und zu geringe Geschwindigkeiten verursacht.

Darüber hinaus kann eine Schädigung des Streifens durch Verschweißungen zwischen Werkzeug und Werkstück hervorgerufen werden. Grund hierfür ist eine zu große Adhäsionsneigung zwischen Werkstückbeschichtung und Werkzeug. In Bild 18 sind die Werkzeug- sowie die Werkstückoberfläche im Falle einer Verschweißung dargestellt. Die lokale Materialanhaftung führt zu einer ausgeprägten Furchung der Streifenoberfläche und zu einer Deformation des Streifens. Die exzessive Materialanhaftung kann durch ein Herausbrechen von Teilen der Werkstückbeschichtung zwischen Werkstück und Werkzeug begründet werden.

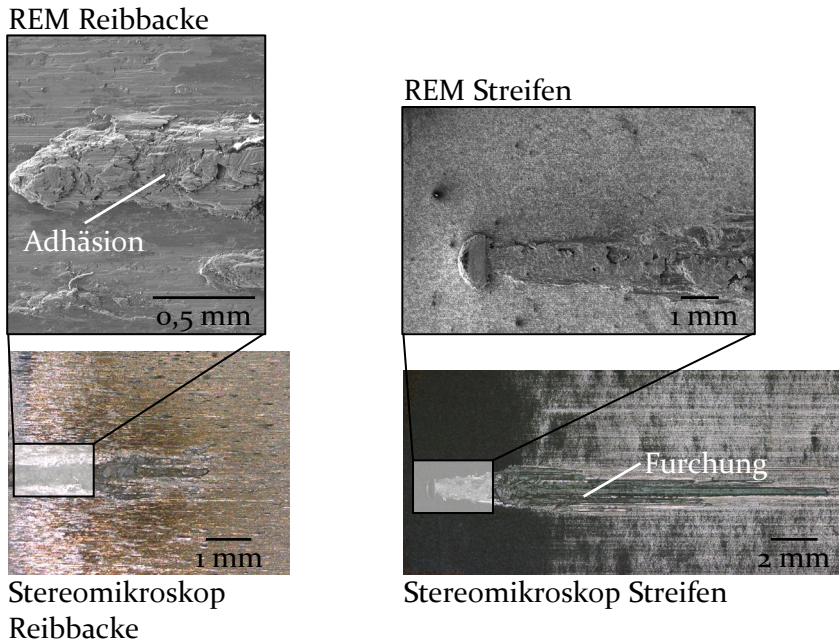
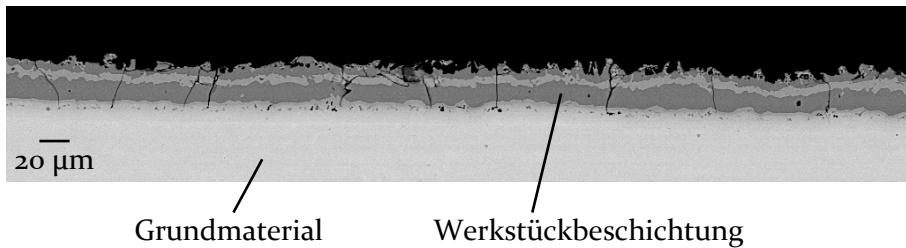


Bild 18: Werkzeug- und Werkstückoberfläche im Falle einer Verschweißung

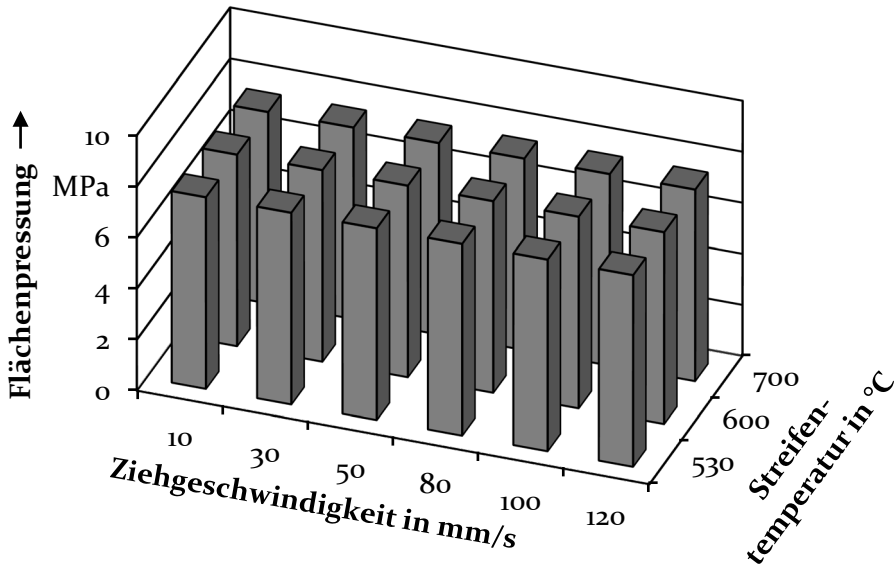
Bild 19 zeigt eine Aufnahme der Werkstückbeschichtung nach erfolgter Wärmebehandlung. Begünstigt wird das Herausbrechen der Beschichtung durch Mikrorisse, die infolge der Wärmebehandlung in der AlSi-Beschichtung entstehen. An diesen Stellen können infolge der hohen Adhäsionsneigung Teile der Beschichtung aus dem Werkzeug gerissen werden und an der Werkzeugoberfläche haften.



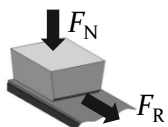
Werkstoff	REM
Werkstück: 22MnB5 + AlSi	EHT: 20,00 kV
$T_{\text{Ofen}} = 930 \text{ } ^\circ\text{C}$	Vergrößerung: 500x
$t_{\text{Ofen}} = 6 \text{ min}$	

Bild 19: REM-Aufnahme von 22MnB5 mit AlSi-Beschichtung nach Wärmebehandlung

Bedingt durch die werkstückseitigen Grenzen ergibt sich ein Prozessfenster für die Durchführung von Versuchen mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Warmstreifenziehanlage. In diesem Kontext wird zwischen dem Prozessfenster für unbeheiztes Werkzeug (Bild 20) und beheiztem Werkzeug (Bild 21) unterschieden.



Werkstoffe		Versuchsparameter	
Werkzeug:	1.2367, geschliffen	$T_{WZ} = RT$	
Werkstück:	22MnB5 + AlSi	$T_{Ofen} = 930\text{ °C}$	
		$t_{Ofen} = 6\text{ min}$	
		$n_{Proben} = 3$	
		$n_{Messungen} = 3$	



$$\mu = \frac{F_R}{F_N}$$

Bild 20: Prozessfenster für Streifenziehversuche mit unbeheiztem Werkzeug

Für unbeheiztes Werkzeug liegt die größtmögliche Flächenpressung, bei der Streifenziehversuche zuverlässig durchgeführt werden können, ohne eine Schädigung des Streifens zu verursachen, bei 7,5 MPa. Die untersuchten Ziehgeschwindigkeiten liegen mit 10 - 120 mm/s innerhalb des minimalen bzw. maximalen Arbeitsbereichs des Zylinders. Hinsichtlich der Werkstücktemperaturen wurden Werte oberhalb von 500 °C für die Versuchsdurchführung ausgewählt, da dies dem für die Umformung relevanten Bereich entspricht. Ab Temperaturen von über 700 °C kommt es zu einem Ablösen der Werkstückbeschichtung. Aufgrund der verschleißkritischen

Kontaktbedingungen, bedingt durch den vergleichsweise langen Ziehweg und den konstant hohen Werkstücktemperaturen, können Werkstücktemperaturen von über 700 °C nicht analysiert werden. Die für die Temperaturüberwachung eingesetzte Infrarotkamera erfasst aufgrund ihres kurzwelligen Sensors keine Temperaturen unterhalb von 500 °C, sodass ein Wert von 530 °C als niedrigste Werkstücktemperatur definiert wurde. Im Falle eines aktiv beheizten Werkzeugs verkleinert sich das Prozessfenster, sodass die maximale Werkstücktemperatur für Striefenziehversuche bei 600 °C liegt. Im Falle des beheizten Werkzeugs wurde das Maximum der Reibbackentemperatur auf 450 °C festgelegt.

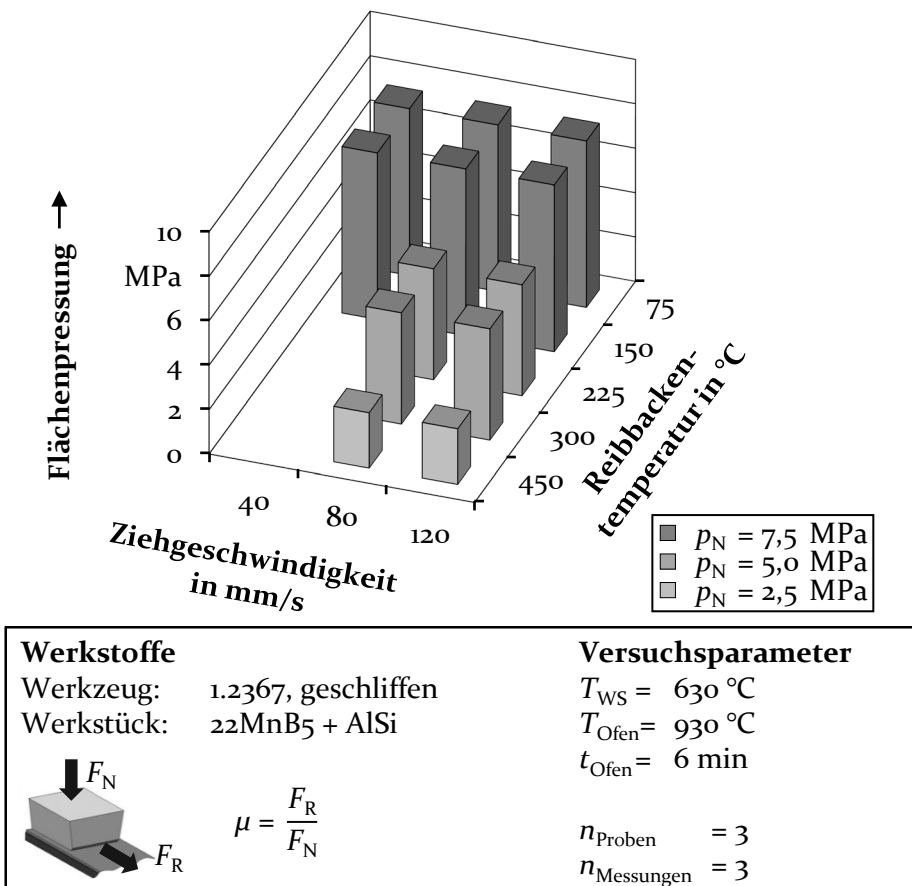


Bild 21: Prozessfenster für Striefenziehversuche mit beheiztem Werkzeug

Somit wird eine Entfestigung an der Werkzeugoberfläche vermieden, die zusätzlich durch den Kontakt mit dem Werkstück erwärmt wird. Darüber hinaus beeinflusst die Reibbackentemperatur die möglichen Flächenpressungen sowie Ziehgeschwindigkeiten. Mit höherer Reibbackentemperatur und geringerer Ziehgeschwindigkeit erhöht sich die Temperatur in der Wirkfuge zwischen Werkzeug und Werkstück, sodass es bei geringeren Flächenpressungen zu einem Ablösen der Werkstückbeschichtung kommt.

5.4 Qualifizierung der Auswertemethodik

Abschließend wird der Prüfstand hinsichtlich der Charakterisierung der Reibbedingungen qualifiziert. Zunächst werden die Konstanz der Reibkraftmessung sowie die Reproduzierbarkeit der ermittelten Reibzahlen analysiert, wofür das Einlaufverhalten der Reibbacken eine zentrale Rolle einnimmt. Im Anschluss werden erste ermittelte Reibzahlen mit Literaturwerten verglichen, um die Plausibilität der Ergebnisse zu beurteilen.

Bedingt durch Verschleiß auf der Werkzeugoberfläche kann sich eine mögliche Änderung des tribologischen Systems auf die Reproduzierbarkeit der Messungen auswirken. Um eine hohe Konstanz und gute Reproduzierbarkeit der Reibzahlmessungen zu gewährleisten, muss das Einlaufverhalten der Werkzeuge berücksichtigt werden. Zur Analyse des Einlaufverhaltens werden zehn Streifenziehversuche mit einer unver-schlissenen Reibbacke durchgeführt. Für die Versuche wird ein unbeheiztes Werkzeug verwendet, da sich die Untersuchungen primär an dem direkten, konventionellen Presshärteprozess orientieren. Die übrigen Prozessparameter entsprechen mit 600 °C Werkstücktemperatur, 50 mm/s Ziehgeschwindigkeit und 5 MPa Flächenpressung in etwa der Mitte des Prozessfensters. Als Referenzwerkstoff wird 1.2367 mit einer Härte von 54 ± 2 HRC und geschliffener Oberfläche verwendet. In Bild 22 ist der Verlauf der Normalkraft sowie der Abzugskraft für zehn Streifenziehversuche dargestellt.

Der Verlauf der Ziehkraft des ersten Streifenziehversuchs mit einer unbe-nutzten Reibbacke unterscheidet sich deutlich von den übrigen Versuchen. Innerhalb der ersten 80 – 90 mm ist die Ziehkraft signifikant höher und bleibt dann über den gesamten Versuch leicht erhöht. Ab dem zweiten Versuch ist der Verlauf der Ziehkraft reproduzierbar und innerhalb des Auswertebereichs nahezu konstant, wobei Versuch 2 und Versuch 3 höhere Reibkräfte aufweisen als die Versuche 4 - 10.

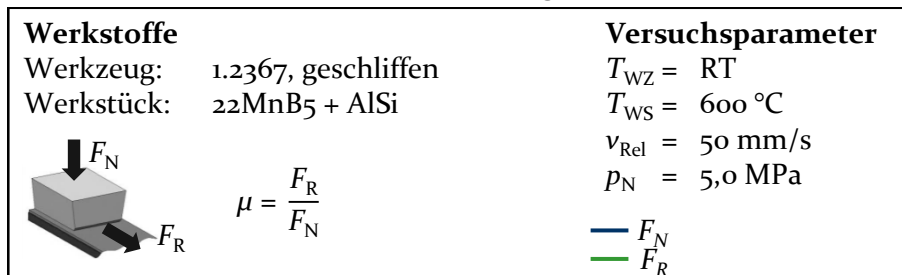
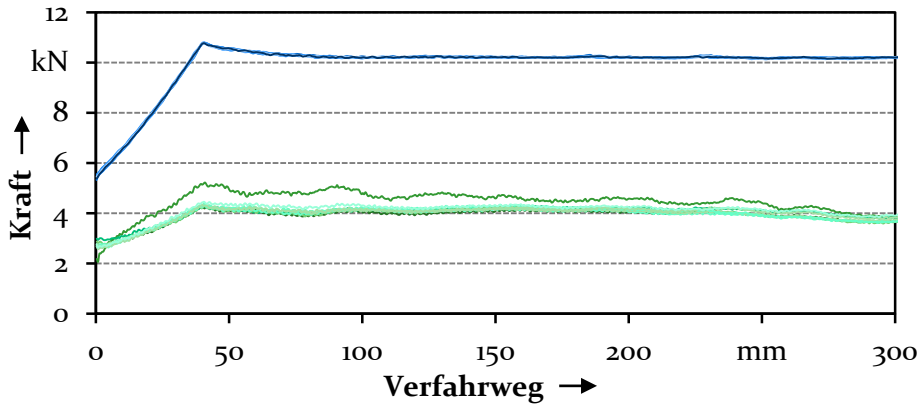


Bild 22: Kraft-Weg-Verläufe mit einer Reibbacke bei zehn Streifenziehversuchen

Das beschriebene Verhalten ist für jede neue Reibbacke reproduzierbar und wurde auch bei ähnlich konzipierten Streifenziehmaschinen beobachtet. Venema et al. [78] untersuchten ebenfalls das Einlaufverhalten bei Streifenziehversuchen unter Presshärtebedingungen. Auch hier unterschied sich der Verlauf des ersten Versuchs deutlich von den übrigen Streifenziehversuchen.

Um die Ursachen für das beobachtete Einlaufverhalten zu untersuchen, werden sowohl die Werkzeugoberfläche als auch die Streifenoberfläche vor und nach Versuchsdurchführung charakterisiert. Im Rahmen der Qualifizierung des Prüfstands wird daher zunächst die Werkzeugoberfläche nach den Streifenziehversuchen optisch analysiert. Bild 23 zeigt die Topographiaufnahmen der Reibbackenoberfläche vor den Versuchen und jeweils nach den Versuchen 1 – 10. Bereits nach dem 1. Versuch ist adhäsiver Verschleiß deutlich auf der Werkzeugoberfläche zu erkennen. Mit steigender Versuchszahl nimmt der Verschleiß sichtbar zu, bis ab dem 4. Versuch anhand der Konfokalmikroskopaufnahmen kein signifikanter Unterschied zu erkennen ist.

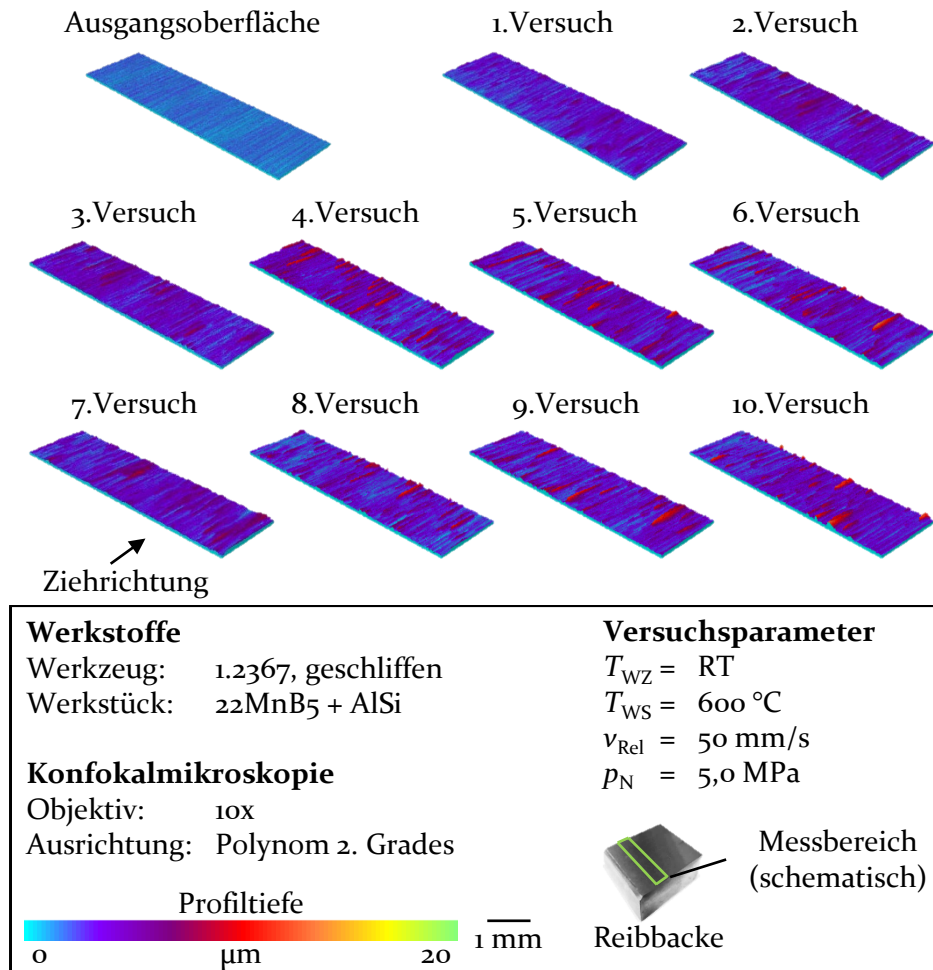


Bild 23: Topographiebilder der Reibbackenoberfläche

Die absolute Amplitude der Oberflächenprofile ist in Bild 24 dargestellt. Hierbei wird der Eindruck aus den Topographiemessungen bestätigt. Während des ersten Streifenziehversuchs kommt es zu signifikantem Verschleiß auf der Werkzeugoberfläche, der bis zum 3. Versuch stark ansteigt. Ab dem 4. Versuch wächst der Verschleiß hingegen deutlich geringer an als zuvor. Da der Anstieg der Profilamplitude den auf den Topographiebildern zu erkennenden Verschleiß mit fortschreitender Versuchsanzahl bestätigt, kann die Profilamplitude als Indikator für erhöhten Verschleiß angesehen werden.

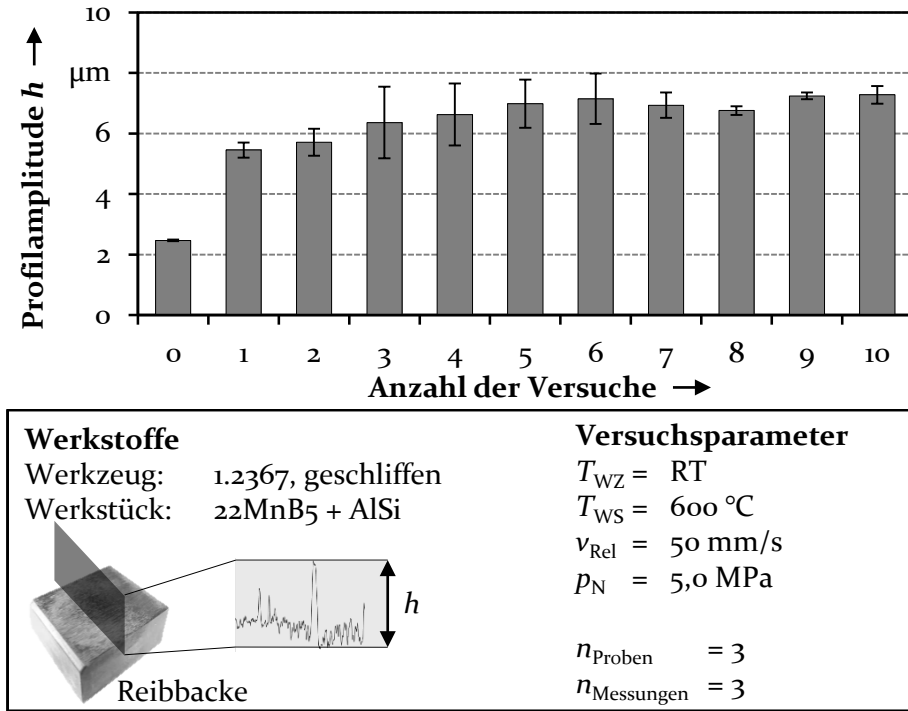


Bild 24: Profilamplitude der Werkzeugoberfläche

Aufgrund der Topographiebilder der Reibbackenoberfläche lässt sich darauf schließen, dass die hohe Reibung zu Beginn der Versuche mit neuer Reibbacke auf einen erhöhten Materialtransfer der Werkstückbeschichtung auf die Werkzeugoberfläche zurückzuführen ist. Nachdem auf der Werkzeugoberfläche eine erste Adhäsionsschicht anhaftet, wird der Materialübertrag reduziert. Dies resultiert in insgesamt geringeren und reproduzierbaren Reibzahlen. Für die Ermittlung der Reibzahlen in den folgenden Abschnitten werden daher für jede neue Reibbacke zunächst drei Einfahrversuche durchgeführt, die in die Reibzahlbestimmung nicht mit einfließen. Dies ist zudem den tribologischen Bedingungen eines Presshärtewerkzeugs im industriellen Einsatz am nächsten [136].

Um die Plausibilität der Reibzahlen einschätzen zu können, erfolgt zunächst ein Abgleich mit in der Literatur veröffentlichten Reibzahlen, die auf Basis von Pin-on-Disc Tests und Streifenziehversuchen ermittelt wurden. In Bild 25 ist ein Überblick über Reibzahlen in der Literatur gegeben. Da die Reibzahlen mit unterschiedlichen Versuchsaufbauten ermittelt wurden und Werkzeugwerkstoffe, Austenitisierungsparameter sowie Prozessparameter variieren, können die Reibzahlen nur qualitativ verglichen

5.5 Zusammenfassende Bewertung der Methodik zur Reibungs- und Verschleißcharakterisierung

Im Rahmen dieses Kapitels wurde eine Methodik zur Charakterisierung der Reibungs- und Verschleißbedingungen beim Presshärten vorgestellt. In diesem Zusammenhang wurden die Anforderungen an die Warmstreifenziehmaschine sowie deren Aufbau beschrieben. Darüber hinaus wurde eine Auswertemethodik basierend auf Flachbahnstreifenziehversuchen zur Reibzahlbestimmung und Verschleißcharakterisierung erläutert. Abschließend wurde ein Prozessfenster für die Durchführung von Streifenziehversuchen mithilfe des entwickelten Prüfstands ermittelt und die Methodik im Abgleich mit aktueller Literatur qualifiziert.

Eine zentrale Anforderung an die Prüfanlage ist, dass kritische Einflussparameter wie Werkstück- und Werkzeugtemperatur, Flächenpressung und Geschwindigkeit unabhängig voneinander untersucht werden können. In diesem Kontext kommt speziell der Werkstücktemperatur eine zentrale Rolle zu, die während der Versuche möglichst konstant gehalten werden muss. Um alle Anforderungen bestmöglich zu erfüllen, wurde ein einseitiger Streifenziehversuch mit beheiztem Schlitten konzipiert und aufgebaut, sodass eine aktive Temperierung des Werkstücks während der Versuchsdurchführung möglich ist.

Für die Analyse der tribologischen Bedingungen wurde eine Auswertemethodik basierend auf experimentellen Untersuchungen entwickelt. Die definierte Versuchsdurchführung gewährleistet eine hohe Reproduzierbarkeit hinsichtlich der Charakterisierung der Reibbedingungen. Um Ursache-Wirkzusammenhänge zwischen den vorherrschenden tribologischen Bedingungen und dem resultierenden Reibverhalten zu identifizieren, wird zudem das Verschleißverhalten untersucht. Da während der Streifenziehversuche sowohl abrasiver als auch adhäsiver Verschleiß auftritt und sich beide Verschleißarten überlagern, ist eine Bestimmung des adhäsiven Verschleißvolumens nicht aussagekräftig. Stattdessen werden Topographiebilder und die absolute Profilamplitude für die Verschleißcharakterisierung herangezogen.

Im Anschluss an die Entwicklung der Auswertemethodik wurde ein Prozessfenster für Versuche an der Warmstreifenziehmaschine ermittelt. Neben anlagenseitigen Grenzen schränken maßgeblich werkstückseitige Grenzen das Prozessfenster ein. Um eine Deformation des Werkstücks aufgrund von Verschweißungen oder einem Abscheren der Werkstückbeschichtung auszuschließen, liegt die maximale Werkstücktemperatur bei 700 °C, die Flächenpressung bei 7,5 MPa. Die Ziehgeschwindigkeit ist bedingt durch den

Einsatzbereich des hydraulischen Abzugszylinders auf 10 – 120 mm/s festgelegt. Die erreichbaren Flächenpressungen und Ziehgeschwindigkeiten werden darüber hinaus durch die Werkzeugtemperatur limitiert, die bis 450 °C eingestellt werden kann. In diesem Kontext sind hohe Flächenpressungen sowie niedrige Abzugsgeschwindigkeiten bei steigenden Werkzeugtemperaturen kritisch.

Abschließend wurde der Prüfstand hinsichtlich der Untersuchung der Reibbedingungen qualifiziert. Bewertungskriterien hierfür sind die Konstanz und Reproduzierbarkeit der gemessenen Reibzahlen sowie die Vergleichbarkeit mit aktuellen Literaturwerten. Bei den Qualifizierungsversuchen zeigte sich, dass aufgrund des starken Verschleißes der Werkzeugoberfläche ein Einlaufverhalten der Reibbacken beobachtet werden kann. Innerhalb der ersten drei Versuche kommt es zu einem erhöhten Materialübertrag zwischen Werkstückbeschichtung und Reibbacke, wodurch hohe Reibkräfte resultieren. Nachdem sich auf der Reibbackenoberfläche eine dünne Adhäsionsschicht gebildet hat, nimmt der Materialübertrag ab, sodass konstante und reproduzierbare Reibzahlen ermittelt werden können. Um die Versuchsanlage abschließend zu qualifizieren, erfolgte im Rahmen einer Plausibilisierung ein Abgleich mit Reibzahlen aus aktueller Literatur. Die gemessenen Reibzahlen weisen dabei eine hohe Übereinstimmung mit veröffentlichten Reibzahlen auf.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die entwickelte Methodik eine zuverlässige und reproduzierbare Charakterisierung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten erlaubt. Die aktive Temperierung des Werkstücks während der Versuchsdurchführung lässt eine isolierte Untersuchung des Einflusses der reibungs- und verschleißkritischen Prozessparameter mit hoher Konstanz und Reproduzierbarkeit zu. Basierend hierauf können grundlegende Ursache-Wirkzusammenhänge zwischen den vorherrschenden tribologischen Bedingungen und dem resultierenden Reib- und Verschleißverhalten identifiziert werden, sodass das Prozessverständnis in Bezug auf die Tribologie beim Presshärten verbessert wird.

6 Schaffung eines Prozessverständnisses beim Presshärten im Laborversuch

Im folgenden Kapitel wird ein Prozessverständnis über die Reibungs- und Verschleißbedingungen beim Presshärten erarbeitet. Zunächst werden Einflussgrößen identifiziert, die einen potentiellen Einfluss auf Reibung und Verschleiß haben. Anschließend wird der Einfluss der reibungssensitiven Prozessparameter anhand einer Parameterstudie auf Basis von Flachbahnstreichziehversuchen unter Presshärtebedingungen analysiert. Die Versuchsgrößen orientieren sich dabei am industriellen Presshärteprozess, um eine größtmögliche Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Im Rahmen der Laborversuche werden der Einfluss der Werkstücktemperatur, der Werkzeugtemperatur, der Relativgeschwindigkeit sowie der Flächenpressung auf die tribologischen Bedingungen untersucht und Reibungs- und Verschleißmechanismen identifiziert. Abschließend werden die grundlegenden Erkenntnisse in Bezug auf die Ursache-Wirkzusammenhänge zusammengefasst.

6.1 Identifikation relevanter Einflussgrößen

Das zu untersuchende Beanspruchungskollektiv umfasst die Prozessparameter, die sich während der Umformung ändern und direkte Auswirkungen auf das tribologische System haben. Hierzu zählen die Werkstücktemperatur, die Werkzeugtemperatur, die Relativgeschwindigkeit und die Flächenpressung zwischen Werkstück und Werkzeug (siehe Abschnitt 2.3.3). Die Extremwerte sind an den Prozessbedingungen in der industriellen Praxis orientiert. Um nicht-lineare Zusammenhänge zu erkennen, werden die Parameter innerhalb der Extremwerte abgestuft (Tabelle 4).

Tabelle 4: Versuchsgrößen der Parameterstudie

	Faktorstufen der Prozessparameter
Werkstücktemperatur T_{WS}	530 / 600 / 700 °C
Werkzeugtemperatur T_{WZ}	RT / 75 / 150 / 225 / 300 / 375 / 450 °C
Geschwindigkeit v_{Rel}	10 / 30 / 50 / 80 / 100 / 120 mm/s
Flächenpressung p_N	2,5 / 5,0 / 7,5 MPa

Da Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Einflussfaktoren nicht auszuschließen sind, erfolgt die Versuchsdurchführung zur Untersuchung des Einflusses der Werkstücktemperatur, der Geschwindigkeit und der Flächenpressung anhand eines vollfaktoriellen Versuchsplans, wobei drei Wiederholversuche je Faktorstufe eine Einschätzung der statistischen Streubreite zulassen. Der Einfluss der Werkzeugtemperatur wird anhand ausgewählter Geschwindigkeiten (40, 80 und 120 mm/s) analysiert, um den Versuchsumfang einzugrenzen. Die Versuchsabfolge wird randomisiert, um systematische Messfehler auszuschließen.

Im industriellen Umfeld erfolgt die Umformung des Werkstücks beim Presshärten in einem Temperaturbereich zwischen 600 – 850 °C [138]. Jedoch wurde zuvor 700 °C als werkstückseitige Grenze für die Durchführung von Versuchen an der Warmstreifenziehanlage identifiziert, sodass die möglichen Faktorstufen limitiert sind. Daher werden im Rahmen der Laborversuche Werkstücktemperaturen von 530, 600 und 700 °C untersucht.

Die Werkzeugtemperatur beeinflusst in hohem Maße die Abschreckgeschwindigkeit des Bauteils und das hieraus resultierende Gefüge. Daher ist sie speziell beim partiellen Presshärten mittels Tailored Tempering ein kritischer Prozessparameter [40]. Mit Blick auf die Warmfestigkeit des Werkzeugwerkstoffs von 550 °C [120] muss neben der aktiven Erwärmung des Werkzeugs auch die passive Erwärmung durch Kontakt mit dem Werkstück berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird die aktiv temperierte Werkzeugtemperatur auf maximal 450 °C festgelegt. Da der Einfluss der Werkzeugtemperatur nicht im Mittelpunkt bisheriger Forschungsarbeiten lag, erfolgt die Untersuchung in sieben Faktorstufen. Dies ermöglicht eine detaillierte Analyse der Ursache-Wirkzusammenhänge zwischen der Werkzeugtemperatur und dem resultierenden Reib- und Verschleißverhalten.

In Bezug auf die Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück sind in der Literatur widersprüchliche Ergebnisse zu finden (siehe 2.3.3). Da in der industriellen Praxis niedrige Taktzeiten angestrebt werden, erfolgt die Umformung mit hohen Pressengeschwindigkeiten. Die Faktorstufen sind in dieser Hinsicht durch das anlagenseitige Maximum von 120 mm/s limitiert. Um dennoch grundlegende Erkenntnisse in Bezug auf die Reibungs- und Verschleißbedingungen gewinnen zu können, wird die Relativgeschwindigkeit zwischen 10 – 120 mm/s in sechs Abstufungen analysiert.

Eine Reihe von Arbeiten hat gezeigt, dass der Kontaktdruck einen zentralen Einfluss auf die tribologischen Bedingungen beim Presshärten hat. Bei

der Umformung von seriennahen Bauteilgeometrien treten lokale Kontaktdrücke von bis zu 20 MPa auf [22]. Da es, wie zuvor erläutert, bei Streifenziehversuchen mit Flächenpressungen von über 7,5 MPa jedoch zu einem Ablösen der Werkstückbeschichtung kommt, werden 2,5 sowie 5,0 und 7,5 MPa mit Streifenziehversuchen untersucht. Der Einfluss höherer Flächenpressungen wird in Kapitel 8 anhand von Abpressungen einer B-Säulen-Geometrie im Labormaßstab berücksichtigt.

Basierend auf den festgelegten Versuchsgrößen wird nachfolgend der Einfluss der Prozessparameter untersucht, die sich während der Umformung von Presshärtebauteilen ändern und einen kritischen Einfluss auf die tribologischen Bedingungen haben. Anhand der experimentellen Untersuchungen werden grundlegende Reibungs- und Verschleißmechanismen identifiziert. Anschließend wird die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf weitere Werkzeugwerkstoffe analysiert.

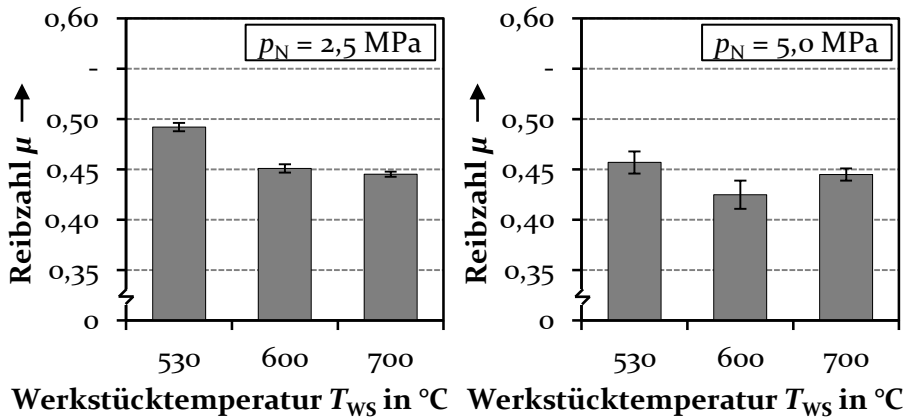
6.2 Experimentelle Erforschung der Einflussgrößen

Mithilfe von Versuchen an der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Warmstreifenziehanlage (siehe Kapitel 5) wird nachfolgend der Einfluss der Prozessparameter auf die Reibungsbedingungen beim Presshärten analysiert und das Prozessverständnis hinsichtlich grundlegender Reibungs- und Verschleißmechanismen verbessert. Da die Erkenntnisse zu einer Erhöhung der Prozessrobustheit und einer Verbesserung der finalen Bauteilqualität im industriellen Presshärteprozess beitragen sollen, orientieren sich die eingesetzten Werkstoffe und die Versuchsgrößen der Parameterstudie an der industriellen Praxis. Dies stellt eine bestmögliche Übertragbarkeit der Erkenntnisse sicher. Als Referenzwerkstoff für das Werkzeug wird der in der Automobilindustrie weit verbreitete Werkzeugwerkstoff 1.2367 verwendet. Um eine reproduzierbare Oberflächenqualität sicherzustellen, ist die Werkzeugoberfläche in Ziehrichtung geschliffen.

6.2.1 Werkstücktemperatur

Von den zuvor definierten Versuchsparametern wird zunächst der Einfluss der Werkstücktemperatur untersucht. Die Temperatur wird nach der Wärmebehandlung mithilfe des beheizbaren Schlittens mit einer Abweichung von ± 10 °C auf dem Sollwert gehalten. In Bild 26 sind die Reibzahlen in Abhängigkeit der Werkstücktemperatur für eine unbeheizte Reibbacke bei einer Abziehggeschwindigkeit von 50 mm/s und jeweils einer Flächenpressung von 2,5 und 5,0 MPa exemplarisch gezeigt.

Aus den gemessenen Reibzahlen bei einer Flächenpressung von 2,5 MPa geht hervor, dass es bei einer Erhöhung der Werkstücktemperatur von 530 °C auf 600 °C zu einer signifikanten Verringerung der Reibzahl von $0,492 \pm 0,004$ auf $0,451 \pm 0,004$ kommt. Dies entspricht einer relativen Abnahme um 8,33 %. Eine weitere Erhöhung der Werkstücktemperatur auf 700 °C zeigt hingegen keine signifikanten Auswirkungen mehr auf die Reibzahl. Bei einer Flächenpressung von 5,0 MPa führt ein Anstieg der Temperatur von 530 °C auf 600 °C zu einer Verringerung der Reibzahlen um 7% von $0,457 \pm 0,011$ auf $0,425 \pm 0,014$. Bei einem weiteren Anstieg der Werkstücktemperatur auf 700 °C kommt es zu einer Erhöhung der Reibzahl um 4,71 % auf $0,445 \pm 0,006$.



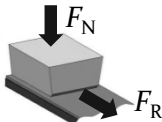
Werkstoffe		Versuchsparameter	
Werkzeug:	1.2367, geschliffen	T_{WZ}	RT
Werkstück:	22MnB5 + AlSi	v_{Rel}	50 mm/s
 $\mu = \frac{F_R}{F_N}$		n_{Proben}	= 3
		$n_{Messungen}$	= 3

Bild 26: Reibzahlen in Abhängigkeit der Werkstücktemperatur

Die Reibungs- und Verschleißbedingungen beim Presshärten werden maßgeblich durch die tribologischen Eigenschaften der eingesetzten AlSi-Beschichtung beeinflusst [139]. Ein möglicher Erklärungsansatz für das beobachtete Reibverhalten ist daher der Einfluss der Temperatur auf den adhäsiven Verschleiß, da moderate Materialanhaftungen reibungsreduzierend wirken, wie in Abschnitt 5.4 gezeigt wurde. Zudem sinkt mit steigenden Temperaturen der Widerstand der Werkstückoberfläche gegenüber Deformation, worin ebenfalls eine Abnahme der Reibung begründet ist.

Durch die Oberflächendeformation entsteht zusätzlich Abrieb, der ein mechanisches Verhaken von Rauheitsspitzen und die Entstehung weiterer adhäsiver Bindungen verhindern kann, sodass sich die Reibung verringert. Zu hohe Temperaturen hingegen können bei erhöhten Kontaktdrücken durch verstärkten Verschleiß zu einer ausgeprägten Deformation des Werkstücks und damit zu einem größeren Bewegungswiderstand führen.

Um die Wirkzusammenhänge zwischen der Werkstücktemperatur und dem resultierenden Reibverhalten zu identifizieren, wird der Verschleiß auf der Werkzeugoberfläche anhand von Topographieaufnahmen analysiert (Bild 27). Die Aufnahmen zeigen die Werkzeugoberfläche nach jeweils sechs Streifenziehversuchen mit einem Ziehweg von insgesamt 400 mm exemplarisch. Anhand der Topographiebilder wird deutlich, dass es infolge der Streifenziehversuche zu adhäsivem Verschleiß auf der Werkzeugoberfläche kommt. Die lokalen Anhaftungen sind längs in Richtung der Ziehbewegung ausgebildet und zeichnen sich sichtbar von der Ausgangsoberfläche ab. Anhand von EDX-Analysen aus vorangegangenen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass diese Anhaftungen zu einem Großteil aus Al mit geringeren Anteilen von Fe und Si bestehen [140]. Der Materialübertrag wird durch die starke Adhäsionsneigung zwischen der Werkstückbeschichtung und der Werkzeugoberfläche verursacht [141]. Infolge der Relativbewegung wird die Beschichtung des Werkstücks abgeschert und bleibt an der Oberfläche des Werkzeugs haften [142]. Zusätzlich entstehen lokale Materialanhaftungen aufgrund von Verschweißungen abrasiver Partikel [142].

Aus den Topographieaufnahmen in Bild 27 ist ersichtlich, dass ein Anstieg der Werkstücktemperatur mit mehr adhäsivem Verschleiß einhergeht. Der Unterschied zwischen 530 °C und 600 °C ist dabei ausgeprägter als zwischen 600 °C und 700 °C. Die Ursache hierfür liegt zum einen in einem Anstieg der Diffusionsrate der Atome mit steigenden Temperaturen [143]. Zum anderen sinkt die Scherfestigkeit der Beschichtung mit steigenden Werkstücktemperaturen, sodass sich die AlSi-Beschichtung leichter vom Werkstück löst [91].

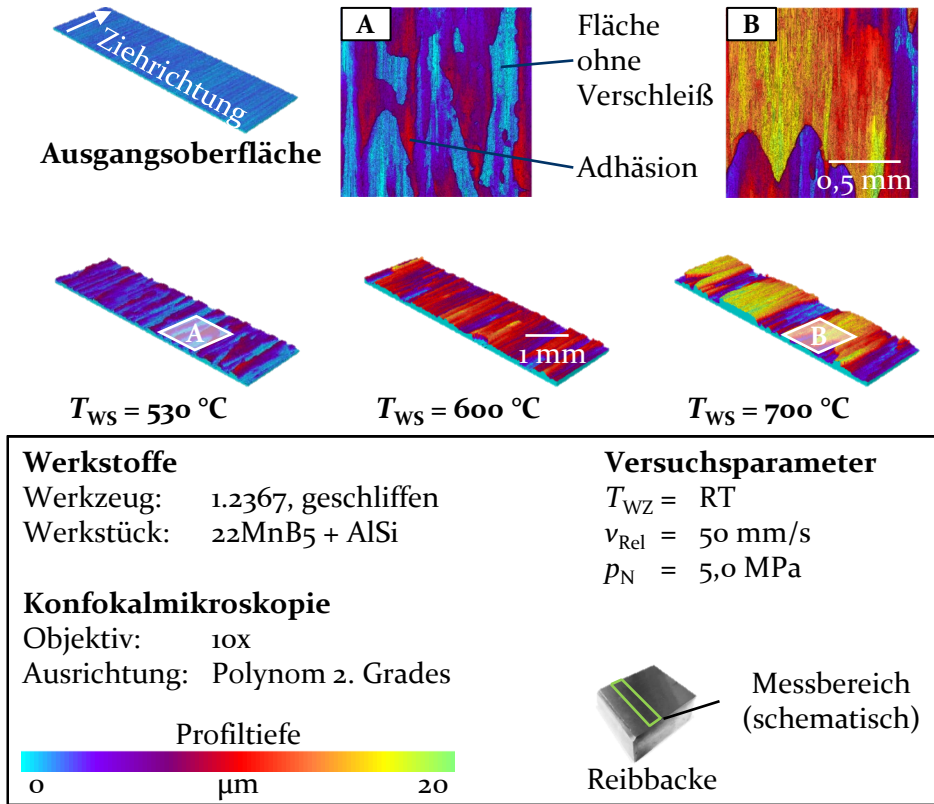


Bild 27: Topographieaufnahmen der Werkzeugoberfläche für unterschiedliche Werkstücktemperaturen

Die Messung der Profilamplitude in Bild 28 verdeutlicht den Einfluss der Werkstücktemperatur auf den adhäsiven Verschleiß. Durch den Anstieg der Werkstücktemperatur von 530 °C auf 600 °C steigt die Profilamplitude signifikant an. Mit einer weiteren Erhöhung der Werkstücktemperatur ist hingegen keine signifikante Änderung der Profilamplitude zu erkennen.

Dies ist auf eine verstärkte Einglättung der Materialanhaftungen auf der Werkzeugoberfläche zurückzuführen. Durch die hohen Temperaturen werden die lokalen Anhaftungen leichter eingelätet und während der Relativbewegung auf der Werkzeugoberfläche verschmiert. Die Folge ist ein großflächiger adhäsiver Verschleiß der Werkzeugoberfläche, der jedoch keine signifikante Zunahme der Profilamplitude bewirkt.

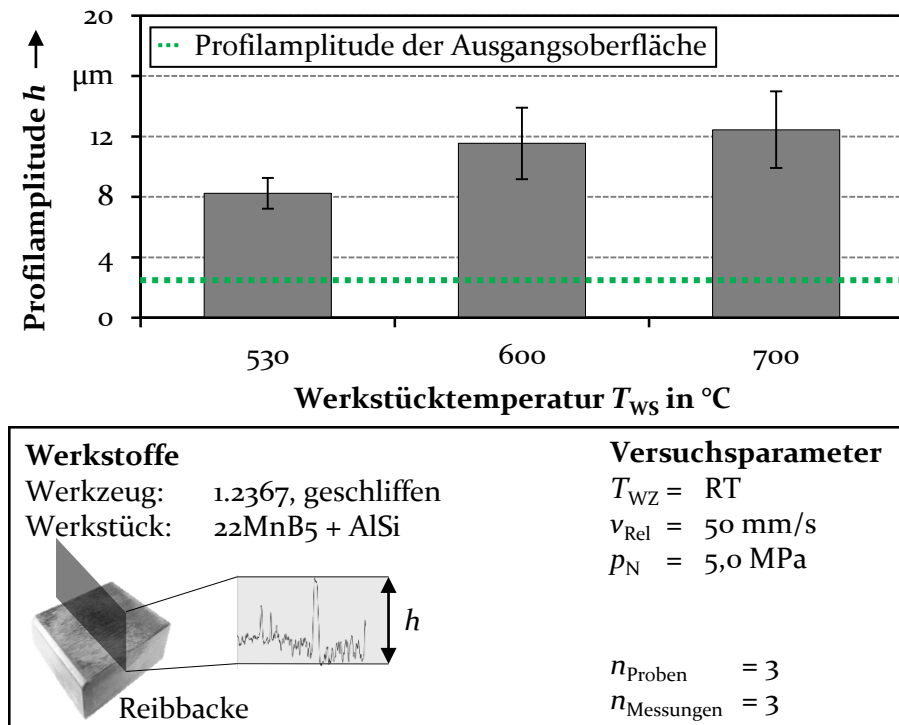


Bild 28: Profilamplitude der Werkzeugoberfläche für unterschiedliche Werkstücktemperaturen

Um den Einfluss des temperaturabhängigen Verschleißverhaltens auf die Reibung zu identifizieren, wird die Werkstückoberfläche des jeweils sechsten Streifenziehversuchs für unterschiedliche Werkstücktemperaturen charakterisiert (Bild 29). Anhand der Aufnahmen ist für Werkstücktemperaturen von 530 °C eine deutliche Einglättung der Rauheitsspitzen auf der Werkstückoberfläche im Vergleich zur Ausgangsoberfläche zu erkennen. Mit einem Anstieg der Werkstücktemperatur auf 600 °C bzw. 700 °C wird die Einglättung weiter verstärkt. Dies ist auf eine erhöhte Duktilität des Werkstücks bei steigenden Temperaturen zurückzuführen [91]. Demnach ist bei höheren Temperaturen weniger Energie für die Einglättung der Rauheitsspitzen notwendig [108]. Zudem tritt mit einem Anstieg der Werkstücktemperatur eine zunehmende Riefenbildung auf der Werkstückoberfläche auf. Diese wird zum einen durch den verstärkten adhäsiven Verschleiß auf der Werkzeugoberfläche und zum anderen durch die verringerte Festigkeit des Werkstücks bei hohen Temperaturen hervorgerufen.

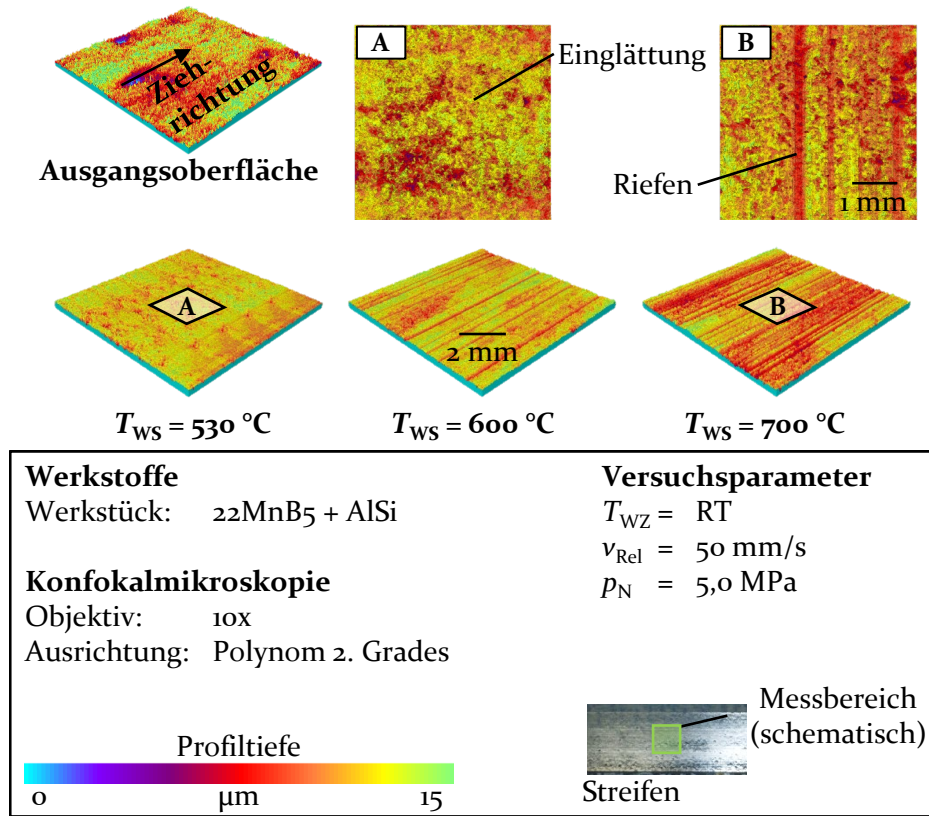


Bild 29: Topographiaufnahmen der Werkstückoberfläche für unterschiedliche Werkstücktemperaturen

Die Analyse der Werkzeug- und Werkstückoberfläche zeigt einen deutlichen Einfluss der Werkstücktemperatur auf das Verschleißverhalten, das sich wiederum direkt und indirekt auf die Reibung auswirkt. In Bild 30 sind die Ursache-Wirkzusammenhänge zwischen der Werkstücktemperatur und dem resultierenden tribologischen Verhalten veranschaulicht. Bei einer Werkstücktemperatur von 530 °C überwiegen die Kohäsionskräfte innerhalb der Werkstückbeschichtung die vergleichsweise geringen Adhäsionskräfte (Bild 30 A). Zudem kommt es aufgrund der geringen Einglättung der Werkstückoberfläche zu einem Verhaken von Rauheitsspitzen, wodurch hohe Reibkräfte resultieren (Bild 30 B). Mit steigenden Werkstücktemperaturen sinkt die Festigkeit der Werkstückoberfläche. Die Reibung sinkt, während gleichzeitig die Deformation der Rauheitsspitzen sowie die Furchung der Werkstückoberfläche durch Unebenheiten auf der Werkzeugoberfläche zunehmen. Hierdurch entsteht Abrieb, der sich aus der Werkstückbeschichtung sowie Oxidpartikeln zusammensetzt [85]. Mit

fortschreitender Relativbewegung werden Rauheitstäler auf Werkzeug- und Werkstückoberfläche mit abgetragenen Partikeln aufgefüllt (Bild 30 D). Sobald Rauheitstäler vollständig aufgefüllt sind und der Abrieb als Zwischenmedium fungiert, wird ein mechanisches Verhaken von Rauheitsspitzen verringert. Zusätzlich tritt an diesen Stellen keine Adhäsion zwischen der Werkstückbeschichtung und der Werkzeugoberfläche auf. Dies führt zu einer Abnahme der Reibung mit steigenden Werkstücktemperaturen.

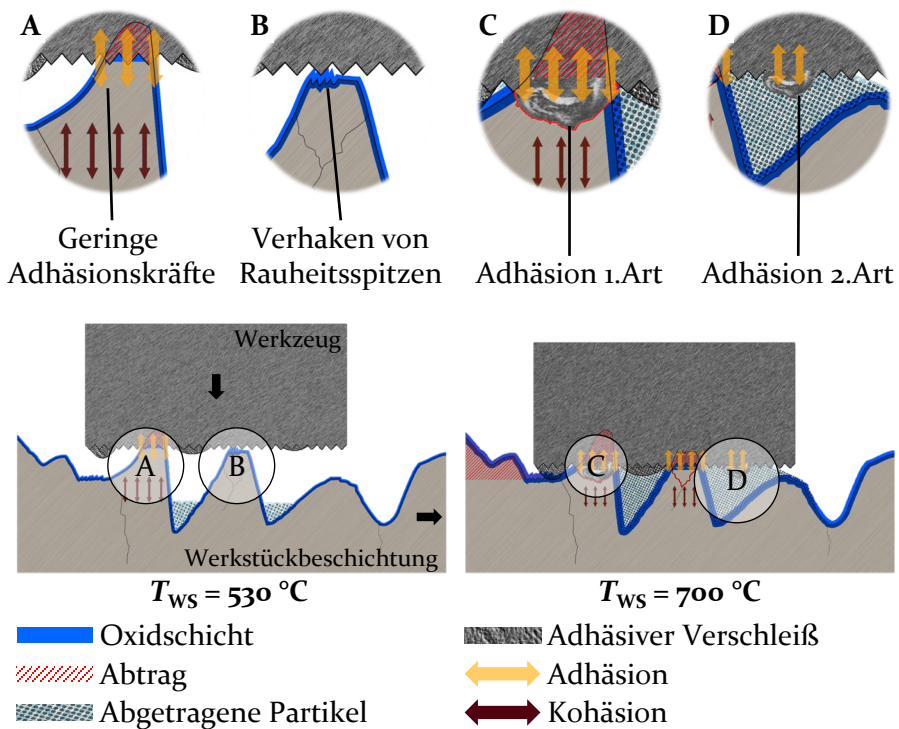


Bild 30: Einfluss der Werkstücktemperatur (schematisch)

Tritt hingegen direkter Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück auf, nimmt adhäsiver Verschleiß mit steigenden Werkstücktemperaturen zu. Dies ist zum Teil auf eine erhöhte Diffusion zurückzuführen [93]. Aufgrund der erhöhten Einglättung nimmt zudem die wahre Kontaktfläche zu. Gleichzeitig sinkt die Kohäsion innerhalb der AlSi-Beschichtung, sodass Teile der Beschichtung leichter gelöst werden (Bild 30 C). Die Folge ist ein erhöhter adhäsiver Verschleiß auf der Werkzeugoberfläche. Durch die Materialanhaftungen am Werkzeug bildet sich eine Oxidschicht mit Schmierwirkung auf der Werkzeugoberfläche (vergleiche Abschnitt 5.3.3).

Zusätzlich nimmt die Adhäsionskomponente durch die reduzierte Scherfestigkeit der Beschichtung ab, sodass die Reibung sinkt [91].

Bei einem weiteren Anstieg der Werkstücktemperaturen nimmt die Deformation der Werkstückoberfläche zu. Die Folge ist mehr Abrieb, der infolge hoher thermischer und mechanischer Belastung verschweißen kann und zu Adhäsion 2. Art führt (Bild 30 D). Dies kann zu einem signifikanten Anstieg der Reibung führen.

6.2.2 Werkzeugtemperatur

Nachdem zuvor der Einfluss der Werkstücktemperatur auf Reibung und Verschleiß analysiert wurde, wird nachfolgend der Einfluss der Werkzeugtemperatur untersucht. Die Temperatur des Werkzeugs wird über drei Heizpatronen mit einer Abweichung von $\pm 10\text{ °C}$ aktiv eingestellt. Die Versuche werden bei einer Ziehgeschwindigkeit von 50 mm/s und einer Flächenpressung von 5 MPa durchgeführt. In Bild 31 sind die Reibzahlen für Werkzeugtemperaturen zwischen 75 °C und 450 °C und Werkstücktemperaturen von 530 °C und 600 °C dargestellt.

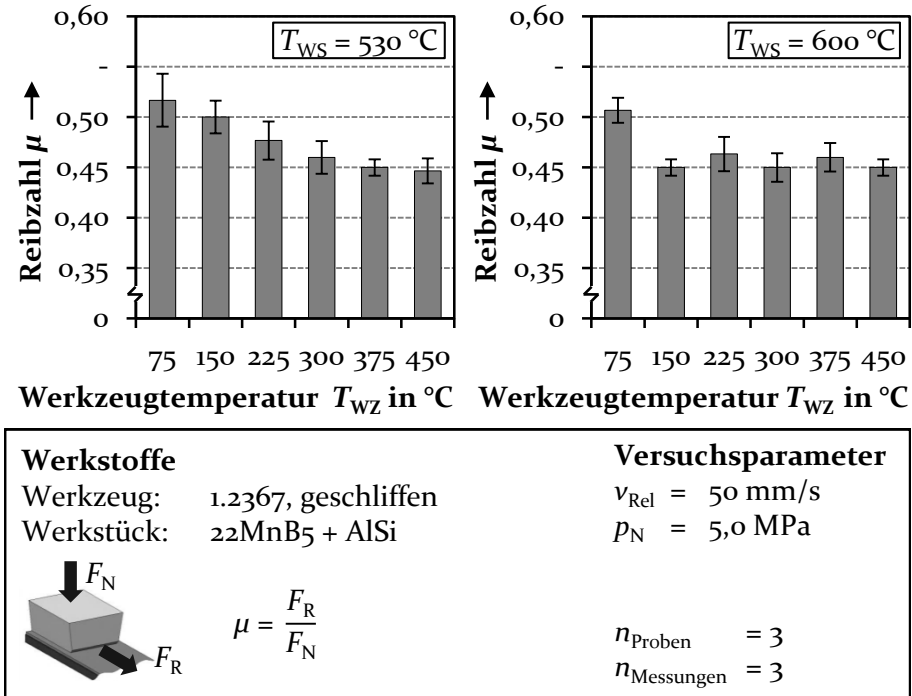


Bild 31: Reibzahlen in Abhängigkeit der Werkzeugtemperatur

Anhand der gemessenen Reibzahlen ist insgesamt eine Reibungsreduzierung mit steigenden Werkzeugtemperaturen zu erkennen. Bei Werkstücktemperaturen von 530 °C führt eine Erhöhung der Werkzeugtemperatur von 75 °C auf 300 °C zu einer annähernd linearen Abnahme der Reibzahl um 11,03 % von $0,517 \pm 0,026$ auf $0,460 \pm 0,016$. Ein weiterer Anstieg der Werkzeugtemperatur auf 375 °C und 450 °C bewirkt hingegen lediglich eine Verringerung der Reibzahl auf $0,450 \pm 0,008$ bzw. $0,447 \pm 0,012$, die innerhalb der Schwankung der Messwerte liegt. Bei einer Werkstücktemperatur von 600 °C bewirkt eine Erhöhung der Werkzeugtemperatur von 75 °C auf 150 °C eine Reduzierung der Reibzahl von $0,507 \pm 0,012$ auf $0,450 \pm 0,008$. Dies entspricht einer Abnahme um 11,24 %. Ein weiterer Anstieg der Werkzeugtemperatur hat keine weitere Reibungsreduzierung zur Folge.

Das beschriebene Reibverhalten ist zum Teil durch den Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die Werkstücktemperatur begründet. Infolge höherer Werkzeugtemperaturen wird die Abkühlung des Werkstücks verlangsamt, sodass höhere Werkstücktemperaturen in der Wirkfuge zwischen Werkzeug und Werkstück vorherrschen [144]. Hierdurch kann die Abnahme der Reibung mit steigenden Werkzeugtemperaturen teilweise begründet werden. Ein weiterer möglicher Erklärungsansatz ist in der Bildung einer Oxidschicht auf der Werkzeugoberfläche infolge der hohen Werkzeugtemperaturen zu sehen [145]. Die in der Literatur festgestellte Schmierwirkung von Oxidschichten trägt demnach maßgeblich zur Verringerung der Reibung bei.

In Bild 32 sind die Werkzeugoberflächen nach Streifenziehversuchen mit unterschiedlichen Werkzeugtemperaturen dargestellt. Die Aufnahmen zeigen die Werkzeugoberfläche nach sechs Streifenziehversuchen exemplarisch für Werkzeugtemperaturen von 75 °C, 225 °C und 375 °C und einer Werkstücktemperatur von 600 °C. Es ist ersichtlich, dass adhäsiver Verschleiß mit steigenden Werkzeugtemperaturen deutlich verringert wird. Bei einer Werkzeugtemperatur von 75 °C sind großflächige Materialanhäufungen auf der Reibbackenoberfläche zu erkennen. Eine Erhöhung der Werkzeugtemperatur auf 225 °C bzw. 375 °C führt zu einer deutlichen Verringerung von adhäsivem Verschleiß.

Die Analyse der Werkzeugoberflächen unterstützt die zuvor formulierte These, dass es bei erhöhten Werkzeugtemperaturen zur Bildung einer Oxidschicht auf der Werkzeugoberfläche kommt. Diese verhindert direkten Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück und unterbindet dadurch die Entstehung von Adhäsion [146].

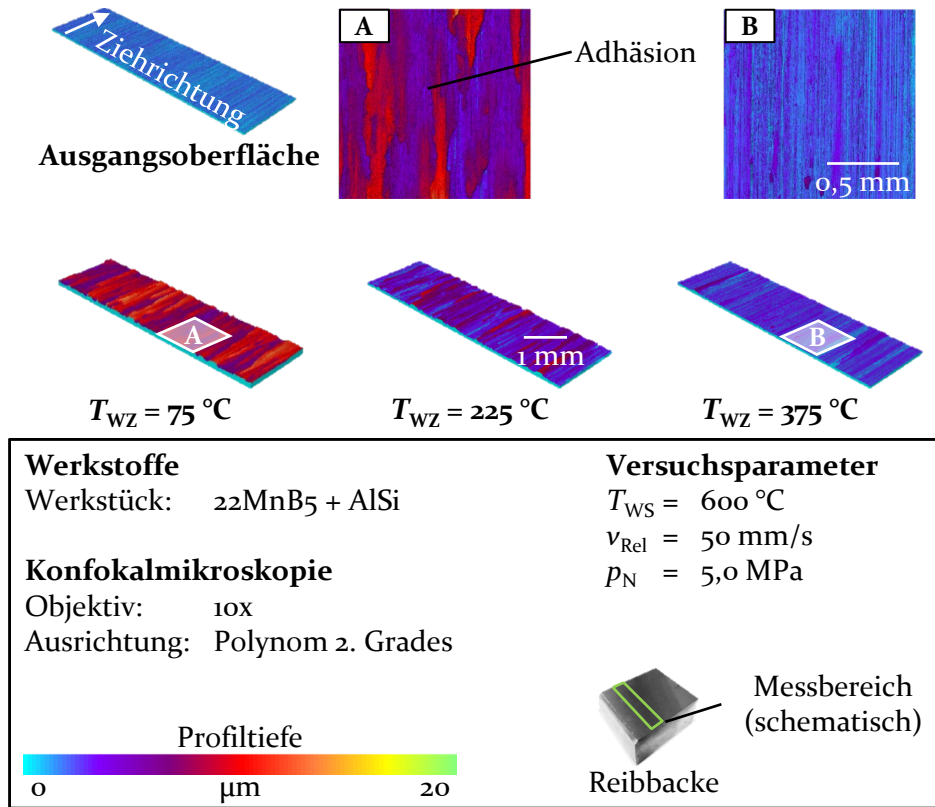


Bild 32: Topographiaufnahmen der Werkzeugoberfläche für unterschiedliche Werkzeugtemperaturen

Die Messung der Profilamplitude auf der Werkzeugoberfläche in Bild 33 bestätigt den Eindruck aus der qualitativen Oberflächencharakterisierung. Mit steigenden Werkstücktemperaturen geht insgesamt eine signifikante Abnahme der Profilamplitude einher. Nach den durchgeführten Streifenziehversuchen mit 75 °C Werkzeugtemperatur wurde auf der Reibbackenoberfläche eine mittlere Profilamplitude von $9,45 \pm 1,42\text{ }\mu\text{m}$ gemessen. Ein Anstieg der Werkzeugtemperatur auf 225 °C resultiert in einer mittleren Profilamplitude von $8,29 \pm 0,25\text{ }\mu\text{m}$. Bei einer Werkzeugtemperatur von 375 °C reduziert sich die Profilamplitude auf $4,90 \pm 0,93\text{ }\mu\text{m}$. Dies entspricht einer Abnahme um $48,15\%$ gegenüber der Profilamplitude nach Versuchen mit 75 °C Werkzeugtemperatur. Durch die Verringerung von Materialanhaftungen auf der Werkzeugoberfläche wirkt sich die Erhöhung der Werkzeugtemperatur auf das Reibverhalten aus.

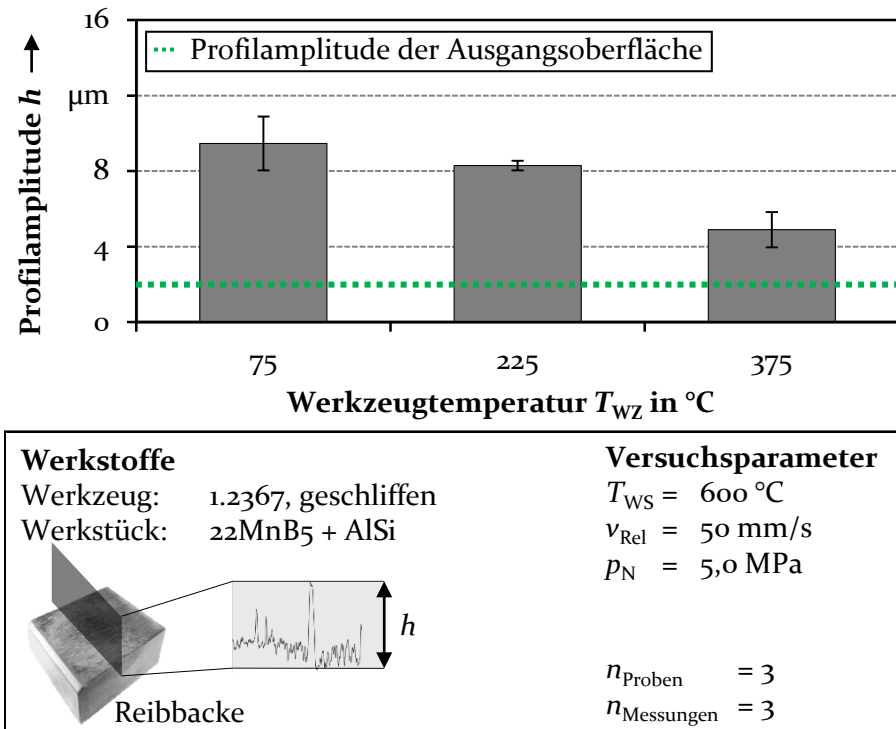


Bild 33: Profilamplitude der Werkzeugoberflächen für unterschiedliche Werkzeugtemperaturen

In Bild 34 ist die Werkstückoberfläche nach Versuchsdurchführung mit unterschiedlichen Werkzeugtemperaturen exemplarisch dargestellt. Die Aufnahmen der Streifentopographie zeigen unabhängig von der Werkzeugtemperatur eine Einglättung der Rauheitsspitzen. Auf der Streifenoberfläche nach Versuchen mit einer Werkzeugtemperatur von 75 °C sind Furchen in Ziehrichtung zu erkennen. Diese werden durch die lokalen Materialanhaftungen auf der Werkzeugoberfläche verursacht. Mit steigenden Temperaturen nehmen die Anzahl und die Tiefe der Furchen ab.

Dies stimmt mit dem zuvor beobachteten Verschleißverhalten in Abhängigkeit der Werkzeugtemperatur überein. Demnach führt die Bildung einer Oxidschicht auf der Werkzeugoberfläche bedingt durch die hohen Werkzeugtemperaturen zu einer Verringerung des adhäsiven Verschleißes. Der reduzierte Materialübertrag resultiert in einer geringeren Furchung der Streifenoberfläche.

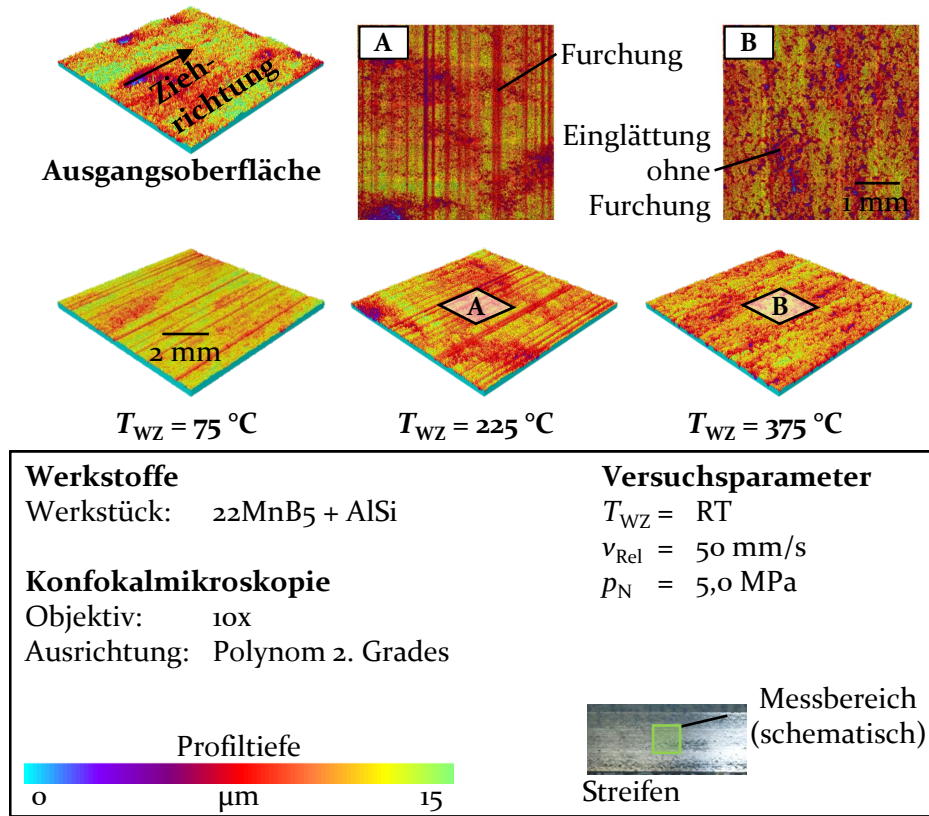


Bild 34: Topographieaufnahmen der Werkstückoberfläche für unterschiedliche Werkzeugtemperaturen

Die Abnahme der Reibung mit steigenden Werkzeugtemperaturen ist daher durch mehrere direkte und indirekte Einflussfaktoren begründet. Die Ursache-Wirkzusammenhänge zwischen der Werkzeugtemperatur und dem resultierenden Reib- und Verschleißverhalten sind in Bild 35 schematisch veranschaulicht. Während der Relativbewegung wird die zu überwindende Adhäsionskraft durch die Oxidschicht auf der Werkzeugoberfläche verringert. Folglich nimmt der Materialübertrag von Werkstückbeschichtung zu Werkzeug ab (Bild 35 A). Zudem wird die Furchung der Streifenoberfläche mit steigenden Werkzeugtemperaturen aufgrund des geringeren adhäsiven Verschleißes auf der Werkzeugoberfläche reduziert (Bild 35 B). Dies bewirkt eine Abnahme von Reibung und Verschleiß mit steigenden Werkzeugtemperaturen.

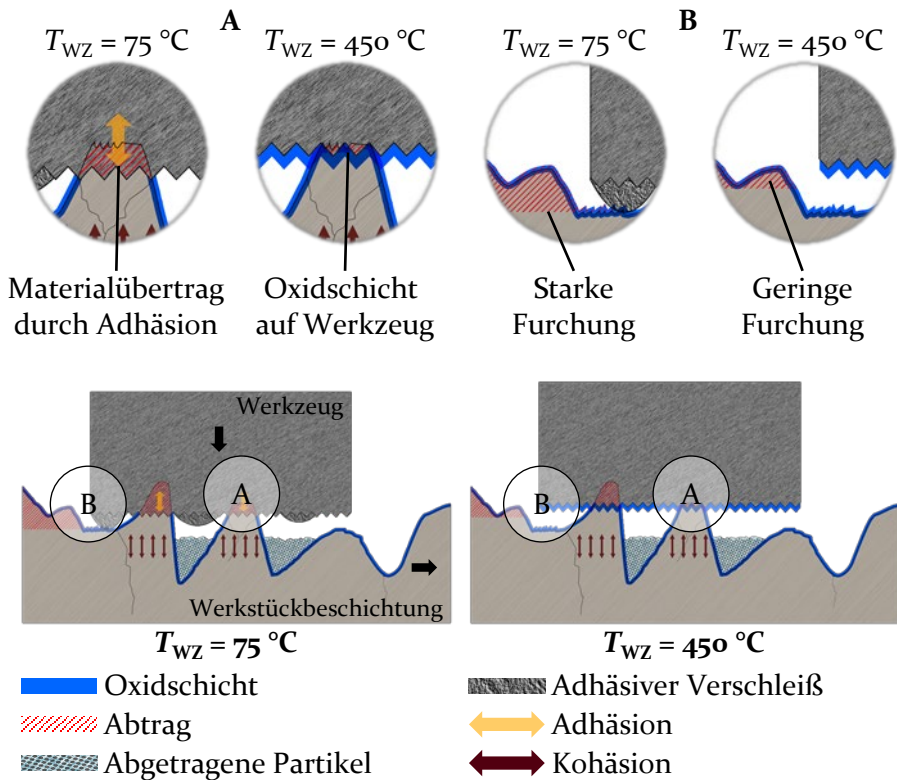


Bild 35: Einfluss der Werkzeugtemperatur (schematisch)

6.2.3 Geschwindigkeit

Neben der Temperatur des Werkstücks und des Werkzeugs ist die Relativgeschwindigkeit zwischen beiden Kontaktpartnern eine wichtige Einflussgröße auf das tribologische System beim Presshärten. Während mit Blick auf die Auskühlung des Werkstücks und die Taktzeit tendenziell hohe Pressengeschwindigkeiten beim Presshärten in der industriellen Praxis eingesetzt werden, treten speziell gegen Ende der Umformung geringe Relativgeschwindigkeiten zwischen Werkzeug und Werkstück auf.

Der Einfluss der Relativgeschwindigkeit auf die tribologischen Bedingungen wird daher für Ziehgeschwindigkeiten zwischen 10 – 120 mm/s untersucht. Die Versuche werden mit einem unbeheizten Werkzeug durchgeführt. In Bild 36 sind die Ergebnisse der Streifenziehversuche exemplarisch für Flächenpressungen von 2,5 MPa und 5,0 MPa dargestellt.

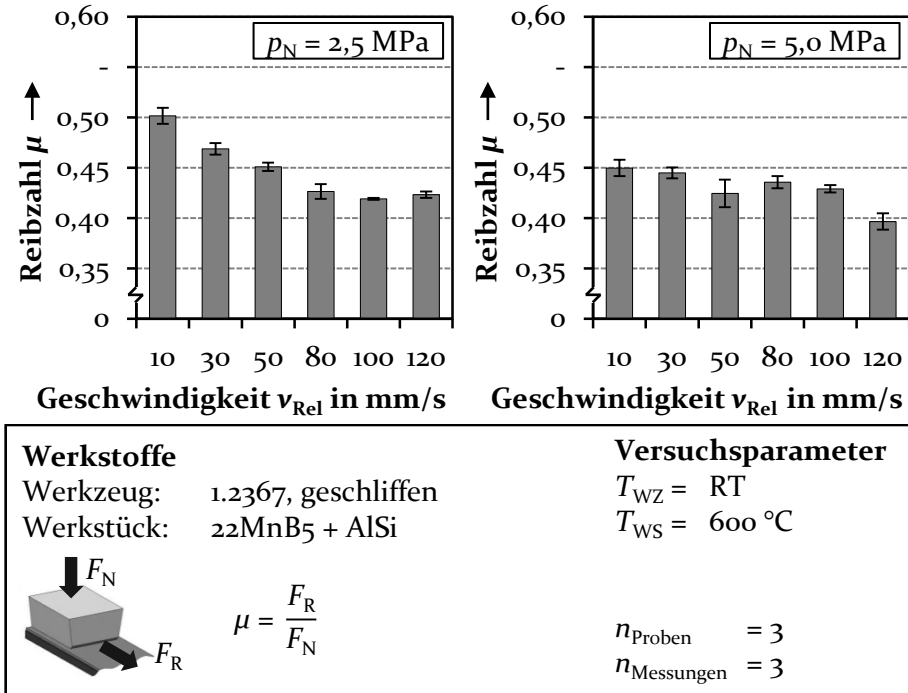


Bild 36: Reibzahlen in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit

Es ist ersichtlich, dass mit steigenden Relativgeschwindigkeiten geringere Reibzahlen einhergehen. Der Einfluss der Relativgeschwindigkeit ist bei einer Flächenpressung von 2,5 MPa ausgeprägter als bei 5,0 MPa. Die höchsten Reibzahlen wurden mit $0,502 \pm 0,008$ bei einer Ziehgeschwindigkeit von 10 mm/s bei 2,5 MPa Flächenpressung gemessen. Eine Erhöhung der Relativgeschwindigkeit auf 100 mm/s hat eine schrittweise Abnahme der Reibzahl auf $0,419 \pm 0,001$ um 16,53 % zur Folge. Ein weiterer Anstieg der Geschwindigkeit wirkt sich nicht auf die Reibung aus. Der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Reibung ist bei einer Flächenpressung von 5,0 MPa weniger deutlich ausgeprägt. Mit steigender Geschwindigkeit ist eine Abnahme der gemessenen Reibzahl von $0,450 \pm 0,008$ bei 10 mm/s auf $0,397 \pm 0,008$ bei 120 mm/s zu beobachten. Eine mögliche Erklärung für den Einfluss der Relativgeschwindigkeit auf die Reibung ist der Anstieg der Temperatur in der Wirkfuge aufgrund der vermehrt eingebrachten kinetischen Energie [95]. Diese führt zu einem geringeren Widerstand der Werkstückoberfläche gegenüber Deformation und bewirkt damit eine Abnahme der Reibung.

Um den Einfluss der Relativgeschwindigkeit auf das Verschleißverhalten zu untersuchen, wird die Werkzeugtopographie optisch analysiert. In Bild 37 ist die Werkzeugoberfläche für unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten nach sechs Streifenziehversuchen bei einer Werkstücktemperatur von 600 °C und einer Flächenpressung von 5 MPa dargestellt. Anhand der Aufnahmen ist zu erkennen, dass der adhäsive Verschleiß an der Werkzeugoberfläche für geringe Ziehgeschwindigkeiten sichtbar ausgeprägter ist. Die Topographienaufnahmen zeigen für niedrige Geschwindigkeiten einen höheren Anteil an adhäsiv verschlissener Fläche mit größerer Spannweite der Profiltiefe. Die Werkzeugoberflächen nach Streifenziehversuchen mit höheren Ziehgeschwindigkeiten weisen eine geringere Topographietiefe sowie lediglich lokal auftretenden Verschleiß auf. Der Grund für den Einfluss der Geschwindigkeit auf den Verschleiß ist in dem zeitabhängigen Diffusionsverhalten der Atome zu sehen [103]. Infolge längerer Kontaktzeiten ist demnach ein Anstieg der Adhäsion zu erwarten.

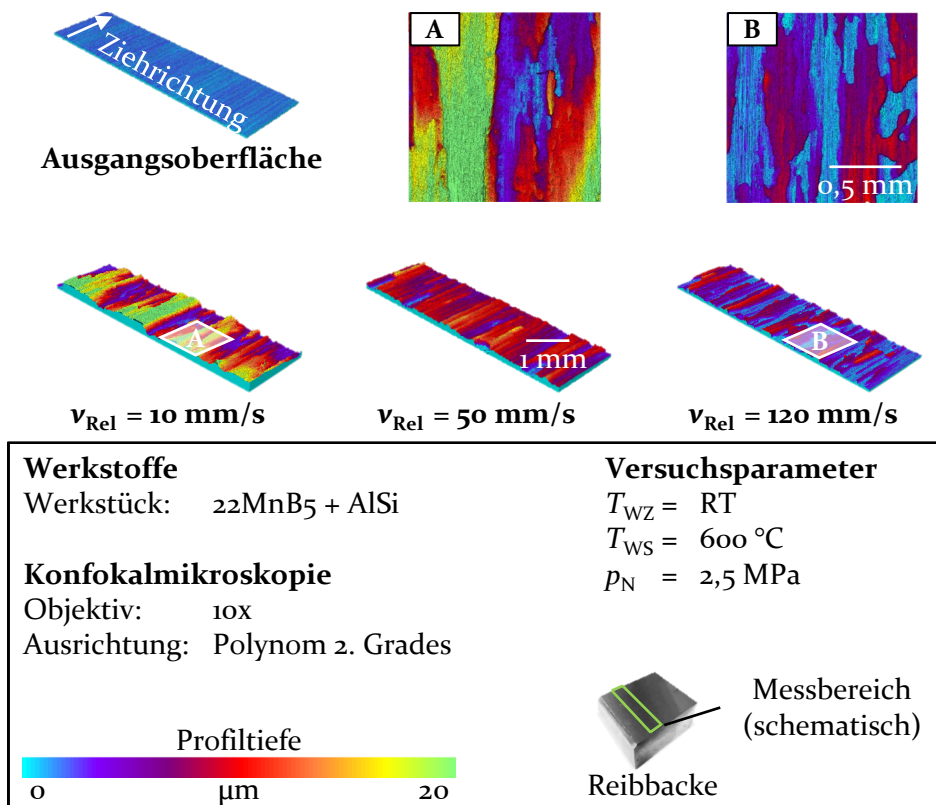


Bild 37: Topographienaufnahmen der Werkzeugoberfläche für unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten

Der Eindruck aus den qualitativen Oberflächenaufnahmen wird durch die Messung der Profilamplituden bestätigt (Bild 38). Aus der absoluten Höhe der Oberflächenprofile wird ersichtlich, dass geringe Relativgeschwindigkeiten zu signifikant mehr adhäsivem Verschleiß führen. Dieses Ergebnis unterstützt den zuvor formulierten Wirkzusammenhang zwischen der Kontaktzeit von Werkzeug und Werkstück und dem resultierenden Verschleißverhalten.

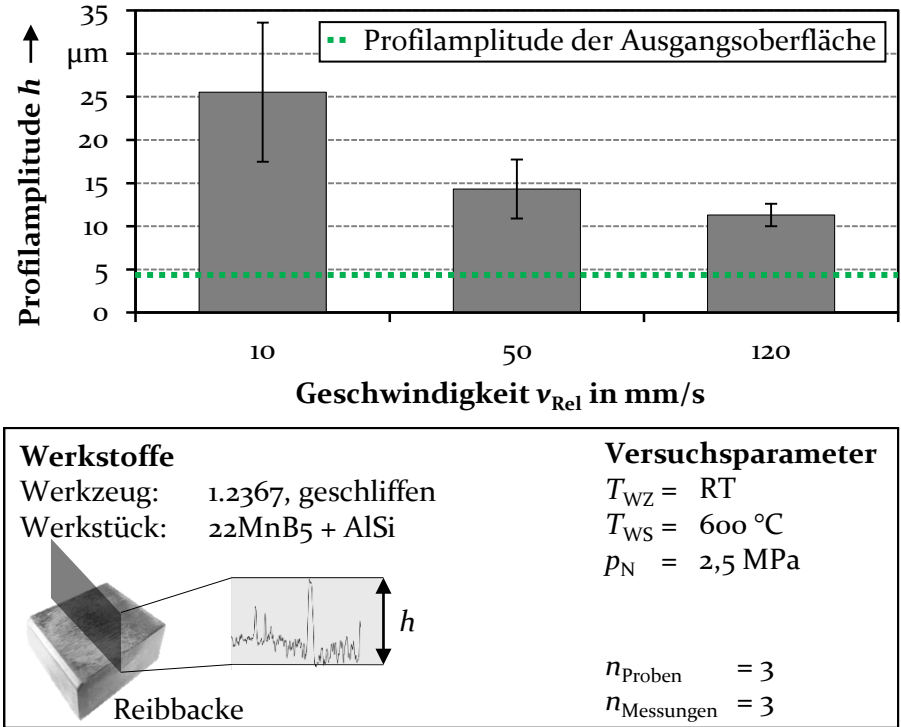


Bild 38: Profilamplitude der Werkzeugoberfläche für unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten

Der beobachtete Einfluss der Relativgeschwindigkeit auf den Verschleiß bietet zudem eine Erklärung für die Abnahme der Reibung mit steigenden Ziehgeschwindigkeiten. Demzufolge ist ein Abfall der Reibung bei höheren Ziehgeschwindigkeiten durch eine geringe Adhäsionskomponente der Reibung begründet.

Die Topographieaufnahmen der Werkstückoberfläche in Bild 39 verdeutlichen den Effekt des adhäsiven Verschleißes auf das Reibverhalten. Auf den Aufnahmen der Werkstückoberfläche ist zu erkennen, dass bei Versuchen

mit geringer Relativgeschwindigkeit ein erhöhter Materialtransfer von Werkstück zu Werkzeug stattfindet.

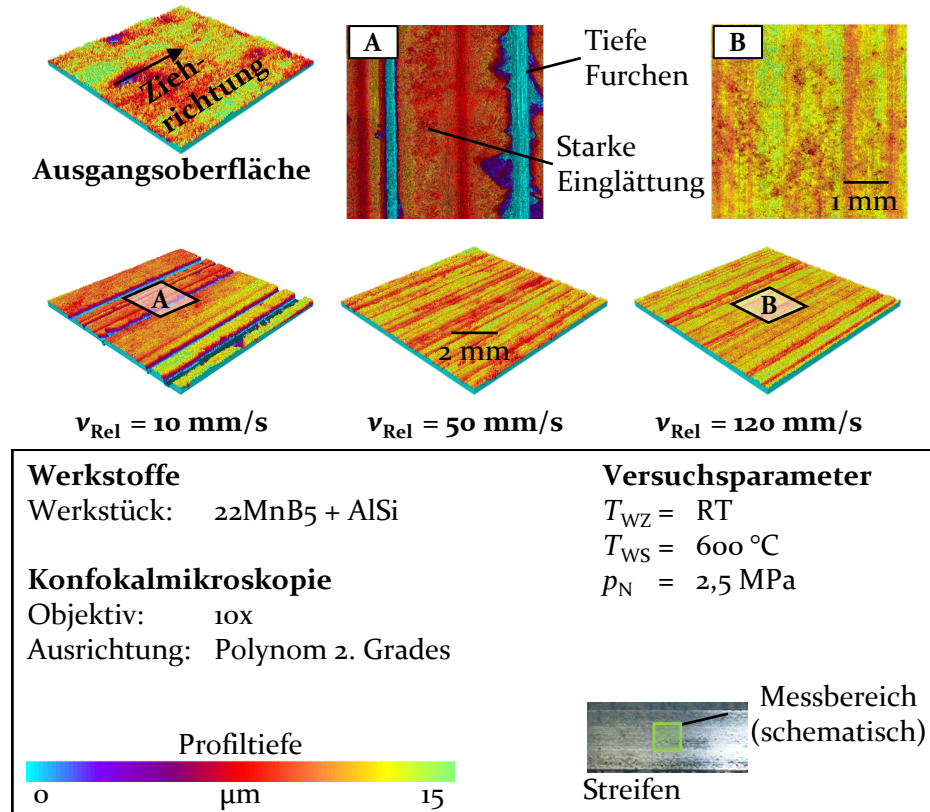


Bild 39: Topographiaufnahmen der Werkstückoberfläche für unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten

Dies ist anhand der geringen Topographietiefe zwischen den Furchen zu erkennen, die sich sichtbar von der rauen Ausgangsoberfläche mit AlSi-Beschichtung unterscheidet. Zusätzlich führt der hohe Materialtransfer bei niedrigen Geschwindigkeiten zu tiefen Furchen auf der Werkstückoberfläche. Durch eine erhöhte Deformations- und Furchungskomponente steigt die Reibung an [95]. Bei hohen Geschwindigkeiten sind Einglättung und Furchung geringer, aufgrund des verringerten Materialübertrags von Werkstück zu Werkzeug. Zudem führt die verstärkte Dissipation kinetischer Energie bei hohen Geschwindigkeiten zu einem Temperaturanstieg in der Wirkfuge [95]. Durch die lokale Temperatureinbringung sinkt die Festigkeit der Werkstückoberfläche und damit der Widerstand des Werkstücks gegenüber Furchung und Deformation. Demnach geht mit hohen

6.2.4 Flächenpressung

Ein weiterer zentraler Einflussfaktor auf die tribologischen Bedingungen ist die anliegende Flächenpressung zwischen Werkzeug und Werkstück. Diese wird im Rahmen der Streifenziehversuche bei einer Kontaktfläche von 2000 mm^2 über die Normalkraft eingestellt. Der Einfluss der Flächenpressung wird in den drei Abstufungen 2,5 MPa, 5,0 MPa und 7,5 MPa untersucht. In Bild 41 ist der Einfluss der Flächenpressung für unterschiedliche Werkstücktemperaturen bei einer Relativgeschwindigkeit von 50 mm/s und unbeheiztem Werkzeug exemplarisch dargestellt.

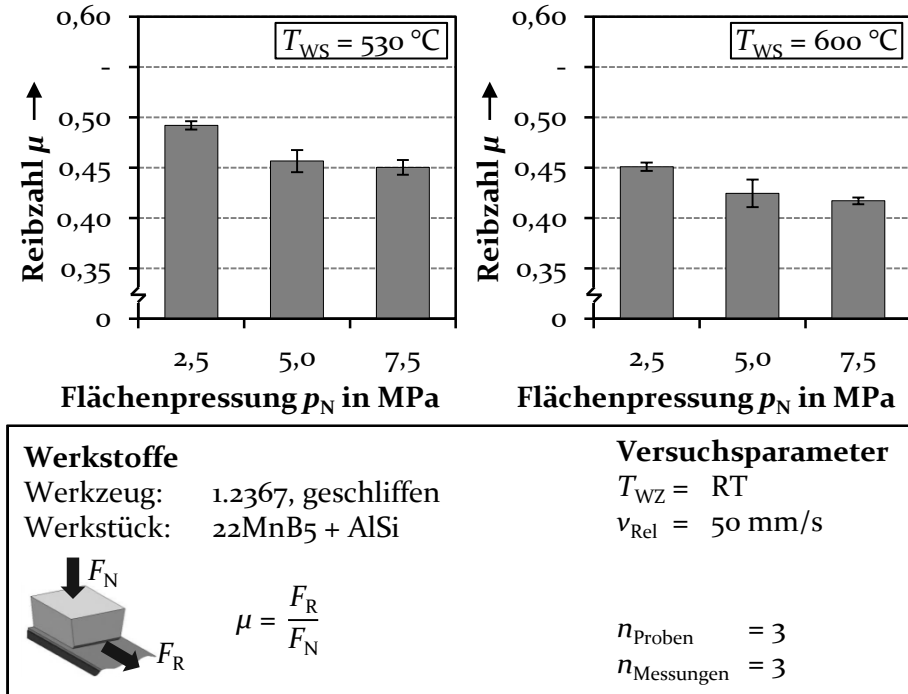


Bild 41: Reibzahlen in Abhängigkeit der Flächenpressung

An den gemessenen Reibzahlen ist ersichtlich, dass mit einer Erhöhung der Flächenpressung ein Abfall der Reibung einhergeht. Dies gilt unabhängig von der Werkstücktemperatur. Bei einer Werkstücktemperatur von 530 °C ist mit einer Erhöhung der Flächenpressung von 2,5 auf 5,0 bzw. 7,5 MPa eine Verringerung der Reibzahl von $0,492 \pm 0,004$ auf $0,457 \pm 0,011$ bzw. $0,450 \pm 0,007$ zu beobachten. Dies entspricht einer Reibungsreduzierung um insgesamt 8,54 %. Bei einer Werkstücktemperatur von 600 °C führt die Erhöhung der Flächenpressung zu einer Abnahme der Reibzahl um 7,54 % von $0,451 \pm 0,004$ auf $0,417 \pm 0,003$. Eine mögliche Ursache für die Abnahme

der Reibung mit steigenden Kontaktdrücken ist die verstärkte Einglättung von Rauheitsspitzen, wodurch mechanisches Verhaken von Rauheitsspitzen verringert wird. Zudem entsteht bei höheren Flächenpressungen vermehrt Abrieb, der wie in Abschnitt 6.2.1 beschrieben zu einer weiteren Reibungsreduzierung führen kann.

Nachfolgend wird der Einfluss der Flächenpressung auf die Werkstückoberfläche und das resultierende Verschleißverhalten erläutert. Bild 42 zeigt die Topographiaufnahmen der Reibbackenoberfläche exemplarisch für eine Werkstücktemperatur von 600 °C bei unterschiedlichen Flächenpressungen.

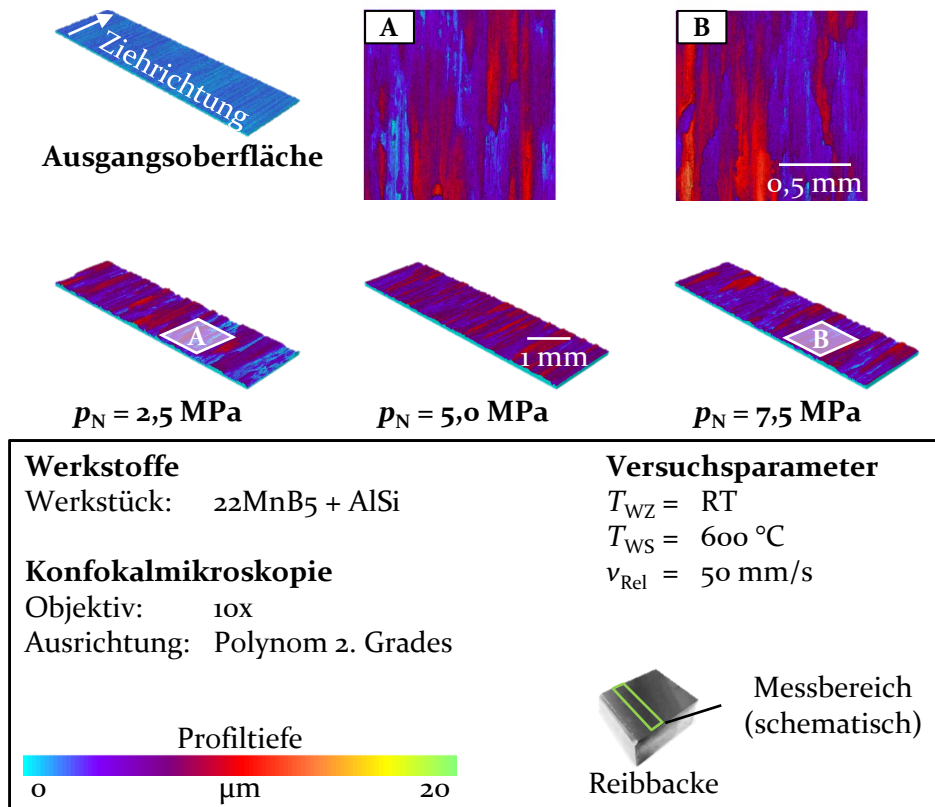


Bild 42: Topographiaufnahmen der Werkzeuoberfläche für unterschiedliche Flächenpressungen

Anhand der Konfokalmikroskopieaufnahmen ist kein signifikanter Einfluss der Flächenpressung auf den Verschleiß der Werkzeuoberfläche zu sehen. Zudem geht im Rahmen der durchgeführten Streifenziehversuche keine Erhöhung der Topographietiefe mit höheren Flächenpressungen einher. Ein

möglicher Grund hierfür ist eine verstärkte Einglättung der Materialanhafungen bei höheren Flächenpressungen, sodass eine eventuelle Zunahme des adhäsiven Verschleißes in diesem Fall mittels Konfokalmikroskopaufnahmen nicht erfasst werden kann. Die Analyse der Profilamplitude in Bild 43 zeigt ebenfalls keinen signifikanten Einfluss der Flächenpressung auf die Höhe des adhäsiven Verschleißes. Unabhängig von der Flächenpressung liegt die Profilamplitude zwischen 9 und 10 μm . Basierend auf der optischen Analyse der Werkzeugoberfläche nach den Streifenziehversuchen kann kein quantifizierbarer Zusammenhang zwischen der Flächenpressung und dem resultierenden Verschleißverhalten identifiziert werden.

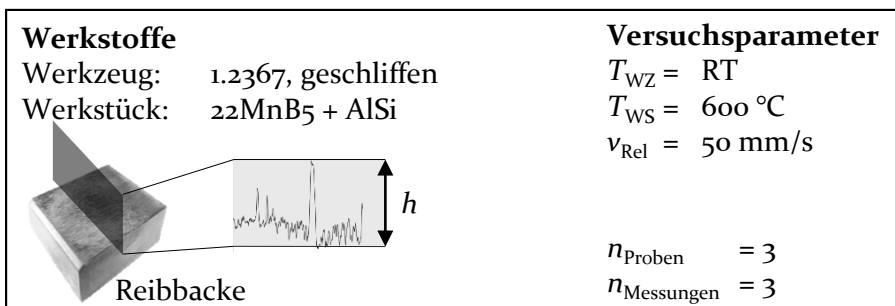
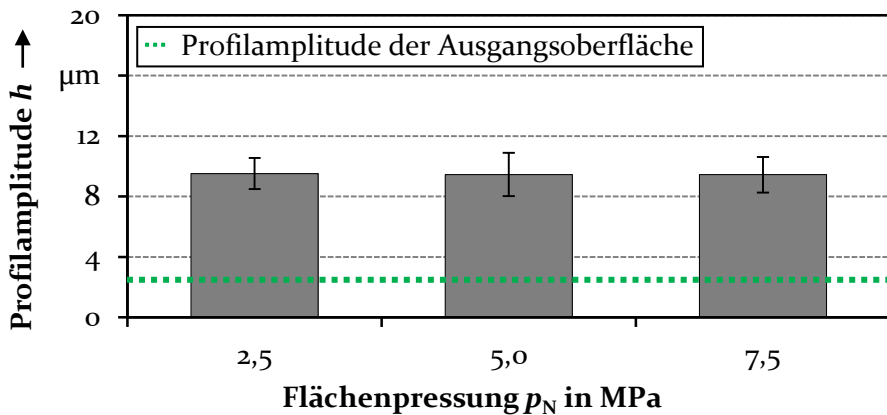


Bild 43: Profilamplitude der Werkzeugoberfläche für unterschiedliche Flächenpressungen

In Bild 44 ist die Oberfläche des Werkstücks nach sechs Streifenziehversuchen bei einer Werkstücktemperatur von 600 °C und unterschiedlichen Flächenpressungen exemplarisch dargestellt. Auf den Aufnahmen ist erkennbar, dass Einglättung und Furchung mit steigenden Anpressdrücken zunehmen. Bei einer Flächenpressung von 2,5 MPa zeigt sich eine Einglättung der Werkstückoberfläche infolge des Kontakts mit dem Werkzeug.

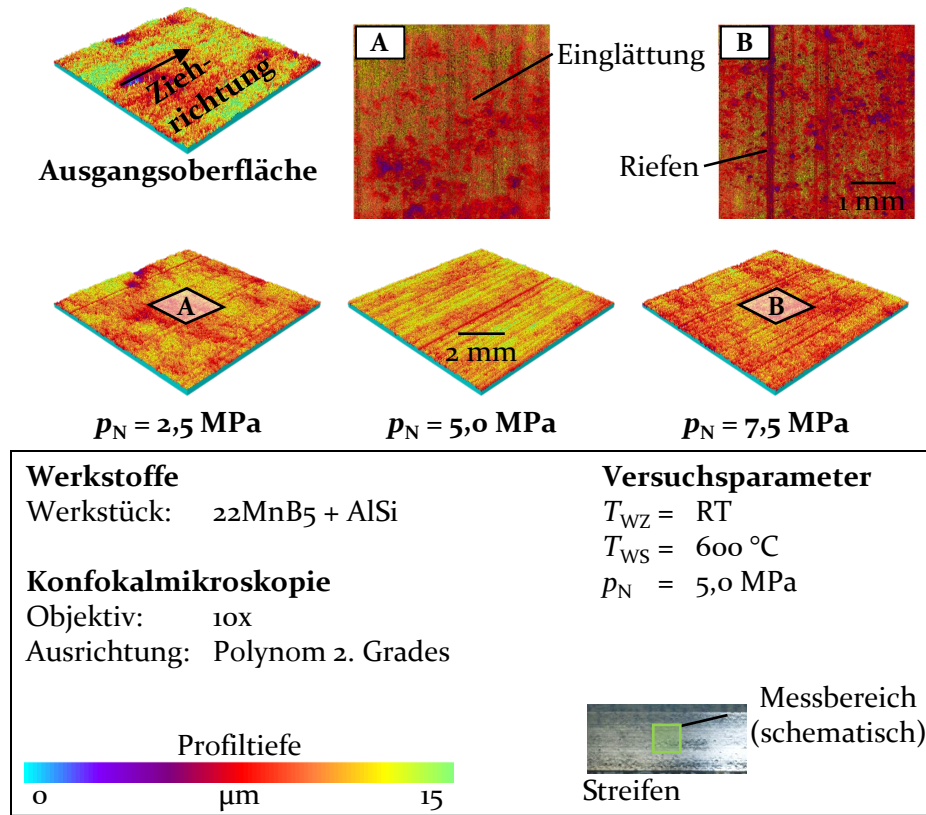


Bild 44: Topographieaufnahmen der Werkstückoberfläche für unterschiedliche Flächenpressungen

Mit einem Anstieg der Flächenpressung auf 5,0 MPa wird die Einglättung weiter verstärkt. Darüber hinaus nimmt die Furchung durch die Werkzeugoberfläche zu. Bei einer Flächenpressung von 7,5 MPa ist eine weiter erhöhte Einglättung zu sehen. Die Werkstückoberfläche weist jedoch schmalere und weniger tiefe Furchen auf. Dies deutet darauf hin, dass ein größerer Anteil der weichen Werkstückbeschichtung abgetragen worden ist. Die beobachtete Veränderung der Werkstückoberfläche in Abhängigkeit der Flächenpressung stimmt mit den Ergebnissen von Ghiotti et al. [91] überein. Die Einglättung der Werkstückoberfläche ist eine mögliche Erklärung für die Abnahme der Reibung mit steigenden Flächenpressungen. Darüber hinaus wird die Deformation der Werkstückoberfläche durch die erhöhte mechanische Belastung verstärkt.

Auf Basis der experimentellen Untersuchungen wurden Ursache-Wirkzusammenhänge zwischen der Flächenpressung zwischen Werkzeug und

Werkstück und dem resultierenden Reib- und Verschleißverhalten abgeleitet. Diese sind in Bild 45 schematisch dargestellt. Durch die Deformation der Oberfläche wird Abrieb erzeugt. Der Abrieb reicht bei einer vergleichsweise geringen Flächenpressung von 2,5 MPa nicht aus, um tiefe Rauheitstäler aufzufüllen (Bild 45 B). Folglich ist ein mechanisches Verhaken von Rauheitsspitzen von Werkzeug und Werkstück aufgrund der geringen Einglättung möglich (Bild 45 A). Dies resultiert in hohen Reibzahlen bei niedrigen Flächenpressungen. Mit steigenden Flächenpressungen nehmen die Einglättung und die Menge an Abrieb zu (Bild 45 C). Dieser kann eine verschleißreduzierende Schutzschicht auf der Werkstückoberfläche bilden [95]. Darüber hinaus wirkt der Abrieb als eine Art Festkörperschmierstoff. Rauheitstäler auf der Werkstückoberfläche werden aufgefüllt und ein mechanisches Verhaken zwischen Werkzeug und Werkstück verringert (Bild 45 D). Hierdurch wird die Reibung mit steigenden Flächenpressungen reduziert.

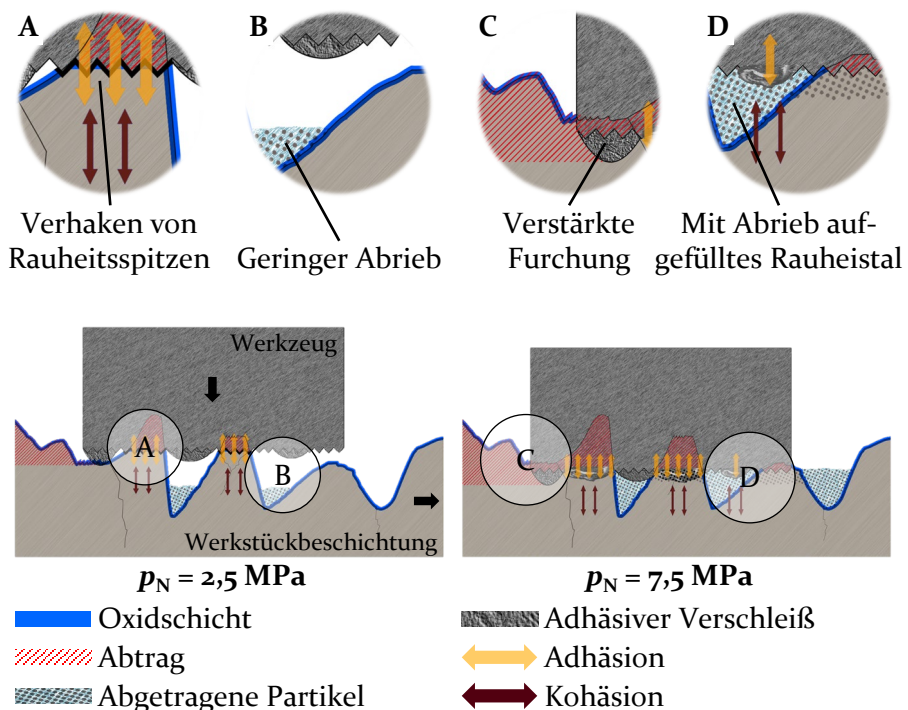


Bild 45: Einfluss der Flächenpressung (schematisch)

Zu hohe Kontaktspannungen führen hingegen zu einem verstärkten Abtrag der Werkstückbeschichtung und zu steigenden Reibkräften, wodurch die Begrenzung des Prozessfensters der Warmstreifenziehanlage bei 7,5 MPa

erklärt werden kann. Durch die Vergrößerung der wahren Kontaktfläche infolge der erhöhten mechanischen Belastung nimmt Adhäsion 1. Art zu [85]. Weiterhin kann es bei hohen Flächenpressungen zu einem Verdichten des Abriebs kommen, der in Kombination mit hohen Temperaturen verschweißen und zu Adhäsion 2. Art führen kann [85].

6.3 Ableitung grundlegender Erkenntnisse in Bezug auf den Einfluss der Prozessführung

Nachfolgend werden die grundlegenden Reibungskomponenten, die mithilfe der Streifenziehversuche zuvor identifiziert wurden, zusammenfassend erläutert. Des Weiteren wird der Einfluss der kritischen Verschleißmechanismen auf das Reibverhalten dargestellt. Abschließend werden die Erkenntnisse bezüglich der tribologischen Bedingungen in Abhängigkeit der Prozessparameter zusammengefasst.

Aufgrund der schmierstofffreien Umformung treten beim Presshärten hohe Reibkräfte auf [147]. Diese beeinflussen neben der Umformkraft auch die resultierende Bauteilqualität [68]. Im Rahmen der durchgeführten Streifenziehversuche konnten sowohl mechanische als auch chemische Einflussfaktoren auf die Reibung identifiziert werden. Da das Werkstück eine geringere Festigkeit als das Werkzeug aufweist, tritt während der Umformung eine Deformation der Werkstückoberfläche auf. Infolge hoher thermischer und mechanischer Belastungen kommt es zu einer Einglättung der Rauheitsspitzen auf der Werkstückoberfläche. Durch die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück erfolgt zudem eine Furchung der Werkstückoberfläche durch Rauheitsspitzen der Werkzeugoberfläche und abrasive Partikel in der Wirkfuge. Die hieraus resultierende Reibung ist abhängig von dem Widerstand des Werkstücks gegenüber der Deformation. Ein zusätzlicher Bewegungswiderstand wird durch das mechanische Verhaken von Rauheitsspitzen hervorgerufen. Neben diesen mechanischen Reibungskomponenten beeinflussen Adhäsionsvorgänge in der Wirkfuge zwischen Werkzeug und Werkstück das Reibverhalten. Infolge der Relativbewegung muss die Adhäsionskraft überwunden werden. Die Ursache hierfür liegt im Wirken von Oberflächenkräften, die nach aktuellem Kenntnisstand unter anderem auf molekulare Wechselwirkungen zurückzuführen sind, wobei die exakten Wirkzusammenhänge bis heute nicht bekannt sind [148]. Hohe Adhäsionskräfte führen darüber hinaus während der Relativbewegung zu einem Ablösen von Teilen der AlSi-Beschichtung, falls die Adhäsionskraft größer als die Scherfestigkeit der Beschichtung ist. Auf-

grund der hohen Temperaturen haben die an der Werkzeug- und Werkstückoberfläche auftretenden Oxidationsprozesse zusätzlich zu den zuvor beschriebenen Faktoren einen signifikanten Einfluss auf das Reibverhalten. Durch den Kontakt mit Sauerstoff bildet sich auf der Werkzeug- und Werkstückoberfläche jeweils eine dünne Oxidschicht [149]. Diese Oxidschichten wirken im Allgemeinen reibungs- und verschleißreduzierend, indem sie Metall-Metall Kontakt verhindern und Adhäsion reduzieren [150]. Die beschriebenen Reibungskomponenten sind in Bild 46 schematisch dargestellt.

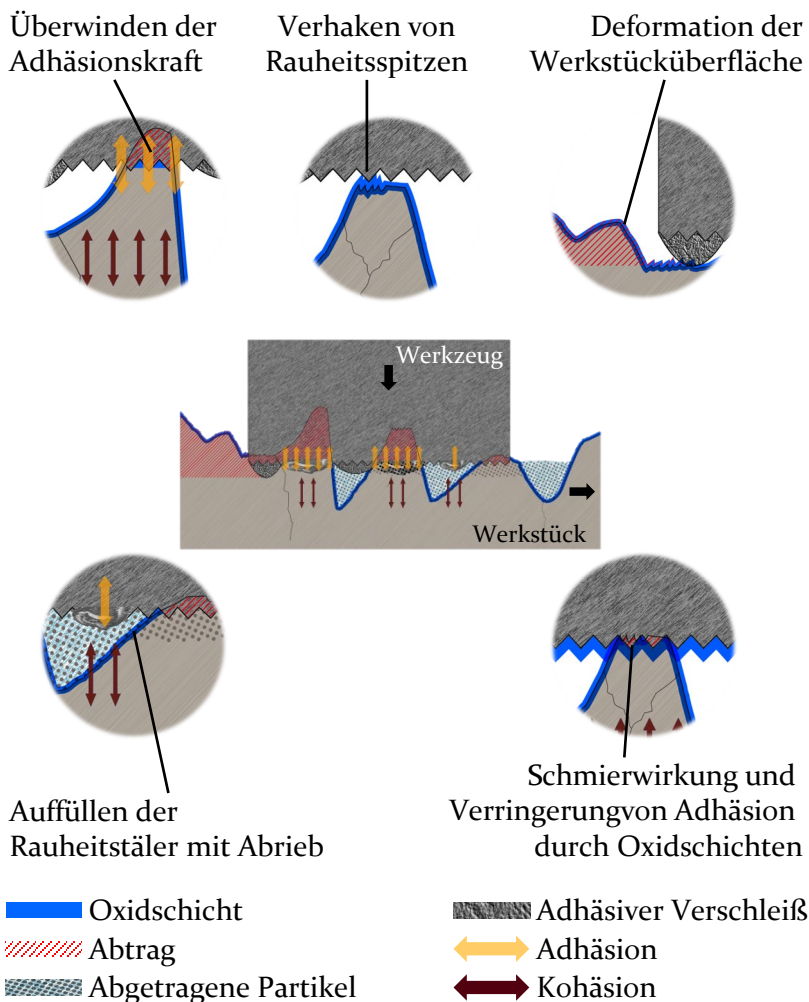


Bild 46: Schematische Darstellung der grundlegenden Reibungskomponenten

Die Reibungsmechanismen werden in hohem Maße durch den hauptsächlich adhäsiven Verschleiß an der Werkzeugoberfläche beeinflusst. Während moderater adhäsiver Verschleiß zunächst eine Abnahme der Reibung bewirkt, führt ausgeprägter adhäsiver Verschleiß zu einem Anstieg der Reibung. Durch Kontakt mit dem Werkzeug kommt es zur Einglättung der Werkstückoberfläche und zur Deformation von lokalen Rauheitsspitzen. An diesen Stellen bricht die Oxidschicht der AlSi-Beschichtung auf [95] und führt zu lokal adhäsivem Verschleiß [151]. Die sich durch den Materialübertrag bildende adhäsive Schicht auf der Werkzeugoberfläche oxidiert stärker als das Grundmaterial des Werkzeugs und bewirkt durch die Schmierwirkung der Oxide eine Verringerung der Reibkräfte [152]. Zusätzlich wird durch die Deformation der Werkstückoberfläche Abrieb erzeugt. Dieser sammelt sich in Rauheitstälern an und wirkt als eine Art Festkörperschmierstoff. Hierdurch bildet sich eine Schutzschicht, die ein mechanisches Verhaken von Rauheitsspitzen sowie adhäsiven Verschleiß reduziert [95]. Dies hat eine weitere Reduzierung der Reibkräfte zur Folge. Mit steigendem adhäsivem Verschleiß ist eine verstärkte Furchung auf der Werkstückoberfläche zu beobachten. Hierdurch wird der Reibungswiderstand durch die Deformation des Werkstücks verstärkt. Zusätzlich kann der in den Furchen angesammelte Abrieb bei zu hoher thermischer und mechanischer Belastung verschweißen und zu adhäsiven Verschleiß 2. Art führen. Die exzessive lokale Materialanhaftung führt zu einer plastischen Deformation des Werkstücks und stark ansteigender Reibung.

In den vorherigen Abschnitten wurde gezeigt, dass die Reibungs- und Verschleißmechanismen in hohem Maße von den Prozessparametern Werkstücktemperatur, Werkzeugtemperatur, Geschwindigkeit und Flächenpressung beeinflusst werden. Nachfolgend werden die Einflüsse der einzelnen Prozessparameter zusammengefasst und identifizierte Wechselwirkungen erläutert. In Bild 47 und Bild 48 ist das Reibverhalten für unterschiedliche Prozessparameter zusammenfassend dargestellt. Der Abfall der Reibung mit einer Erhöhung der Werkstücktemperatur von 530 °C auf 600 °C ist durch mehrere Faktoren begründet. Steigende Werkstücktemperaturen verringern die Festigkeit des Werkstücks [153]. Demzufolge sinkt der Widerstand der Werkstückbeschichtung gegenüber Einglättung und Furchung. Unter gleichbleibender mechanischer Belastung nehmen die Deformation von Rauheitsspitzen sowie die Furchung der Werkstückoberfläche daher zu. Die Folge ist vermehrter Abrieb, der Anteile der Werkstückbeschichtung sowie Oxidpartikel aufweist [85]. Durch die Relativbewegung werden Rauheitstäler durch den Abrieb aufgefüllt, sodass der Reibungswiderstand aufgrund von mechanischem Verhaken der Rauheits-

spitzen abnimmt. Gleichzeitig wird der Abrieb durch hohe Kontaktdrücke und Temperaturen verdichtet und verschweißt, sodass vermehrt adhäsiver Verschleiß 2. Art entsteht. Die gestiegenen Temperaturen führen zudem dazu, dass die Scherfestigkeit der Werkstückbeschichtung abnimmt und so, begünstigt durch Mikrorisse in der Werkstückoberfläche, vermehrt Teile der Beschichtung vom Werkstück gelöst werden und am Werkzeug anhaften (adhäsiver Verschleiß 1. Art). Hierdurch kann das zunächst widersprüchlich erscheinende Absinken der Reibung bei gleichzeitig gestiegenem Verschleiß erklärt werden. Ein weiterer Anstieg der Werkstücktemperatur auf 700 °C bewirkt eine Zunahme des adhäsiven Verschleißes. Durch die lokale Materialanhäufung an der Werkzeuoberfläche nimmt die Furchung des Werkstücks zu. Die Folge ist mehr Abrieb, der bei zu hoher mechanischer und thermischer Belastung verschweißt und einen Anstieg der Reibung bewirkt.

Der Einfluss der Werkzeugtemperatur ist teilweise durch die indirekte Auswirkung auf die Werkstücktemperatur begründet. Infolge höherer Werkzeugtemperaturen wird dem Werkstück bei Kontakt weniger Wärme entzogen, sodass die Abnahme der Reibung mit steigenden Werkzeugtemperaturen zu einem Teil auf höhere Werkstücktemperaturen in der Wirkfuge zurückzuführen ist. Darüber hinaus wird die Oxidation der Werkzeuoberfläche mit steigenden Werkzeugtemperaturen verstärkt. Durch die Oxidschicht wird adhäsiver Verschleiß reduziert und Reibung verringert.

Der Effekt der Relativgeschwindigkeit auf das Reib- und Verschleißverhalten basiert zum Teil auf der vermehrt eingebrachten Wärme mit steigenden Relativgeschwindigkeiten [95]. Durch erhöhte lokale Erwärmung infolge der Dissipation kinetischer Energie ist die Reibungsreduzierung mit höheren Ziehgeschwindigkeiten durch einen Temperaturanstieg in der Wirkfuge zu erklären. Eine weitere mögliche Erklärung für den Einfluss der Relativgeschwindigkeit ist in den komplexen atomaren und molekularen Wechselwirkungen zu finden, auf denen die Adhäsionsvorgänge beruhen. In der Literatur sind unterschiedliche Adhäsionstheorien zu finden, die versuchen das in Experimenten festgestellte Verhalten zu erklären [154]. Zwei dieser Theorien stützen sich zum Teil auf die Ausbildung von Dipolverbindungen sowie auf Diffusionsvorgänge. In diesem Zusammenhang würde eine erhöhte Kontaktzeit zwischen Werkzeug und Werkstück einen Anstieg der Adhäsionskraft und damit erhöhte Reibung und Verschleiß bei niedrigen Relativgeschwindigkeiten erklären. Die Zunahme der Reibung bei sehr hohen Geschwindigkeiten in Verbindung mit hohen Werkstücktemperaturen und Kontaktdrücken ist auf ein Verschweißen abrasiver Partikel durch die zusätzlich eingebrachte Wärme zurückzuführen.

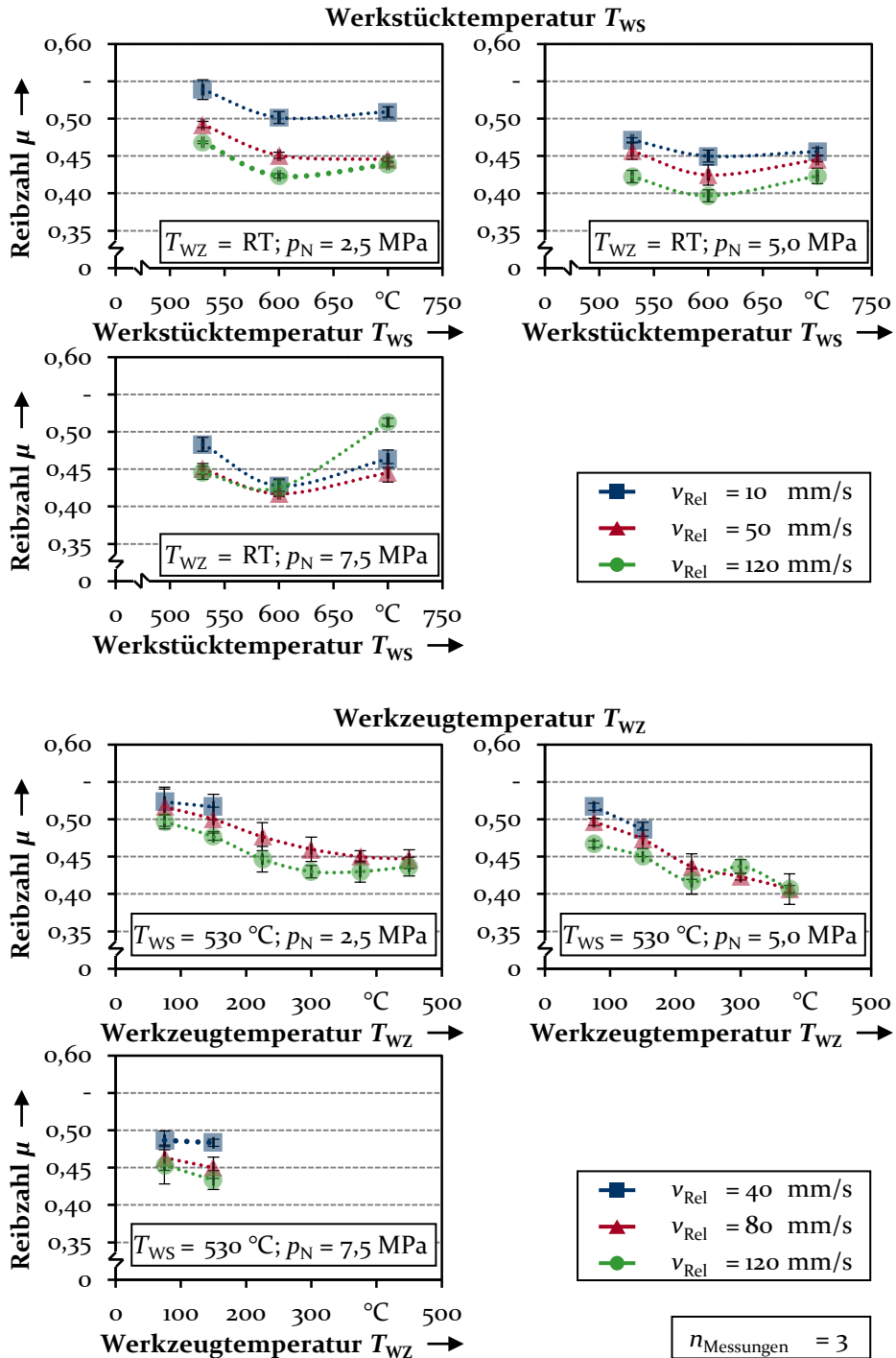


Bild 47: Zusammenstellung der ermittelten Reibzahlen (Teil 1)

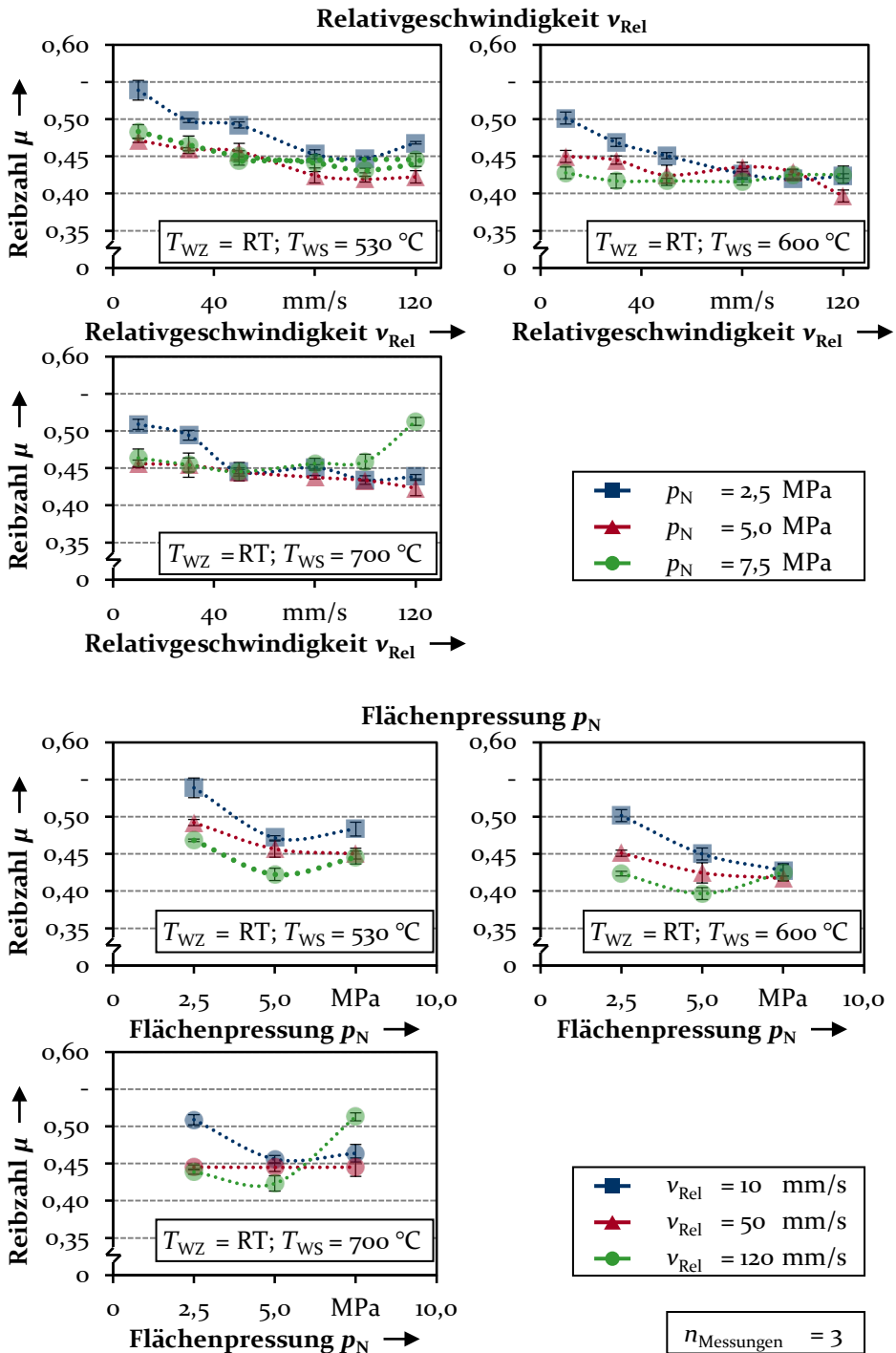


Bild 48: Zusammenstellung der ermittelten Reibzahlen (Teil 2)

Mit einer Erhöhung der Flächenpressung von 2,5 MPa auf 5,0 MPa wurde ein Absinken der Reibung festgestellt. Bei niedriger Flächenpressung kommt es zu einer moderaten Einglättung und Furchung der Werkstückoberfläche. Der hierbei entstehende Abrieb reicht nicht aus, um die Rauheitstäler aufzufüllen, sodass ein mechanisches Verhaken der Rauheitsspitzen von Werkzeug- und Werkstückoberfläche möglich ist und vergleichsweise hohe Reibkräfte resultieren. Mit steigender Flächenpressung wird die Einglättung an der Werkstückoberfläche verstärkt. Zudem wird ein Teil der Werkstückbeschichtung durch die hohen Kontaktdrücke während der Relativbewegung abgetragen. Der hierdurch vermehrt entstehende Abrieb füllt die Rauheitstäler auf und fungiert als eine Art Festkörperschmierstoff, der die Reibung reduziert. Ein weiterer Anstieg der Flächenpressung verstärkt ähnlich wie hohe Werkstücktemperaturen oder Relativgeschwindigkeiten den Werkzeugverschleiß. Die wahre Kontaktfläche wird durch die Einglättung vergrößert, sodass mehr adhäsiver Verschleiß 1. Art auftritt [90]. Zudem wird adhäsiver Verschleiß 2. Art durch das Verdichten und Verschmelzen des Abriebs begünstigt. Der erhöhte Werkzeugverschleiß bewirkt durch die verstärkte Deformation des Werkstücks einen Anstieg der Reibung.

Die Ergebnisse der Streifenziehversuche zeigen, dass die Prozessparameter einen signifikanten Einfluss auf das resultierende Reib- und Verschleißverhalten beim Presshärten haben. Neben dem direkten Einfluss der einzelnen Prozessparameter nehmen die vielseitigen Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen eine zentrale Rolle im Hinblick auf die resultierenden Reib- und Verschleißmechanismen ein.

6.4 Zusammenfassende Bewertung des Prozessverständnisses

Im Rahmen dieses Kapitels wurde ein Prozessverständnis im Hinblick auf die tribologischen Bedingungen beim Presshärten erarbeitet. Relevante Einflussfaktoren auf Reibung und Verschleiß wurden mit Flachbahnstrei-
fenziehversuchen anhand der in Kapitel 5 beschriebenen Methodik untersucht. Im Fokus der experimentellen Untersuchungen stand der Einfluss der Werkstücktemperatur, der Werkzeugtemperatur, der Relativgeschwindigkeit und der Flächenpressung. Bild 49 gibt einen Überblick über den Einfluss der Prozessparameter auf die Reibung beim direkten Presshärten. Um grundlegende Ursache-Wirkzusammenhänge zu identifizieren, wur-

den die Reibung und der Verschleiß auf der Reibbackenoberfläche untersucht. Ferner wurde die Streifenoberfläche nach Versuchsdurchführung analysiert.

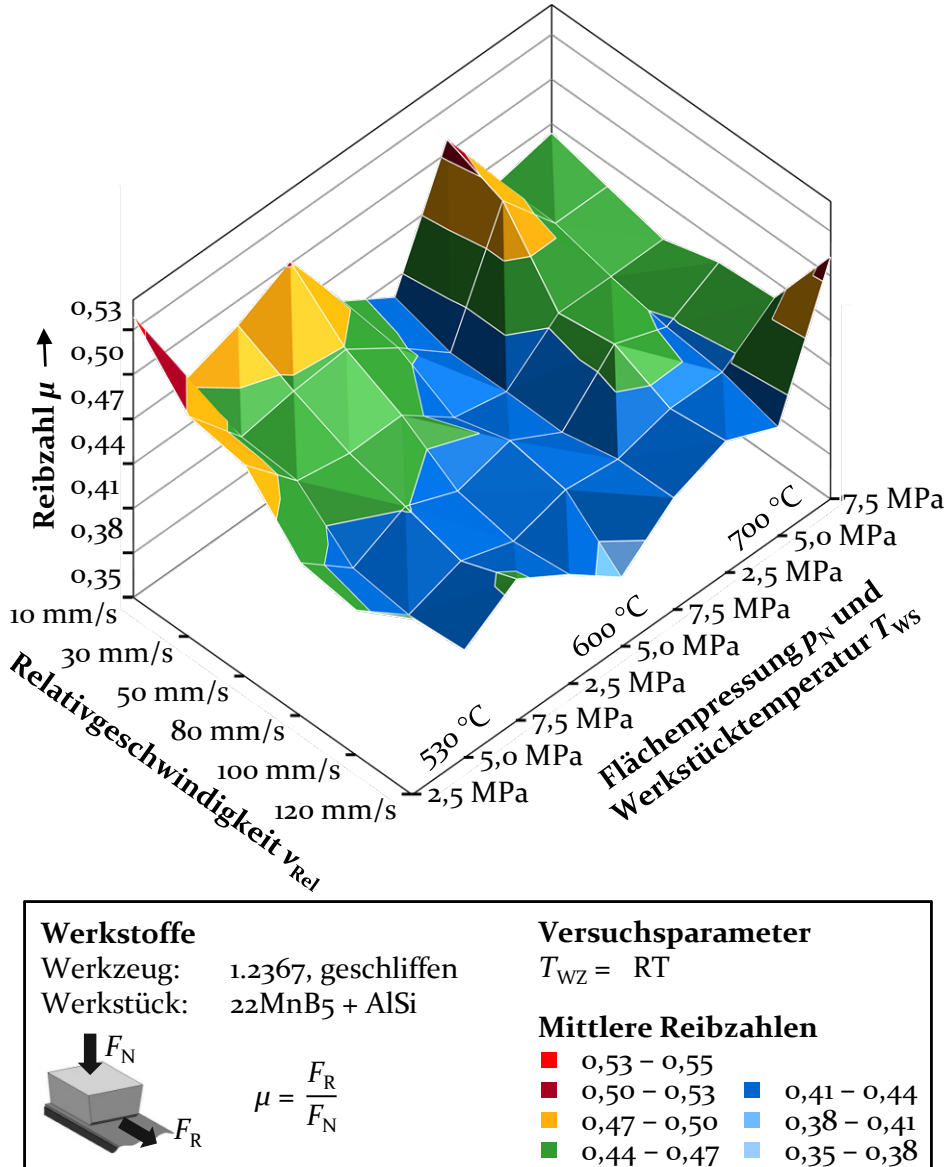


Bild 49: Mittlere Reibzahlen in Abhängigkeit von Relativgeschwindigkeit, Flächenpressung und Werkstücktemperatur für unbeheiztes Werkzeug

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass eine Vielzahl von Reib- und Verschleißmechanismen zu komplexen tribologischen Bedingungen beim Presshärten führen. Als kritische Reibungsaspekte wurden der Widerstand des Werkstücks gegenüber Einglättung und Furchung durch das Werkzeug, ein mechanisches Verhaken von Rauheitsspitzen und das Überwinden der Adhäsionskraft zwischen Werkzeug und Werkstück bzw. das Abscheren von Teilen der Werkstückbeschichtung identifiziert. Diese grundlegenden Reibungsaspekte werden in hohem Maße durch die Entstehung von Abrieb sowie durch Oxidschichten auf der Werkzeug- bzw. Werkstückoberfläche beeinflusst.

Auf Basis der Ergebnisse der Streifenziehversuche lassen sich Empfehlungen für die Auslegung von Presshärteprozessen ableiten. Hohe Relativgeschwindigkeiten während der Umformung führen tendenziell zu geringerer Reibung. Zudem ist die Werkzeug- und Prozessauslegung so zu gestalten, dass Flächenpressungen von über 7,5 MPa bei Werkstücktemperaturen über 600 °C vermieden werden, da es hierdurch zu hohem Verschleiß und hoher Reibung kommen kann. Um eine geringe Taktzeit zu erreichen, beginnt die Umformung des Bauteils im industriellen Umfeld direkt nach dem Transfer der austenitisierten Platine in das Werkzeug bei einer Werkstücktemperatur von 800 °C. Gegen Ende der Bauteilumformung treten zwangsweise geringe Relativgeschwindigkeiten auf, da das Werkzeug vollständig geschlossen wird, um das Bauteil auf die Entnahmetemperatur abzuschrecken. Daher sollte der Prozess so ausgelegt werden, dass die Umformung bei einer Werkstücktemperatur von ungefähr 600 °C abgeschlossen ist. Streifenziehversuche in diesem Temperaturbereich haben eine geringe Sensitivität gegenüber der Relativgeschwindigkeit aufgewiesen und niedrige Reibzahlen ergeben.

Neben den Prozessparametern wirkt sich der Verschleiß der Werkzeuoberfläche signifikant auf das Reibverhalten aus. Der dominierende Verschleißmechanismus im Rahmen der durchgeführten Streifenziehversuche ist adhäsiver Verschleiß. Dieser führt zu lokalen Materialanhaftungen auf der Werkzeuoberfläche und verändert die Werkzeugtopographie grundlegend. Zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten, gilt es die Entstehung von Adhäsionsverbindungen zwischen der AlSi-Beschichtung des Werkstücks und der Werkzeuoberfläche zu minimieren. In diesem Kontext sind vor allem werkzeugseitige Maßnahmen erfolgsversprechend.

7 Analyse werkzeugseitiger Maßnahmen zur Reibungs- und Verschleißreduzierung

Nach der Erarbeitung eines grundlegenden Prozessverständnisses in Bezug auf die tribologischen Bedingungen beim Presshärten wird nachfolgend der werkzeugseitige Einfluss auf Reibung und Verschleiß anhand von Streifenziehversuchen untersucht. In diesem Zusammenhang werden die Oberflächenbearbeitung, der Grundwerkstoff und die Wärmebehandlung des Werkzeugwerkstoffs variiert. Zudem wird die Applikation unterschiedlicher Werkzeugbeschichtungen analysiert.

7.1 Identifikation werkzeugseitiger Maßnahmen

Die tribologischen Bedingungen sind entscheidend für das Umformverhalten und die resultierende Bauteilqualität beim Presshärten. Bedingt durch die hohen Temperaturen während der Umformung treten hohe Reibkräfte sowie hoher Werkzeugverschleiß auf. Die Einflussfaktoren auf das tribologische System können in werkstückseitige, prozessseitige sowie werkzeugseitige Kategorien untergliedert werden. (siehe Abschnitt 2.3.3) Als Werkstückwerkstoff für direktes Presshärten hat sich zum aktuellen Zeitpunkt 22MnB5 mit AlSi-Beschichtung durchgesetzt. Dessen temperatur- und zeitabhängiges Umform- und Umwandlungsverhalten gibt enge Grenzen für die Prozessparameter während der Umformung vor. In diesem Zusammenhang ist werkzeugseitig das größte Verbesserungspotential hinsichtlich Reibung und Verschleiß zu erwarten.

In der industriellen Praxis werden unterschiedliche Verfahren für die Oberflächenendbearbeitung von Presshärtewerkzeugen eingesetzt. Aus der Kaltumformung ist bekannt, dass die Rauheit der Werkzeugoberfläche einen Einfluss auf das Reib- und Verschleißverhalten hat [155]. Unter anderem werden hohe Reibkräfte durch ein mechanisches Verhaken der Rauheitsspitzen verursacht [156]. Auch Laborversuche unter Presshärtebedingungen lassen den Schluss zu, dass mechanisches Verhaken von Rauheitsspitzen zu verstärkter Reibung führt [157]. Im industriellen Umfeld werden Oberflächen von Presshärtewerkzeugen häufig mittels Polieren oder Schleifen bearbeitet. Darüber hinaus werden vereinzelt auch mittels Hochgeschwindigkeitszerspanung überarbeitete Oberflächen eingesetzt. In diesem Kontext gilt es, den Einfluss der unterschiedlichen Verfahren zur Oberflächenendbearbeitung auf Reibung und Verschleiß zu analysieren.

Neben dem mechanischen Verhaken von Rauheitsspitzen ist eine ausgeprägte Adhäsionsneigung zwischen dem Werkzeugwerkstoff und der AlSi-Beschichtung des Werkstücks eine mögliche Ursache für die hohen Reibkräfte und Verschleißraten während der Umformung [74]. In der Serienfertigung findet eine Vielzahl von unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffen Anwendung. Diese haben aufgrund ihrer Legierung sowie ihrer Gefügestruktur jeweils eine unterschiedlich ausgeprägte Adhäsionsneigung. Daher ist die Wahl des Werkzeugwerkstoffs ein weiterer kritischer Einflussfaktor.

Die Adhäsionsneigung zwischen Werkstückbeschichtung und Werkzeug ist abhängig von der chemischen Affinität [71] und der wahren Kontaktfläche [108] in der Wirkfuge. Darüber hinaus kommt es durch lose Partikel zu Abrasion bei Presshärtewerkzeugen. Um abrasiven Verschleiß auf ein Minimum zu begrenzen, sind hohe Anforderungen an die Härte der Werkzeuge gestellt. Vor diesem Hintergrund nimmt die Wärmebehandlung des Werkzeugstahls eine kritische Rolle ein. Zudem wird ein Einfluss der Gefügestruktur, insbesondere bestimmter Karbide, auf die Adhäsionsneigung vermutet [158]. Diese wird ebenfalls durch die Wärmebehandlung signifikant beeinflusst, sodass es den Einfluss der Wärmebehandlung auf Reibung und Verschleiß näher zu untersuchen gilt.

Zur Reduzierung von adhäsivem Verschleiß wird im Bereich der konventionellen Blechumformung und der Zerspanungstechnik eine Reihe von Werkzeugbeschichtungen erfolgreich eingesetzt [69]. Aufgrund ihrer Temperaturbeständigkeit ist die Anwendung von PVD-Werkzeugbeschichtungen auch für das Presshärten ein vielversprechender Ansatz. Die bisher in der industriellen Praxis verwendeten TiAlN- und AlCrN-Beschichtungen weisen jedoch eine hohe Anfälligkeit gegenüber adhäsivem Verschleiß auf [114]. Daher gilt es, das tribologische Einsatzverhalten weiterer PVD-Beschichtungen zu untersuchen. Die Bewertung der vorgestellten werkzeugseitigen Maßnahmen erfolgt analog zu Kapitel 6 mit Flachbahnstreifenziehversuchen unter Presshärtebedingungen. Da der Fokus der Arbeit auf dem direkten Presshärteprozess liegt, werden die Werkzeuge nicht aktiv beheizt. Für die übrigen Prozessparameter wird mit einer Werkstücktemperatur von 600 °C, einer Flächenpressung von 5 MPa und einer Ziehgeschwindigkeit von 50 mm/s näherungsweise die Mitte des in Abschnitt 5.3.3 ermittelten Prozessfensters gewählt. Um eine Einschätzung über die statistische Streubreite treffen zu können, werden pro Werkzeugkonfiguration drei Reibbacken eingesetzt. Pro Reibbacke werden sechs Streifenziehversuche mit einem Ziehweg von jeweils 400 mm durchgeführt.

7.2 Experimentelle Erforschung der Maßnahmen

Nachfolgend wird der Einfluss der identifizierten werkzeugseitigen Maßnahmen experimentell untersucht. Um den Einfluss der Oberflächenrauheit zu analysieren, wird die Oberfläche der Reibbacken mittels unterschiedlicher Verfahren spanend bearbeitet. Der Effekt der Legierung wird anhand dreier Werkzeugwerkstoffe ermittelt, die sich in ihrer chemischen Zusammensetzung unterscheiden. Um die Auswirkungen der Wärmebehandlung des Werkzeugwerkstoffs zu untersuchen, werden jeweils drei Härtestufen pro Werkzeugwerkstoff eingestellt. Das Potential zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen durch den Einsatz von Werkzeugbeschichtungen wird anhand von drei PVD-Beschichtungen analysiert.

7.2.1 Oberflächenendbearbeitung

Die Werkzeugoberfläche steht in direktem Kontakt mit dem Werkstück und ist daher ein potentiell kritischer Einflussfaktor [159]. In Bild 50 sind die taktilen Rauheitswerte Rz und Rpk der Werkzeugoberfläche für die eingesetzten Bearbeitungsverfahren dargestellt.

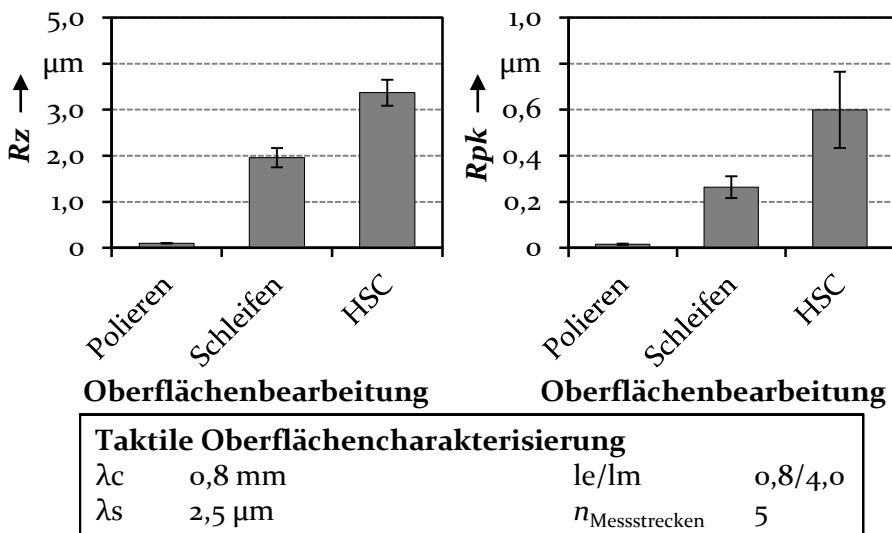


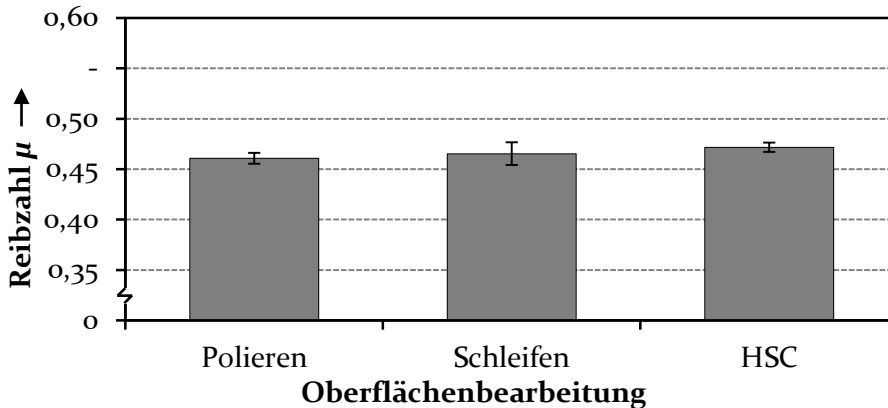
Bild 50: Rauheit der Werkzeugoberfläche infolge unterschiedlicher Oberflächenbearbeitung

Um Reibung und Verschleiß für unterschiedlich raue Werkzeugoberflächen zu untersuchen, werden polierte, geschliffene und gefräste Oberflächen eingesetzt. Die finale Bearbeitung der Werkzeugoberfläche erfolgt

jeweils nach der Wärmebehandlung. Als Werkzeugwerkstoff wird der Referenzwerkstoff 1.2367 mit einer Härte von 54 ± 1 HRC eingesetzt. Infolge der unterschiedlichen Oberflächenbearbeitung Polieren, Schleifen und Hochgeschwindigkeitszerspanung (HSC) ergeben sich signifikante Unterschiede bei den Rauheitskenngrößen.

Die polierten Werkzeugoberflächen weisen einen Rz-Wert von $0,10 \pm 0,008 \mu\text{m}$ und einen Rpk-Wert von $0,015 \pm 0,008 \mu\text{m}$ auf. Die geschliffenen Oberflächen haben mit einem Rz-Wert von $1,95 \pm 0,21 \mu\text{m}$ und einem Rpk-Wert von $0,26 \pm 0,047 \mu\text{m}$ eine signifikant höherer Rauheit. Die Schleifriefen sind in 0° zur Ziehrichtung orientiert. Der Prozess des Hochgeschwindigkeitszerspanens führt zu einer vergleichsweise rauen Oberfläche mit einem Rz-Wert von $3,37 \pm 0,280 \mu\text{m}$ und einem Rpk-Wert von $0,59 \pm 0,166 \mu\text{m}$. Auch hier erfolgte die Bearbeitung in Ziehrichtung.

In Bild 51 sind die ermittelten Reibzahlen für unterschiedlich bearbeitete Werkzeugoberflächen gezeigt. Die Ergebnisse der Streifenziehversuche verdeutlichen, dass die Ausgangsrauheit der Werkzeugoberfläche keinen signifikanten Einfluss auf die Reibbedingungen hat.



Werkstoffe		Versuchsparameter	
Werkzeug:	1.2367, geschliffen	$T_{WZ} =$	RT
Werkstück:	22MnB5 + AlSi	$T_{WS} =$	600 °C
		$v_{Rel} =$	50 mm/s
		$p_N =$	5,0 MPa
$\mu = \frac{F_R}{F_N}$		$n_{Proben} =$	3
		$n_{Messungen} =$	3

Bild 51: Reibzahlen in Abhängigkeit der Oberflächenbearbeitung

Bei Streifenziehversuchen mit polierter Oberfläche wurde eine mittlere Reibzahl von $0,461 \pm 0,005$ gemessen. Versuche mit geschliffener bzw. gefräster Werkzeugoberfläche ergaben eine mittlere Reibzahl von $0,465 \pm 0,008$ bzw. $0,472 \pm 0,011$. Die festgestellten Unterschiede zwischen den mittleren Reibzahlen liegen damit innerhalb der Schwankungsbreite der Versuche. Das beobachtete Reibverhalten stimmt mit Untersuchungen von Azushima et al. [111] überein, die bei Streifenziehversuchen mit einer Flächenpressung von 5 MPa keinen Einfluss der Ausgangsrauheit der Werkzeugoberfläche feststellen konnten. Im Gegensatz hierzu ging bei Pin-on-Disc Tests von Pelcastre et al. [110] bei einer Flächenpressung von 10 MPa eine erhöhte Reibung mit erhöhter Rauheit einher. Die in dieser Studie ermittelten Reibzahlen liegen jedoch in einem Bereich zwischen 0,9 – 1,2 und sind damit insgesamt als kritisch zu betrachten.

In Bild 52 sind die Topographiaufnahmen der Werkzeugoberfläche dargestellt. Diese unterstützen die Erkenntnisse aus den Streifenziehversuchen.

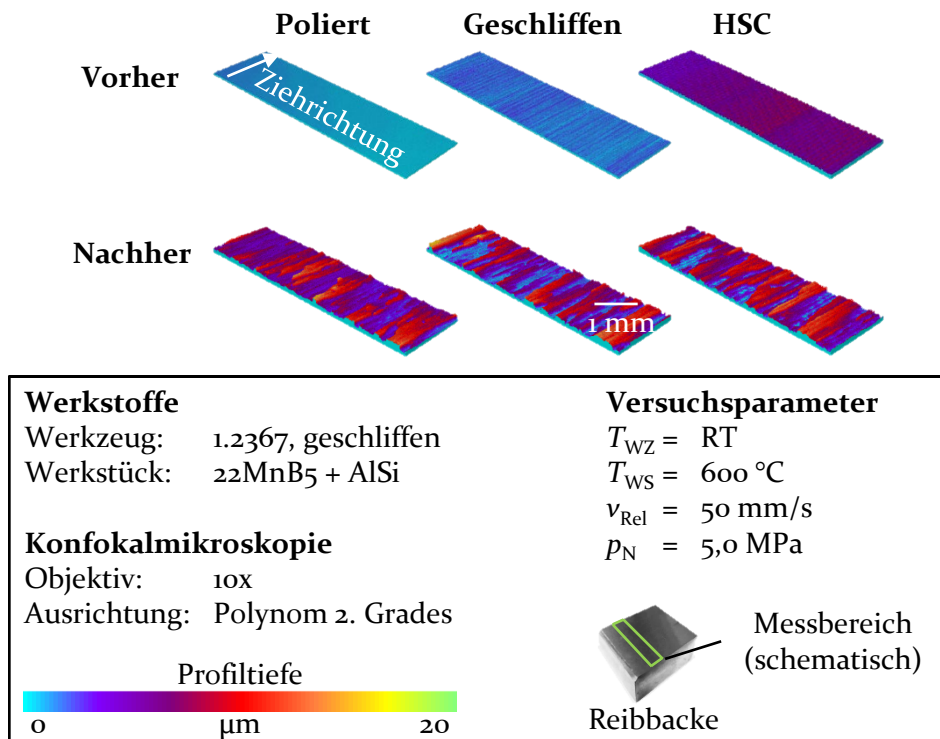


Bild 52: Topographiaufnahmen der Werkzeugoberfläche für unterschiedliche Oberflächenbearbeitung

Auf den Aufnahmen der Werkzeugoberfläche im Ausgangszustand ist deutlich die unterschiedliche Werkzeugtopographie infolge der Oberflächenbearbeitung zu erkennen. Die Werkzeugoberflächen nach sechs Streifenziehversuchen sind unabhängig von der Rauheit der Oberfläche vor den Versuchen mit starkem adhäsivem Verschleiß versehen.

Die Analyse der Profilamplitude der Werkzeugoberfläche (Bild 53) unterstützt die Erkenntnisse aus den Topographieaufnahmen. Nach sechs Streifenziehversuchen bildet sich auf der Werkzeugoberfläche eine Profilamplitude von rund 12 μm aus, wobei kein signifikanter Einfluss der Oberflächenbearbeitung erkennbar ist.

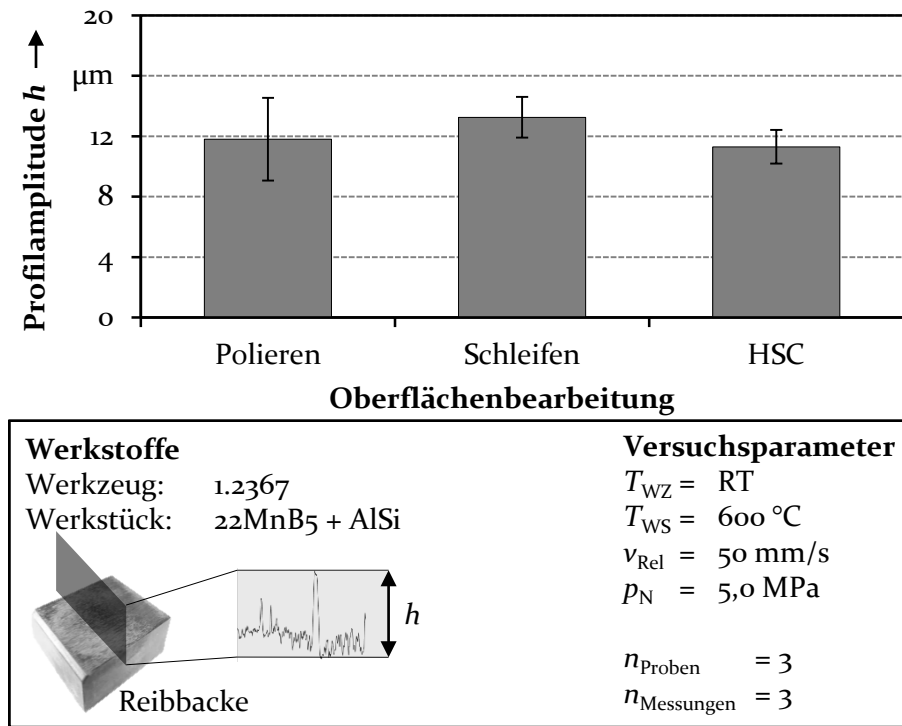


Bild 53: Profilamplitude für unterschiedliche Werkzeugoberflächen

Die lokalen Anhaftungen auf der Werkzeugoberfläche, die bereits während des ersten Streifenziehversuchs auftreten, führen zu einer im Vergleich zur Ausgangsoberfläche signifikant erhöhten Topographietiefe. Da die wahre Kontaktfläche maßgeblich durch die Bereiche mit lokalen Anhaftungen auf der Werkzeugoberfläche definiert ist, hat die Oberflächenendbearbeitung und damit die Rauheit der Ausgangsoberfläche keinen Einfluss auf das Reibverhalten im Rahmen der Laborversuche.

7.2.2 Legierungszusammensetzung

In der industriellen Praxis wird eine Vielzahl an unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffen für Presshärtewerkzeuge eingesetzt. Die thermischen und mechanischen Eigenschaften der Werkzeugstähle werden maßgeblich durch die Zusammensetzung der Legierung beeinflusst. Die Ursache-Wirkzusammenhänge zwischen der chemischen Legierung von Presshärtestählen und dem resultierenden Reib- und Verschleißverhalten sind jedoch zum aktuellen Zeitpunkt nur unzureichend erforscht. Nachfolgend wird daher der Einfluss des Werkzeugwerkstoffs untersucht, indem drei unterschiedliche Werkstoffe bei sonst konstanten Versuchsbedingungen bezüglich ihres tribologischen Verhaltens charakterisiert werden.

Als Referenzwerkstoff wird der konventionelle Warmarbeitsstahl 1.2367 mit der vom Hersteller empfohlenen Einsatzhärte von 54 HRC verwendet. Darüber hinaus werden der Kaltarbeitsstahl K353 mit 62 HRC sowie der speziell für Presshärteanwendungen entwickelte Spezialstahl 1.2383 mit 52 HRC untersucht. Die ausgewählten Werkzeugwerkstoffe unterscheiden sich in ihrer Legierung, Härte und thermischen Leitfähigkeit (siehe Abschnitt 4.1.2). Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Legierungen eignen sich die ausgewählten Stähle, um einen möglichen Einfluss des Werkzeugwerkstoffs auf Reibung und Verschleiß zu identifizieren. Für die Versuchsdurchführung wurden geschliffene Werkzeugoberflächen verwendet. Die Bearbeitungsrichtung ist in Richtung der Ziehbewegung orientiert. In Bild 54 sind die mittleren Reibzahlen für die drei untersuchten Werkzeugwerkstoffe gezeigt. Die Versuche wurden bei einer Flächenpressung von 5 MPa, einer Ziehgeschwindigkeit von 50 mm/s und unbeheiztem Werkzeug durchgeführt.

Die Wahl des Werkzeugwerkstoffs beeinflusst das resultierende Reibverhalten. Die gemessenen Reibzahlen liegen für den Referenzwerkstoff 1.2367 bei $0,465 \pm 0,008$. Bei Streifenziehversuchen mit dem Kaltarbeitsstahl K353 wurde eine Reibzahl von $0,463 \pm 0,005$ ermittelt. Die höchste Reibung wurde für den Werkstoff 1.2383 mit $0,485 \pm 0,007$ gemessen. Dies entspricht einer um 4,3 % höheren Reibung im Vergleich zu Streifenziehversuchen mit dem Werkstoff 1.2367.

Ein Erklärungsansatz hierfür könnte die unterschiedliche Adhäsionsneigung der Legierungen sein. Demnach würde abhängig von der Wahl des Werkzeugwerkstoffs die Adhäsionskomponente der Reibung variieren. Eine hohe Adhäsionsneigung würde in diesem Kontext mit einer erhöhten Reibung einhergehen, da stärkere Adhäsionsbindungen während der Relativbewegung überwunden werden müssen.

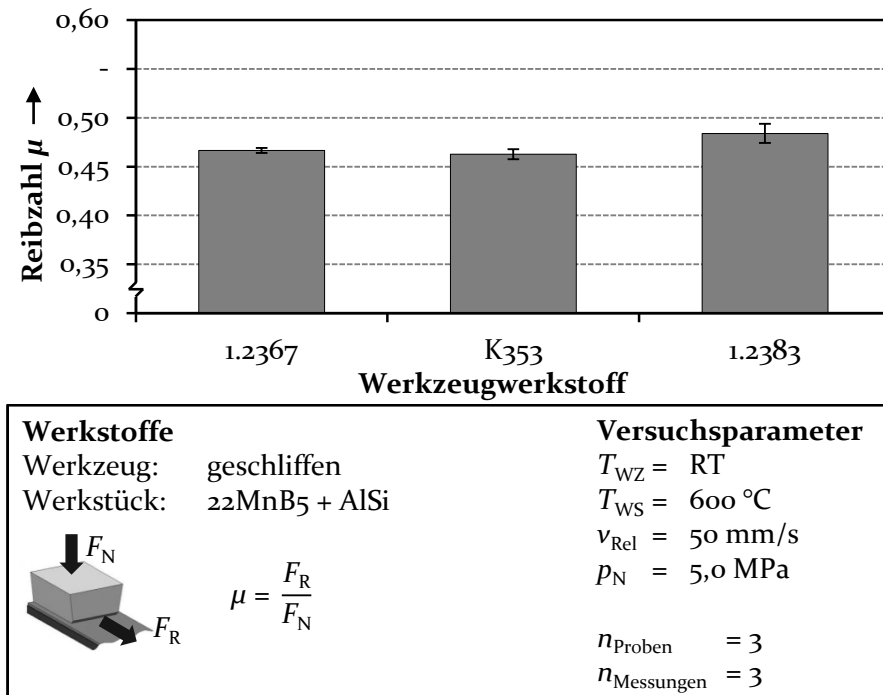


Bild 54: Reibzahlen für unterschiedliche Werkzeugwerkstoffe

In Abschnitt 6.2.1 wurde ein Einfluss der Werkstücktemperatur auf Reibung und Verschleiß identifiziert. Daher wird zunächst untersucht, ob die unterschiedlichen thermischen Leitfähigkeiten der Werkzeugstähle einen signifikanten Einfluss auf die Werkstücktemperatur im Rahmen der Laborversuche haben. Hierfür wurde die Temperatur des Streifens direkt vor und nach Kontakt mit der Reibbacke während der Versuchsdurchführung mit zwei Thermographiekameras aufgezeichnet. Die Temperatur des Streifens vor Kontakt mit der Reibbacke betrug $600 \pm 10\text{ °C}$. In Bild 55 ist die mittlere Streifentemperatur nach Kontakt mit der Reibbacke für die drei Werkzeugwerkstoffe 1.2367, K353 und 1.2383 dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass die thermische Leitfähigkeit der Werkzeugwerkstoffe nur einen geringen Einfluss auf die Streifentemperatur während der Versuchsdurchführung hat. Der Abfall der Streifentemperatur durch Kontakt mit dem Werkzeug liegt in einem Bereich zwischen $70 - 118 \pm 10\text{ °C}$. Bei Versuchen mit Reibbacken aus dem Werkstoff 1.2367 wurde im Auslaufbereich eine Streifentemperatur von $495 \pm 10\text{ °C}$ gemessen. Die Streifentemperatur bei Versuchen mit dem Werkstoff K353 lag bei $530 \pm 10\text{ °C}$. Für den

Werkstoff 1.2383 wurde eine mittlere Streifentemperatur von $481 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ermittelt. Die Messungen zeigen, dass aufgrund der vergleichsweise geringen Temperaturunterschiede kein signifikanter Einfluss der thermischen Leitfähigkeit auf das tribologische Einsatzverhalten zu erwarten ist.

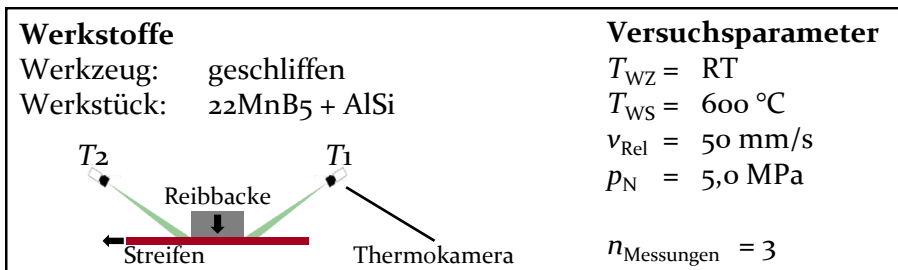
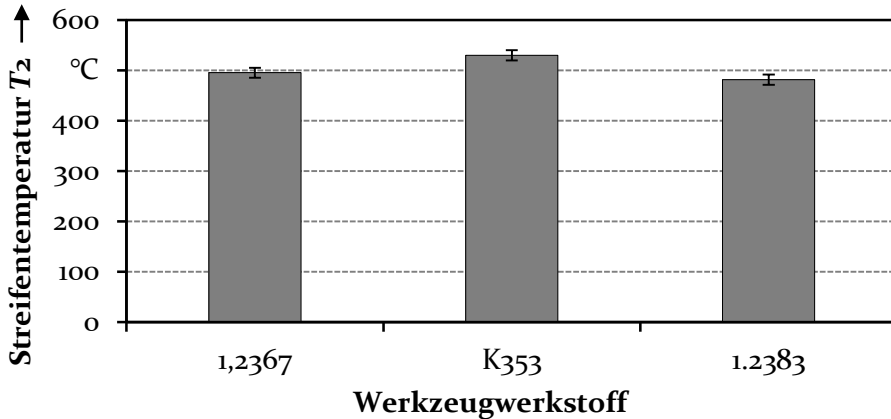


Bild 55: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf die Streifentemperatur nach Kontakt mit der Reibbacke

Nachfolgend wird daher der Verschleiß der Reibbacken näher untersucht. In Bild 56 ist die Topographie der Werkzeugoberflächen nach sechs Streifenziehversuchen exemplarisch dargestellt. Alle drei Werkzeugwerkstoffe weisen nach sechs Streifenziehversuchen deutlich adhäsiven Verschleiß auf der Reibbackenoberfläche auf. Die Werkzeugoberflächen der Werkstoffe 1.2367 und K353 zeigen eine vergleichbare Menge an adhäsiven Verschleiß, der große Teile der Werkzeugoberfläche bedeckt. Auf der Oberfläche der Reibbacke aus dem Werkstoff 1.2383 sind sichtbar weniger und nur lokal auftretende Anhaftungen vorhanden. Demnach geht mit moderatem adhäsivem Verschleiß eine geringere Reibung einher. In diesem Kontext führt der geringere Verschleiß des Werkstoffs 1.2383 zu leicht erhöhter Reibung. Dies stimmt mit dem beobachteten Einlaufverhalten in Abschnitt 5.4 überein und wurde bei vergleichbaren Untersuchungen von Venema et al. [92] ebenfalls festgestellt.

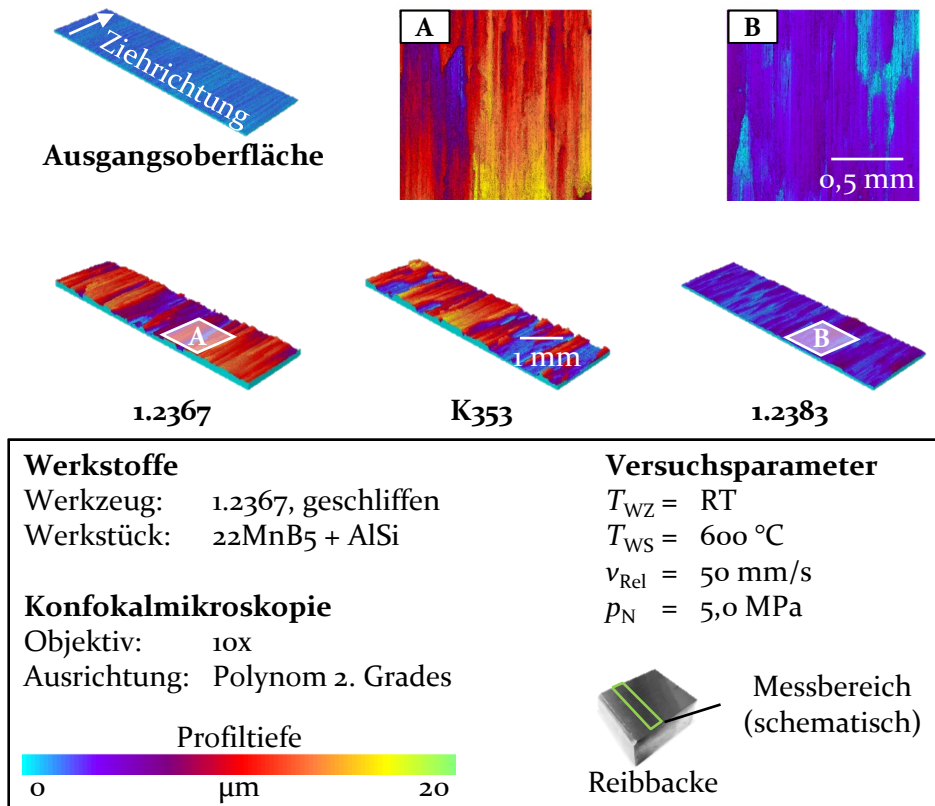


Bild 56: Topographieaufnahmen der Werkzeugoberfläche für unterschiedliche Werkzeugwerkstoffe

Die Analyse der Profilamplitude in Bild 57 verdeutlicht die Unterschiede im Verschleißverhalten. Mit einer Profilamplitude von $12,3 \pm 0,52\text{ }\mu\text{m}$ für den Werkstoff 1.2367 bzw. $12,1 \pm 2,41\text{ }\mu\text{m}$ für den Werkstoff K353 ist kein signifikanter Unterschied in Bezug auf die Profilamplitude zwischen diesen beiden Werkstoffen zu erkennen. Im Gegensatz dazu wurde auf der Reibbackenoberfläche für den Werkstoff 1.2383 eine deutlich geringere Profilamplitude von $6,8 \pm 0,52\text{ }\mu\text{m}$ gemessen. Dies spricht für eine geringere Adhäsionsneigung des Werkstoffs 1.2383 und bekräftigt den zuvor formulierten Erklärungsansatz für das beobachtete Reibverhalten. Da sich die untersuchten Werkstoffe sowohl in ihrer Härte als auch in ihrer Legierung unterscheiden, kommen an dieser Stelle beide Werkzeugeigenschaften als Ursache für die geringe Adhäsionsneigung in Frage.

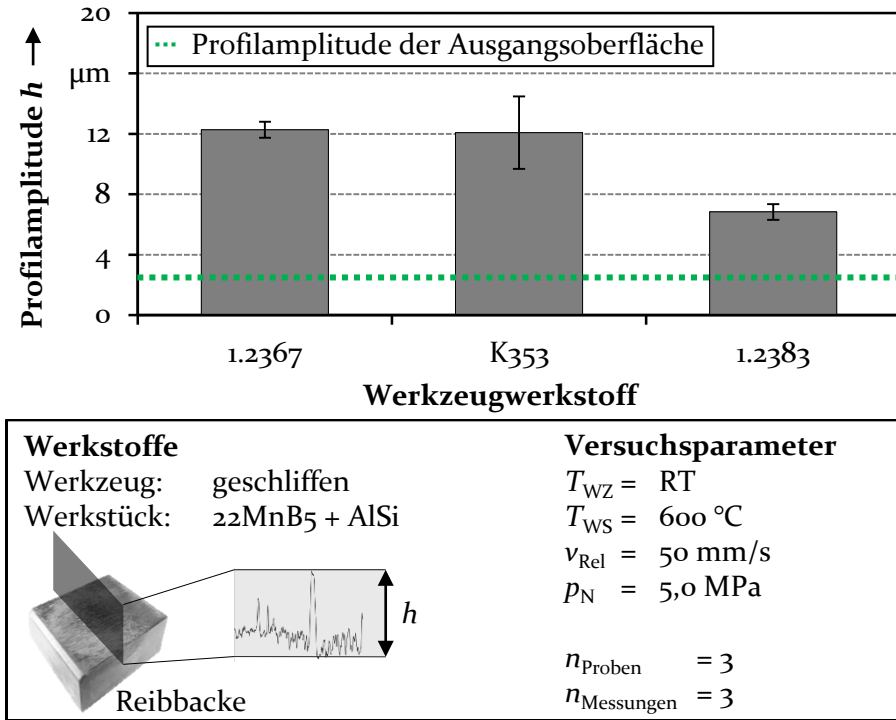


Bild 57: Profilamplitude der Werkzeugoberfläche für unterschiedliche Werkzeugwerkstoffe

Um den Einfluss des unterschiedlichen Verschleißverhaltens der Werkzeugwerkstoffe auf das Reibverhalten zu veranschaulichen, sind in Bild 58 die Topographieaufnahmen der Werkstückoberfläche nach den Streifenziehversuchen exemplarisch dargestellt. Unabhängig vom eingesetzten Werkzeugwerkstoff ist eine Einglättung der Rauheitsspitzen auf der Werkstückoberfläche zu erkennen. Darüber hinaus sind Furchen in Ziehrichtung zu sehen, welche maßgeblich durch die lokalen Anhaftungen auf der Werkzeugoberfläche verursacht werden. Auf der Oberfläche des Streifens nach Versuchen mit dem Werkstoff 1.2383 sind tendenziell größere Bereiche zu erkennen, die das charakteristische Erscheinungsbild der Ausgangsoberfläche des Streifens zeigen. Dies deutet auf einen geringeren Materialübertrag vom Werkstück zum Werkzeug hin und bestätigt die festgestellten Unterschiede im Verschleißverhalten der untersuchten Werkstoffe.

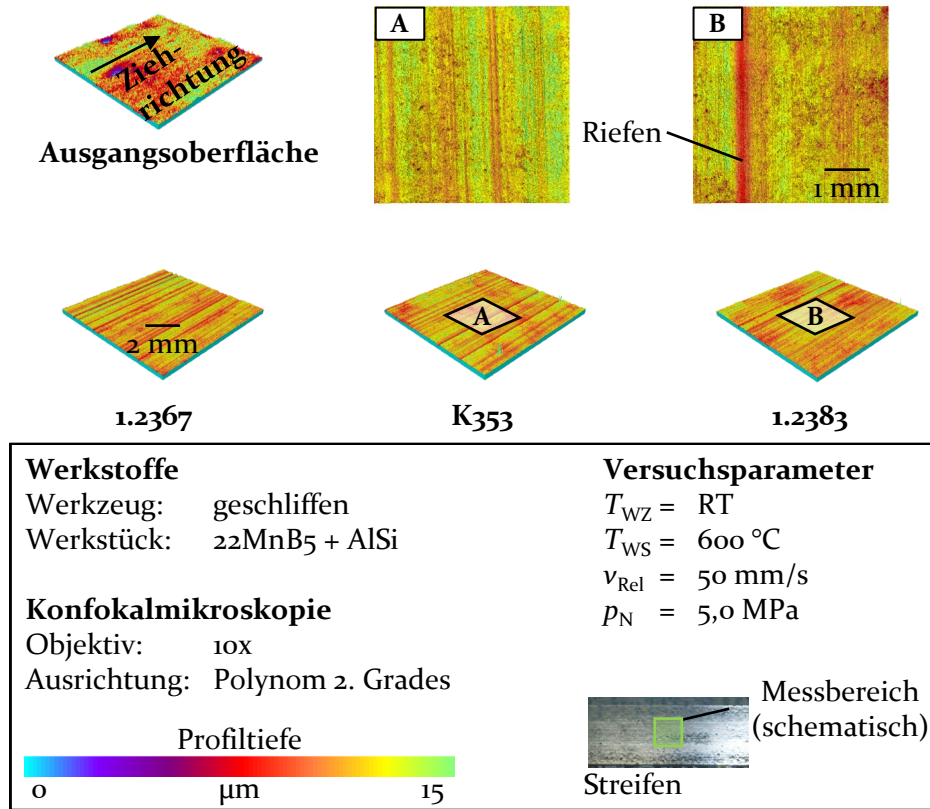


Bild 58: Topographieaufnahmen der Werkstückoberfläche für unterschiedliche Werkzeugwerkstoffe

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl des Werkzeugwerkstoffs grundsätzlich einen Einfluss auf das Reib- und Verschleißverhalten beim Presshärten haben kann. Die Ursache hierfür scheint im Wesentlichen die Adhäsionsneigung der Werkzeugwerkstoffe zu sein. Diese wird wesentlich durch die Mikrostruktur der Werkstoffe beeinflusst [160]. Durch eine geringere Adhäsionsneigung findet weniger Materialtransfer von der Werkstückbeschichtung zur Werkzeugoberfläche statt, sodass nur vereinzelt und lokal begrenzter adhäsiver Verschleiß entsteht. Folglich bildet sich auf der Werkzeugoberfläche keine flächendeckende Oxidschicht, die eine Verringerung der Reibung zur Folge hätte. Mögliche Ursachen für die veränderte Adhäsionsneigung sind die chemische Legierung des Werkzeugwerkstoffs sowie die Unterschiede in der Werkzeughärte. Die Ursache-Wirkzusammenhänge zwischen der Adhäsionsneigung und den Werkzeugeigenschaften werden nachfolgend näher untersucht.

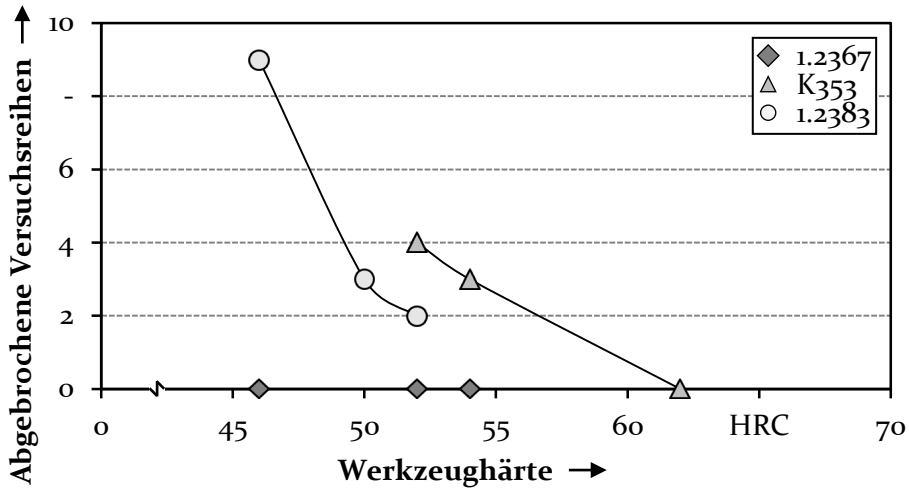
7.2.3 Wärmebehandlung des Werkzeugwerkstoffs

Nachdem in Abschnitt 7.2.2 ein Einfluss des Werkzeugwerkstoffs auf das Reib- und Verschleißverhalten festgestellt wurde, wird im Folgenden der Einfluss der Werkzeughärte näher analysiert. Um mögliche Auswirkungen der Werkzeughärte auf das tribologische Verhalten zu identifizieren, werden mithilfe einer gezielten Wärmebehandlung unterschiedliche Härtewerte für die in Abschnitt 7.2.2 untersuchten Werkzeugwerkstoffe eingestellt. Für jeden Werkstoff werden drei Härtestufen ausgewählt. Zwei der Stufen bilden dabei das Minimum und Maximum der Werkzeughärte gemäß den Herstellerangaben. Eine zusätzliche dritte Härtestufe erlaubt den Vergleich der drei Werkzeugstähle bei einer Härte von 52 ± 1 HRC. In Tabelle 5 sind die unterschiedlichen Härtewerte der untersuchten Werkstoffe aufgeführt.

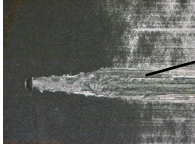
Tabelle 5: Härtewerte der untersuchten Werkstoffe

	Werkzeughärte in HRC		
	1.Stufe	2.Stufe	3.Stufe
1.2367	46 ± 1	52 ± 1	54 ± 1
K353	52 ± 1	54 ± 1	62 ± 1
1.2383	46 ± 1	50 ± 1	52 ± 1

Die Werkzeugoberfläche wurde nach dem Härten und vor Durchführung der Versuche in Richtung der Ziehbewegung mittels Schleifen bearbeitet. Für jede Härtestufe wurden jeweils drei Reibbacken gefertigt. Da es während der Versuchsdurchführung vereinzelt zu Verschweißungen und damit zu einer Deformation des Werkstücks kam, wurden pro Reibbacke jeweils drei Versuchsblöcke mit jeweils drei Versuchsreihen durchgeführt. Die Reibbacken wurden hierfür nach jeder Versuchsreihe mittels Schleifen überarbeitet. Eine Versuchsreihe entspricht dabei jeweils sechs Streifenziehversuchen mit einer Ziehstrecke von 400 mm. Die Versuche erfolgten bei einer Werkstücktemperatur von $600 \text{ }^\circ\text{C}$, einer Flächenpressung von 5 MPa, einer Relativgeschwindigkeit von 50 mm/s und mit unbeheiztem Werkzeug. Im Falle einer Verschweißung wurden die gemessenen Reibzahlen nicht für die Beurteilung des Reib- und Verschleißverhaltens herangezogen, da die Versuchsreihe abgebrochen wurde. In Bild 59 ist die Anzahl der abgebrochenen Versuche dargestellt.



Werkstoffe		Versuchsparameter	
Werkzeug:	geschliffen	T_{WZ}	RT
Werkstück:	22MnB5 + AlSi	T_{WS}	600 °C
		v_{Rel}	50 mm/s
		p_N	5,0 MPa
		n_{Proben}	= 3
		$n_{Messungen}$	= 3



Aufschweißung

Streifenoberfläche

Bild 59: Anzahl der abgebrochenen Versuchsreihen

Eine hohe Abbruchquote ist als Indiz für eine hohe Adhäsionsneigung des Werkzeugs zu sehen. Es wird deutlich, dass sowohl die Wahl des Werkzeugwerkstoffs als auch dessen Wärmebehandlung einen Einfluss auf das Verschleißverhalten haben. Unabhängig von der Härtestufe ist keine Aufschweißung bei Streifenziehversuchen mit dem Referenzwerkstoff 1.2367 aufgetreten. Bei Versuchen mit den Werkstoffen K353 und 1.2383 kam es hingegen zu Verschweißungen und damit zu ungültigen Versuchsdurchgängen. Der Spezialstahl 1.2383 offenbart dabei eine insgesamt höhere Anfälligkeit für Verschweißungen als der Kaltarbeitsstahl K353. Bei beiden Werkstoffen steigt die Abbruchquote mit abnehmender Werkzeughärte. Für die 1. Härtestufe des 1.2383 mit 46 ± 1 HRC konnten aufgrund einer Abbruchquote von 100 % keine Reibzahlen ermittelt werden.

Aus der Analyse der Abbruchquote wird ersichtlich, dass kein direkter Zusammenhang zwischen der absoluten Härte des Werkzeugwerkstoffs und

der Adhäsionsneigung abgeleitet werden kann. Bei gleicher Härte der untersuchten Legierungen kam es demnach zu unterschiedlich vielen abgebrochenen Versuchen. Demzufolge kann eine mechanische Ursache, in Form einer verstärkten Deformation der Werkzeugoberfläche, für die beobachteten Unterschiede im Verschleißverhalten nahezu ausgeschlossen werden. Wahrscheinlich ist daher eine chemische Ursache, bedingt durch eine unterschiedliche Ausbildung der Gefügestruktur während der Wärmebehandlung. Eine mögliche Erklärung für die unterschiedliche Adhäsionsneigung der Werkzeuge wäre die Ausbildung von Karbiden [158].

Vor diesem Hintergrund wurde der Einfluss der Wärmebehandlung auf das Gefüge der Werkzeugwerkstoffe analysiert (siehe Bild 60). Für die Analyse des Gefüges wurden Querschliffe der unterschiedlich wärmebehandelten Werkzeugwerkstoffe mit V2A-Beize geätzt und mittels Lichtmikroskop untersucht.

Bei dem Werkstoff 1.2367 sind keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des resultierenden Gefüges zu erkennen. Bei allen drei Härtestufen ist martensitisches Gefüge vorhanden. Zudem haben sich VCrMoC- und MoCrVSiC-Karbide ausgebildet die homogen verteilt sind.

Das resultierende Gefüge des Werkstoffs K353 ist ebenfalls martensitisch. Zudem sind Seigerungen erkennbar, die parallel zur Reibbackenoberfläche orientiert sind. Im Zuge der Wärmebehandlung sind großflächige CrVMoC-, CrAlMoVC- und NbMoCrVTiC-Karbide entstanden, die zeilig angeordnet sind. Mit größerer Werkstoffhärte sind die Karbide homogener verteilt und ihre Größe nimmt tendenziell ab. Ein Erklärungsansatz für die erhöhte Adhäsionsneigung des K353 bei 54 ± 1 HRC und 52 ± 1 HRC ist daher die Verteilung sowie die Größe der Karbide im Gefüge.

Untersuchungen von Fontalvo et al. [160] zeigen ebenfalls einen Einfluss des Karbidanteils und der Karbidverteilung auf adhäsiven Verschleiß von Werkzeugen. Ein geringer Abstand zwischen den Karbiden erhöht demnach die Wahrscheinlichkeit, dass sich an den Kontaktstellen zwischen den Rauheitsspitzen von Werkzeug und Werkstück Karbide befinden [160]. Diese wiederum weisen eine geringere chemische Affinität gegenüber dem Gegenkörper auf und reduzieren somit adhäsiven Verschleiß [161].

Der Werkstoff 1.2383 weist bei der höchsten Härtestufe von 52 ± 1 HRC martensitisches Gefüge mit VMoC-Karbiden auf. Bei 50 ± 1 HRC und 46 ± 1 HRC ist hingegen eine veränderte Gefügestruktur zu erkennen und

Martensit ist nicht mehr deutlich ausgeprägt. Die Unterschiede im beobachteten Verschleißverhalten des Werkstoffs 1.2383 sind demnach möglicherweise auf die Veränderungen in der Gefügestruktur zurückzuführen.



Bild 60: Einfluss der Wärmebehandlung auf das resultierende Gefüge der Werkzeugwerkstoffe

Die Bestimmung der mittleren Reibzahlen zur Beurteilung des Reibverhaltens erfolgt basierend auf den Versuchsreihen ohne Aufschweißung (Bild 61). Anhand der Ergebnisse ist zu erkennen, dass die Reibung für Streifenziehversuche, in denen keine Aufschweißungen aufgetreten sind, für die Werkstoffe 1.2367 und K353 nicht von der Werkzeughärte beeinflusst wird. Bei Versuchen mit dem Spezialstahl 1.2383 hingegen führt ein Anstieg der Härte von 50 ± 1 HRC auf 52 ± 1 HRC zu einer Zunahme der Reibzahl um 5,2 % von $0,46 \pm 0,002$ auf $0,484 \pm 0,010$. Aufgrund des geringen Unterschieds der Werkzeughärte scheint der Einfluss der absoluten Härte jedoch weniger kritisch als der Einfluss der unterschiedlichen Wärmebehandlung auf die resultierende Gefügestruktur zu sein.

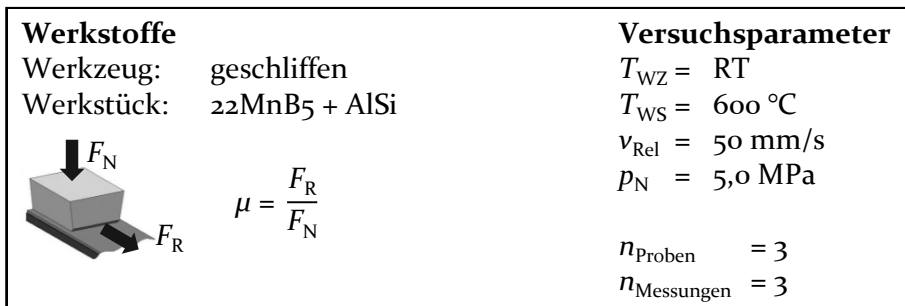
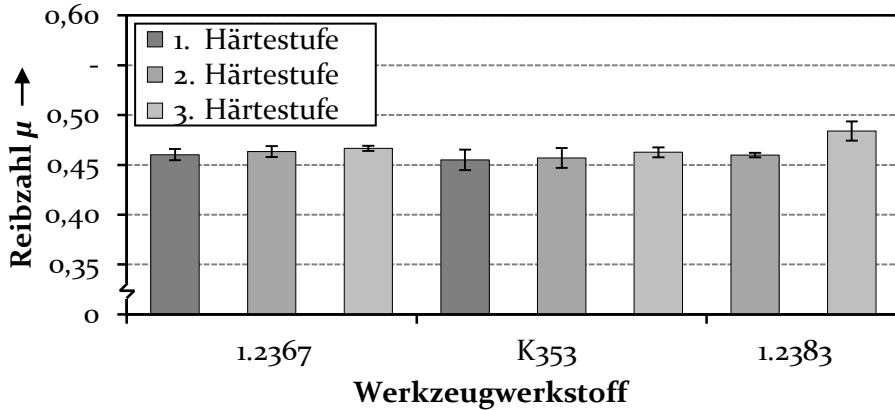


Bild 61: Reibzahlen für unterschiedliche Werkzeughärten

In Bild 62 sind die Topographieaufnahmen der Werkzeugoberfläche nach sechs Streifenziehversuchen für die unterschiedlichen Härtestufen der Werkzeugwerkstoffe exemplarisch dargestellt. Für die Werkstoffe 1.2367 und K353 ist anhand der qualitativen Aufnahmen kein Einfluss der Werkzeughärte auf den Verschleiß an der Werkzeugoberfläche zu erkennen. Die Werkzeugoberflächen aus dem Werkstoff 1.2383 weisen sichtbar weniger Verschleiß auf als die Werkstoffe 1.2367 und K353. Darüber hinaus deuten die Topographieaufnahmen auf einen höheren Verschleiß mit abnehmender Härte für Proben aus 1.2383 hin. Wie in Abschnitt 5.4 und Abschnitt 7.2.2 bereits gezeigt wurde, bewirkt moderater adhäsiver Verschleiß auf der Werkzeugoberfläche einen Abfall der Reibung. Die vergleichsweise hohen Reibzahlen, die bei Versuchen mit der 3. Härtestufe des Werkstoffs 1.2383 gemessen wurden, sind daher durch eine geringere Adhäsionsneigung des Werkzeugwerkstoffs und folglich dem Fehlen einer flächendeckenden Adhäsionsschicht auf der Werkzeugoberfläche begründet.

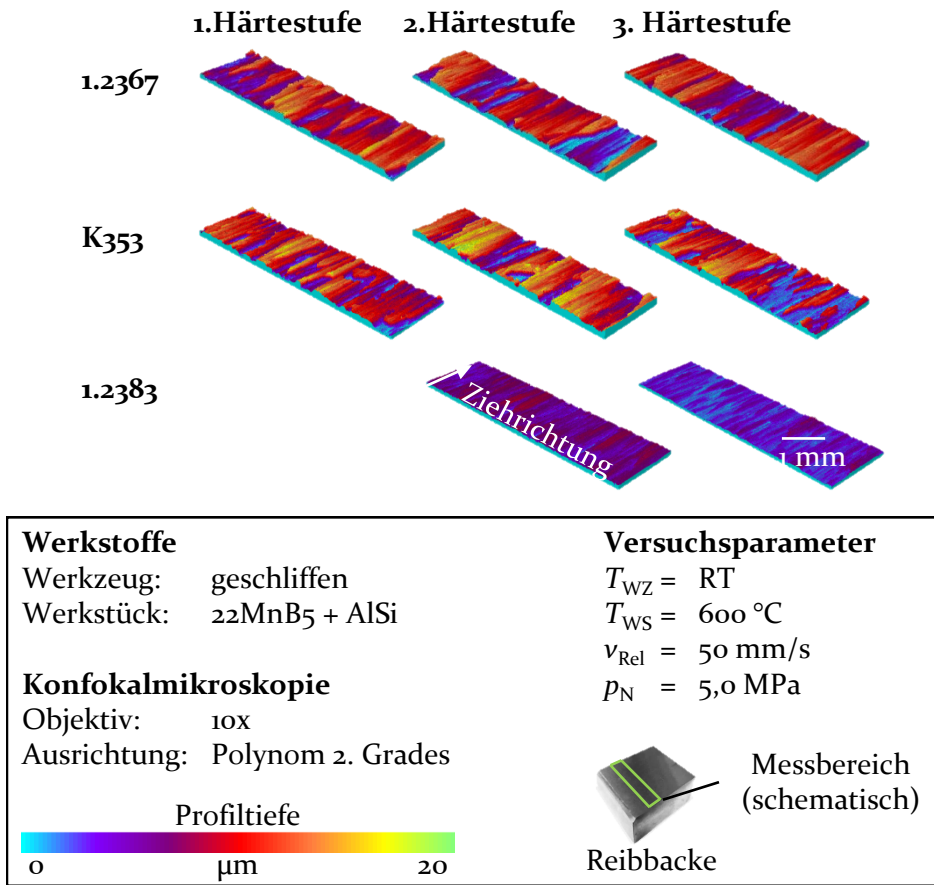


Bild 62: Topographieaufnahmen der Werkzeugoberfläche für unterschiedliche Werkzeughärten

Bild 63 zeigt die Profilamplitude der Werkzeugoberfläche. Die gemessenen Profilamplituden bestätigen den in Bild 59 dargestellten Trend, dass mit geringerer Werkzeughärte eine erhöhte Verschleißanfälligkeit einherzugehen scheint. Alle drei untersuchten Werkzeugwerkstoffe weisen tendenziell einen Anstieg der Profilamplitude mit abnehmender Werkzeughärte auf. Für den Referenzwerkstoff 1.2367 mit einer Härte von $46 \pm 1\text{ HRC}$ wurde eine Profilamplitude von $15,7 \pm 0,94\text{ }\mu\text{m}$ gemessen. Eine Zunahme der Härte auf $54 \pm 1\text{ HRC}$ bewirkt beispielsweise eine Abnahme der Profilamplitude um 21,66 % auf $12,3 \pm 0,52\text{ }\mu\text{m}$. Für den Werkstoff K353 nimmt die Profilamplitude bei einer Zunahme der Härte von $52 \pm 1\text{ HRC}$ auf $62 \pm 1\text{ HRC}$ um 17,82 % von $14,7 \pm 0,87\text{ }\mu\text{m}$ auf $12,1 \pm 2,40\text{ }\mu\text{m}$ ab. Dieser Trend bestätigt sich ebenso bei Versuchen mit dem Werkstoff 1.2383, bei

dem eine Erhöhung der Werkzeughärte mit tendenziell geringerem Werkzeugverschleiß einherzugehen scheint.

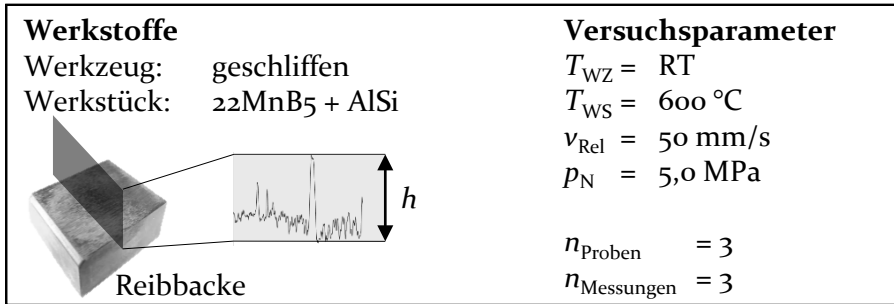
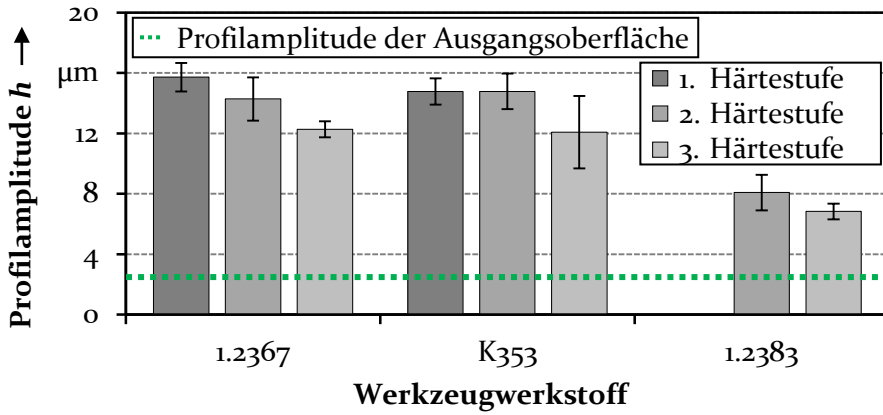


Bild 63: Profilamplitude der Werkzeugoberfläche für unterschiedliche Werkzeughärten

Da in die Messung der Profilamplitude sowohl abrasiver als auch adhäsiver Verschleiß mit einfließt, kann der Einfluss der Werkzeughärte auf das Verschleißverhalten teilweise über einen geringeren abrasiven Verschleiß mit steigender Härte begründet werden. In der Folge befinden sich weniger abrasive Partikel in der Wirkfuge, durch welche Adhäsion 2. Art entstehen kann. Zusätzlich haben Untersuchungen gezeigt, dass die Adhäsionsneigung von Metallen mit steigender Härte abnimmt [69].

Unter Berücksichtigung der absoluten Härtewerte wird jedoch ersichtlich, dass neben der Härte des Werkzeugwerkstoffs ein zusätzlicher Einfluss durch die Legierung bzw. das Gefüge des Werkzeugs vorhanden ist. Bei einem Vergleich der gemessenen Profilamplitude der 3. Härtestufe des Werkstoffs 1.2367 und der 2. Härtestufe des Spezialstahls 1.2383, so wird deutlich, dass die Profilamplitude für den Werkstoff 1.2383 bei 50 ± 1 HRC signifikant niedriger ist als die Amplitude des Referenzwerkstoffs 1.2367 bei 54 ± 1 HRC.

In Bild 64 sind die Topographieaufnahmen der Streifenoberfläche dargestellt. Die Oberfläche des Werkstücks weist für alle drei untersuchten Werkzeugwerkstoffe ein vergleichbares Erscheinungsbild auf.

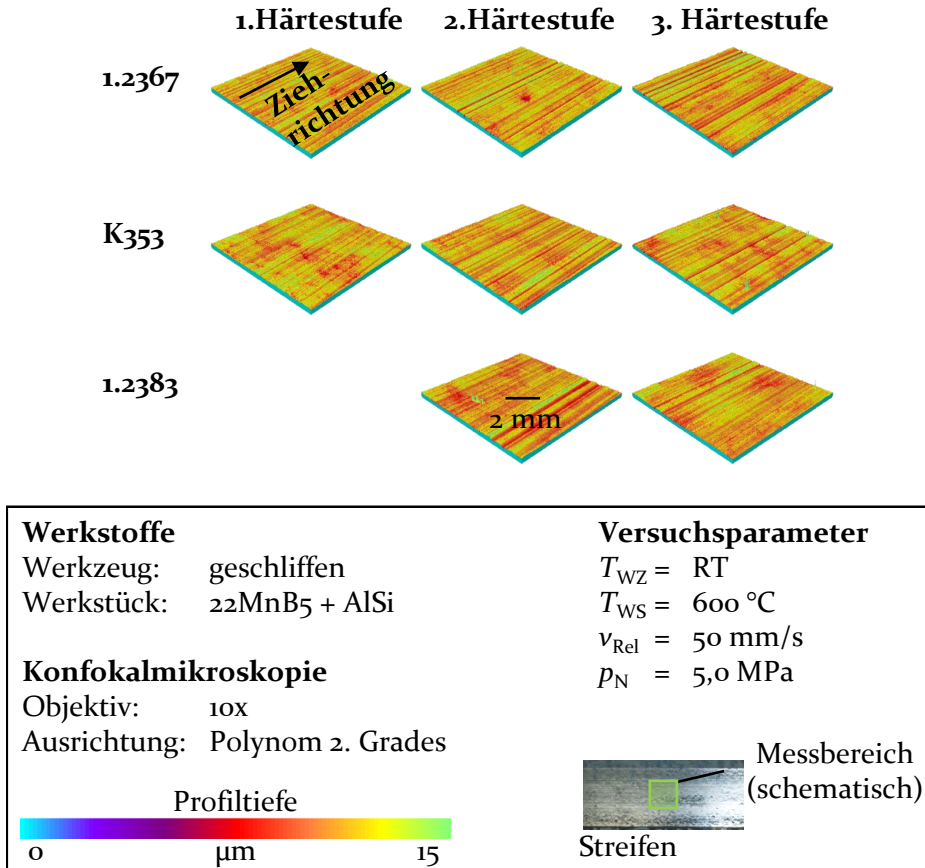


Bild 64: Topographieaufnahmen der Werkstückoberfläche für unterschiedliche Werkzeug-härte

Durch den adhäsiven Verschleiß auf der Werkzeugoberfläche sind Riefen in Ziehrichtung auf der Streifenoberfläche ausgebildet. Anhand von Konfokalmikroskopieaufnahmen ist jedoch kein Einfluss der Werkzeughärte erkennbar.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass sich die Härte des Werkzeugs auf das Verschleißverhalten beim Presshärten auswirkt. Dabei ist neben dem verbesserten Widerstand gegen abrasiven Verschleiß auch eine Verbesserung der adhäsiven Verschleißbeständigkeit mit steigender Werkzeughärte zu beobachten. Geringere Härtewerte des Werkzeugs hingegen

führen zu einer erhöhten Adhäsionsneigung, die sich in einem häufigeren Auftreten von Verschweißungen zwischen Werkzeug und Werkstück äußert. Zusätzlich wurde neben dem Einfluss der Härte ein Einfluss der Legierung bzw. des Gefüges des Werkzeugwerkstoffs auf das Verschleißverhalten identifiziert, der in Kombination mit der Werkzeughärte das resultierende Reibverhalten beeinflussen kann. Vor diesem Hintergrund scheint der Einsatz von Werkzeugbeschichtungen ein vielversprechender Ansatz zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten zu sein.

7.2.4 Beschichtung der Werkzeugoberfläche

Nachdem zuvor ein Einfluss der Legierung und der Werkzeughärte identifiziert wurde, wird der Einsatz von Werkzeugbeschichtungen unter Presshärtebedingungen hinsichtlich der Auswirkungen auf die tribologischen Bedingungen analysiert. Der Einsatz von Werkzeugbeschichtungen erlaubt eine signifikante Steigerung der Oberflächenhärte. Zudem kann mittels Werkzeugbeschichtungen die Konzentration von Legierungselementen an der Werkzeugoberfläche gezielt beeinflusst werden. Nachfolgend wird daher die Verwendung von PVD-Beschichtungen untersucht, die sich aufgrund ihrer thermischen und mechanischen Eigenschaften für den Presshärteprozess eignen. Die unterschiedlichen Eigenschaften der verwendeten Beschichtungen können Tabelle 6 entnommen werden.

Untersuchungen von Glascott et al. [162], Hardell et al. [18], Pelcastre et al. [85] und Ylikiran et al. [113] haben gezeigt, dass sich Oxidschichten positiv auf den Widerstand gegenüber adhäsivem Verschleiß auswirken können. Für die folgenden Untersuchungen wurden daher Beschichtungen auf der Basis von Al, Ti und Cr als Legierungselemente ausgewählt, die sich durch eine hohe Oxidationsbeständigkeit auszeichnen [163].

Tabelle 6: Eigenschaften der untersuchten Werkzeugbeschichtungen nach [163] [122] [164]

	Eigenschaften der Beschichtung		
	Härte in HV _{0,05}	Max. Einsatztemperatur in °C	Schichtdicke in µm
AlCrTiN	3300 ± 300	900	3 – 5
AlTiN	3300 ± 300	800	2 – 4
CrCN	2300 ± 200	600	2 – 6

Die AlCrTiN-Beschichtung wurde speziell für die Warmumformung entwickelt und weist eine geringe Anfälligkeit gegenüber der Ausbreitung von Mikrorissen innerhalb der Beschichtung auf. Die AlTiN-Beschichtung wurde ursprünglich für den Einsatz in der Hochleistungszerspanung entwickelt. Aufgrund ihrer maximalen Einsatztemperaturen von 800 °C eignet sie sich jedoch prinzipiell auch für den Presshärteprozess. Beide Beschichtungen besitzen eine Härte von $3300 \pm 300 \text{ HV}_{0,05}$, sodass eine hohe Beständigkeit gegenüber abrasivem Verschleiß zu erwarten ist. Als dritte Beschichtung wird eine CrCN-Beschichtung untersucht, die sich durch gute Gleiteigenschaften in Kontakt mit Stahl auszeichnet. Die maximale Einsatztemperatur liegt gemäß Datenblatt bei 600 °C [122]. Mit einer Härte von $2300 \pm 200 \text{ HV}_{0,05}$ ist diese Beschichtung ebenfalls für Werkzeuge geeignet, die hohem Verschleiß ausgesetzt sind. Als Substrat für die Beschichtungen wurde der Werkstoff 1.2367 mit einer Härte von 600 HV_{0,05} verwendet. Die Schichtdicken der untersuchten Beschichtungen liegen zwischen 2 – 6 µm. Durch die Legierungselemente Al, Cr und Ti wird die Oxidationsbeständigkeit der Beschichtungen maßgeblich beeinflusst. In Bild 65 ist der Anteil dieser Legierungselemente in der chemischen Zusammensetzung der jeweiligen Beschichtungen zu entnehmen. Die Messung erfolgte mittels EDX.

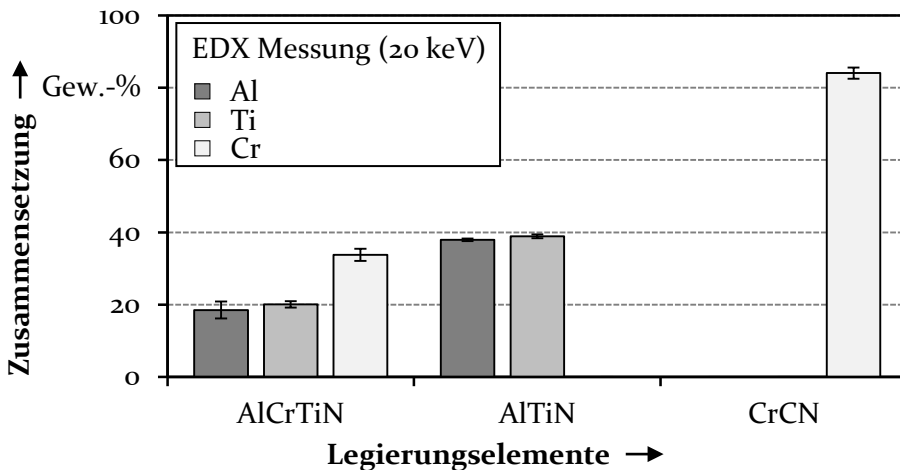
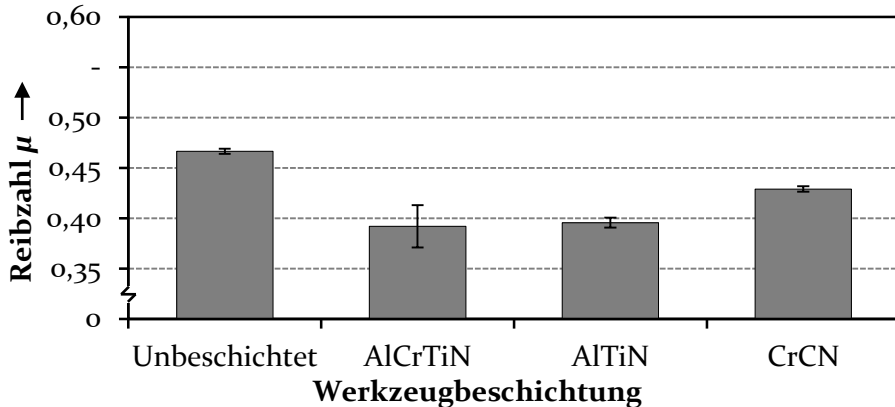


Bild 65: Legierungselemente der Werkzeugbeschichtungen

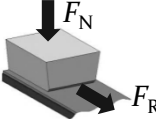
Die AlCrTiN-Beschichtung weist mit rund 20 Gew.-% eine gleichmäßige Verteilung von Al und Ti sowie einen Cr-Anteil von rund 34 Gew.-% auf. Die AlTiN-Beschichtung besteht zu rund 38 Gew.-% aus Al und Ti, ohne messbaren Anteil von Cr. Im Falle der CrCN-Beschichtung dominiert der

Cr-Anteil mit rund 84 Gew.-%. Die Zusammensetzung der drei Beschichtungen wurde so gewählt, dass der Einfluss von Cr bzw. der Kombination aus Al und Ti auf das Reib- und Verschleißverhalten unter Presshärtebedingungen gezielt analysiert werden kann.

Das resultierende Reibverhalten von beschichteten und unbeschichteten Werkzeugen ist in Bild 66 dargestellt. Der Einsatz der Werkzeugbeschichtungen führt zu einer signifikanten Abnahme der Reibkräfte um bis zu 16,06 %. Anhand der gemittelten Reibzahlen ist ersichtlich, dass die beiden Beschichtungen mit Al und Ti tendenziell besseres Reibverhalten aufweisen als die CrCN-Beschichtung. Bei Streifenziehversuchen mit AlCrTiN-Beschichtung wurde eine Reibzahl von $0,392 \pm 0,021$ gemessen. Streifenziehversuche mit AlTiN-Beschichtung ergaben eine Reibzahl von $0,396 \pm 0,005$. Bei Versuchen mit CrCN-Beschichtung wurde hingegen mit einer Reibzahl von $0,429 \pm 0,003$ eine um 9,44 % höhere Reibung im Vergleich zur AlCrTiN-Beschichtung ermittelt.



Werkstoffe		Versuchsparameter	
Werkzeug:	1.2367	$T_{WZ} = RT$	
Werkstück:	22MnB5 + AlSi	$T_{WS} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$	
		$v_{Rel} = 50 \text{ mm/s}$	
		$p_N = 5,0 \text{ MPa}$	
		$n_{Proben} = 3$	
		$n_{Messungen} = 3$	



$$\mu = \frac{F_R}{F_N}$$

Bild 66: Reibzahlen für unterschiedliche Werkzeugbeschichtungen

Eine mögliche Erklärung hierfür ist die hohe Sauerstoffaffinität von Ti, die zur Bildung einer Ti-Oxidschicht führt [165]. In Bild 67 ist zu erkennen,

dass auf den Werkzeugoberflächen der beschichteten Reibbacken im Vergleich zur unbeschichteten Reibbacke sichtbar weniger Materialübertrag stattfindet.

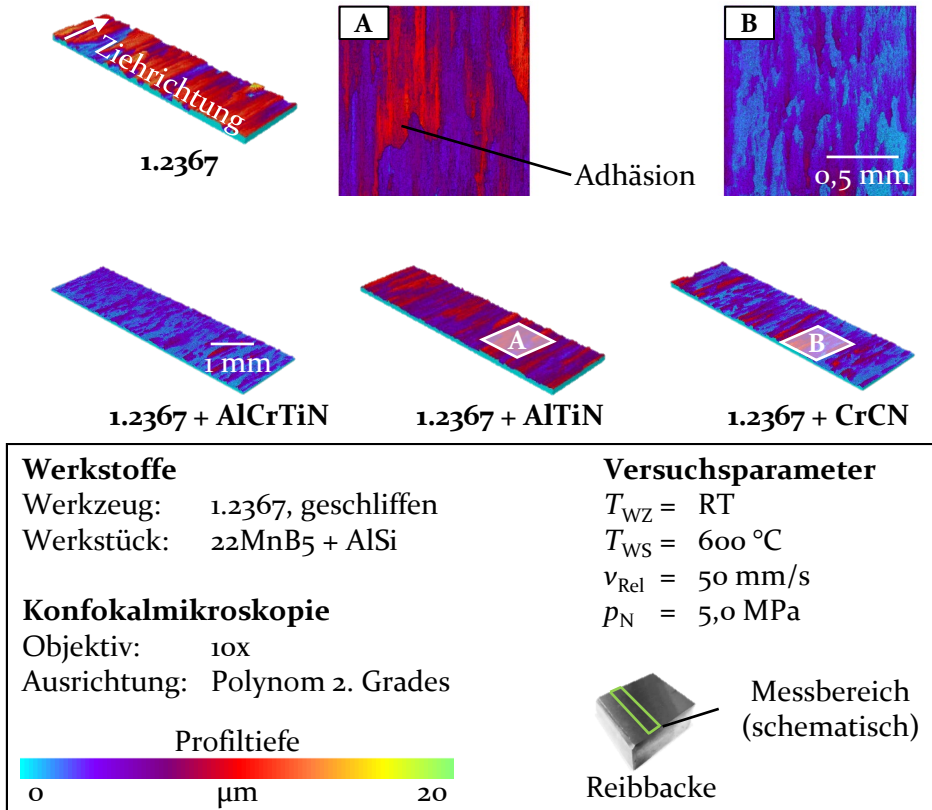


Bild 67: Topographiaufnahmen der Werkzeugoberfläche für unterschiedliche Werkzeugbeschichtungen

Auf der mit AlCrTiN beschichteten Reibbackenoberfläche tritt nur lokal vereinzelt adhäsiver Verschleiß mit geringer Topographietiefe auf. Die Werkzeugtopographie der Reibbacke mit CrCN-Beschichtung ist vergleichbar mit der Oberfläche der AlCrTiN-Beschichtung. Die Materialanhaftungen sind lokal begrenzt auf der Werkzeugoberfläche verteilt. Die Topographietiefe ist im Vergleich zur AlCrTiN-Beschichtung jedoch tendenziell erhöht. Die Topographie der Reibbacke mit AlTiN-Beschichtung weist eine großflächig verschlissene Werkzeugoberfläche auf. Anhand der Analyse der Profilamplitude in Bild 68 wird die unterschiedliche Verschleißbeständigkeit der Beschichtungen verdeutlicht. Die Profilamplitude der unbeschichteten Werkzeugoberfläche liegt bei $12,3 \pm 0,5\text{ µm}$.

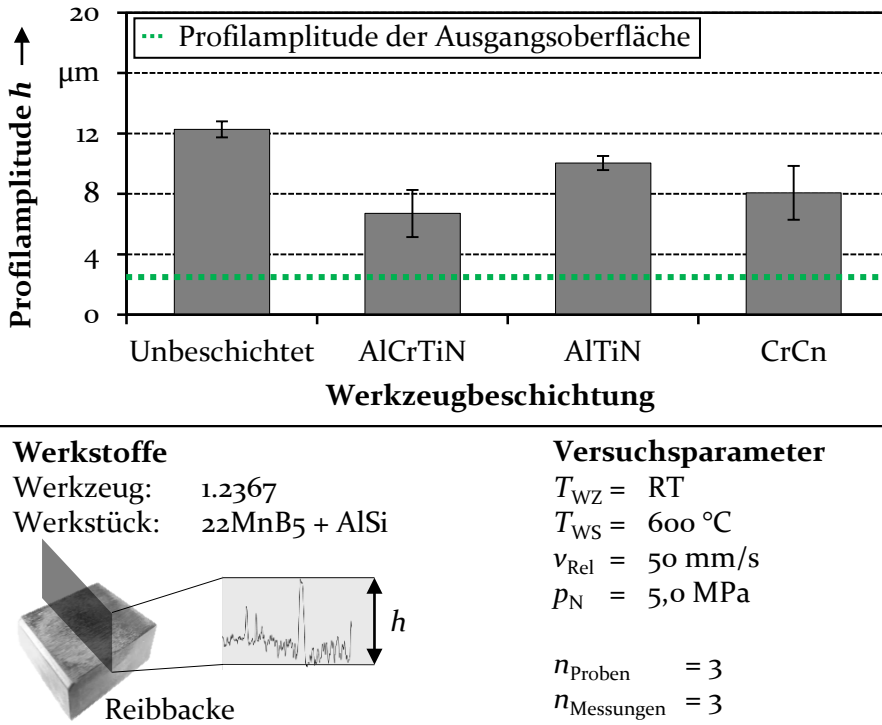


Bild 68: Profilamplitude der Werkzeugoberfläche für unterschiedliche Werkzeugbeschichtungen

Durch die Anwendung der AlCrTiN-Beschichtung verringert sich die Profilamplitude um 45,53 % auf $6,7 \pm 1,6 \mu\text{m}$. Eine vergleichbare Profilamplitude mit $8,1 \pm 1,8 \mu\text{m}$ wurde für Reibbacken mit CrCN-Beschichtung gemessen. Für Proben mit AlTiN-Beschichtung ergibt sich eine tendenziell leicht erhöhte Profilamplitude von $10,0 \pm 0,5 \mu\text{m}$. Damit bestätigt die Analyse der Profilamplituden insgesamt, dass der Einsatz der untersuchten PVD-Beschichtungen eine signifikante Verbesserung der Verschleißbeständigkeit bewirkt.

Aufgrund der hohen Temperaturen von 600 °C scheint das Oxidationsverhalten der Werkzeugbeschichtungen hierfür ausschlaggebend zu sein. Durch den hohen Cr-Anteil in der CrCN-Beschichtung bildet sich auf der Werkzeugoberfläche eine Cr-Oxidschicht [69]. Diese Passivschicht unterbindet Metall-Metall Kontakt und verbessert die Beständigkeit gegenüber adhäsivem Verschleiß [146]. Die Reduzierung von Reibung und Verschleiß durch die Anwendung der AlTiN-Beschichtung beruht ebenfalls auf dem Oxidationsverhalten der Beschichtung, das durch die hohen Temperaturen noch verstärkt wird. Die Legierungselemente Al und Ti bilden zusammen

eine harte Al_3Ti -Phase, die einen hohen Widerstand gegenüber abrasivem Verschleiß zur Folge hat [166]. Darüber hinaus unterstützt Ti die Bildung einer Passivschicht auf der Werkzeugoberfläche [167]. Die Ti-Oxidschicht bewirkt einen Abfall der Reibung durch ihre schmierende Wirkung [165]. Anhand der Analyse der Profilamplitude ist ersichtlich, dass eine Cr-Oxidschicht in Bezug auf die Verbesserung des Widerstands gegenüber adhäsivem Verschleiß effektiver ist als AlTi-Oxidschichten ohne Cr-Anteil.

Die Anwendung einer AlCrTiN-Beschichtung zeigt in den Laborversuchen das größte Verbesserungspotential im Hinblick auf das Reib- und Verschleißverhalten. Die Bildung einer Cr-Oxidschicht wird durch das Legierungselement Aluminium zusätzlich verstärkt [168]. Daher verbindet die AlCrTiN-Beschichtung eine schmierende sowie eine verschleißreduzierende Wirkung durch die Kombination der Legierungselemente Al und Ti sowie Cr. Trotz der Verbesserung des Widerstands gegenüber adhäsivem Verschleiß durch die Werkzeugbeschichtungen tritt lokaler adhäsiver Verschleiß auf der Werkzeugoberfläche auf. Dieser ist auf die hohe mechanische Belastung zurückzuführen, die zu einer lokalen Beschädigung der Oxidschichten führt [151].

Das unterschiedliche Verschleißverhalten der Werkzeugbeschichtungen spiegelt sich in den Aufnahmen der Streifentopographie nach den Streifenziehversuchen wider (Bild 69). Auf der Werkstückoberfläche nach Streifenziehversuchen mit unbeschichtetem sowie mit AlTiN beschichtetem Werkzeug sind auf der Streifenoberfläche Furchen in Ziehrichtung zu sehen. Diese sind maßgeblich auf adhäsiven Verschleiß an der Werkzeugoberfläche zurückzuführen. Auf der Oberfläche des Streifens nach Versuchen mit AlCrTiN- und CrCN-Beschichtung hingegen sind nur vereinzelt Riefen in Ziehrichtung zu erkennen. Die restliche Fläche weist eine Vielzahl von Rauheitsspitzen auf, die in ihrem Erscheinungsbild der Werkstückoberfläche ohne bzw. vor Kontakt mit dem Werkzeug ähnlich sind. Dies lässt auf einen verringerten Materialübertrag schließen. Die Aufnahmen der Streifentopographien stimmen damit mit dem beobachteten Verschleißverhalten der Werkzeugbeschichtungen überein.

Im Rahmen der durchgeführten Laborversuche zur Untersuchung des tribologischen Verhaltens der ausgewählten PVD-Beschichtungen wurde gezeigt, dass durch die Anwendung der Werkzeugbeschichtungen eine signifikante Verringerung der Reibung um bis zu 16 % erreicht werden kann. Zudem wurden die Materialanhaftungen auf der Werkzeugoberfläche signifikant reduziert.

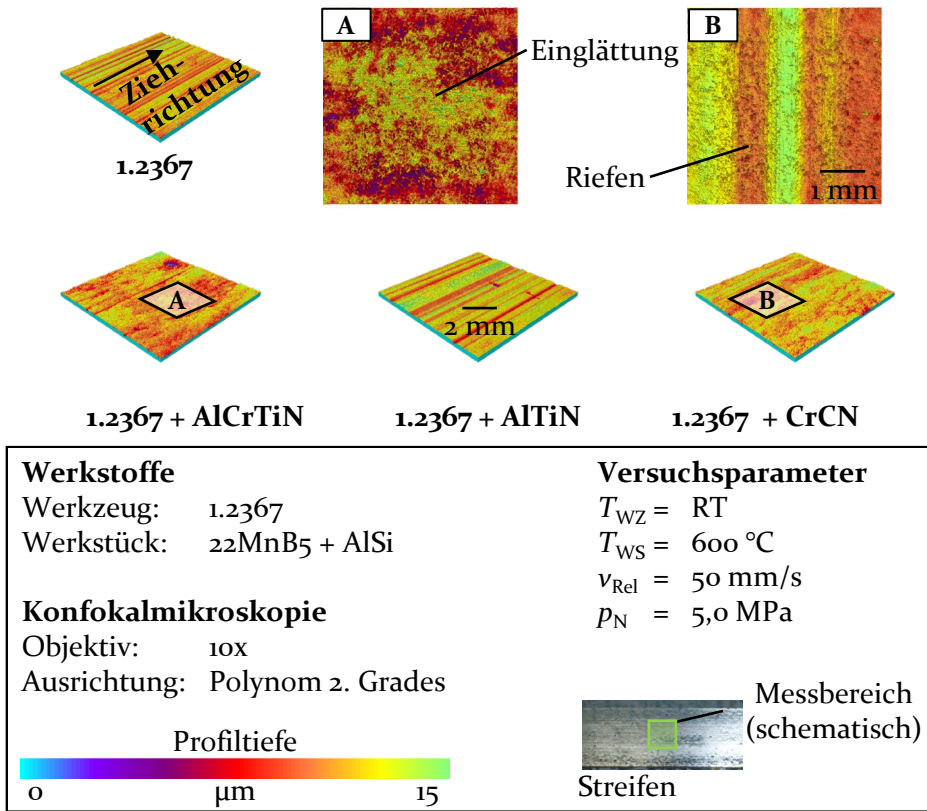


Bild 69: Topographieaufnahmen der Werkstückoberfläche für unterschiedliche Werkzeugbeschichtungen

Ausschlaggebend für das verbesserte Reib- und Verschleißverhalten unter Presshärtebedingungen scheint das Oxidationsverhalten der Beschichtungen zu sein. In diesem Kontext zeigten die Legierungselemente Al und Ti einen reibungsreduzierenden Effekt, während Cr die Bildung einer Passivschicht begünstigt und primär adhäsiven Verschleiß verringert. Durch eine Kombination der beiden Effekte konnte mittels einer AlCrTiN-Beschichtung sowohl Reibung als auch adhäsiver Verschleiß im Rahmen der durchgeführten Streifenziehversuche signifikant reduziert werden.

7.3 Zusammenfassende Bewertung der werkzeug-seitigen Maßnahmen

Auf Basis von Streifenziehversuchen unter Presshärtebedingungen wurde der Einfluss werkzeugseitiger Maßnahmen auf die tribologischen Bedin-

gungen analysiert. Im Fokus der Untersuchungen lag der Einfluss der Oberflächenrauheit, des Werkzeugwerkstoffs und der Wärmebehandlung des Werkstoffs. Zusätzlich wurde der Einsatz von Werkzeugbeschichtungen zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß analysiert.

Um die Auswirkungen der Oberflächenendbearbeitung zu untersuchen, wurden mittels Polieren, Schleifen und Hochgeschwindigkeitszerspannung unterschiedlich raue Werkzeugoberflächen erzeugt. Im Rahmen der durchgeführten Streifenziehversuche konnten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich Reibung und Verschleiß festgestellt werden. Die Ursache hierfür ist der starke adhäsive Verschleiß, der bereits während des ersten Versuchs auf der Werkzeugoberfläche auftritt. Da die Topographietiefe durch die Adhäsion signifikant größer ist als die Topographietiefe der Ausgangsoberfläche, ist die Wahl der Oberflächenendbearbeitung nicht ausschlaggebend für das tribologische Einsatzverhalten.

Anhand von Streifenziehversuchen mit unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffen wurde gezeigt, dass die Wahl des Werkzeugwerkstoffs Reibung und Verschleiß beeinflussen kann. Für den Warmarbeitsstahl 1.2367 und den Kaltarbeitsstahl K353 wurden keine signifikant unterschiedlichen Reibzahlen ermittelt. Versuche mit dem Werkstoff 1.2383 ergaben hingegen einen Anstieg der Reibung um rund 5 %. Die Hauptursache hierfür scheint die chemische Affinität des Werkzeugwerkstoffs gegenüber der AlSi-Beschichtung des Werkstücks zu sein. Nach den durchgeführten Streifenziehversuchen weisen die Werkzeugoberflächen des 1.2383 sichtbar weniger adhäsiven Verschleiß auf als die Werkstoffe 1.2367 und K353. Folglich bildet sich auf der Werkzeugoberfläche keine flächendeckende Schicht von Materialanhaftungen mit schmierender Wirkung.

Der Einfluss der Wärmebehandlung wurde anhand von jeweils drei Härtestufen der ausgewählten Werkzeugwerkstoffe analysiert. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen zeigte sich, dass die weicheren Härtestufen des K353 und 1.2383 mit einer größeren Wahrscheinlichkeit zu starkem adhäsivem Verschleiß neigen und es zu Verschweißungen zwischen Werkzeug und Werkstück kommen kann. Bei allen drei Werkzeugwerkstoffen steigt der Verschleiß auf der Werkzeugoberfläche mit abnehmender Härte tendenziell an. Ausschlaggebend scheint in diesem Kontext jedoch nicht die absolute Härte des Werkzeugs zu sein, sondern der Einfluss der Wärmebehandlung auf die resultierende Gefügestruktur. In Bezug auf das Reibverhalten ist hingegen kein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Härtestufen der Werkstoffe 1.2367 und K353 erkennbar. Im Falle des Spezialstahls 1.2383 ergaben sich mit geringerer Härte niedrigere Reibzahlen.

Abschließend wurde der Einsatz von Werkzeugbeschichtungen anhand von drei PVD-Beschichtungen (AlCrTiN, AlTiN und CrCN) untersucht. Alle Beschichtungen bewirken einen signifikanten Abfall der Reibung. Im Falle der AlCrTiN-Beschichtung wurde die Reibung um bis zu 16,66 % im Vergleich zum unbeschichteten Werkzeug verringert. Weiterhin führt ein Einsatz der Beschichtungen im Rahmen der Laborversuche zu signifikant weniger Materialanhaftungen auf der Werkzeugoberfläche. Die Wirkung der Werkzeugbeschichtungen scheint maßgeblich auf der Bildung einer Oxidschicht auf der Werkzeugoberfläche zu beruhen. Diese wird durch die Zusammensetzung der Beschichtung beeinflusst. Im Vergleich der drei untersuchten Werkzeugbeschichtungen scheint die Kombination aus Al und Ti eine ausgeprägte Schmierwirkung zu entfalten. Der Cr-Anteil innerhalb der Beschichtung unterbindet eher die Bildung von adhäsivem Verschleiß.

Zusammenfassend bieten werkzeugseitige Maßnahmen die Möglichkeit, die tribologischen Bedingungen beim Presshärten zu verbessern. Der Einfluss der Oberflächenendbearbeitung ist bereits ab geringem adhäsivem Verschleiß vernachlässigbar. Durch die Wahl des Werkzeugwerkstoffs und die Wärmebehandlung des Werkzeugwerkstoffs kann insbesondere das Verschleißverhalten beeinflusst werden. Höhere Werkzeughärten sind in diesem Kontext vorteilhaft. Mithilfe von geeigneten Werkzeugbeschichtungen können sowohl Reibung als auch Verschleiß beim Presshärten signifikant verringert werden. Nachdem die Wirksamkeit der identifizierten Maßnahmen in Streifenziehversuchen nachgewiesen wurde, gilt es die Ergebnisse anhand von Umformversuchen mit gesteigerter Komplexität zu verifizieren. Hierdurch wird die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf den industriellen Presshärteprozess überprüft. Im nachfolgenden Kapitel werden daher ausgewählte werkzeugseitige Maßnahmen auf ein Demonstratorwerkzeug mit B-Säulen-Geometrie im Labormaßstab angewendet.

8 Übertragung der Erkenntnisse aus den Flachbahnstreifenziehversuchen auf den Presshärteprozess

In diesem Kapitel wird die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den Flachbahnstreifenziehversuchen auf den Presshärteprozess analysiert. Im Fokus stehen hierbei werkzeugseitige Einflüsse auf die tribologischen Bedingungen beim Presshärten. Die Wirksamkeit der werkzeugseitigen Maßnahmen wird anhand von Bauteilabpressungen mit einem Presshärtewerkzeug im Labormaßstab untersucht. Um eine objektive Bewertung zu ermöglichen, werden Referenzbauteile mit dem unbeschichteten Warmarbeitsstahl 1.2367 abgepresst. Anschließend wird der Einfluss der werkzeugseitigen Maßnahmen anhand des Umformverhaltens, der resultierenden Blechdicke sowie des Werkzeugverschleißes bewertet.

8.1 Festlegung der zu untersuchenden Werkzeugkonfigurationen

Zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen gilt es, die während der Umformung auftretenden Reibkräfte und den Werkzeugverschleiß zu reduzieren. Die Ergebnisse der Streifenziehversuche aus den vorherigen Kapiteln zeigen, dass neben der Wahl des Werkzeugwerkstoffs die Wärmebehandlung der Werkzeuge das tribologische Verhalten beeinflusst. Darüber hinaus bietet der Einsatz von Werkzeugbeschichtungen ein hohes Verbesserungspotential hinsichtlich der Reduzierung von Reibung und Verschleiß.

Im Folgenden wird überprüft, ob die Ergebnisse aus den Streifenziehversuchen auf reale Umformbedingungen übertragbar sind. Die Erkenntnisse bezüglich des werkzeugseitigen Einflusses werden hierfür anhand von Bauteilabpressungen einer B-Säulen-Geometrie im Labormaßstab verifiziert. Die Bauteilabpressungen werden mit unterschiedlichen Werkzeugkonfigurationen durchgeführt. Hierzu werden austauschbare Stempel- und Matrizeinsätze verwendet (siehe Bild 70). Die Positionierung der Platine erfolgt über Einweiser-Pins, sodass eine hohe Reproduzierbarkeit der Versuche erreicht wird.

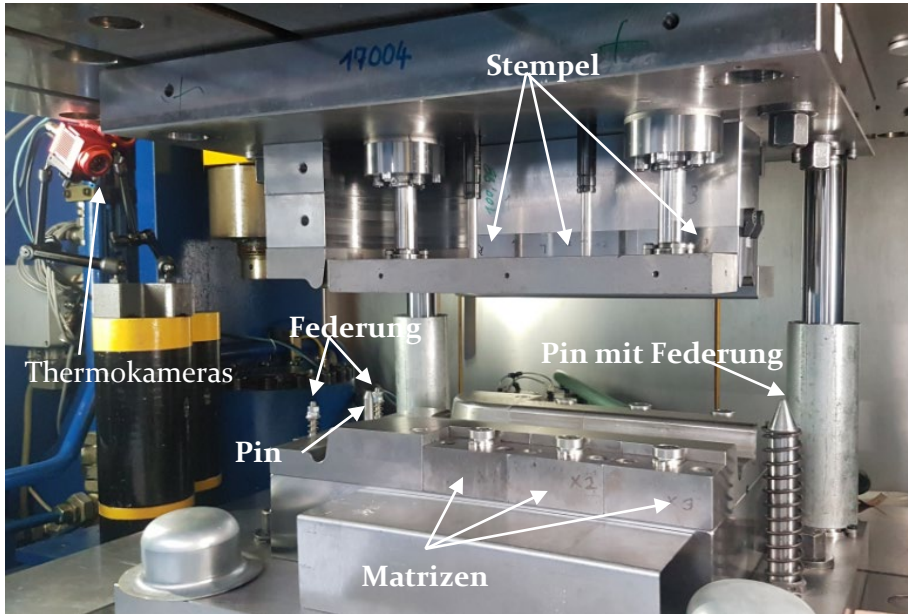


Bild 70: Versuchsaufbau mit eingebautem Presshärtewerkzeug

Als Referenzwerkstoff wird der Warmarbeitsstahl 1.2367 mit einer Härte von 54 ± 2 HRC verwendet. Dies entspricht der vom Hersteller empfohlenen Einsatzhärte, die auch in industriellen Presshärtewerkzeugen eingesetzt wird. Die Werkzeugoberfläche ist unbeschichtet. Demgegenüber werden zwei weitere Werkzeugkonfigurationen untersucht, die basierend auf den Ergebnissen der Streifenziehversuche jeweils das beste sowie das schlechteste Reib- und Verschleißverhalten erwarten lassen. Die Werkzeugoberflächen wurden bei allen drei Werkzeugkonfigurationen abschließend geschliffen. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die verwendeten Werkzeuge.

Tabelle 7: Eigenschaften der eingesetzten Werkzeugkonfigurationen

	Werkzeugeigenschaften		
	Werkstoff	Härte in HRC	Oberfläche
Referenz	1.2367	54 ± 2	unbeschichtet
1. Werkzeugkonfiguration	1.2383	48 ± 2	unbeschichtet
2. Werkzeugkonfiguration	K353	62 ± 2	AlCrTiN

Die erste Variante des Werkzeugs besteht aus dem Spezialstahl 1.2383 ohne Werkzeugbeschichtung. Bei diesem Stahl wurden im Rahmen der Streifenziehversuche die höchsten Reibzahlen ermittelt. Der Werkstoff wird mit einer Härte von 48 ± 2 HRC eingesetzt. Mit dieser Werkzeughärte konnten keine gültigen Reibzahlen ermittelt werden, da die hohe Adhäsionsneigung zu Aufschweißungen geführt hat. Demzufolge ist bei dieser Variante das schlechteste Reib- und Verschleißverhalten im Rahmen der Umformversuche zu erwarten.

Für die zweite Werkzeugkonfiguration werden Einsätze aus dem Kaltarbeitsstahl K353 gefertigt. Das beobachtete Reib- und Verschleißverhalten des K353 ist mit dem des Werkzeugwerkstoffs 1.2367 vergleichbar. Anhand der Ergebnisse der Streifenziehversuche ist tendenziell ein erhöhter Widerstand gegenüber adhäsivem Verschleiß mit steigender Werkzeughärte zu erkennen. Daher wird der Werkstoff im Rahmen der Bauteilabpressungen mit einer Werkzeughärte von 62 ± 2 HRC eingesetzt. Darüber hinaus bewirkt der Einsatz von PVD-Beschichtungen eine signifikante Verringerung von Reibung und Verschleiß. Aus diesem Grund wird für die zweite Werkzeugkonfiguration eine AlCrTiN-Beschichtung aufgebracht.

8.2 Methodik zur Charakterisierung der tribologischen Bedingungen anhand einer B-Säulen-Geometrie

Nachfolgend wird das Vorgehen zur Abpressung einer B-Säulen-Geometrie im Labormaßstab mithilfe eines Presshärtewerkzeugs beschrieben. Die Versuchsparameter orientieren sich am industriellen Serienprozess, um eine bestmögliche Übertragbarkeit der Erkenntnisse sicherzustellen. In diesem Kontext sind die Wärmebehandlung der Platine vor und die Platinentemperatur während der Umformung als kritische Parameter zu betrachten. Um Rückschlüsse auf die Reibbedingungen während der Umformung ziehen zu können, wird die Stößelkraft sowie die resultierende Blechdicke des Bauteils analysiert. Der Verschleiß der Werkzeugoberfläche wird mittels taktiler und optischer Messung untersucht.

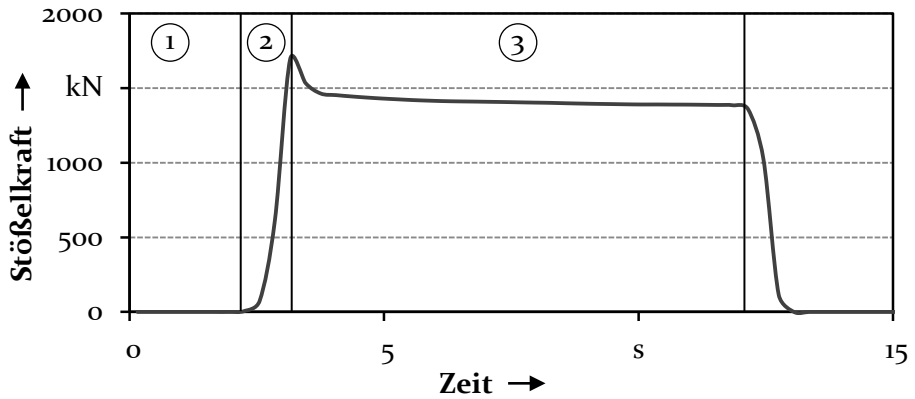
Die Versuchsparameter für die Abpressung der B-Säulen-Geometrien sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Für die experimentellen Untersuchungen wird analog zu den Streifenziehversuchen 22MnB5 mit AlSi-Beschichtung und einer Blechstärke von 1,5 mm verwendet. Die Wärmebehandlung der Platine erfolgt in einem separaten Kammerofen bei einer Ofentemperatur von $930 \text{ }^\circ\text{C}$ für 6 min.

Tabelle 8: Überblick über Versuchsparameter für Bauteilabpressungen

	Versuchsparameter
	Wärmebehandlung
Ofentemperatur	930 °C
Verweilzeit im Ofen	360 s
Transferzeit von Ofen zu Werkzeug	3 - 4 s
	Umformung
Zeit in Werkzeug vor Umformung	5,5 s
Verfahrweg mit Eilgang	100 mm
Geschwindigkeit bei Eilgang	200 mm/s
Umformweg	90 mm
Umformgeschwindigkeit	100 mm/s
	Abschrecken
Presskraft	1400 kN
Haltezeit	9 s

Die Parameter der Wärmebehandlung sowie die Transferzeit sind mit der industriellen Praxis vergleichbar. Der Transfer der Platine vom Ofen in das Werkzeug erfolgt manuell innerhalb von 3 - 4 s. Das Presshärtewerkzeug wurde in eine hydraulische Tiefziehpresse vom Typ Hydrap HPDZb 630 montiert. Die maximale Verfahrgeschwindigkeit der Presse im Eilgang liegt bei 200 mm/s. Um eine vorzeitige Auskühlung des Bauteils zu minimieren, ist die Platine im Werkzeug auf drei Federn gelagert. Die Federn sind so positioniert, dass die mit den Federn in Kontakt kommenden Bereiche nicht umgeformt werden (siehe Abschnitt 4.4.1). Die Umformung erfolgt mit der bei der Presse maximal realisierbare Umformgeschwindigkeit von 100 mm/s. Nach der Umformung bleibt das Werkzeug analog zum industriellen Presshärteprozess für 9 s geschlossen. Hierdurch wird die Umwandlung der Gefügestruktur des Bauteils in vollständigen Martensit sichergestellt. Die Presskraft während der Abschreckphase beträgt 1400 kN. Dies

entspricht der maximal einstellbaren Haltekraft der Presse. In Bild 71 ist der Verlauf der Stößelkraft exemplarisch dargestellt.



Werkstoffe		Versuchsparameter	
Werkzeug:	1.2367, geschliffen	$t_{\text{Transfer}} = 3,5 + 5,5 \text{ s}$	
Werkstück:	22MnB5 + AlSi	$v_{\text{Stößel}} = 100 \text{ mm/s}$	
		$F_{\text{Stößel}} = 1400 \text{ kN}$	
		$t_{\text{Abschreck}} = 9 \text{ s}$	
		① Transfer	
		② Umformen	
		③ Abschrecken	



B-Säulen-Geometrie

Bild 71: Exemplarischer Verlauf der Stößelkraft

Während der Umformung steigt die Stößelkraft auf ca. 1700 kN an. Anschließend wird die Stößelkraft auf den Sollwert von 1400 kN geregelt. Hierdurch ist eine schnelle Abschreckung des Werkstücks durch Kontakt mit dem Werkzeug sichergestellt. Nach einer Haltezeit von 9 s wird das Werkzeug geöffnet, sodass das Werkstück entnommen werden kann. Der charakteristische Verlauf der Stößelkraft während der Versuchsdurchführung war für alle Bauteilabpressungen gleich und variiert lediglich in der maximalen Stößelkraft.

Im Hinblick auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich der Umformbedingungen auf den Presshärteprozess nimmt der Temperaturverlauf der Platine eine zentrale Rolle ein [44]. Die Temperatur des Bauteils wurde während der durchgeführten Versuche anhand einer Infrarotkamera überwacht. Zur Erfassung der Temperatur nach der Umformung wurde das Werkzeug ohne Haltezeit direkt wieder geöffnet. Der Verlauf der Platinentemperatur ist in Bild 72 exemplarisch dargestellt.

8 Übertragung der Erkenntnisse aus den Flachbahnstreichziehversuchen auf den Presshärteprozess

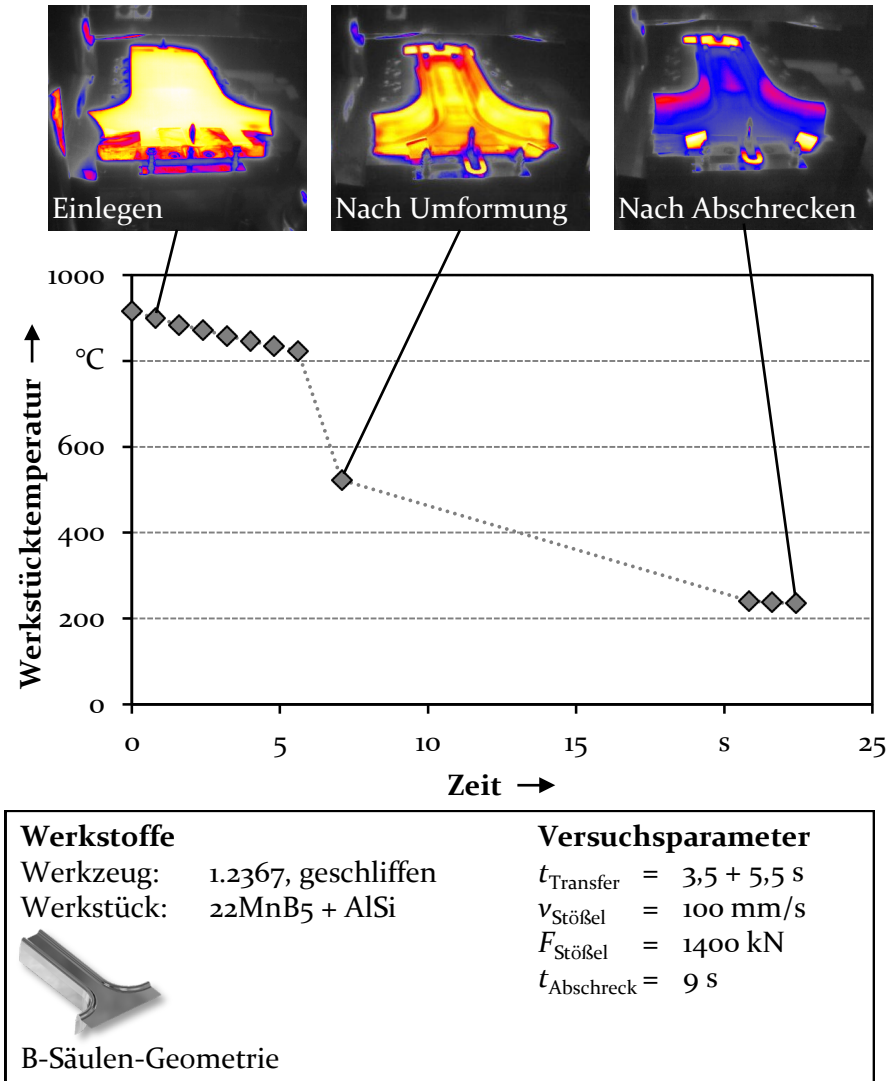
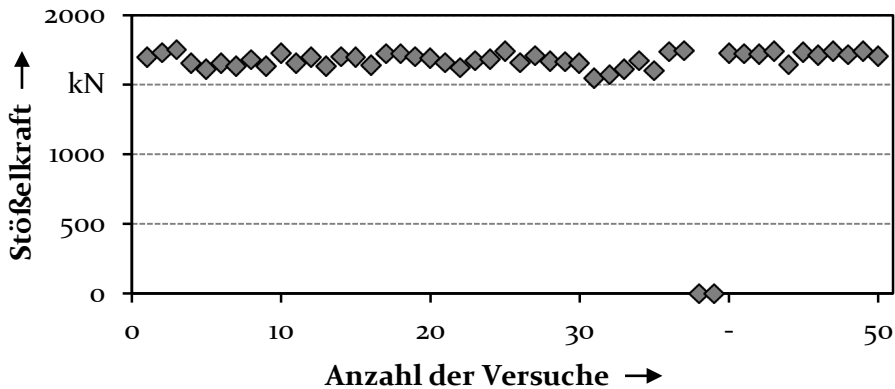


Bild 72: Exemplarischer Verlauf der Platinentemperatur

Nach dem manuellen Transfer beträgt die Einlegetemperatur der Platine ca. 850 °C. Bis zum Kontakt mit dem Stempel kühlt das Werkstück um weitere 50 °C auf ab. Während der Umformung sinkt die Temperatur des Werkstücks auf 530 °C. Vor und während der Umformung liegt demnach vollkommen austenitisches Gefüge vor. Durch die anschließende Abschreckphase wird das Bauteil im geschlossenen Werkzeug auf eine Entnahmetemperatur von weniger als 200 °C abgeschreckt.

Die mittlere Abkühlgeschwindigkeit liegt demnach bei über 30 K/s. Daher ist eine Umwandlung in martensitisches Gefüge sichergestellt [30]. Der Verlauf der Werkstücktemperatur während des kombinierten Umform- und Abschreckvorgangs weist eine hohe Vergleichbarkeit mit der industriellen Praxis auf [35]. Somit ist eine weitgehende Übertragbarkeit der Ergebnisse bezüglich des Umformverhaltens auf den Serienprozess gewährleistet [44]. In Bild 73 sind die maximalen Stößelkräfte von 50 Bauteilabpressungen gezeigt. Die gemessenen Stößelkräfte liegen zwischen 1550 kN und 1750 kN. Die vergleichsweise große Schwankung der Messwerte ist darauf zurückzuführen, dass der Widerstand der Pressenführung mit in die Kraftmessung einfließt. Bei fünf Leerfahrten ergab sich eine mittlere Stößelkraft von 1632 ± 34 kN.



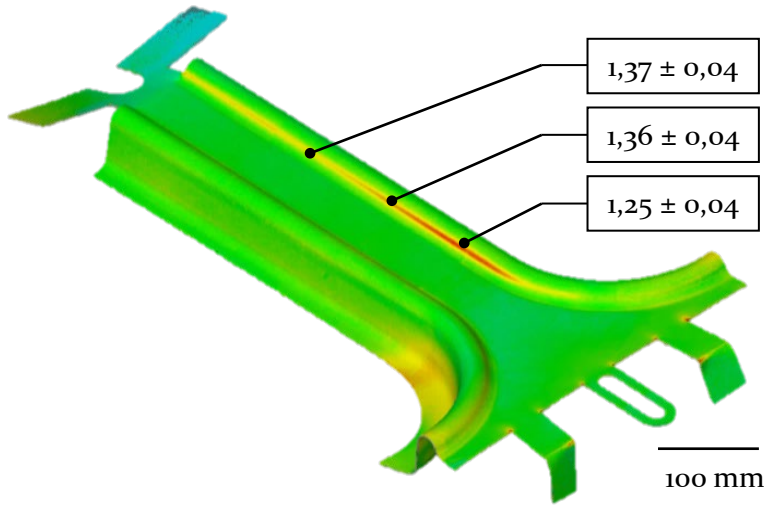
Werkstoffe		Versuchsparameter	
Werkzeug:	1.2367, geschliffen	t_{Transfer}	= 3,5 + 5,5 s
Werkstück:	22MnB5 + AlSi	$v_{\text{Stößel}}$	= 100 mm/s
		$F_{\text{Stößel}}$	= 1400 kN
		$t_{\text{Abschreck}}$	= 9 s
		n_{Proben}	= 5



B-Säulen-Geometrie

Bild 73: Überblick über die maximalen Stößelkräfte

Neben der Umformkraft wird auch die resultierende Blechdicke der abgepressten Bauteile analysiert. Eine hohe Blechausdünnung ist demnach ein Indiz für hohe Reibung während der Umformung, da der Stofffluss verringert wird [169]. Die Blechstärke wird mithilfe des topometrischen 3D-Sensors ATOS gemessen. In Bild 74 ist die Analyse der Blechdicke exemplarisch dargestellt.



3D-Scanning (ATOS)		Versuchsparameter	
Messfläche:	300 x 230 mm	t_{Transfer}	= 3,5 + 5,5 s
Messpunkteabstand:	0,12 mm	$v_{\text{Stößel}}$	= 100 mm/s
Auflösung:	0,01 mm	$F_{\text{Stößel}}$	= 1400 kN
		$t_{\text{Abschreck}}$	= 9 s
		n_{Proben}	= 5

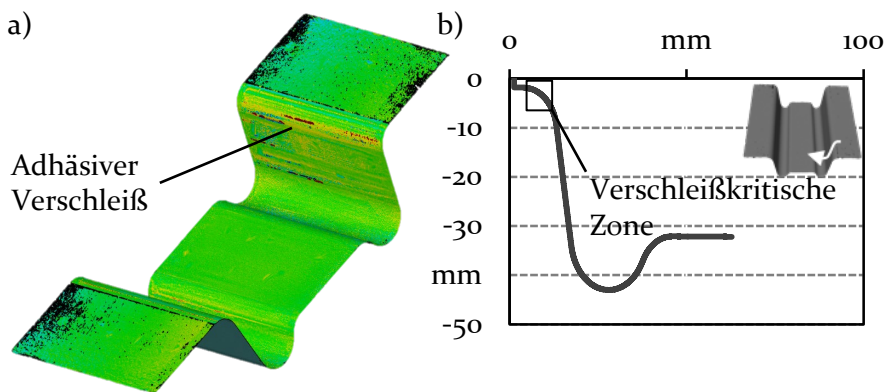
Profiltiefe	
1,20	1,80
mm	

Bild 74: Blechdickenmessung an B-Säulen-Geometrie im Labormaßstab

Anhand der Blechdickenmessung ist ersichtlich, dass es infolge der Umformung zu einer Verringerung der Blechstärke um bis zu 16,67 % von 1,5 mm auf 1,25 mm kommt. Die größte Blechausdünnung tritt im inneren Radius des Stegbereichs auf.

Die in Kapitel 6 identifizierten Verschleißmechanismen haben einen erhöhten Werkzeugverschleiß zur Folge, der dazu führt, dass Presshärtewerkzeuge in der industriellen Praxis oftmals bereits nach 2000 Hübten überarbeitet werden müssen [136]. Der Verschleiß entsteht dabei während des ersten Hubs und nimmt mit steigender Hubanzahl zu. Vor diesem Hintergrund wird die Werkzeugoberfläche jeweils nach 50 abgepressten Bauteilen analysiert, um eine Aussage bezüglich des Verschleißverhaltens des Werkzeugs treffen zu können. Darüber hinaus ermöglicht eine detaillierte Analyse der Werkzeugoberfläche nach der vergleichsweise geringen Anzahl an Hübten eine zuverlässige Verifizierung der Erkenntnisse aus den Streifenziehversuchen. Aufgrund der Abmessungen der Matrizeneinsätze ist eine Verschleißcharakterisierung mittels Konfokalmikroskop nicht

möglich. Für die Charakterisierung der Werkzeugoberfläche wird daher der 3D-Sensor ATOS eingesetzt. Zunächst werden hiermit verschleißkritische Werkzeugbereiche identifiziert. Anschließend werden in diesen Bereichen die Konturen der Werkzeugoberfläche taktil erfasst und mit der Ausgangskontur gegenübergestellt. In Bild 75 ist die ATOS-Messung eines Matrizenzeinsatzes exemplarisch gezeigt. Die gelb bis rot eingefärbten Bereiche weisen auf adhäsiven Verschleiß hin. Schwarze Messpunkte stellen Regionen dar, die aufgrund der Spiegelung nicht erfasst wurden. Diese befinden sich hauptsächlich im Bereich des Niederhalters, der keine sichtbaren Verschleißspuren zeigt.



3D-Scanning (ATOS)		Versuchsparameter	
Messfläche:	135 x 100 mm	$t_{\text{Transfer}} = 3,5 + 5,5 \text{ s}$	
Messpunkteabstand:	0,05 mm	$v_{\text{Stößel}} = 100 \text{ mm/s}$	
Auflösung:	0,01 mm	$F_{\text{Stößel}} = 1400 \text{ kN}$	
Taktile Konturmessung		$t_{\text{Abschreck}} = 9 \text{ s}$	
Antastkraft:	0,001 N		
Verfahrweg:	60 mm		

Bild 75: Optische (a) sowie taktile (b) Analyse der Werkzeugoberfläche nach 50 Bauteilabpressungen

Anhand der Analyse der Oberflächenmessung ist ersichtlich, dass Verschleiß hauptsächlich im Matrizenradius auftritt. Die Konzentration von adhäsivem Verschleiß in diesem Bereich ist anhand der lokal hohen Flächenpressungen zu erklären [71]. Zudem kommt es hier zur größten Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück. In der Zarge ist geringer Verschleiß zu erkennen, da der Zargenbereich eine 10° Neigung aufweist. Aufgrund des Neigungswinkels kann ein vollflächiger Kontakt

zwischen Werkzeug und Werkstück für die Abschreckung des Bauteils sichergestellt werden. Der Großteil des adhäsiven Verschleißes tritt im Einlaufbereich des Matrizenradius auf. Dieser Bereich wird nachfolgend für die Beurteilung des Verschleißverhaltens herangezogen.

Bild 76 zeigt die taktile Analyse der Werkzeugkontur eines Matrizen Einsatzes im Einlaufbereich des Matrizenradius exemplarisch. Anhand der Messergebnisse ist erkennbar, dass mithilfe der taktile Konturmessung ein sichtbarer Materialauftrag auf der Werkzeugoberfläche stattfindet. Der dominierende Verschleißmechanismus nach 50 Bauteilabpressungen ist adhäsiver Verschleiß.

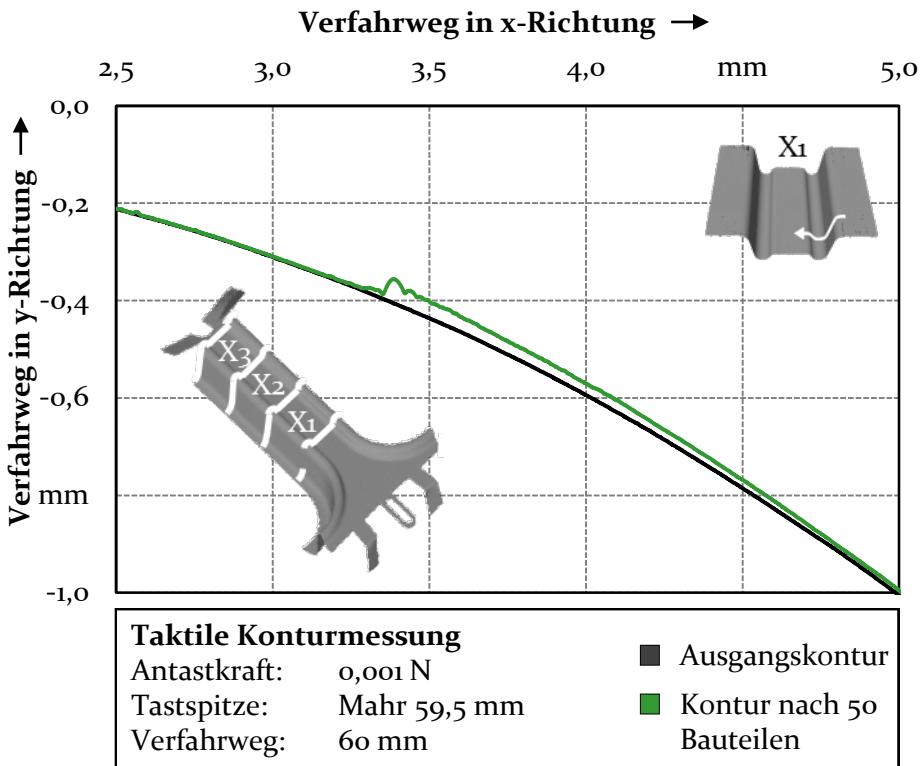


Bild 76: Taktile Analyse der Werkzeugkontur nach 50 Bauteilabpressungen

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die vorgestellte Methodik zur Charakterisierung der Reib- und Verschleißbedingungen anhand einer B-Säulen-Geometrie zur Verifizierung der Erkenntnisse aus den zuvor durchgeführten Flachbahnstreifenziehversuchen geeignet ist. Die Auswertung des Temperatur-Zeit Verlaufs der Werkstücktemperatur während

der Versuchsdurchführung zeigt, dass die Rahmenbedingungen der Bauteilabpressungen der B-Säulen-Geometrie grundsätzlich mit der industriellen Praxis vergleichbar sind. Die Umformtemperatur liegt in einem Bereich zwischen 500 °C und 800 °C. Durch die hohen Reibkräfte bei der Umformung tritt eine Blechausdünnung von bis zu 16,67 % auf. Dies liegt unterhalb der maximal zulässigen Blechausdünnung im Serienprozess [11]. Die tribologischen Bedingungen während der Umformung sind daher auf den Presshärteprozess in der industriellen Praxis übertragbar. Im Rahmen der Charakterisierung der Werkzeugoberfläche nach der Versuchsdurchführung wurde ein sichtbarer Materialauftrag gemessen. Somit ist neben der Analyse der Reibbedingungen anhand der Stößelkraft und der Blechausdünnung auch eine grundsätzliche Aussage über das Verschleißverhalten basierend auf den durchgeführten Bauteilabpressungen möglich.

8.3 Verifizierung der Maßnahmen zur Reibungs- und Verschleißreduzierung aus den Laborversuchen anhand einer Demonstratorgeometrie

Nachfolgend wird das tribologische Einsatzverhalten der ausgewählten Werkzeugkonfigurationen analysiert. Hierfür wird die im vorherigen Abschnitt anhand der Referenzwerkzeugkonfiguration vorgestellte Methodik zur Charakterisierung des Reib- und Verschleißverhaltens bei der Abpressung von B-Säulen-Geometrien im Labormaßstab angewendet. Da die Werkzeugkonfigurationen unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten aufweisen, wird zunächst der Verlauf der Platinentemperatur während der Versuchsdurchführung untersucht.

Neben den vorherrschenden Reibbedingungen beeinflusst die Werkstücktemperatur maßgeblich das Umformverhalten. Der Verlauf der Platinentemperatur während der Versuchsdurchführung wird analysiert, indem die Einlegetemperatur der Platine im Werkzeug, die Temperatur direkt nach der Umformung sowie die Temperatur nach dem Abschreckvorgang im geschlossenen Werkzeug für die ausgewählten Werkzeugkonfigurationen gegenübergestellt werden. Zur Erfassung der Temperatur nach der Umformung wird das Werkzeug ohne Haltezeit wieder geöffnet. In Bild 77 sind die gemittelten Werkstücktemperaturen während der Versuche mit den ausgewählten Werkzeugkonfigurationen exemplarisch dargestellt. Die Werkstücktemperatur wird anhand von fünf gleichbleibenden Messpunkten im Messfeld der Thermokamera ermittelt.

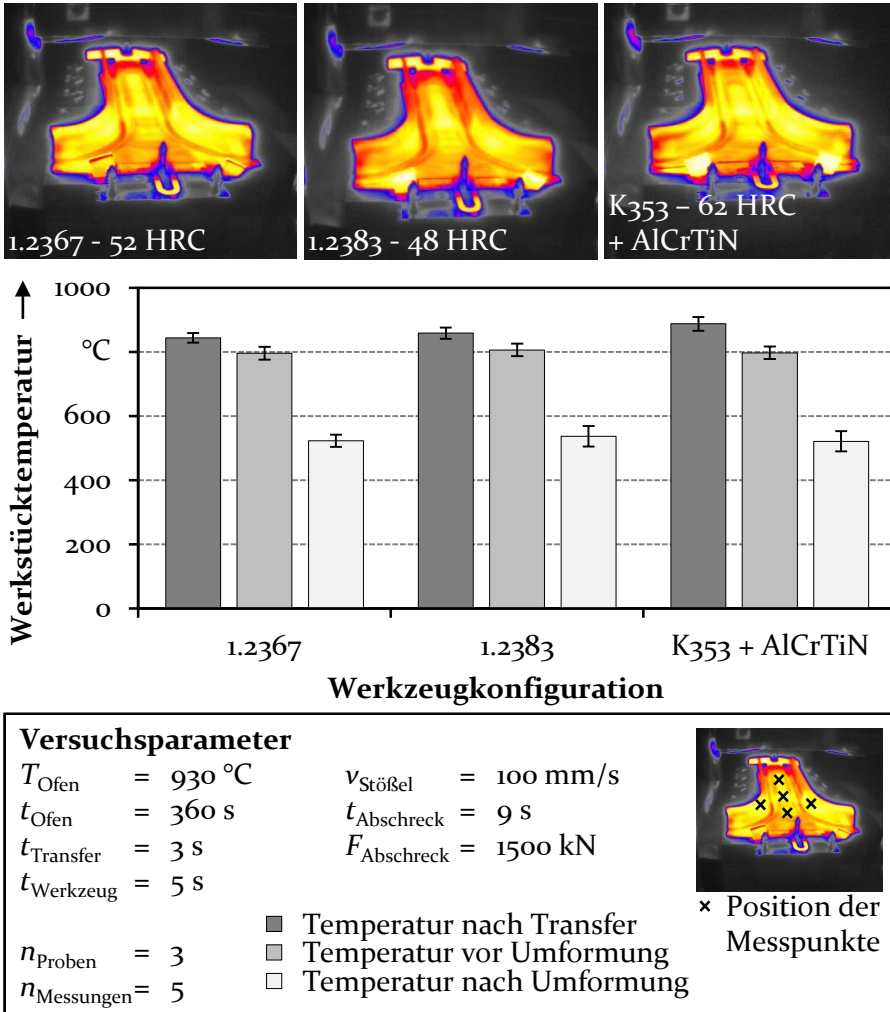
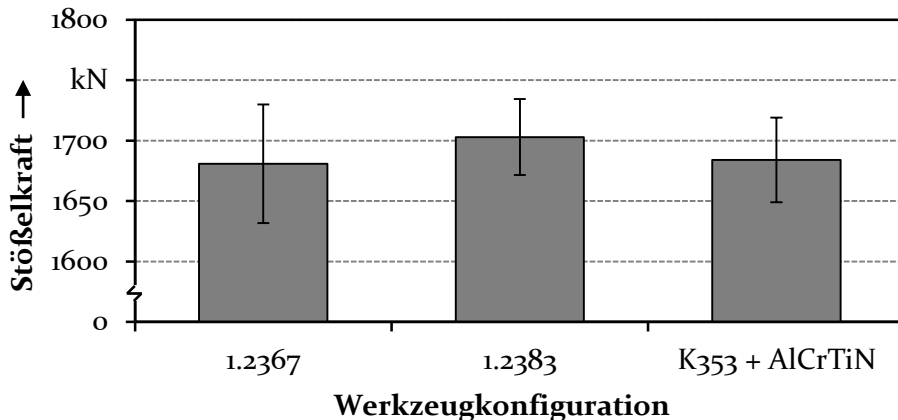


Bild 77: Vergleich der Platinentemperatur während der Versuchsdurchführung für unterschiedliche Werkzeugkonfigurationen

Anhand der gemessenen Platinentemperaturen ist ersichtlich, dass die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der Werkzeugkonfigurationen keinen Einfluss auf die Werkstücktemperatur im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen haben. Die Einlegetemperatur der Platine nach dem manuellen Transfer von dem Kammerofen in die Presse beträgt 863 ± 18 °C. Während sich das Werkzeug schließt, kühlt das Bauteil weiter ab, sodass die Temperatur direkt vor der Umformung bei 792 ± 14 °C liegt. Die durchschnittliche Temperatur unmittelbar nach der Umformung liegt für die Referenzwerkzeugkonfiguration (1.2367) bei 525 ± 19 °C. Bei Versuchen mit

der ersten Werkzeugkonfiguration (1.2383) bzw. zweiten Werkzeugkonfiguration (K353 + AlCrTiN) wurde eine Werkstücktemperatur von $535 \pm 32 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $536 \pm 31 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen. Aufgrund der hohen Stempelgeschwindigkeit von 100 mm/s haben die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten keinen signifikanten Einfluss auf die Werkstücktemperaturen während der Umformung. Demzufolge sind Unterschiede im Umformverhalten maßgeblich auf das unterschiedliche Reibverhalten der Werkzeugkonfigurationen zurückzuführen. In diesem Kontext werden nachfolgend die maximalen Stößelkräfte sowie die resultierende Blechdicke der Bauteile analysiert.

In Bild 78 sind die mittleren Stößelkräfte für die Werkzeugkonfigurationen aus jeweils 50 Bauteilabpressungen dargestellt. Aufgrund der großen Messchwankungen ist kein signifikanter Unterschied zwischen den maximalen Stößelkräften der untersuchten Werkzeugkonfigurationen zu ermitteln. Die Ursache hierfür sind die hohen Schwankungen der Stößelkräfte bei Leerfahrten (siehe Abschnitt 8.2). Mit $1702 \pm 32 \text{ kN}$ weist die erste Werkzeugkonfiguration (1.2383) jedoch tendenziell die höchsten Stößelkräfte auf. Dies geht auf erhöhte Reibkräfte während der Umformung zurück.



Werkstoffe		Versuchsparameter	
Werkzeug:	geschliffen	$t_{\text{Transfer}} = 3,5 + 5,5 \text{ s}$	
Werkstück:	22MnB5 + AlSi	$v_{\text{Stößel}} = 100 \text{ mm/s}$	
		$F_{\text{Stößel}} = 1400 \text{ kN}$	
		$t_{\text{Abschreck}} = 9 \text{ s}$	
		$n_{\text{Proben}} = 5$	



B-Säulen-Geometrie

Bild 78: Vergleich der maximalen Stößelkräfte bei Bauteilabpressungen mit unterschiedlichen Werkzeugkonfigurationen

Eine weitere Möglichkeit, die Reibungsbedingungen während der Umformung zu beurteilen, ist die Analyse der Blechausdünnung. Hohe Reibkräfte zwischen Matrizenradius und Bauteil behindern den Materialfluss. Dies hat eine höhere Blechausdünnung in reibungssensitiven Bauteilbereichen zur Folge. In Bild 79 ist die gemittelte Blechdicke aus jeweils fünf umgeformten B-Säulen-Geometrien dargestellt. Pro Werkzeugkonfiguration wurden das erste, das zehnte, das dreißigste, das vierzigste und das fünfzigste Bauteil analysiert.

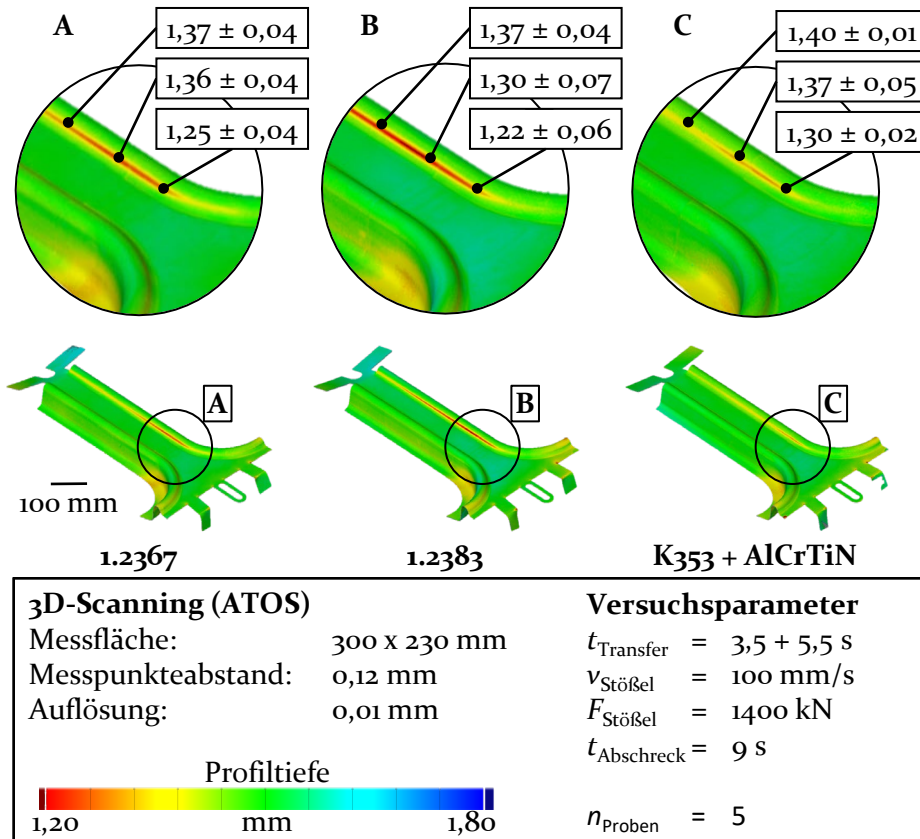


Bild 79: Blechdickenmessung an B-Säulen-Geometrien im Labormaßstab für unterschiedliche Werkzeugkonfigurationen

Infolge der hohen Reibkräfte kommt es während der Abpressung der B-Säulen-Geometrien zu einer signifikanten Blechausdünnung. Die höchste Blechausdünnung tritt im Innenradius des Stegbereichs auf. Beim Vergleich der resultierenden Blechdicken ist ein messbarer Unterschied zwischen den untersuchten Werkzeugkonfigurationen zu erkennen. Im

Bereich des Innenradius liegt die Blechausdünnung für die Referenzwerkzeugkonfiguration (1.2367) zwischen 6 % - 19,33 %. Die gemittelte Blechdicke beträgt zwischen $1,25 \pm 0,04$ und $1,34 \pm 0,04$ mm. Demgegenüber wurde bei Versuchen mit der ersten Werkzeugkonfiguration (1.2383) eine höhere Blechausdünnung gemessen. Für die gemittelte Blechdicke im analysierten Bereich ergibt sich ein Wert zwischen $1,22 \pm 0,06$ und $1,37 \pm 0,04$ mm. Dies entspricht einer Blechausdünnung von 6 - 22,67 %. Die Blechausdünnung bei Versuchen mit der zweiten Werkzeugkonfiguration (K353 + AlCrTiN) ist hingegen deutlich geringer. Die gemessene Blechdicke liegt zwischen $1,30 \pm 0,02$ und $1,40 \pm 0,01$ mm bzw. 6 - 14,67 %.

Anhand der Analyse der Blechausdünnung ist ein messbarer Unterschied hinsichtlich des Reibverhaltens der untersuchten Werkzeugkonfigurationen feststellbar. Die höchste Blechausdünnung von bis zu 22,67 % wurde bei Versuchen mit dem Werkstoff 1.2383 ermittelt. Bauteile, die mit der zweiten Werkzeugkonfiguration (K353 + AlCrTiN) hergestellt wurden, weisen hingegen eine deutlich geringere Blechausdünnung von maximal 14,67 % auf. Die messbaren Unterschiede bei der Blechausdünnung sind maßgeblich auf das unterschiedliche Reibverhalten der Werkzeugkonfigurationen zurückzuführen. In diesem Kontext treten während der Umformung mit der ersten Werkzeugkonfiguration (1.2383) die höchsten Reibkräfte auf. Die Reibung bei der zweiten Werkzeugkonfiguration (K353 + AlCrTiN) ist hingegen deutlich niedriger. Die Auswertung der Stößelkraft und der Blechausdünnung zeigen damit eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Flachbahnstreifenziehversuche aus Abschnitt 7.2.

Neben dem Reibverhalten wird das Verschleißverhalten der Werkzeugkonfigurationen mithilfe des Presshärtewerkzeugs im Labormaßstab untersucht. Wie zuvor in Abschnitt 8.2 beschrieben, erfolgt die Charakterisierung der Werkzeugoberfläche aufgrund der Abmessungen der Werkzeugeinsätze zunächst mithilfe des optischen Messsystems ATOS. Für die Verschleißauswertung wird die Oberfläche der Matrizen analysiert. In Bild 80 sind die Werkzeugoberflächen nach 50 Bauteilabpressungen exemplarisch dargestellt. Es wird deutlich, dass anhand der qualitativen Analyse signifikante Unterschiede im Verschleißverhalten der Werkzeugkonfigurationen feststellbar sind. Die Referenzwerkzeugkonfiguration (1.2367) zeigt im Vergleich die größten Materialanhaftungen im Radius. Auf der Werkzeugoberfläche der ersten Werkzeugkonfiguration (1.2383) ist ebenfalls sichtbarer adhäsiver Verschleiß zu erkennen.

8 Übertragung der Erkenntnisse aus den Flachbahnstreichziehversuchen auf den Presshärteprozess

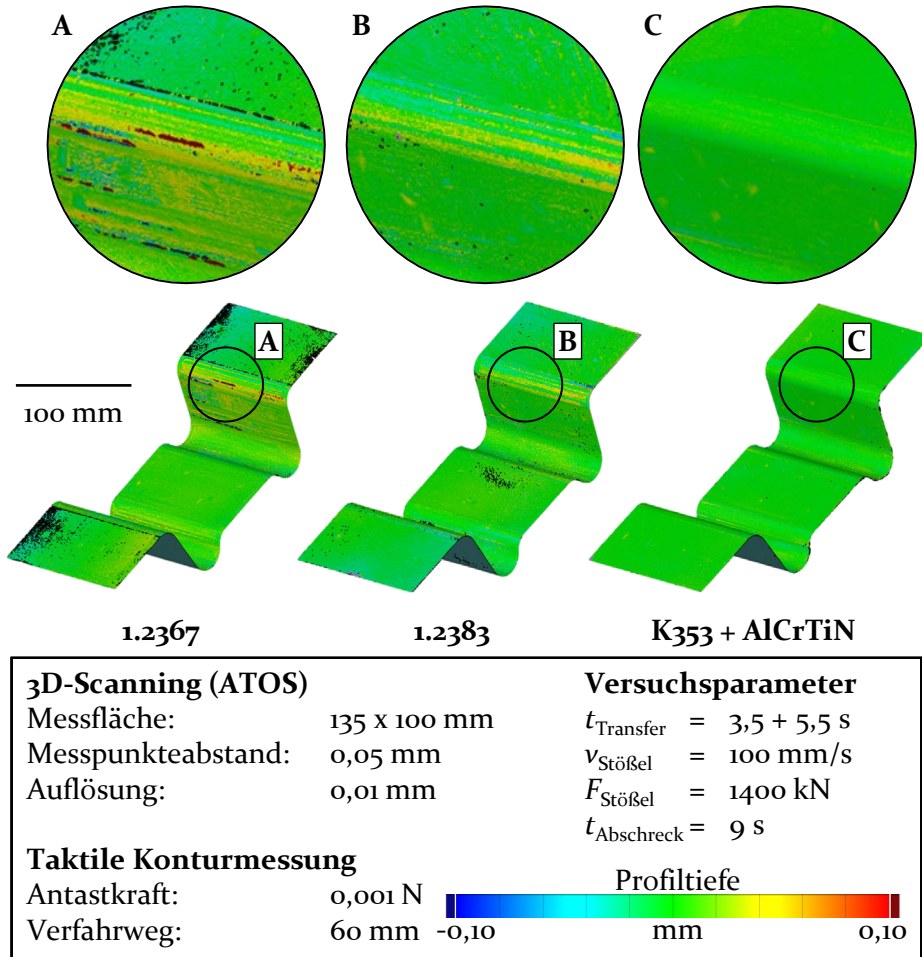


Bild 80: Analyse der Werkzeugoberflächen nach 50 Bauteilabpressungen für unterschiedliche Werkzeugkonfigurationen

Aufgrund der limitierten Messgenauigkeit des ATOS Messsystems ist ein verlässlicher Vergleich der Absolutwerte jedoch nicht möglich. Deutlich sichtbar ist hingegen der erhöhte Verschleißwiderstand der zweiten Werkzeugkonfiguration gegenüber Materialanhaftungen. Nach 50 Bauteilabpressungen ist anhand der optischen Analyse der Werkzeugoberfläche kein Verschleiß zu erkennen.

Um eine genauere Verschleißanalyse der Werkzeugkonfigurationen zu ermöglichen, wurden die verschleißkritischen Bereiche der Matrizeinsätze taktill untersucht. Hierzu wurde für jede Werkzeugkonfiguration die Werkzeugkontur an jeweils 18 Stellen taktill gemessen. Pro Matrizenblock (siehe X1 bis X3 in Bild 81) wurden sechs Messstrecken analysiert, wobei der

größte Verschleiß tendenziell bei Matrizenblock X₁ aufgetreten ist. In Bild 81 ist die taktile Analyse der Werkzeugkontur nach 50 Bauteilabpressungen exemplarisch an einer Messstrecke gezeigt.

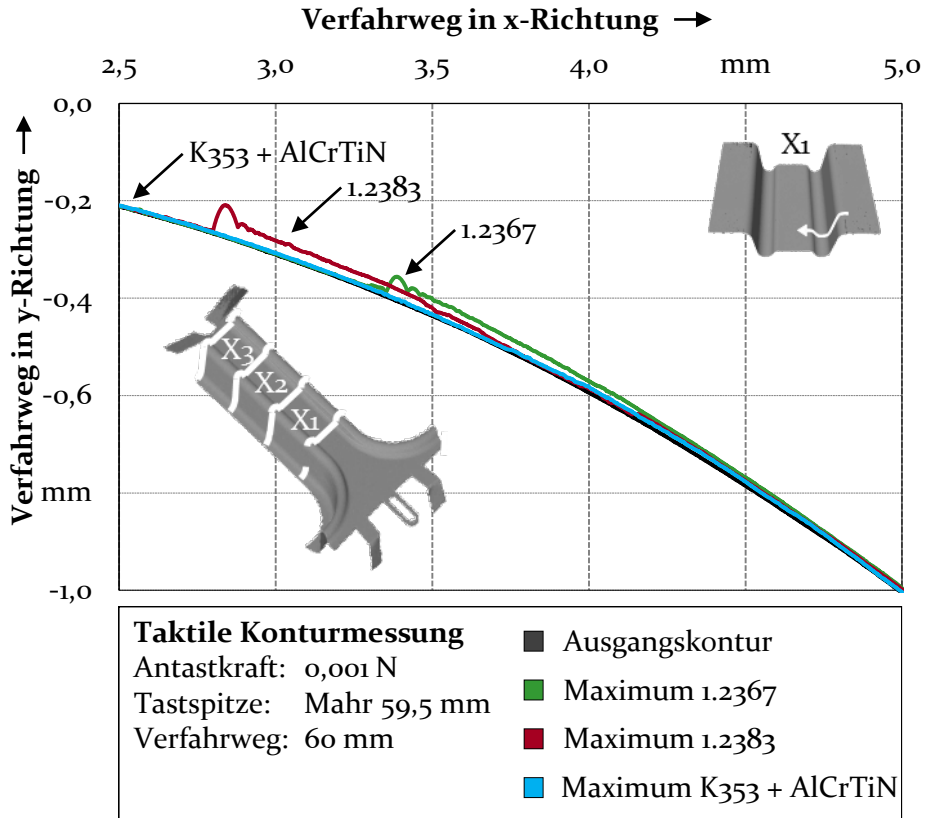


Bild 81: Taktile Analyse der Werkzeugkontur nach 50 Bauteilabpressungen für unterschiedliche Werkzeugkonfigurationen

Anhand der Konturmessung ist ein sichtbarer Materialauftrag bei den unbeschichteten Werkzeugwerkstoffen 1.2367 sowie 1.2383 erkennbar. Der adhäsive Verschleiß beginnt bei der ersten Werkzeugkonfiguration (1.2383) weiter vorne im Einlaufbereich. Darüber hinaus ist die Höhe der Materialanhaftung tendenziell größer, als bei der Referenzwerkzeugkonfiguration (1.2367). Dies konnte bei sämtlichen Konturmessungen festgestellt werden. Anhand der Konturmessung der zweiten Werkzeugkonfiguration (K353 + AlCrTiN) ist hingegen, wie bei der optischen Oberflächenanalyse, nahezu kein Materialauftrag zu erkennen.

Sowohl die optische als auch die taktile Analyse der Werkzeugoberfläche zeigen ein deutlich verbessertes Verschleißverhalten der Werkzeugkonfiguration mit AlCrTiN-Beschichtung. Die Matrizen der unbeschichteten Werkzeugkonfigurationen aus 1.2367 bzw. 1.2383 weisen bereits nach 50 Bauteilabpressungen sichtbare Materialanhaftungen auf der Werkzeugoberfläche auf. Demnach stimmen die Ergebnisse der Verschleißanalyse im Rahmen der Bauteilabpressungen der B-Säulen-Geometrie mit den Erkenntnissen aus den Flachbahnstreifenziehversuchen überein.

Zusammenfassend wurde im Rahmen der Versuche anhand der Demonstratorgeometrie ein Einfluss der ausgewählten Werkzeugkonfigurationen auf das tribologische Einsatzverhalten festgestellt. Zur Untersuchung der Reibbedingungen wurde die maximale Stößelkraft aus jeweils 50 Versuchen ausgewertet. Hierbei wurden tendenziell höhere Stößelkräfte bei Versuchen mit dem Werkzeugwerkstoff 1.2383 gemessen. Weiterhin wurde die Blechdicke der umgeformten Bauteile analysiert. In diesem Kontext wurden bei Bauteilen, die mit dem Werkstoff 1.2383 umgeformt wurden, die geringsten Blechdicken und eine maximale Blechdünnung von 21 % ermittelt. Bauteile, die mit der Werkzeugkonfiguration aus dem Werkstoff K353 und einer AlCrTiN-Beschichtung hergestellt wurden, weisen hingegen eine deutlich geringere Blechdünnung von maximal 14,67 % auf. Die Ergebnisse sind auf das unterschiedliche Reibverhalten der Werkzeugkonfigurationen zurückzuführen und bestätigen die Ergebnisse aus den Streifenziehversuchen (siehe Abschnitt 7.2).

Das Verschleißverhalten der Werkzeugkonfigurationen wurde mittels optischer und taktile Charakterisierung der Werkzeugoberfläche untersucht. Die Werkzeugkonfiguration aus K353 und AlCrTiN-Beschichtung zeigte hierbei einen deutlich erhöhten Widerstand gegenüber adhäsivem Verschleiß. Demnach konnten die Ergebnisse aus den Streifenziehversuchen sowohl in Bezug auf Reibung als auch hinsichtlich Verschleiß durch die experimentellen Untersuchungen anhand der B-Säulen-Geometrie im Labormaßstab verifiziert werden.

8.4 Abschließende Bewertung von Maßnahmen zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärteprozess

Durch die thermischen und mechanischen Belastungen während der Umformung sind hohe Anforderungen an Presshärtewerkzeuge gestellt. Im

besonderen Maße trifft dies auf das Reibverhalten sowie die Verschleißbeständigkeit der Werkzeuge zu. Um den Materialfluss zu begünstigen und die resultierende Bauteilqualität zu steigern, ist eine geringe Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück während der Umformung anzustreben. Weiterhin sollte das Werkzeug einen hohen Widerstand gegenüber adhäsivem Verschleiß aufweisen, um eine robuste Prozessführung sowie eine reproduzierbare Bauteilqualität zu gewährleisten.

Vor diesem Hintergrund wurden in Kapitel 7 werkzeugseitige Maßnahmen zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß auf Basis von Flachbahnstreichziehversuchen analysiert. Die Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass die Adhäsionsneigung durch die chemische Legierung und die Wärmebehandlung des Werkzeugwerkstoffs beeinflusst werden kann. In diesem Kontext scheint jedoch nicht die absolute Härte des Werkzeugwerkstoffs, sondern das resultierende Gefüge ausschlaggebend zu sein. Obwohl im Rahmen der Streifenziehversuche eine Verringerung der Reibung mit moderatem Verschleiß festgestellt wurde, ist mit Blick auf eine robuste Prozessführung in der industriellen Praxis eine möglichst geringe Adhäsionsneigung der Legierung anzustreben. Der Einsatz von temperaturbeständigen Werkzeugbeschichtungen bietet diesbezüglich hohes Potential. Durch die Anwendung von PVD-Beschichtungen wurden sowohl Reibung als auch Verschleiß signifikant reduziert. Dies ist maßgeblich auf die Bildung von Oxidschichten auf der Werkzeugoberfläche zurückzuführen. Im Rahmen der Laborversuche zeigte die Beschichtung der Werkzeugoberfläche mit einer AlCrTiN-Beschichtung die günstigsten tribologischen Bedingungen.

Mittels ausgewählter Werkzeugkonfigurationen wurden in Abschnitt 8.3 sowohl kritische als auch günstige tribologische Bedingungen bei der Umformung von Presshärtebauteilen realisiert. Hierfür wurde eine B-Säulen-Werkzeug im Labormaßstab verwendet. Sowohl die Bauteilgeometrie als auch der Versuchsablauf hinsichtlich Kraft-Zeit-Verlauf und Temperatur-Zeit-Verlauf sind am industriellen Presshärteprozess orientiert. Daher ist von einer weitgehenden Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf die industrielle Praxis auszugehen. Auf Basis der Ergebnisse aus den Streifenziehversuchen in Abschnitt 7.2 wurde der Werkzeugstahl mit der größten Härte in Kombination mit einer PVD-Beschichtung als Beispiel für günstiges tribologisches Einsatzverhalten ausgewählt. Der Werkzeugwerkstoff K353 wurde mit einer Härte von 62 ± 2 HRC eingesetzt. Als Werkzeugbeschichtung wurde AlCrTiN-Beschichtung aufgebracht. Bei den hiermit durchgeführten Bauteilabpressungen wurde eine vergleichsweise geringe Blechausdünnung von maximal 14,67 % ermittelt. Weiterhin ist nach der

Herstellung von 50 Bauteilen, im Gegensatz zu den reibungs- und verschleißkritischen Werkzeugkonfigurationen ohne Werkzeugbeschichtung, kein messbarer Verschleiß auf der Werkzeugoberfläche vorhanden.

Anhand der experimentellen Untersuchungen mit einer B-Säulen-Geometrie im Labormaßstab wurde gezeigt, dass die Erkenntnisse aus den Flachbahnstreifenziehversuchen grundsätzlich auf eine Bauteilgeometrie mit erhöhter Komplexität übertragbar sind. Demnach ist mithilfe des Laborversuchs eine objektive Beurteilung des Reib- und Verschleißverhaltens möglich. Die Aussagekraft der Ergebnisse auf die Standmenge eines Presshärtewerkzeugs ist hingegen aufgrund der unterschiedlichen Kontaktbedingungen limitiert.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Beim Presshärten kommt den tribologischen Bedingungen zwischen Werkzeug und Werkstück eine besondere Bedeutung zu, da aufgrund der hohen Umformtemperaturen ein Einsatz von Schmierstoffen nicht möglich ist. Dies limitiert die Standmenge von Presshärtewerkzeugen und beeinflusst die resultierende Qualität von pressgehärteten Bauteilen. Vor diesem Hintergrund bedarf es der Entwicklung von Maßnahmen zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß. Der bisherige Kenntnisstand über die tribologischen Bedingungen beim Presshärten ist hierfür allerdings nicht ausreichend. Die zentrale Zielstellung dieser Arbeit lag deshalb in der Schaffung eines umfassenden Prozessverständnisses in Bezug auf die vorherrschenden Reibungs- und Verschleißmechanismen. Dieses diente als Grundlage zur Identifizierung werkzeugseitiger Maßnahmen zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß. Gegenstand der Untersuchungen war der Bor-Mangan-Stahl 22MnB5 mit AlSi-Beschichtung, der in der industriellen Praxis als Standardwerkstoff etabliert ist.

Zunächst wurde in der vorliegenden Arbeit eine Methodik zur Charakterisierung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten entwickelt. Hiermit ist eine gezielte und reproduzierbare Untersuchung des Einflusses kritischer Prozessparameter auf Basis von Flachbahnstreifenziehversuchen möglich. Mithilfe der Methodik wurden grundlegende Reibungs- und Verschleißmechanismen beim Presshärten identifiziert. Es stellte sich heraus, dass der Bewegungswiderstand maßgeblich durch die Einglättung und Furchung der Werkstückoberfläche und durch ein Verhaken von Rauheitsspitzen verursacht wird. Infolge der Deformation der Werkstückoberfläche entsteht Abrieb, der zu einer Verringerung der Reibung führt. Weiterhin bilden sich zwischen Werkzeug und Werkstück adhäsive Bindungen aus, die während der Relativbewegung überwunden werden müssen. Die Ursache hierfür liegt in der hohen Adhäsionsneigung zwischen der AlSi-Beschichtung und dem Werkzeugwerkstoff. Ferner wurde ein signifikanter Einfluss von Oxidschichten festgestellt, die eine Reibungsreduzierung bewirken. Als Hauptverschleißmechanismus wurde Adhäsion identifiziert. Hierbei kommt es zu einem signifikanten Materialübertrag von der Werkstückbeschichtung auf das Werkzeug. Verstärkt wird der Verschleiß durch die hohen Temperaturen beim Presshärten, die sich auf die Scherfestigkeit der Beschichtung und die Diffusionsrate der Atome auswirken. Weiterhin steigt der Verschleiß mit der wahren Kontaktfläche und der Kontaktzeit zwischen Werkzeug und Werkzeug an. Verschleißreduzierend hingegen

wirken sich Oxidschichten aus, die als Zwischenschicht fungieren und Metall-Metall Kontakt verhindern.

Das erarbeitete Prozessverständnis diente als Grundlage, um werkzeugseitige Maßnahmen zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß zu identifizieren. Neben unterschiedlichen Verfahren zur Oberflächenbearbeitung wurde der Einfluss der Legierungszusammensetzung und der Wärmebehandlung des Werkzeugwerkstoffs untersucht. Zudem wurde der Einsatz von Werkzeugbeschichtungen analysiert. Untersuchungen zum Einfluss der Oberflächenbearbeitung anhand polierter, geschliffener und hochgeschwindigkeitszerspanter Oberflächen ergaben, dass diese aufgrund des ausgeprägten adhäsiven Verschleißes keine Auswirkungen auf Reibung und Verschleiß haben. Der Einfluss der Legierung wurde mit drei Werkzeugwerkstoffen analysiert. Es zeigte sich, dass die Wahl des Werkzeugwerkstoffs die Reib- und Verschleißbedingungen beeinflussen kann. Ferner wurde die Wärmebehandlung der Werkzeugwerkstoffe variiert, um unterschiedliche Härtewerte zu erzeugen. Hierbei hatten die resultierende Härte und die Gefügestruktur einen Einfluss auf das Verschleißverhalten, wobei die jeweils härteren Varianten des Werkzeugwerkstoffs einen höheren Widerstand gegenüber adhäsivem Verschleiß hatten. Zudem wurde der Einsatz von drei PVD-Beschichtungen analysiert. Durch die Werkzeugbeschichtungen konnte die Reibung signifikant reduziert und der Verschleißwiderstand erhöht werden.

Abschließend wurde die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den Laborversuchen auf eine Bauteilgeometrie mit erhöhter Komplexität überprüft. Anhand von Bauteilabpressungen einer B-Säulen-Geometrie im Labormaßstab wurden die Ergebnisse aus den Streifenziehversuchen verifiziert, sodass die Übertragbarkeit der grundsätzlichen Erkenntnisse auf den Presshärteprozess aufgezeigt wurde.

In weiterführenden Forschungsarbeiten gilt es die Zusammenhänge zwischen den Legierungselementen von Werkzeugstählen sowie der Wärmebehandlung der Werkzeuge und dem resultierendem Reib- und Verschleißverhalten zu identifizieren. Einen weiteren Ansatzpunkt bildet die umfassende Analyse von Werkzeugbeschichtungen, um ein tiefergehendes Verständnis der Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der Schichtsysteme und dem resultierenden Einsatzverhalten beim Presshärten zu erarbeiten. Ferner sind Anstrengungen zu unternehmen, um neuartige Werkstückwerkstoffe und Werkstückbeschichtungen zu entwickeln, die sich in der industriellen Praxis etablieren können und die tribologischen Bedingungen beim Presshärten verbessern.

10 Summary and outlook

The tribological conditions between tool and workpiece are of particular importance within hot stamping since the application of lubricants is not possible due to the high forming temperatures. As a consequence, the lifetime of hot stamping tools is limited and the resulting part quality of hot stamped components is affected. In this context, the development of measures for reducing friction and wear is required. However, the previous knowledge about the tribological conditions in hot stamping is insufficient for this purpose. The main purpose of this thesis has therefore been the establishment of a comprehensive process understanding regarding the prevailing friction and wear mechanisms. This served as a basis for the identification of tool-side measures for reducing friction and wear. The experiments were conducted with the boron-manganese steel 22MnB5 with AlSi-coating, which is established as a common material within the industrial practice.

Initially, a methodology for the characterization of tribological conditions in hot stamping has been developed within the present work. A specific and reproducible investigation on the influence of critical process parameters is hereby possible with flat strip drawing tests. Based on this methodology, fundamental friction and wear mechanisms within hot stamping have been identified. The experiments showed that the resistance against the motion is mainly caused by flattening and plowing of the workpiece surface as well as mechanical interlocking of asperities. Wear debris is caused due to the deformation of the workpiece surface, leading to a reduction of friction. Furthermore, adhesion bonds form between tool and workpiece, which have to be overcome during the relative motion. The reason can be found in the high adhesion tendency between AlSi-coating and tool material. In addition, a significant impact of oxide layers, which lead to a reduction of friction, could be found. Adhesion has been identified as the main wear mechanism. A significant material transfer from the workpiece to the tool takes place. Wear is increased due to the high temperatures within hot stamping, which affect the shear strength of the coating and the diffusion rate of atoms. Moreover, wear rises with the real contact area and the contact time between tool and workpiece. Oxide layers on the contrary act as an interlayer and thus prevent metal-metal contact, which reduces adhesive wear.

The established process understanding subsequently served as a basis for the identification of tool-side measures to reduce friction and wear. Besides

different surface processing, the influence of the composition of the alloy and the heat treatment of the tool material was investigated. Furthermore, the application of tool coatings was analyzed. Experiments regarding the impact of surface processing based on polished, ground and high-speed milled surfaces showed that the surface treatment has no significant influence on friction and wear due to distinct adhesive wear. The effect of the alloy was analyzed with three different tool materials. It turned out that the choice of the tool material can affect the friction and wear conditions. Additionally, the heat treatment of the tool materials was varied to create different hardness values. The resulting hardness and microstructure showed an impact on wear behavior. Respectively the harder versions of the tool material had higher resistance against adhesive wear. Moreover, the application of three PVD-coatings (AlCrTiN, AlTiN and CrCN) was analyzed. Due to the application of tool coatings, friction could be reduced significantly and the resistance against wear could be increased.

In conclusion, the transferability of the findings from laboratory tests to a geometry with increased complexity was tested. Based on produced parts with a B-pillar-geometry in laboratory scale, the results of the strip drawing tests were verified, showing the transferability of basic findings on the hot stamping process.

Future studies should identify the correlations between the alloying elements of tool steels as well as the heat treatment of tools and the resulting friction and wear behavior. Another starting point is a comprehensive analysis of tool coatings to create a deep understanding of the influence of the characteristics of coating systems and the resulting performance within hot stamping. Furthermore, new workpiece materials and workpiece coatings that can be established within the industrial practice and improve the tribological conditions in hot stamping have to be developed.

Literaturverzeichnis

- [1] BMWi: Automobilindustrie. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-automobilindustrie.html> (aufgerufen am 12.02.2019)
- [2] Kraftfahrt-Bundesamt: Bestand an Pkw in den Jahren 2009 bis 2018 nach ausgewählten Kraftstoffarten. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/b_umwelt_z.html?nn=663524 (aufgerufen am 26.02.2019)
- [3] Automobilindustrie, V.d.: VDA: Deutsche Automobilindustrie kommt bei der Reduktion „klassischer“ Schadstoffemissionen stark voran. <https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/65.html> (aufgerufen am 10.07.2018)
- [4] Bundesministerium für Umwelt, N.u.n.S.: Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO₂ - Emissionen von Personenkraftwagen https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eu_verordnung_co2_emissionen_pkw.pdf (aufgerufen am 10.07.2018)
- [5] Lechler, J.: Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2009
- [6] VDA Verband der Automobilindustrie e.V.: Handeln für den Klimaschutz - CO₂ Reduktion in der Automobilindustrie. 2009.
- [7] F., G.M.: Herausforderung Leichtbau in der Großserie – Zukünftige Mischbaustrategien in der Karosseriefertigung. In: Neugebauer, R. and Drossel, W.G. (Hrsg.): 19. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, 2012, S. 119-127
- [8] European Aluminium Association: Annual Report 2007. <http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2011/09/EAA-Annual-Report-2007-Activity.pdf> (aufgerufen am 29.10.2014)
- [9] BMWi: Leichtbau. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/leichtbau.html> (aufgerufen am 22.11.2018)

- [10] Goede, M. and Stehlin, M.: SuperLIGHT-Car project – An integrated research approach for lightweight car body innovations. In: (Hrsg.): Innovative Developments for Lightweight Vehicle Structures, 2009, S. 25-38
- [11] Maschinenmarkt: Presshärten erlaubt Leichtbau in Großserie. <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/presshaerten-erlaubt-leichtbau-in-der-grossserie-a-502128/> (aufgerufen am 18.11.2018)
- [12] Merklein, M. and Lechler, J.: Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels. Journal of Materials Processing Technology (2006), S. 452-455
- [13] Maschinenmarkt: Ofenfreier Prozess für Presshärten möglich. <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/ofenfreier-prozess-fuer-presshaerten-moeglich-a-403119/> (aufgerufen am 14.11.2018)
- [14] Wilsius, J., Hein, P. and Kefferstein, R.: Status and future trends of hot stamping of USIBOR 1500 P. In: Geiger, M., Merklein M. (Hrsg.): 1. Erlanger Workshop Warmblechumformung, 2006, S. 82-101
- [15] Hoffmann, H., Neugebauer, R. and Spur, G.: Handbuch Umformen. München: Hanser 2012, 2. Auflage
- [16] Burkhardt, L.: Eine Methodik zur virtuellen Beherrschung thermo-mechanischer Produktionsprozesse bei der Karosserieherstellung. Dissertation, ETH Zürich, 2008
- [17] Kappes, B.: Über den Nachweis tribologischer Effekte mit Hilfe von Modellversuchen im Bereich der umweltfreundlichen Kaltmassivumformung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2005
- [18] Hardell, J., Kassfeldt, E. and Prakash, B.: Friction and wear behaviour of high strength boron steel at elevated temperatures of up to 800 °C. Wear (2008), S. 788-799
- [19] Wieland, M.: Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2015
- [20] Behrens, B.A., Hübner, S. and Demir, M.: Optimale Prozessschmierung sichert Qualität der Wärmeumformung. MaschinenMarkt (2010), S. 30-31

- [21] Stöhr, T.: Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2012
- [22] Lenze, F.J. and Sikora, S.: Herstellung von Karosseriebauteilen aus warmgeformten höchstfesten Stahlwerkstoffen. In: Geiger, M. and Merklein, M. (Hrsg.): 1. Erlanger Workshop Warmblechumformung, 2006, S. 1-12
- [23] Friedrich, H.E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer, 2017, 2. Auflage
- [24] Ridderstråle, C.-E.: Manufacturing a hardened steel article (Patent). 1977.
- [25] Karbasian, H. and Tekkaya, A.E.: A review on hot stamping. Journal of Materials Processing Technology (2010), S. 2103-2118
- [26] Merklein, M., Wieland, M., Lechner, M., Bruschi, S. and Ghiotti, A.: Hot stamping of boron steel sheets with tailored properties: A review. Journal of Materials Processing Technology (2016), S. 11-24
- [27] Lechler, J., Merklein, M. and Geiger, M.: Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens beim Warmumformen höchstfester Vergütungsstähle. In: Geiger, M. (Hrsg.): 1. Erlanger Workshop Warmblechumformung, 2006, S. 13-30
- [28] Somani, M.C., Karjalainen, L.P., Eriksson, M. and Oldenburg, M.: Dimensional Changes and Microstructural Evolution in a B-bearing Steel in the Simulated Forming and Quenching Process. ISIJ International (2001), S. 361-367
- [29] ArcelorMittal: Warmumformstähle - Usibor® und Ductibor®: Datenblatt. 2017.
- [30] Dick, P., Schweiker, T., Mattes, U. and A., F.: Warmumformung bei Daimler - Ein heiß diskutiertes Verfahren. In: Merklein, M. (Hrsg.): 3. Erlanger Workshop Warmblechumformung, 2008, S. 41-56
- [31] ThyssenKrupp: MBW - Product information for manganese-boron steels for hot forming. 2016.

- [32] Windmann, M., Röttger, A., Hahn, I. and Theisen, W.: Mechanical properties of AlFeY intermetallics in Al-base coatings on steel 22MnB5 and resulting wear mechanisms at press-hardening tool steel surfaces. *Surface and Coatings Technology* (2017), S. 321-327
- [33] Steinhoff, K., Ademaj, A., Prokaph, S., Schupfer, M. and Weidig, U.: Marktentwicklung und Technologietrends in der Warmumformung von höchstfesten Vergütungsstählen. In: Merklein, M. (Hrsg.): 7. Erlanger Workshop Warmblechumformung, 2012, S. 85-112
- [34] Köyer, M., Horstmann, S., Sikora, S., Wuttke, T., Zaspel, I. and Lenze, F.J.: Oberflächenveredelung für die Warmumformung - Serienprodukte und Neuentwicklungen. In: Merklein, M. (Hrsg.): 5. Erlanger Workshop Warmblechumformung, 2010, S. 15-28
- [35] 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
- [36] Schuler Pressen GmbH: Formhärten mit PCH Flex - Flexibel, Effizient, Produktiv. 2017.
- [37] So, H., Steinbeiss, H. and Hoffmann, H.: Entwicklung einer Methodik zur Optimierung von Umformwerkzeugen für die Warmblechumformung. In: Geiger, M. and Merklein, M. (Hrsg.): 1. Erlanger Workshop Warmblechumformung, 2006, S. 102-117
- [38] Hippchen, P.: Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2014
- [39] Steinhoff, K., Maikranz-Valentin, M., Weidig, U. and Paar, U.: Bauteile mit maßgeschneiderten Eigenschaften durch neuartige thermo-mechanische Prozessstrategien in der Warmblechumformung. In: Geiger, M. and Merklein, M. (Hrsg.): 2. Erlanger Workshop Warmblechumformung, 2007, S. 1-12
- [40] Feuser, P. and Schweiker, T.: Tailored Tempered Parts - Presshärtbauteile mit maßgeschneiderten Eigenschaften. In: Merklein, M. (Hrsg.): 3. Erlanger Workshop Warmblechumformung, 2009, S. 127-142

- [41] Banik, J., Lenze, F.J., Sikora, S. and Laurenz, R.: Tailored Properties - A Pivotal Question for Hot Forming. In: Oldenburg, M., Steinhoff, K. and Prakash, B. (Hrsg.): 3rd International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 2011, S. 13-20
- [42] Pierschel, N., Landgrebe, D., Silbermann, K. and Schieck, F.: Tool and process design for press hardened parts with small-sized tailored properties. In: Oldenburg, M., Prakash, B. and Steinhoff, K. (Hrsg.): 6th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 2017, S. 491-500
- [43] Rahn, R. and Schruff, I.: Modern Tool Steels for Hot Metal Forming Applications. In: Oldenburg, M. and Steinhoff, K. (Hrsg.): 4th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 2013, S. 489-496
- [44] Bruschi, S. and Ghiotti, A.: Hot Stamping. Comprehensive Materials Processing (2014), S. 27-54
- [45] Weißbach, W., Dahms, M. and Jaroschek, C.: Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. Wiesbaden: Springer, 2015, 19. Auflage
- [46] Overhoff Verbindungstechnik GmbH - Legierungselemente: Einfluss der Legierungen auf Stahl.
- [47] Jacobs, O.: Werkstoffkunde. Würzburg: Vogel Business Media, 2016, 3. Auflage
- [48] Bold, J., Feuser, P. and Zapf, J.: Erweiterung des Einsatzspektrums von pressgehärteten Bauteilen durch neue Werkstoffkonzepte. In: Merklein, M. (Hrsg.): 12. Erlanger Workshop Warmblechumformung, 2017, S. 159-168
- [49] Schönherr, J., Landgrebe, D. and Polubinski, S.: Developments in Press Hardening - An Update. ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (2017), S. 33-36
- [50] Gerber, T., Heckelmann, I., Diaz, N. and Lenze, F.J.: Efforts in Expanding the Portfolio of Hot Forming Steel Material Concepts. In: Steinhoff, K., Oldenburg, M. and Prakash, B. (Hrsg.): 4th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 2013, S. 145-152

- [51] Tokizawa, A., Yamamoto, K., Takemoto, Y. and Senuma, T.: Development of 2000MPa Class Hot Stamped Steel Components with Good Toughness and High Resistance against Delayed Fracture. In: Steinhoff, K., Oldenburg, M. and Prakash, B. (Hrsg.): 5th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 2015, S. 473-480
- [52] Hikida, K., Nishibata, T., Kikuchi, H., Suzuki, T. and Nakayama, N.: Properties of New TS 1800 MPa Grade Hot Stamping Steel and Application for Bumper Beam. In: Steinhoff, K., Oldenburg, M. and Prakash, B. (Hrsg.): 4th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 2013, S. 127-134
- [53] Meza-García, E., Kräusel, V. and Landgrebe, D.: Experimental analysis of the sheet metal forming behavior of newly developed press hardening steels. In: AIP Conference Proceedings 1960, 150008, 2018
- [54] Mithieux, J., Badinier, G., Santacreu, P. and Herbelin, J.: Optimized Martensitic Stainless Steels for Hot Formed Parts in Automotive Crash Application. In: Steinhoff, K., Oldenburg, M. and Prakash, B. (Hrsg.): 4th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 2013, S. 57-64
- [55] Meza-García, E., Rautenstrauch, A., Kräusel, V. and Landgrebe, D.: Tailoring of mechanical properties of a side sill part made of martensitic stainless steel by press hardening. In: AIP Conference Proceedings 1769, 130015, 2016
- [56] Badinier, G., Mithieux, J., Santacreu, P. and Herbelin, J.: Development of 1.8 GPa Martensitic Stainless Steel for Hot Stamping Application. In: Steinhoff, K., Oldenburg, M. and Prakash, B. (Hrsg.): 5th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 2015, S. 715-723
- [57] Badinier, G., Moreau, J.B., Bertrand, P., Clément, B., Mithieux, J., Saedlou, S. and Paegle, J.: Development of Press Hardening Stainless Steels for Body-In-White Application. In: Oldenburg, M., Steinhoff, K. and Prakash, B. (Hrsg.): 6th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel - CHS², 2017, S. 77-84

- [58] Behrens, B.A., Hübner, S., Krimm, R., Chugreev, A., Hasselbusch, T., Stockburger, E. and Pfeffer, C.: Kohlenstoffmartensitische Chromstähle in der Warmblechumformung - Forschungstätigkeiten am IFUM. In: Merklein, M. (Hrsg.): 13. Erlanger Workshop Warmblechumformung, 2018, S. 107-123
- [59] Banik, J., Ruthenberg, M., Köyer, M., Etzold, U. and Parma, G.: AS Pro - Neuer Überzug für eine robustere Fertigung in der Warmumformung. In: Merklein, M. (Hrsg.): 12. Erlanger Workshop Warmblechumformung, 2017, S. 1-12
- [60] Kelsch, R., Sommer, A., Radlmayr, K., Schwinghammer, H., Faderl, J., Kurz, T. and Luckeneder, G.: Warmumformung verzinkter Stähle. In: Merklein, M. (Hrsg.): 11. Erlanger Workshop Warmblechumformung, 2016, S. 131-144
- [61] Vrolijk, M., Lorenz, D., Porzner, H. and Holecek, M.: Supporting Lightweight Design: Virtual Modeling of Hot Stamping with Tailored Properties and Warm and Hot Formed Aluminium. *Procedia Engineering* (2017), S. 336-342
- [62] Behrens, B.A. and Olle, P.: Consideration of Phase Transformations in Numerical Simulation of Press Hardening. *Steel Research International* (2007), S. 784-790
- [63] Forstner, K., Stobich, S. and Buchmayr, B.: Heat transfer during press hardening. In: (Hrsg.): International Deep Drawing Research Group annual conference IDDRG, 2007, S. 609-613
- [64] Merklein, M., Wieland, M., Stoehr, T., Lechler, J. and Gruener, M.: Analytic methods for the calculation of the heat transfer coefficient. *International Review of Mechanical Engineering* (2010), S. 208-2015
- [65] Boher, C., Le Roux, S., Penazzi, L. and Dessain, C.: Experimental investigation of the tribological behavior and wear mechanisms of tool steel grades in hot stamping of a high-strength boron steel. *Wear* (2012), S. 286-295
- [66] Karbasian, H., Brosius, A., Tekkaya, A.E., Lechler, J. and Merklein, M.: Numerical process design of hot stamping processes based on verified thermo-mechanical characteristics. In: (Hrsg.): Materials Science and Technology Conference and Exhibition, 2008, S. 1733-1743

- [67] Venema, J., Hazrati, J., Matthews, D.T.A., Stegeman, R.A. and 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* (2018), S. 149-155
- [68] Batchelor, A.W. and Stachowiak, G.W.: Tribology in Materials Processing. *Journal of Materials Processing Technology* (1995), S. 503-515
- [69] Czichos, H. and Habig, K.: Tribologie-Handbuch. Berlin: Springer Vieweg, 2015, 4. Auflage
- [70] Gesellschaft für Tribologie e.V. (GfT): Tribologie - Verschleiß, Reibung, Definitionen, Begriffe, Prüfung. GfT Arbeitsblatt 7. (GfT), G.f.T.e.V., 2002
- [71] Vilaseca, M., Pujante, J., Casellas, D., Dessain, C., Wilsius, J., Bachmann, M., Alsmann, M., Grausem, M., Hamasaiid, A., Valls, I., Eriksson, K., Berglund, D., Ademaj, A., Steinhoff, K., Lindkvist, G., Oldenburg, M. and Prakash, B.: Wear measurement methodology and test facility to increase the efficiency of hot stamping for high performance component production (TESTTOOL). 2016
- [72] Geiger, M., Merklein, M. and Lechler, J.: Determination of tribological conditions within hot stamping. *Production Engineering* (2008), S. 269-276
- [73] Borsetto, F., Ghiotti, A. and Bruschi, S.: Assessment of friction tests for sheet metal forming at elevated temperatures. *Steel Research International* (2008), S. 88-93
- [74] Kondratiuk, J. and Kuhn, P.: Tribological investigation on friction and wear behaviour of coatings for hot sheet metal forming. *Wear* (2011), S. 839-849
- [75] Weiss, M., Pereira, M.P., Rolfe, B.F. and Hilditch, T.B.: Wear mechanisms in forming of HSS and AHSS. In: International Deep Drawing Research Group annual conference IDDRG, 2011, S. 691-702
- [76] Hardell, J., Pelcastre, L. and Prakash, B.: High-temperature friction and wear characteristics of hardened ultra-high-strength boron steel. *Engineering Tribology* (2010), S. 1139-1151

- [77] Medea, F., Venturato, G., Ghiotti, A. and Bruschi, S.: Tribological performances of new steel grades for hot stamping tools. *Journal of Physics: Conference Series* (2017), S. 1-8
- [78] Venema, J., Matthews, D.T.A., Hazrati, J., Wörmann, J. and van den Boogaard, A.H.: Friction and wear mechanisms during hot stamping of AlSi coated press hardening steel. *Wear* (2017), S. 137-145
- [79] Engel, U.: Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Werkzeugen der Massivumformung. Bamberg: Meisenbach, 1996
- [80] Lange, K.: Umformtechnik - Grundlagen. Berlin: Springer, 1984, 1. Auflage
- [81] Grote, K.H. and Feldhusen, J.: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin: Springer, 2011, 23. Auflage
- [82] Pujante, J., Vilaseca, M., Casellas, D. and Riera, D.: Analysis of wear in industrial press hardening tools. In: *International Deep Drawing Research Group annual conference IDDRG*, 2016, S. 689-696
- [83] Ghiotti, A., Sgarabotto, F. and Bruschi, S.: A novel approach to wear testing in hot stamping of high strength boron steel sheets. *Wear* (2013), S. 1319-1326
- [84] Wieland, M. and Merklein, M.: Wear behavior of uncoated and coated tools under complex loading conditions. *Tribology in Industry* (2011), S. 11-17
- [85] Pelcastre, L., Hardell, J. and Prakash, B.: Galling mechanisms during interaction of tool steel and Al-Si coated ultra-high strength steel at elevated temperature. *Tribology International* (2013), S. 263-271
- [86] Holm, R.: *Electrical Contacts*. Berlin: Springer, 1967, 4. Auflage
- [87] Klocke, F. and König, W.: *Fertigungsverfahren 4 Umformen*. Berlin: Springer, 2006, 5. Auflage
- [88] Buckley, D.H.: *Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication*. Amsterdam: Elsevier, 1981, 5. Auflage

- [89] Hardell, J., Prakash, B. and Steinhoff, K.: High temperature tribological studies on surface engineered tool steel and high strength boron steel. *Steel Research International* (2009), S. 665-670
- [90] Pelcastre, L.: High temperature galling : influencing parameters and mechanisms. Dissertation, Luleå tekniska universitet, 2013
- [91] Ghiotti, A., Bruschi, S. and Borsetto, F.: Tribological characteristics of high strength steel sheets under hot stamping conditions. *Journal of Materials Processing Technology* (2011), S. 1694-1700
- [92] Venema, J., Hazrati, J., Matthews, D. and van den Boogaard, T.: An Insight in Friction and Wear Mechanisms during Hot Stamping. *Key Engineering Materials* (2018), S. 131-138
- [93] Wang, L.: Modelling of friction for high temperature extrusion of aluminium alloys. Dissertation, Delft University of Technology, 2012
- [94] Hardell, J., Hernandez, S., Mozgovoy, S., Pelcastre, L., Courbon, C. and Prakash, B.: Effect of oxide layers and near surface transformations on friction and wear during tool steel and boron steel interaction at high temperatures. *Wear* (2015), S. 223-229
- [95] Hernandez, S., Hardell, J., Courbon, C., Winkelmann, H. and Prakash, B.: High temperature friction and wear mechanism map for tool steel and boron steel tribopair. *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces* (2014), S. 74-84
- [96] Yanagida, A. and Azushima, A.: Evaluation of coefficients of friction in hot stamping by hot flat drawing test. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (2009), S. 247-250
- [97] Ademaj, A., Weidig, U. and Steinhoff, K.: Phenomenological Thermo-Physical Approach on Process Monitoring in Hot Stamping of Coated Boron Steel. In: Steinhoff, K., Oldenburg, M. and Prakash, B. (Hrsg.): 4th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 2013, S. 239-247
- [98] Feuser, P.: Prozessfensterbetrachtung beim partiellen Presshärten mit beheiztem Umformwerkzeug. In: Merklein, M. (Hrsg.): 7. Erlanger Workshop Warmblechumformung, 2012, S. 31-52

- [99] Wang, Z.J., Luo, X.Y., He, W.T. and Zhang, Y.S.: Investigation into the tribological behaviors of press hardening steels on the tailored conditions. *Science China-Technological Sciences* (2015), S. 97-106
- [100] Groche, P., Moeller, N., Hoffmann, H. and Suh, J.: Influence of gliding speed and contact pressure on the wear of forming tools. *Wear* (2011), S. 2570-2578
- [101] Dessain, C., Hein, P., Wilsius, J., Penazzi, L., Boher, C. and Weikert, J.: Experimental investigation of friction and wear in hot stamping of Usibor 1500P. In: Steinhoff, K., Oldenburg, M. and Prakash, B. (Hrsg.): 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 2008, S. 217-227
- [102] Borsetto, F., Ghiotti, A., Bruschi, S., Stoehr, T., Lechler, J. and Merklein, M.: Interlaboratory comparison of friction conditions in hot stamping operations. *Key Engineering Materials* (2010), S. 97-105
- [103] Tian, X., Zhang, Y. and Li, J.: Investigation on tribological behavior of advanced high strength steels: Influence of hot stamping process parameters. *Tribology Letters* (2012), S. 489-495
- [104] Osakada, K., Mori, K., Altan, T. and Groche, P.: Mechanical servo press technology for metal forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (2011), S. 651-672
- [105] Pelcastre, L., Hardell, J., Rolland, A. and Prakash, B.: Influence of microstructural evolution of Al-Si coated UHSS on its tribological behaviour against tool steel at elevated temperatures. *Journal of Materials Processing Technology* (2016), S. 117-124
- [106] Merklein, M., Stoehr, T., Svec, T. and Wieland, M.: Investigations on parameters influencing thermal and frictional properties within hot stamping. *Journal of Heat Treatment and Materials* (2011), S. 335-341
- [107] Fan, D.W. and De Cooman, B.C.: State-of-the-knowledge on coating systems for hot stamped parts. *Steel Research International* (2012), S. 412-433
- [108] Hardell, J. and Prakash, B.: High-temperature friction and wear behaviour of different tool steels during sliding against Al-Si-coated high-strength steel. *Tribology International* (2008), S. 663-671

- [109] Gracia-Escosa, E., García, I., Damborenea, J.J.d. and Conde, A.: Friction and wear behaviour of tool steels sliding against 22MnB5 steel. *Journal of Materials Research and Technology* (2017), S. 241-250
- [110] Pelcastre, L., Hardell, J. and Prakash, B.: Investigations into the occurrence of galling during hot forming of Al-Si-coated high-strength steel. *Engineering Tribology* (2011), S. 487-498
- [111] Azushima, A., Uda, K. and Yanagida, A.: Friction behavior of aluminum-coated 22MnB5 in hot stamping under dry and lubricated conditions. *Journal of Materials Processing Technology* (2012), S. 1014-1021
- [112] Behrens, B.A., Kawalla, R., Awiszus, B., Bouguecha, A., Ullmann, M., Graf, M., Bonk, C., Chugreev, A. and Wester, H.: Numerical Investigation of the Oxide Scale Deformation Behaviour with Consideration of Carbon Content during Hot Forging. *Procedia Engineering* (2017), S. 526-531
- [113] Yilkiran, D., Wulff, D., Almohallami, A., Özkaya, F., Bouguecha, A., Hübner, S., Möhwald, K., Maier, H.J. and Behrens, B.A.: Wear behaviour of thermally oxidised tool surfaces as low-friction separation layers for dry sheet metal forming. *Wear* (2017), S. 1789-1803
- [114] Sobiech, M., Fopp, D., Ramm, J., Müller, A., Reiter, A. and Rudigier, H.: New PVD Coating Approaches for Hot Stamping Applications. In: Oldenburg, M. and Steinhoff, K. (Hrsg.): 4th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 2013, S. 215-222
- [115] Eifeler Unternehmensgruppe, v.e.: PVD Schichtsysteme. <https://www.eifeler.com/de/pvd-schichtsysteme/> (aufgerufen am 27.02.2019)
- [116] Azushima, A., Uda, K., Maki, J. and Nomura, N.: Frictional behavior of ZnO coated aluminized steels under hot drawing tests with coated tools. *Journal of Materials Processing Technology* (2016), S. 106-111

- [117] Bachmann, M., Fell, R. and Ademaj, A.: Investigation on Surface and Process Parameters Influencing the Friction Behavior in Hot Sheet Metal Forming. In: Steinhoff, K., Oldenburg, M. and Prakash, B. (Hrsg.): 4th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 2013, S. 507-516
- [118] Böhler Edelstahl: Kaltarbeitsstahl - K353: Datenblatt. 2019.
- [119] Deutsche Edelstahlwerke: Thermotur 2383 Supercool: Spezialstahl zum Presshärten: Datenblatt. 2017.
- [120] Warmarbeitsstahl - 1.2367: Datenblatt. 2019.
- [121] Unternehmensgruppe, v.e.: Duplexbehandlung = Plasmanitrieren + PVD-Schichtsystem in einem Prozess. <https://www.eifeler.com/de/duplexbehandlung/> (aufgerufen am 27.02.2019)
- [122] Eifeler Unternehmensgruppe, v.e.: CrN / CrCN: Hohe Abriebfestigkeit, Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit. http://www.eifeler.com/app/uploads/sites/82/2018/05/CRN_CRCN_DE.pdf (aufgerufen am 26.11.201)
- [123] Norm DIN EN ISO 6508: Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Rockwell. 6508, N.D.E.I., 2016
- [124] Volk, R.: Rauheitsmessung - Theorie und Praxis. Berlin: Beuth, 2005, 1. Auflage
- [125] Norm DIN 4287: Ermittlung der Rauheitsmessgrößen Ra, Rz, Rmax mit elektrischen Tastschnittgeräten - Grundlagen. Berlin: 4287, N.D., 1990 (zurückgezogen)
- [126] Gesellschaft für Optische Messtechnik: ATOS User Manual - Software. ATOS v6.3 and higher. 2013.
- [127] Nguyen, H.: Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aushärtbarer Aluminiumlegierungen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2015
- [128] Merklein, M., Lechler, J. and Stöhr, T.: Characterization of tribological and thermal properties of metallic coatings for hot stamping boron-manganese steels. In: Bouzakis, K.-D. (Hrsg.): 7th International Conference THE Coatings in Manufacturing Engineering, 2008, S. 219-228

- [129] Arnold Schröder Industrieöfen GmbH: Ofenbeschreibung Glüh- und Härteöfen ME87/13. 2013.
- [130] Palm, C., Vollmer, R., Aspacher, J. and Gharbi, M.: Increasing performance of Hot Stamping systems. *Procedia Engineering* (2017), S. 765-770
- [131] Hoffmann, H., So, H. and Steinbeiss, H.: Design of Hot Stamping Tools with Cooling System. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (2007), S. 269-272
- [132] Kirk, A. and Neil, J.: Selecting a hydraulic hot-stamping press. *Stamping Journal* (2014), S. 40-44
- [133] Kossack, C., Ziegert, J. and Schmitz, T.: Energy-based friction analysis. *Precision Engineering* (2019), S. 88-94
- [134] Schleicher, M. and Blasinger, F.: *Regelungstechnik*. Fulda: JUMO, 2003, 6. Auflage
- [135] Mori, K.: Smart hot stamping of ultra-high strength steel parts. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* (2012), S. 496-503
- [136] Agudo, J.P.: *Wear Mechanisms in Press Hardening of Boron Steel*. Dissertation, Politecnica de Catalunya, 2015
- [137] Tomala, A., Ripoll, M.R. and Badisch, E.: Tool – Solid Lubricant – Workpiece Interactions in High Temperatures Applications. *Procedia Engineering* (2013), S. 626-633
- [138] Tröster, T. and Rostek, T.: Innovative Warmumformung. In: Siegert, K. (Hrsg.): *Neuere Entwicklungen in der Blechumformung*, 2004, S. 51-65
- [139] Mori, K., Bariani, P.F., Behrens, B.A., Brosius, A., Bruschi, S., Maeno, T., Merklein, M. and Yanagimoto, J.: Hot stamping of ultra-high strength steel parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (2017), S. 755-777
- [140] Schwingenschlögl, P., Weldi, M. and Merklein, M.: Investigation of the influence of process parameters on adhesive wear under hot stamping conditions. *Journal of Physics: Conference Series* (2017), 896, 1

- [141] Neugebauer, R., Schieck, F., Polster, S., Mosel, A., Rautenstrauch, A., Schönherr, J. and Pierschel, N.: Press hardening - An innovative and challenging technology. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* (2012), S. 113-118
- [142] Venema, J., Matthews, D., Hazrati, J., Wörmann, J. and van den Boogaard, A.: Friction and wear mechanisms during hot stamping of AlSi coated press hardening steel. *Wear* (2017), S. 137-145
- [143] Bürgel, R.: *Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik: Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen, Hochtemperaturlegierungen*. Berlin: Springer, 2015, 5. Auflage
- [144] Wang, Z., Liu, P., Xu, Y., Wang, Y. and Zhang, Y.: Hot Stamping of High Strength Steel with Tailored Properties by Two Methods. *Procedia Engineering* (2014), S. 1725-1730
- [145] Mozgovoy, S., Hardell, J., Deng, L., Oldenburg, M. and Prakash, B.: Simulative high temperature friction and wear studies for press hardening applications. In: Steinhoff, K., Oldenburg, M. and Prakash, B. (Hrsg.): *5th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel*, 2015, S. 167-175
- [146] Stachowiak, G.W. and Batchelor, A.W.: *12 Adhesion and Adhesive Wear*. Tribology Series (1993), S. 613-635
- [147] Dohda, K., Boher, C., Rezai-Aria, F. and Mahayotsanun, N.: Tribology in metal forming at elevated temperatures. *Friction* (2015), S. 1-27
- [148] Dutschk, V.: *Oberflächenkräfte und ihr Beitrag zu Adhäsion und Haftung in glasfaserverstärkten Thermoplasten*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2000
- [149] Dautzenberg, J.H.: The role of dynamic recrystallization in dry sliding wear. *Wear* (1980), S. 401-411
- [150] P. Bowden, F. and W. Rowe, G.: *The Adhesion of Clean Metals*. Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (1956), S. 429-442
- [151] Groche, P., Nitzsche, G. and Elsen, A.: Adhesive wear in deep drawing of aluminum sheets. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (2008), S. 295-298
- [152] Stott, F.H.: High-temperature sliding wear of metals. *Tribology International* (2002), S. 489-495

- [153] Ghiotti, A., Bruschi, S. and Medea, F.: Comparison of tribological and wear performances of AlSi and Zn coatings in hot stamping of boron steel sheets. *Wear* (2015), S. 810-821
- [154] Gleich, H.: Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2004
- [155] Roch, T., Stepien, L., Kunze, T., Mousavi, A., Topalski, S., Lasagni, A. and Brosius, A.: Tool Optimization for Dry Forming Applications – Optimized Surface Preparation of ta-C Dry Metal Forming Open Access Journal (2017), S. 25-29
- [156] Tenner, J., Häfner, T., Rothhammer, B., Krachenfels, K., Zhao, R., Schmidt, M., Tremmel, S. and Merklein, M.: Influence of laser generated micro textured coated tool surfaces on dry deep drawing processes. *Dry Metal Forming Open Access Journal* (2018), S. 35-46
- [157] Ghiotti, A., Bruschi, S., Medea, F. and Hamasaiid, A.: Tribological behavior of high thermal conductivity steels for hot stamping tools. *Tribology International* (2016), S. 412-422
- [158] Rahn, R. and Schruoff, I.: The Selection of Tool Steels for Hot-Stamping Tools with Respect to Increased Loads. In: Steinhoff, K., Oldenburg, M. and Prakash, B. (Hrsg.): 5th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 205, S. 659-668
- [159] Ghiotti, A. and Bruschi, S.: Tribological behaviour of DLC coatings for sheet metal forming tools. *Wear* (2011), S. 2454-2458
- [160] Fontalvo, G.A., Humer, R., Mitterer, C., Sammt, K. and Schemmel, I.: Microstructural aspects determining the adhesive wear of tool steels. *Wear* (2006), S. 1028-1034
- [161] Zum Gahr, K.-H.: *Microstructure and Wear of Materials* Elsevier, 1987, 10. Auflage
- [162] Glascott, J., Stott, F.H. and Wood, G.C.: The effectiveness of oxides in reducing sliding wear of alloys. *Oxidation of Metals* (1985), S. 99-114

- [163] Eifeler Unternehmensgruppe, v.e.: Tigral - Aluminium-Chrom-Titannitrid: Abriebfestigkeit und hohe thermische Beständigkeit. http://www.eifeler.com/app/uploads/sites/82/2018/05/TIGRAL_D E.pdf (aufgerufen am 26.11.2018)
- [164] Eifeler Unternehmensgruppe, v.e.: EXXTRAL-plus - Für die Hochleistungszerspannung. <http://www.eifeler.com/de/exxtral-plus/> (aufgerufen am 26.11.2018)
- [165] Gobrecht, J.: Werkstofftechnik - Metalle. München: Oldenbourg, 2009, 3. Auflage
- [166] Saheb, N., Laoui, T., Daud, A.R., Harun, M., Radiman, S. and Yahaya, R.: Influence of Ti addition on wear properties of Al-Si eutectic alloys. *Wear* (2001), S. 656-662
- [167] Heinrich, H.: Die Korrosion der Metalle am Beispiel der interkristallinen Korrosion. <https://hps.hs-regensburg.de/heh39273/aufsaeetze/ik.pdf> (ufbgerufen am 21.11.2018)
- [168] Ruge, J. and Wohlfahrt, H.: Technologie der Werkstoffe: Herstellung, Verarbeitung, Einsatz. Dordrecht: Springer, 2013, 9. Auflage
- [169] Sigvant, M., Pilthammar, J., Hol, J., H Wiebenga, J., Chezan, T., Carleer, B. and Van den Boogaard, T.: Friction in Sheet Metal Forming Simulations: Modelling of New Sheet Metal Coatings and Lubricants. In: (Hrsg.): IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, S. 1-8

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Schwingenschlögl, P.; Hildering, S.; Merklein, M.: Untersuchung der Reibbedingungen beim Presshärten mittels Streifenziehversuchen bei erhöhten Temperaturen. In: M. Merklein (Hrsg.): 10. Erlanger Workshop Warmblechumformung, Meisenbach, 2015, S. 177-194
- [P2] Schwingenschlögl, P.; Hildering, S.; Merklein, M.: Characterization and Description of Friction Conditions for Hot Stamping and Partial Hot Stamping of Ultra High Strength Steel. In: Stahl-Institut VDEh (Hrsg.): Proceedings METEC & 2nd ESTAD, 2015, S. 1-6
- [P3] Schwingenschlögl, P.; Tenner (geb. Steiner), J.; Gauglitz, S.; Merklein, M.: Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die tribologischen Bedingungen beim Presshärten. In: Merklein, M. (Hrsg.): 11. Erlanger Workshop Warmblechumformung, Meisenbach Bamberg, 2016, S. 45-62
- [P4] Schwingenschlögl, P.; Hildering, S.; Merklein, M.: Investigation of Friction Conditions at Elevated Temperatures for Hot Stamping. In: Thai Tribology Association (TTA) (Hrsg.): Proceedings 7th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes, 2016, S. 217-228
- [P5] Schwingenschlögl, P.; Hauser, D.; Tenner (geb. Steiner), J.; Merklein, M.: Werkzeugseitige Beeinflussung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten. In: Merklein, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 12. Erlanger Workshop Warmblechumformung, Meisenbach Bamberg, 2017, S. 169-180
- [P6] Schwingenschlögl, P.; Weldi, M.; Merklein, M.: Investigation of the influence of process parameters on adhesive wear under hot stamping conditions. In: (Hrsg.): Journal of Physics: Conference Series, 2017

- [P7] Schwingenschlögl, P.; Tenner (geb. Steiner), J.; Andreas, K.; Merklein, M.: Tribological behavior of Zn coated 22MnB5 in hot stamping.: Steels in Cars and Trucks, 2017
- [P8] Schwingenschlögl, P.; Tenner (geb. Steiner), J.; Andreas, K.; Merklein, M.: Investigation of Tribological Conditions within Partial Hot Stamping. In: Steinhoff, K.; Oldenburg, M.; Prakash, B. (Hrsg.): 6th Conference on Hot Sheet Metal Forming of high-Performance Steel, 2017, S. 233-240
- [P9] Schwingenschlögl, P.; Tenner (geb. Steiner), J.; Merklein, M.: Tribological Behavior of Different Tool Steels and Surface Properties under Hot Stamping Conditions. In: (Hrsg.): Key Engineering Material, 767, 2018, S. 212-219
- [P10] Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Charakterisierung und Beschreibung der Reibverhältnisse beim Presshärten und partiellen Presshärten von höchstfesten Vergütungsstählen. Abschlussbericht FOSTA P871: Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf, 2018
- [P11] Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Einfluss der Werkzeugeigenschaften auf die tribologischen Bedingungen beim Presshärten. In: Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben, Bruno Buchmayr (Hrsg.): XXXVII. Verformungskundliches Kolloquium, 2018, S. 65-70
- [P12] Schwingenschlögl, P.; Niederhofer, P.; Merklein, M.: Investigation on basic friction and wear mechanisms within hot stamping considering the influence of tool steel and hardness. In: Wear (2019)
- [P13] Niederhofer, P.; Eger, K.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Properties of tool steels for application in hot stamping. In: Tooling (2019)

- [P14] Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Characterization of tribological conditions within direct hot stamping. In: Journal of Material Processing Technology (2019)

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten*

- [S1] Kärtner, M.; Fell, R.; Hildering, S.; Merklein, M.: Inbetriebnahme eines Warmstreifenzugprüfstandes zur Untersuchung von prozessparameterabhängigen Reibzahlen im direkten Presshärteprozess. Masterarbeit (2014), Erlangen
- [S2] Boettche, M.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Experimentelle Untersuchungen der Reibverhältnisse für das direkte und indirekte Presshärten. Bachelorarbeit (2014), Erlangen
- [S3] Venezian, L.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Investigation of functional relations between the friction coefficient and process parameters within the hot stamping process. Masterarbeit (2015), Erlangen
- [S4] Vogler, C.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Entwicklung von Modellansätzen für die Reibverhältnisse im Presshärteprozess auf Grundlage experimenteller Untersuchungen. Masterarbeit (2015), Erlangen
- [S5] Brendler, J.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Untersuchung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten mittels Napfzugversuchen. Projektarbeit (2015), Erlangen
- [S6] Turner, R.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Experimentelle Charakterisierung unterschiedlicher Werkstückbeschichtungen für das Presshärten. Projektarbeit (2016), Erlangen
- [S7] Gauglitz, S.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Experimentelle Untersuchung der tribologischen Bedingungen für das partielle Presshärten. Projektarbeit (2016), Erlangen

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

- [S8] Weldi, M.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Experimentelle Untersuchung der Einflüsse von Prozessparametern beim Presshärten auf den Werkzeugverschleiß. Projektarbeit (2016), Erlangen
- [S9] Schirdewahn, S.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Experimentelle und simulative Untersuchung des Temperatureinflusses auf die tribologischen Bedingungen beim Presshärten. Projektarbeit (2016), Erlangen
- [S10] Schwegler, E.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Entwicklung eines Werkzeugs zum Presshärten von Demonstratorgeometrien im Labormaßstab. Projektarbeit (2016), Erlangen
- [S11] Hauser, D.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Experimentelle Untersuchung des werkzeugseitigen Einflusses auf die tribologischen Bedingungen beim Presshärten. Bachelorarbeit (2017), Erlangen
- [S12] Gauglitz, S.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Validierung einer funktionalen Beschreibung der Reibzahl in Abhängigkeit der Prozessparameter beim Presshärten. Masterarbeit (2017), Erlangen
- [S13] Panusch, F.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Werkzeugeigenschaften auf die tribologischen Bedingungen beim Presshärten. Masterarbeit (2018), Erlangen
- [S14] Stachow, S.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Analyse des tribologischen Einsatzverhaltens unterschiedlicher Werkzeugoberflächen unter Presshärtebedingungen. Masterarbeit (2018), Erlangen
- [S15] Schirdewahn, S.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Numerische Analyse der Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus Streifenziehversuchen auf den industriellen Presshärteprozess. Masterarbeit (2018), Erlangen

- [S16] Drummer, M.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Experimentelle Analyse von werkzeugseitigen Einflussgrößen auf das Einsatzverhalten beim Presshärten. Bachelorarbeit (2018), Erlangen
- [S17] Fuss, T.; Schwingenschlögl, P.; Merklein, M.: Experimentelle Untersuchung der Reib- und Verschleißbedingungen beim Presshärten. Bachelorarbeit (2018), Erlangen

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2020):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

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

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

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

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien

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

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

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

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

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

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhal-
tens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von
Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte
Montageplanung am Beispiel der
Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur
Flexibilitätssteigerung der
rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-
feinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines
übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und
Prozeßdiagnostik für das Schneiden
mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab.
1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen
Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten
Diagnosesystems für automatisierte
Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte
Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von
Softwaresystemen für rechnergeführte
Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumforme mit
elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 29: Peter Hoffmann
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen: Prozeßführung und
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-
beitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit
objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung
in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17451-6.

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

Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simula-
tionsverfahrens für operative und
strategische Probleme der
Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann
Operatives Fertigungscontrolling durch
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-
tungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten
Werkstattprogrammiersystems für das
Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von
Montageanlagen in einem integrierten
Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-
der Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17778-7.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung
an offenen CNC-Steuerungen zur
Prozeß- und Programoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und
Prozeßplanung zur Leistungs- und
Qualitätssteigerung beim
Spulenwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung
für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für
CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler
Schraubstationen in der
automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen
in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke
Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller
Automatisierte Demontagesysteme
und recyclinggerechte Produktgestaltung
elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meißner
Kaltmassivumformung metallischer
Kleinstteile - Werkstoffverhalten,
Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind
Zerstörungsfreie Ermittlung mechani-
scher Eigenschaften von Feinblechen mit
dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-102-4.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 100: Bernd Falk
Simulationsbasierte
Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge
der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-136-9.

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

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

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

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum
Produktionsmanagement in der
Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.
Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet
zum effizienten Service von
Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-147-4.

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

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

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration
der 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 Integra-
tion neuer Bauelementetechnologien in
die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten
alternativer Elektroniklote in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem
Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montage-
systemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von
Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung
der Mikrostruktur und
der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches
Architekturkonzept zur Akquisition
simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische
Optimierung im Innenausbau durch
den Einsatz moderner
Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-
Punktschweißen in der Elektronikpro-
duktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum
Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten
Programmierung für
die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim
Laserstrahlschweißen mit den Methoden
der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung
metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die
MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter
Mikroverbindungen elektronischer
Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum
Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium
für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontak-
ten elektronischer Bauelemente mit
Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann
Erweiterung der Formgebungsgrenzen
beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Ein-
satz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch
3 - D MID Technologie in der
Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl
Fertigungsqualität und Umformbarkeit
laserstrahlgeschweißter Formplatinen
aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk
Entwicklung eines konfigurierbaren
Steuerungssystems für die flexible
Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck
Neue Sensorik und Aktorik für
Bearbeitungsköpfe zum
Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, Trennen und Laserstrahlschweißen
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und
multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner
Technische Umsetzung produktbezoge-
ner Instrumente der Umweltpolitik bei
Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier
Strategien für einen produktorientierten
Einsatz räumlicher spritzgegossener
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich
Kostensimulation - Simulationsbasierte
Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer
Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny
Innenhochdruck-Umformen von Blechen
aus Aluminium- und Magnesiumlegie-
rungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha
Flexible Montageautomatisierung zur
Komplettmontage flächenhafter Produkt-
strukturen durch kooperierende
Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und
Verbindungstechnik für mechatronische
Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph
Durchgängige simulationsgestützte
Planung von Fertigungseinrichtungen der
Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah
Simulationsbasierte Bestimmung der
zu erwartenden Maßhaltigkeit für das
Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein
Scherschneiden und Biegen metallischer
Kleinstteile - Materialeinfluss und
Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff
Excimerlaserstrahlbiegen dünner
metallischer Folien mit homogener
Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach
Rechnergestützte Anpassung von
Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl
System- und Prozesstechnik für das
simultane Löten mit Diodenlaserstrah-
lung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker
Tribologische Eigenschaften keramischer
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer
Oberflächenendbearbeitung mittels
Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik
durch innovative maschinenbauliche und
regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama
Effizienzsteigerung in der Montage durch
marktorientierte Montagestrukturen und
erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Ent-
wicklung von Konzepten und Methoden
für die rechnerunterstützte Modellierung
und Optimierung von komplexen
Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-206-3.

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

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

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

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

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

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

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

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-221-7.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 175: Peter Wölflick
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0.

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

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

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

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

Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht
Werkstoffcharakterisierung und
Prozessauslegung für die wirkmedienba-
sierte Doppelblech-Umformung von
Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeug-
lebensdaueroptimierung und Präzisions-
fertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter
Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen
beim Presshärten des höchstfesten
Vergütungsstahls 22MnB5
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez
Simulationsgestützte Methoden zur
effizienten Gestaltung von Lötprozessen
in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makrome-
chatronischen Modulen zur flexiblen
Integration in hybride
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur
experimentellen Ermittlung und zur
Modellierung von Fließortkurven bei
erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungs-
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-
rung von einatzgerechten elektroni-
schen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum
Excimerlaserstrahl-Abtragen unter
Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen
zum Rührreibschweißen metallischer
Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung
des Werkstoffverhaltens von
presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten
Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten
Produktionskonzeptes für mobile
Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktlagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
beim Laserstrahl-tiefschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten
Steuerungssystems zur
Materialflussorganisation im
wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahl-schweißen
transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des
Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen
Qualifizierung des Potentials von
Verfestigungseffekten zur Erweiterung
des Umformvermögens aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus
Erstellung eines Werkstofforientierten
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung
des Formgebungsvermögens von Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischeneschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec
Untersuchungen zur Herstellung von
funktionsoptimierten Bauteilen im
partiellen Presshärtprozess mittels lokal
unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader
Grundlegende Untersuchungen zur
Verschleißcharakterisierung beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung und Fehlerdetektion
an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland
Entwicklung einer Methode zur Prognose
adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen
für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm
Strukturierte additive Metallisierung
durch kaltaktives
Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner
Herstellung beanspruchungsangepasster
Aluminiumblechhalbzeuge durch
eine maßgeschneiderte Variation der
Abkühlgeschwindigkeit nach
Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit
auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim
Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles
for the Generation of Thin Conductive
Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider
Umformtechnische Herstellung
dünnwandiger Funktionsbauteile
aus Feinblech durch Verfahren der
Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof
Sematische Modellierung automatisierter
Produktionssysteme zur Verbesserung
der IT-Integration zwischen Anlagen-
Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller
Erarbeitung von Grundlagen zur
Abbildung des tribologischen Systems
in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler
Einsatz technologischer Versuche zur
Erweiterung der Versagensvorhersage
bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten
Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig
Integration des Systemverhaltens von
Automobil-Hochvoltleitungen in die
virtuelle Absicherung durch
strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl
Automatisierte Datenerfassung für disk-
ret ereignisorientierte Simulationen in
der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold
Mikroschockwellenumformung mittels
ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger
Laserstrahlschweißen thermoplastischer
Kohlenstoffaserverbundwerkstoffe mit
spezifischem Zusatzdraht
LFT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-408-2.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 Wärme-
behandlungssimulation
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnihl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung
rührreibgeschweißter Aluminium-
halbzeuge 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 Aluminiumblechwerk-
stoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathemati-
sche 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
transienter optischer Materialeigen-
schaften bei der Ultrakurzpuls-Laser-
materialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

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

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung
in der produzierenden Industrie im Kon-
text 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
muskuloskeletalen 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 laserdirekt-
strukturierter 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 Prozess-
überwachung auf Basis sozio-cyber-phy-
sischer 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 Herstel-
lung 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 schräg-
verzahnten 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 Heißcrimpprozesses
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.

Abstract

With the growing numbers of automobiles in Germany, the demands of modern passenger cars regarding safety and efficiency constantly increase. The application of hot stamped parts allows reducing the weight of the body in white and simultaneously improving passenger safety. However, high forming temperatures prevent the use of lubricants, so that high friction and tool wear limit the process window. In order to use the full potential of the hot stamping process, the development of measures to reduce friction and wear is needed. For this purpose, a method for characterizing the tribological conditions within hot stamping has been elaborated within this work. This method allows for analyzing the friction and wear conditions reproducibly and specifically. With this method, a comprehensive process understanding regarding the predominant tribological conditions has been created. Based on the created process understanding tool-side measures for reducing friction and wear have been identified. The experimental investigations indicate that the choice, as well as the heat treatment of the tool material and the application of PVD-tool-coatings, can reduce friction and wear. Concluding, the transferability of the findings of the strip drawing tests on a B-pillar-geometry in laboratory-scale was shown. Thus, it can be concluded that the basic findings of this work can be used for hot stamping processes.

Mit steigenden Fahrzeugzahlen in Deutschland nehmen die Anforderungen an moderne Pkws hinsichtlich Sicherheit und Effizienz stetig zu. Der Einsatz pressgehärteter Bauteile erlaubt es, Gewichtseinsparungen bei der Rohkarosserie zu erzielen und gleichzeitig den Schutz der Fahrzeuginsassen zu verbessern. Hohe Umformtemperaturen verhindern den Einsatz von Schmierstoffen, sodass hohe Reibung und starker Werkzeugverschleiß das Prozessfenster limitieren. Um das volle Potential des Presshärteverfahrens auszunutzen, bedarf es daher der Entwicklung von Maßnahmen zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß. Hierfür wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methodik zur Charakterisierung der Reib- und Verschleißbedingungen beim Presshärten erarbeitet, die eine gezielte und reproduzierbare Analyse der tribologischen Bedingungen ermöglicht. Mithilfe dieser Methodik wurde ein umfassendes Prozessverständnis in Bezug auf die vorherrschenden tribologischen Bedingungen geschaffen. Aufbauend auf diesem Prozessverständnis wurden werkzeugseitige Maßnahmen zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß identifiziert. Hierbei zeigte sich, dass die Wahl und die Wärmebehandlung des Werkzeugwerkstoffs und der Einsatz von PVD-Werkzeugbeschichtungen Reibung und Verschleiß verringern können. Abschließend wurde die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den Laborversuchen auf eine B-Säulen-Geometrie im Labormaßstab gezeigt, sodass die grundsätzlichen Erkenntnisse für den Presshärteprozess genutzt werden können.

