



FAU Studien aus dem Maschinenbau 363

**Franziska Neubauer**

Oberflächenmodifizierung und  
Entwicklung einer Auswertemethodik  
zur Verschleißcharakterisierung  
im Presshärteprozess



Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik  
zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess

# **FAU Studien aus dem Maschinenbau**

## **Band 363**

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Franziska Neubauer

# **Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess**

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

Erlangen  
FAU University Press  
2021

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

Neubauer, Franziska. 2021. *Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 363. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-407-3.

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

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: <https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-406-6 (Druckausgabe)  
eISBN: 978-3-96147-407-3 (Online-Ausgabe)  
ISSN: 2625-9974  
DOI: 10.25593/978-3-96147-407-3

**Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer  
Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung  
im Presshärteprozess**

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

zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Franziska Neubauer, M. Sc.

aus Marburg (Lahn)

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

Tag der mündlichen

Prüfung: 16.12.2020

Vorsitzender des

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

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein  
Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT). Wesentliche Ergebnisse wurden innerhalb des von der Bayerischen Forschungstiftung geförderten Programms ForNextGen im Teilprojekt 3 „Innovative Oberflächenbehandlung zur Verschleißreduktion bei Presshärtewerkzeugen“ sowie im Rahmen des durch das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand ZIM geförderten Projekts „Verschleißreduktion an Presshärtewerkzeugen durch den Einsatz innovativer Beschichtungen“ erarbeitet.

Mein besonderer Dank gilt der Ordinaria des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie, Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein, für die intensive wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit. Darüber hinaus möchte ich mich für die fachlichen Diskussionen sowie dem entgegengebrachten Vertrauen und die Förderung, welche ich während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit erfahren habe und mich persönlich weiterentwickelt haben, herzlichst danken.

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt danke ich vielmals für die Übernahme des Koferats und seinem Interesse an meiner Arbeit. Bei apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Becker bedanke ich mich für die Übernahme des fachfremden Gutachtens.

Weiterhin gilt mein Dank allen technischen Mitarbeitern, dem Sekretariat, der Buchhaltung und Systemadministration. Ich danke zudem allen Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, welche durch ihren Einsatz zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ganz besonders möchte ich mich bei Dr.-Ing. Kolja Andreas, Dr.-Ing. Jennifer Tenner und Dr.-Ing. Julia Degner für die vertrauensvolle Zusammenarbeit bedanken.

Abschließend danke ich meiner Familie für die bedingungslose Unterstützung bei allen Entscheidungen auf meinem bisherigen Lebensweg.

Attendorn, im Februar 2021

Franziska Neubauer



# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>vii</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik und Forschung .....</b>	<b>3</b>
2.1 Presshärten .....	3
2.1.1 Verfahrensbeschreibung .....	4
2.1.2 Tribologie beim Presshärten .....	6
2.2 Werkzeugeinsatz und -versagen.....	11
2.2.1 Anforderungen an die Werkzeugwerkstoffe für den Einsatz im Presshärteprozess .....	11
2.2.2 Werkzeugversagen während des Presshärtens .....	13
2.2.3 Beeinflussung des Einsatzverhaltens durch Oberflächenmodifizierung.....	18
2.3 Verfahren zur Untersuchung und Auswertung des Einsatzverhaltens von Presshärtewerkzeugen .....	25
2.3.1 Methoden zur Untersuchung des Reib- und Verschleißverhaltens von Presshärtewerkzeugen .....	25
2.3.2 Analyseverfahren zur Oberflächen- und Verschleißcharakterisierung.....	27
2.4 Zusammenfassende Bewertung .....	31
<b>3 Zielsetzung und Methodik.....</b>	<b>35</b>
<b>4 Verwendete Werkstoffe, Parameter sowie Mess- und     Prüfverfahren .....</b>	<b>39</b>
4.1 Werkzeug- und Werkstückwerkstoffe .....	39
4.2 Verfahrensparameter für das Oberflächenmodifizieren .....	41
4.3 Analysemethoden zur Oberflächencharakterisierung .....	44
4.4 Experimentelle Untersuchungen zum Einsatzverhalten .....	46
<b>5 Weiterentwicklung eines Auswerteverfahrens zur     Quantifizierung des Verschleißes.....</b>	<b>51</b>
5.1 Ablauf der Oberflächencharakterisierung und Funktion des Auswerteprogramms.....	52
5.2 Ergebnisgenauigkeit des Algorithmus .....	59
5.3 Gegenüberstellung mit konventionellen Methoden .....	63

<b>6</b>	<b>Analyse der Oberflächeneigenschaften und des Einsatzverhaltens beschichteter und legierter Presshärtewerkzeuge .....</b>	<b>67</b>
6.1	Ermittlung der Oberflächeneigenschaften.....	68
6.2	Untersuchung des Einsatzverhaltens .....	70
6.2.1	Analyse des Verschleißverhaltens.....	71
6.2.2	Einfluss der Prozessparameter sowie der AlSi-Schichtdicke auf den Oberflächenverschleiß .....	96
6.2.3	Untersuchung des Reibverhaltens in Warmstreifenziehversuchen .....	105
6.2.4	Ermittlung des Abkühlverhaltens oberflächenmodifizierter Werkzeuge.....	114
6.3	Zusammenhänge zwischen Einsatzverhalten und Oberflächeneigenschaft .....	117
<b>7</b>	<b>Übertragbarkeit auf einfache Bauteilgeometrien.....</b>	<b>121</b>
7.1	Numerische Analyse des Beanspruchungskollektivs .....	121
7.2	Untersuchung in Tiefziehprozessen .....	126
<b>8</b>	<b>Wissenschaftliche Bewertung der Ergebnisse.....</b>	<b>135</b>
8.1	Anwendung des Auswerteverfahrens zur Verschleißcharakterisierung.....	135
8.2	Bewertung der Oberflächenmodifikation im Hinblick auf die Verschleißbeständigkeit.....	139
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>145</b>
<b>10</b>	<b>Summary and Outlook .....</b>	<b>149</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>153</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>171</b>

## Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	-	Untere Integrationsgrenze des Riemann-Integrals
$a_{i-1}$	-	Teilintervall bezogen auf die untere Grenze des Riemann-Integrals
$a_i$	-	Teilintervall bezogen auf die obere Grenze des Riemann-Integrals
b	-	Obere Integrationsgrenze des Riemann-Integrals
$f(t)dt$	-	Funktion des Riemann-Integrals in Abhängigkeit von der Variablen t mit der Schrittweite dt
$f_i(t)dt$	-	Teilfunktion zur Summenbildung im Riemann-Integral in Abhängigkeit der Variablen t mit der Schrittweite dt
$i=1$	-	Laufindex zur Summenbildung mit dem Riemann-Integral mit Startwert 1
k	-	Dimensionsloser Verschleißkoeffizient
$k_{ab}$	mm <sup>3</sup> /N m	Verschleißkoeffizient für abrasives Verschleißvolumen
$k_f$	MPa	Fließspannung
n	-	Index zur Summenbildung mit dem Riemann-Integral zur Angabe des Endwerts
q	°C	Abkühlgeschwindigkeit
$\Delta t$	sek	Zeitintervall in der Abkühlkurve zur Berechnung der Abkühlgeschwindigkeit
v	mm/s	Gleitgeschwindigkeit oder Relativgeschwindigkeit
$F_N$	N	Normalkraft
$F_R$	N	Reibkraft
H	Pa	Oberflächenhärte
$M_s$	°C	Martensitstarttemperatur
Sa	µm	Arithmetischer Mittenrauwert
Sk	µm	Kernrautiefe
Spk	µm	Reduzierte Spitzenhöhe

Svk	$\mu\text{m}$	Reduzierte Riefentiefe
$T_1$	$^{\circ}\text{C}$	Starttemperatur in der Abkühlkurve zur Berechnung der Abkühlgeschwindigkeit
$T_2$	$^{\circ}\text{C}$	Endtemperatur in der Abkühlkurve zur Berechnung der Abkühlgeschwindigkeit
$W_{\text{adv}}$	$\text{m}^3$	Adhäsives Verschleißvolumen nach Archard
$W_{\text{abv}}$	$\text{m}^3$	Abrasives Verschleißvolumen nach Archard
$\alpha$	$^{\circ}$	Krümmungswinkel entlang Matrize
$\mu$	-	Reibzahl

**Abkürzung**

**Beschreibung**

AC <sub>3</sub> -Temperatur	Temperatur im Eisenkohlenstoffdiagramm, bei der die Umwandlung des Ferrits in Austenit beendet ist
AlCrN	Aluminium-Chromnitrid
AlSi	Aluminium-Silizium, Beschichtung des Bleches
AlCrTiN	Aluminium-Chrom-Titannitrid
ATOS	Advanced Topometric Sensor
AX-650 W/1.3348	Legierungsdraht mit Hauptlegierungselementen Chrom, Molybdän, Kohlenstoff
Ax-308L	Legierungsdraht mit Hauptlegierungselementen Nickel, Molybdän und Chrom
AX-312	Legierungsdraht mit Hauptlegierungselementen Nickel, Molybdän und Chrom
AX-316L	Legierungsdraht mit Hauptlegierungselementen Nickel, Molybdän und Chrom
AX-Mo	Legierungsdraht mit Hauptlegierungselement Molybdän
AX-NiMoCr90	Legierungsdraht mit Hauptlegierungselementen Nickel, Molybdän und Chrom
AX-Zink/ SG <sub>2</sub> Ti	Legierungsdraht mit Hauptlegierungselement Titan
CrN	$^{\circ}$ Chromnitrid
CrMoV-Stahl	Chrom Molybdän Vanadium Stahl
CVD	Chemical Vapour Deposition, (Chemische Gasphasenabscheidung für Oberflächenbeschichtungen)
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie (Messmethode zur Bestimmung der Elementzusammensetzung)
Fe-Al-Si	Eisen-Aluminium-Silizium, entstandene intermetallische Phasen durch Diffusionsvorgänge beim Austenitisieren
FEM	Finite Elemente Methode

HRC	Härte nach dem Rockwell-Eindringverfahren
HV	Härte nach dem Vickers-Eindringverfahren
PVD	Physical Vapour Deposition (Physikalische Gasphasenabscheidung für Oberflächenbeschichtungen)
WDX	Wellenlängendispersive Röntgenspektroskopie (Messmethode zur Bestimmung der Elementzusammensetzung)
Zn	Zink, Beschichtung für Vergütungsstähle



# 1 Einleitung

Der Wunsch der Menschheit nach individueller, bezahlbarer Mobilität und das wachsende Umweltbewusstsein stellen eine zentrale Motivation für die Automobilindustrie dar [1], um neue Lösungsstrategien für zukünftige Fahrzeugkonzepte zu entwickeln. Laut einer Studie des Bundesministeriums für Verkehr ist bis 2030 ein Anstieg des motorisierten Individualverkehrs von 902,4 auf 991,8 Mrd. Personenkilometer zu erwarten [2]. Dieser Trend in Kombination mit konventionellen Antrieben resultiert in einer hohen Umweltbelastung durch zunehmende CO<sub>2</sub> Emissionen. Der Leichtbau stellt eine Schlüsseltechnologie dar, um durch eine Gewichtseinsparung die gesundheitsgefährdenden Schadstoffe zu reduzieren und auch im Hinblick neuer Antriebstechnologien die Reichweite von elektrifizierten Fahrzeugen zu erhöhen [3]. Neben geringem Bauteilgewicht stellt die Sicherstellung der Insassensicherheit einen weiteren wichtigen Faktor dar, weshalb eine hohe mechanische Festigkeit und Fertigungsgenauigkeit der eingesetzten Fahrzeugkomponenten vorausgesetzt wird [4].

Das Presshärten stellt ein geeignetes Fertigungsverfahren dar, um diesen Anforderungen gerecht zu werden. In diesem Herstellungsprozess werden höchstfeste Karosseriebauteile mit hoher Maßhaltigkeit produziert, indem eine Wärmebehandlung und die Umformung der Bauteile in einem Prozessschritt erfolgen [5]. Folglich können geringere Blechdicken der Halbzeuge eingesetzt und somit das Bauteilgewicht ohne Festigkeitseinbußen verringert werden. In diesem Zusammenhang werden Streckgrenzen von circa 1000 MPa sowie Zugfestigkeiten bis circa 1500 MPa erreicht [6]. Als übliche pressgehärtete Bauteile werden sicherheitsrelevante Komponenten wie die A- und B- Säule, der Stoßfänger sowie der Querträger gefertigt [7], um durch ihre hohen Festigkeiten die Insassensicherheit zu gewährleisten.

In der industriellen Anwendung werden Verfahrensstrategien wie das direkte und indirekte Presshärten unterschieden [7]. Die hohen Prozesstemperaturen oberhalb von 900 °C, welche während der Wärmebehandlung der Halbzeuge auftreten, bedingen zum Schutz vor Verzunderung und Oxidation einen Einsatz von beschichteten Werkstücken [7]. Im Falle des direkten Presshärteprozesses werden AlSi-Schutzschichten verwendet [7]. Ein signifikanter Nachteil von feueraluminierten Stählen in der industriellen Anwendung ist, dass die AlSi-Schicht zu adhäsiver Materialanhaftung am Werkzeug [8] und somit zu einer kosten- und zeitintensiven Wartung der Presshärtewerkzeuge führt [9]. Presshärtewerkzeuge sind hohen thermischen Beanspruchungen ausgesetzt [9], weshalb Schmierstoffe für

diesen Warmumformprozess als Verschleißschutz nicht geeignet sind [10]. Vor diesem Hintergrund besteht ein Forschungsbedarf, um eine Oberflächenmodifizierung der Werkzeuge zur Erhöhung der Verschleißbeständigkeit vorzunehmen und hinsichtlich der Anwendbarkeit für komplexe thermo-mechanische Umformprozesse zu evaluieren.

Um die Oberfläche von Presshärtewerkzeugen zu modifizieren, sind das Laserstrahllegieren sowie das Abscheiden von Beschichtungssystemen aufgrund ihrer hohen Temperaturbeständigkeit geeignet. Durch Anwendung dieser Methoden ist aus wirtschaftlicher Sicht ebenfalls ein Einsatz von segmentierten Werkzeugen oder die Bearbeitung lokaler Bereiche der Matrize realisierbar. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung und Beschreibung der Zusammenhänge zwischen modifizierten Werkzeugoberflächen und deren Einsatzverhalten. Um Rückschlüsse auf einen geeigneten Verschleißschutz für Presshärtewerkzeuge ziehen zu können, wird der Einfluss unterschiedlicher Legierungselemente auf das Verschleißverhalten untersucht. In diesem Zusammenhang wird eine Auswertemethodik entwickelt, um eine Bewertung der unterschiedlichen Oberflächenmodifizierungen vorzunehmen. Zur Charakterisierung des Oberflächenverschleißes sind konventionelle Analyseverfahren auf die Qualifizierung der Oberflächentopografien sowie die Ermittlung der Oberflächenrauheiten vor und nach dem Einsatz der Werkzeuge beschränkt. In der vorliegenden Arbeit wird ein modifiziertes Analyseverfahren zur Quantifizierung des Oberflächenverschleißes ermöglicht und dadurch die komplexe Interaktion der Verschleißmechanismen Abrasion und Adhäsion im Bereich der Warmumformung erfasst. Die Untersuchungen werden in diesem Zusammenhang an legierten und beschichteten Oberflächen durchgeführt, welche die chemische Affinität zwischen Werkzeug und Werkstück reduzieren, jedoch nicht die Oberflächenrauheiten verändern. Diese Vorgehensweise stellt eine Voraussetzung dar, um die thermischen und tribologischen Bedingungen des Presshärteprozesses nach dem Modifizieren der Werkzeugoberflächen nicht wesentlich zu verändern und somit einen Einsatz für den Presshärteprozess zu gewährleisten. Für einen Nachweis der Übertragbarkeit auf industrierelevante Umformprozesse wird in dieser Arbeit eine numerische Analyse zur Identifizierung höchstbeanspruchter Werkzeugbereiche durchgeführt. Mithilfe dieser Erkenntnisse wird eine lokale Oberflächenmodifizierung der Werkzeuge realisiert. Zudem wird es durch einen oberflächenangepassten Einsatz von Presshärtewerkzeugen ermöglicht, die Werkzeugstandmenge, die Wartungsintervalle und somit die Wirtschaftlichkeit des Fertigungsprozesses zu steigern.

## 2 Stand der Technik und Forschung

Der Schwerpunkt dieser Arbeit ist, einen Beitrag zur Erhöhung der Werkzeugstandmenge durch Oberflächenmodifizierung von Umformwerkzeugen für das Presshärten zu liefern. Zu diesem Zweck sind grundlegende Kenntnisse über die Ursachen der Verschleißentwicklung erforderlich. Im Stand der Technik werden ein Überblick über das Einsatzverhalten von konventionellen Presshärtewerkzeugen gegeben sowie die Herausforderungen im Hinblick des auftretenden Werkzeugverschleißes aufgezeigt. Um die Werkzeugstandmenge zu erhöhen, werden verschiedene Möglichkeiten zur Beeinflussung des Einsatz- und Verschleißverhaltens von Presshärtewerkzeugen durch Oberflächenmodifizierungen beschrieben. Durch eine abschließende Bewertung des Stands der Technik erfolgt eine Ableitung des aktuellen Forschungsbedarfs, welcher die Grundlage der vorliegenden Arbeit darstellt.

### 2.1 Presshärten

Das moderne Presshärten, wie es heutzutage Anwendung findet, wurde 1973 von Norrbottens Jernverks zum Patent eingereicht [11]. Der Prozess wurde später durch die Luleå University of Technology weiterentwickelt, indem im Jahr 1975 ein erstes Forschungsprojekt in Kooperation mit Volvo Trucks und Norrbottens Jernverks im Jahr 1975 startete [12]. Als erstes Fahrzeug wurde 1984 der SAAB 9000 mit einem pressgehärteten Seitenaufprall ausgestattet [12]. Es folgten die Herstellung von Stoßfängern sowie A- und B- Säulen [13]. Zwischen 1987 und 1997 nahm die Produktion der Bauteile von 3 Mio. Teilen pro Jahr auf 8 Mio. Teile pro Jahr zu [13]. Seitdem stieg die Nachfrage an höchstfesten Bauteilen stetig an, bis im Jahr 2018 574 Mio. Teile gefertigt wurden [14].

Bei dem Presshärteprozess werden hochfeste Stähle verarbeitet, indem nach dem Austenitisieren der Halbzeuge die Formgebung mit gleichzeitigem Härten der Bauteile durchgeführt wird. Die hohe Härte wird bei diesem Vorgang durch eine Phasenumwandlung eines austenitischen Gefüges in Martensit erzielt [7]. Um die werkstückspezifischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile zu erreichen, werden borlegierte Vergütungsstähle verwendet. Aufgrund guter Umformbarkeit und hoher mechanischer Festigkeiten nach dem Presshärten ist insbesondere der Bor-Manganstahl 22MnB5 etabliert [7]. Die chemische Zusammensetzung des Stahls beeinflusst die resultierenden Festigkeitseigenschaften nach dem Abschrecken

sowie die Härtebarkeit der Bauteile. Durch den Boranteil resultiert die Phasentransformation in Martensit und eine mögliche Umwandlung in andere Gefüge während der Verarbeitung wird verzögert [7]. Mangan senkt zudem die Martensitstarttemperatur [15]. Neben der Legierungszusammensetzung ist bei der Umwandlungshärtung die zeitliche Dauer während des Abschreckens zur Erreichung der hohen mechanischen Festigkeiten entscheidend [16]. Aus diesem Grund kommen gekühlte Umformwerkzeuge zum Einsatz, deren Werkzeugkühlung konventionell mithilfe von integrierten Kühlkanälen erfolgt, welche nahe an der Werkzeugoberfläche positioniert sind [17]. Durch diese Gestaltung werden die Presshärtewerkzeuge möglichst effizient gekühlt [17].

Im Vergleich zu konventionellen Umformprozessen bei Raumtemperatur sind Presshärtewerkzeuge erheblichen thermo-mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt [5]. Folglich hängt die Bauteilqualität vom resultierenden Reib- und Verschleißverhalten der Umformwerkzeuge ab. Die Werkzeug- und die Blechoberfläche stehen während der Tiefziehoperation im direkten metallischen Kontakt, da bedingt durch die hohen Prozesstemperaturen beim Presshärten keine Schmierstoffe eingesetzt werden, wodurch das tribologische Verhalten beeinflusst wird [10]. Zur Gewährleistung einer gleichbleibenden Bauteilqualität sind infolge einer Kombination aus hoher thermischer Beanspruchung und hoher Reibung kürzere Wartungsintervalle der Umformwerkzeuge erforderlich, wodurch die Werkzeugstandmenge reduziert sowie die Instandhaltungskosten erhöht werden [9]. Die durch das Umformen einer heißen Blechplatte bei gleichzeitiger Abschreckung resultierende thermische Wechselbeanspruchung stellt hohe Ansprüche an die Werkzeugoberfläche [18]. Aus diesem Grund treten zunehmend Verschleißerscheinungen am Presshärtewerkzeug in Erscheinung.

### **2.1.1 Verfahrensbeschreibung**

Im industriellen Einsatz wird das konventionelle Presshärten primär nach dem direkten und indirekten Verfahren unterschieden. Das grundlegende Prinzip ist bei beiden Methoden identisch, wobei die Verfahrensschritte in das Austenitisieren eines Blechzuschnittes mit anschließender Umformung und gleichzeitiger Abschreckung der Halbzeuge sowie einer Nachbearbeitung der Bauteile gegliedert sind. Der wesentliche Unterschied zwischen den Herstellungsverfahren besteht in der Abfolge oder Anzahl der erforderlichen Prozessschritte. Nachfolgend werden die Fertigungsabläufe beschrieben.

## Direktes Presshärten

Beim direkten Presshärten wird das Halbzeug zunächst in einem Ofen für mehrere Minuten über die werkstoffspezifische  $AC_3$ -Temperatur erwärmt [19]. Am weitesten verbreitet sind in diesem Zusammenhang sogenannte Rollenherdöfen, welche durch ihre keramischen Transportrollen besonders wirtschaftlich und prozesssicher sind [20]. Für den üblicherweise verwendeten Vergütungsstahl 22MnB5 liegt dieser Temperaturwert zwischen  $880\text{ °C}$  und  $950\text{ °C}$  [21]. Die Umwandlung eines ferritisch-perlitischen in ein homogenes Austenitgefüge ist neben der Austenitisierungstemperatur von der Verweilzeit im Ofen abhängig. In diesem Zusammenhang sind für  $900\text{ °C}$  circa 5 Minuten erforderlich [22]. Zusätzlich ist die resultierende Blechtemperatur abhängig von der Blechdicke sowie der chemischen Zusammensetzung der Oberflächenbeschichtung [23]. Zum Schutz vor Oxidation kommen AlSi-Schichten zum Einsatz. Diese Oberflächenbeschichtung besteht aus circa 88 % Aluminium, 9 % Silizium und 3 % Eisen bei einer Schichtdicke zwischen  $25\text{ }\mu\text{m}$  und  $30\text{ }\mu\text{m}$  [24]. Die Schmelztemperatur dieser Schutzschicht liegt bei circa  $600\text{ °C}$  und ist wesentlich niedriger als die Erwärmungstemperatur während der Austenitisierung des Bauteils im Ofen [25]. Durch die Diffusion von Eisen aus dem Grundmaterial in das Beschichtungssystem werden intermetallische Phasen von Fe-Al-Si gebildet, wodurch eine höhere Temperaturbeständigkeit der AlSi-Schicht resultiert [26]. In diesem Zusammenhang liegt eine stabile Bindung von  $Al_8Fe_2Si$  vor, welche zu einer zunehmenden Verfestigung des Beschichtungssystems führt [26]. Ein Aufschmelzen der Beschichtung wird daher verhindert. Während Silizium die schnelle Bildung der spröden Phase von  $Fe_2Al_5$  reduziert, bildet Aluminium mit Sauerstoff eine  $Al_2O_3$ -Schicht auf der Rohteiloberfläche, was zu einem hohen Oxidationsschutz führt [24]. Ein Einsatz von unbeschichteten Blechen ist ebenfalls möglich. Jedoch ist eine Austenitisierung unter einer Schutzgasatmosphäre erforderlich, um eine Verzunderung der Oberflächen zu verhindern [27].

Um ein schnelles Abkühlen der Zuschnitte vor der Umformung zu vermeiden, werden nach der Erwärmung die Bleche unter Einhaltung einer zeitlich kurzen Transferzeit in ein gekühltes Umformwerkzeug eingelegt [28]. In diesem Zusammenhang ist es möglich, dass eine inhomogene Phasenumwandlung und somit lokal variierende mechanische Eigenschaften am Bauteil resultieren [28]. Im industriellen Einsatz erfolgt die Umformung der Bauteile oberhalb der Martensitstarttemperatur zwischen  $850\text{ °C}$  und  $400\text{ °C}$  [29], während bei der Formgebung die Werkstücke auf ihre Entnahmetemperatur von circa  $150\text{ °C}$  abgeschreckt werden [28]. Zur Bildung eines vollständigen Martensitgefüges sind hohe Abkühlgeschwindigkeiten von

mindestens 30 °C/s und darüber hinaus erforderlich [28]. Abhängig von der verwendeten Fertigungsanlage sind Umformgeschwindigkeiten oberhalb von 150 mm/s wirtschaftlich, um eine vollständige Gefügewandlung in Martensit unter geringem Zeit- und Kostenaufwand zu realisieren [30]. Mit dieser Verfahrensmethode werden für pressgehärtete Bauteile Zugfestigkeiten über 1500 MPa erreicht [7].

### **Indirektes Presshärten**

Im Vergleich zur direkten Methode werden die Bauteile beim indirekten Presshärten bis zu 90 % ihrer finalen Geometrie bei Raumtemperatur umgeformt. Der Blechzuschnitt wird entweder in einem oder mehreren vorgelagerten Tiefziehoperationen verarbeitet [31], wodurch komplexere Bauteilgeometrien mit größerer Ziehtiefe als im direkten Prozess fertigbar sind [31]. Erst anschließend wird die Austenitisierung der Halbzeuge durchgeführt. In einem sogenannten Kalibriervorgang erfolgt die Formgebung der finalen Bauteilgeometrie bei gleichzeitigem Abkühlen des Bauteils [31].

Feuerverzinkte Bleche kommen beim direkten Verfahren zum Einsatz, da Zn-Beschichtungen einen kathodischen Schutz gegenüber Korrosion bieten. Durch die aluminiumbasierte Variante kann nur ein Barrierschutz sichergestellt werden [24]. Ein Nachteil des zinkbeschichteten Materials ist, dass ein Einsatz aufgrund seiner Neigung zu Versprödung des Metalls bei hohen Temperaturen für das direkte Presshärten nicht möglich ist [32]. Im indirekten Prozess tritt die flüssige Zinkphase nicht während des Umformprozesses auf, da nach dem Austenitisieren keine Tiefziehoperation, sondern lediglich eine Abschreckung des Bauteils stattfindet [31].

#### **2.1.2 Tribologie beim Presshärten**

Unter dem Begriff Reibung wird im Allgemeinen der Bewegungswiderstand gegen Einleitung einer Relativbewegung von in Kontakt stehenden Körpern verstanden [33]. Im Bereich der Umformtechnik ist primär die Gleitreibung für den in der Wirkfuge auftretenden Spannungs- und Formänderungszustand entscheidend [34]. Das Reibverhalten wird durch die sogenannte Reibkraft charakterisiert. Diese Kenngröße beschreibt die Kraft, welche während des Umformprozesses den mechanischen Widerstand entgegen der Relativbewegung zwischen den Kontaktpartnern ausübt [33]. Die Reibung ist keine Werkstoffeigenschaft und ist von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig. Die Stoffeigenschaften der Kontaktpaarung von Werkstück sowie Werkzeug, die Bauteiltemperatur, die Relativgeschwindigkeit in der Wirkfuge zwischen den Metallflächen und die Schmierung

beeinflussen das Reibverhalten [35]. Coulomb fasste diese Zusammenhänge in einem einfachen Reibzahlggesetz zusammen und stellte die nachfolgend dargestellte mathematische Beschreibung auf [34].

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

Mithilfe dieses einfachen analytischen Ansatzes wird die Reibzahl  $\mu$  durch das Verhältnis von Reibkraft  $F_R$  zur Normalkraft  $F_N$  ermittelt und die Annahme getroffen, dass die Reibung unabhängig von der Größe der Kontaktfläche ist. Das Modell wird noch heute für viele Ingenieur Anwendungen in erster Näherung verwendet [36]. In diesem Zusammenhang untersuchten Kondratiuk et al. das Reibverhalten von AlSi und Zn-Ni beschichteten Blechwerkstoffen, um daraus Rückschlüsse zum Einsatz alternativer Materialien für das Presshärten abzuleiten [37]. Sie wiesen anhand ihrer Ergebnisse nach, dass durch die vorhandene Oxidschicht die Zn-Ni beschichteten Proben zu einer geringeren metallischen Adhäsion im Vergleich zur AlSi-Schicht neigen, wodurch eine geringere Reibung resultiert [37]. Durch diese Erkenntnis wird deutlich, dass eine komplexe Interaktion zwischen dem Reibverhalten und der Verschleißneigung der Werkstoffpaarungen besteht. Um jedoch in erster Näherung die tribologischen Bedingungen im Umformprozess zu beschreiben, liefert der von Coulomb aufgestellte mathematische Zusammenhang präzise Ergebnisse. In aktuellen Forschungsarbeiten gewinnt die numerische Analyse des Umformverhaltens gerade im Hinblick auf die Herstellung von komplexen Bauteilen zunehmend an Bedeutung. Um eine Vorhersage zur Bauteilherstellbarkeit zu treffen, legen Graff et al. in ihrer Arbeit das Coulomb'sche Reibgesetz zu Grunde [38]. Sie analysieren darauf aufbauend die Einflüsse hinsichtlich der Fließeigenschaften der Bauteilmaterialien, des Wärmetransfers sowie des Reibverhaltens auf die Bauteilqualität [38]. Eine Anwendung des mathematischen Zusammenhangs nach Coulomb ist für den Presshärteprozess gegeben, da dieses Modell für Trockenreibung gültig ist [36]. Während des Umformprozesses ist bei diesem Fertigungsverfahren ein Einsatz von Schmierstoffen nicht möglich, weshalb Festkörperreibung vorherrscht [10]. Die Gültigkeit des Gesetzes beruht in diesem Zusammenhang auf der idealisierten Annahme, dass ein Einfluss der Oberflächenrauheit sowie der wahren Kontaktflächen auf das Reibverhalten vernachlässigbar ist [36]. Entgegen dieser Theorie ist für eine vollständige Charakterisierung des Reibverhaltens der komplexe Vorgang zwischen den in Kontakt befindlichen Oberflächen zu berücksichtigen. Während der Relativbewegung treten insbesondere elastische und plastische Deformation von Oberflächenunebenheiten auf,

welches durch Mulvihill et al. für die Entwicklung ihrer numerischen Simulation genutzt wurde [39]. Zudem stellen die Temperatur und das Verschleißverhalten weitere wesentliche Einflussfaktoren auf die Reibung dar [36].

Allgemein stehen während des Reibkontaktes von Festkörpern Reibung, Verschleiß und Schmierung miteinander in Wechselwirkung. Vor diesem Hintergrund wurde der Begriff Tribologie geprägt, welcher die Wissenschaft zur Beschreibung dieser drei Teilbereiche von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung zusammenfasst [36]. Beim Presshärteprozess wird das tribologische Verhalten maßgeblich durch die Flächenpressung, Relativgeschwindigkeit und Temperatur beeinflusst. In diesem Zusammenhang wiesen Schwingenschlögl et al. nach, dass eine Wechselwirkung von hoher Blechtemperatur, Kontaktpressung sowie Geschwindigkeit während der Reibbewegung zu Verschleißerscheinungen an den Kontaktflächen führt [40]. Im Folgenden werden diese Zusammenhänge an einigen Forschungsarbeiten, welche diese Themenstellungen infolge der zunehmenden industriellen Bedeutung von pressgehärteten Bauteilen beinhalten, näher beschrieben und auf mögliche Auswirkungen auf das Prozessergebnis wird eingegangen. Basierend auf den Arbeiten von Ghiotti et al. ist die Reibung von der Deformation der Oberflächenunebenheiten abhängig [41]. Eine Zunahme der Anpresskraft zwischen den Kontaktpartnern führt hierbei zu einer stärkeren Einglättung der Werkstückoberflächen, wodurch eine geringere Anzahl von Oberflächenunebenheiten während der Relativbewegung elastisch oder plastisch verformt werden. Durch diesen Erklärungsansatz wird deutlich, dass zur Aufrechterhaltung der Relativbewegung der Reibungswiderstand abnimmt [41]. Nach Czichos sind diese Deformationsvorgänge neben einer Adhäsionskomponente, Scherung und Furchung Reibmechanismen zugeordnet, welche die Festkörperreibung charakterisieren [33]. Bowden und Tabor haben in ihren Arbeiten bezüglich der Adhäsionsneigung von Metallpaarungen einen Zusammenhang zwischen diesen Vorgängen hergestellt [42]. Nach ihren Erkenntnissen beruht die Reibung von metallischen Werkstoffen auf der Bildung von Mikrokontakten, welche während der Relativbewegung geschert werden. Ein weiterer Einflussfaktor ist durch das Eindringen der Rauheitsunebenheiten der härteren Oberflächen in den weicheren Gegenkörper gegeben, wodurch diese Kontaktfläche gefurcht wird. Folglich ist die Reibkraft aus der Summe der Einzelkräfte, welche aus der Scherung und Furchung resultieren, zusammengesetzt [42]. Darauf aufbauend leiten Bowden und Tabor ab, dass sich die lokalen Kontaktbereiche an den Rauheitsspitzen durch den Kontaktdruck plastisch verformen, wodurch die

wahre Kontaktfläche gebildet wird. Diesen Fließdruck setzen sie in Beziehung zur Scherkomponente, um unter Berücksichtigung der Adhäsionsneigung die Reibung metallischer Werkstoffpaarungen zu beschreiben [42]. Dieser Ansatz wird von Czichos aufgegriffen, indem die Adhäsionskomponente durch die Bildung neuer Mikrokontakte mit anschließender Entstehung von adhäsiven Bindungen zusammengefasst wird [33]. Von Czichos werden dabei die Annahmen getroffen, dass die Bildung neuer Metallbindungen von der Elektronenstruktur der Werkstoffe im Festkörperkontakt sowie der freien Oberflächenenergie abhängt [33]. Durch die Forschungsarbeit von Ghiotti et al. wird dieser Zusammenhang deutlich [41]. Um den Einfluss der Werkstücktemperatur auf das Reibverhalten von AlSi beschichteten Vergütungsstählen zu analysieren, führten sie Untersuchungen mithilfe eines Pin-on-Disk Tests bei jeweils 500 °C, 700 °C und 800 °C durch [41]. Die Versuchsdauer betrug für jede Werkstücktemperatur 12 Sekunden. Als Anpresskraft wählten sie 5 MPa mit einer Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe von 5 rpm. Sie wiesen nach, dass die Reibzahl mit zunehmender Temperatur abnimmt. Die Ursache führen Ghiotti et al. auf die Verringerung der Scherfestigkeit der AlSi Schicht bei erhöhten Werkstücktemperaturen zurück, wodurch die Oberflächenunebenheiten leichter verformt werden. Folglich wird der Reibwiderstand verringert [41]. Schwingenschlög et al. bestätigen dieses Ergebnis anhand ihrer Analysen zur Ermittlung des Einflusses verschiedener Prozessparameter auf das tribologische Verhalten unter Presshärtebedingungen [43]. Sie nutzten zu diesem Zweck eine Warmstreifenziehanlage unter Variation der Blechtemperatur zwischen 530 °C und 700 °C bei einer Relativgeschwindigkeit von 50 mm/s und 2,5 MPa Anpresskraft. Während die Reibung bei höheren Temperaturen tendenziell abnimmt, weisen sie eine Zunahme des Adhäsionsverschleißes nach. Sie erklären die Verringerung der Reibung durch eine Schmierwirkung von Aluminium der AlSi-Beschichtung, welche aufgrund der geringeren Scherfestigkeit während des Reibkontaktes zunehmend abgetragen wird. Durch die hohen adhäsiven Materialanhaftungen am Werkzeug ist eine Reduzierung der schmierenden Wirkung durch Aluminiumpartikel nach Erreichen eines gewissen Verschleißvolumens zu erwarten [43]. Zusammenfassend gilt, dass im Vergleich zu Umformprozessen bei Raumtemperatur die thermischen Beanspruchungen von hoher Relevanz für die tribologischen Prozessbedingungen beim Presshärten sind. Basierend auf den Erkenntnissen von Bowden und Tabor ist die Reibung von der Scherfestigkeit der Kontaktpartner abhängig [42]. In ihren Arbeiten führen Schwingenschlög et al. den Einfluss der resultierenden Temperatur in der Wirkfuge zwischen den Reibpartnern auf die Erkenntnisse von Bowden und Tabor zurück [44]. Eine Zunahme der Oberflächentemperatur

führt zur Verringerung der Scherfestigkeit der AlSi-Beschichtung. Folglich kommt es zu einer Beschädigung der AlSi-Schutzschicht des Blechwerkstoffes, weshalb Partikel in Bewegungsrichtung abrasiv abgetragen werden [44]. Während des Reibkontaktes werden metallische Bindungen zwischen Werkzeug und Werkstück gebildet, woraus ein hoher Reibwiderstand resultiert [45]. Die zu überwindende Reibkraft hängt dabei von der benötigten Kraft zur Scherung dieser lokalen Verbindungen ab [42].

Als weiteren Einflussparameter auf das tribologische Verhalten sind die gewählten Prozessparameter wie die Umformgeschwindigkeit zu nennen [45]. Nach Tian und Zhang ist bei niedrigen Relativgeschwindigkeiten infolge adhäsiver Wechselwirkung zwischen den Festkörpern eine Zunahme der Reibung zu erwarten [45]. Aufgrund der metallischen Gitterstruktur werden bei längeren Kontaktzeiten zwischen Werkstück und Werkzeug neue Metallbindungen zwischen den Oberflächen gebildet [45]. In der Folge haften Partikel der Beschichtung während der Gleitbewegung an der Werkzeugoberfläche an [46]. Um diese Bindungen während der Gleitbewegung wieder voneinander zu trennen, ist eine höhere Krafteinwirkung in Bewegungsrichtung erforderlich [45]. Vor dem Hintergrund der komplexen thermo-mechanischen Wechselwirkung, welche beim Presshärten in der Wirkfuge auftreten, ist daher eine gesamtheitliche Untersuchung dieser Zusammenhänge nötig [5]. In diesem Zusammenhang stellen Reibung und Verschleiß voneinander abhängige Vorgänge dar, welche sich gegenseitig beeinflussen. Aus diesem Grund werden beide Teilgebiete als Systemeigenschaften definiert und sind zur Analyse der auftretenden Werkzeugbeanspruchung einem tribologischen System zugeordnet [33]. Es wird hierbei zwischen zwei Gebieten unterschieden. Während bei einem geschlossenen System ein anhaltender oder wiederholender Kontakt zwischen den Reibpartnern besteht, erfolgt bei der offenen Variante ein einmaliger Kontakt [33]. Als tribologisches System wird im Allgemeinen die Kombination aus den in Kontakt stehenden Wirkflächen, das Zwischenmedium sowie das Umgebungsmedium definiert [33]. Abgeleitet aus diesem Zusammenhang stellen im Bereich des Presshärtens der Grundkörper die Werkzeugmatrize, der Gegenkörper, das umzuformende Blech und der Zwischenstoff Verschleißpartikel wie Oxid- oder AlSi-Schichten dar. Durch die komplexe Interaktion zwischen dem Reibungs- und Verschleißverhalten wird das Werkzeugversagen begünstigt. Um die Oberflächenbeanspruchung der Presshärtewerkzeuge zu reduzieren, ist eine gesamtheitliche Berücksichtigung der tribologischen Teilgebiete sowie des Einflusses der wesentlichen Prozessparameter auf das Einsatzverhalten erforderlich.

## 2.2 Werkzeugeinsatz und -versagen

Im Vergleich zur konventionellen Kaltumformung sind die Presshärte-  
werkzeuge erheblichen thermo-mechanischen Bedingungen ausgesetzt.  
Aufgrund der hohen Blechtemperaturen nach dem Austenitisieren wird die  
Wirkfläche des Werkzeuges erwärmt. Gleichzeitig ist durch den Kontakt  
mit der Werkzeugoberfläche eine Abschreckung der Halbzeuge in kürzes-  
ter Zeit erforderlich, um Martensit zu bilden. Erst durch diese Phasenum-  
wandlung werden die hohen mechanischen Festigkeiten von pressgehärte-  
ten Bauteilen erzielt. Vor diesem Hintergrund werden an Warmarbeits-  
stähle hohe Anforderung hinsichtlich Temperatur- und Verschleiß-  
beständigkeit gestellt.

### 2.2.1 Anforderungen an die Werkzeugwerkstoffe für den Einsatz im Presshärteprozess

Die Bearbeitung von Halbzeugen und Bauteilen stellt hinsichtlich des je-  
weiligen Herstellungsprozesses unterschiedliche Anforderungen an die  
Werkzeugoberflächen. Abhängig von den Prozessbedingungen werden un-  
terschiedliche Eigenschaften der verwendeten Materialien vorausgesetzt,  
weshalb in der Regel die Werkzeugstähle in Kaltarbeitsstähle, Warmar-  
beitsstähle, Kunststoff-Formenstähle sowie Schnellarbeitsstähle eingeteilt  
werden [35]. Beim Presshärten wird das tribologische Verhalten durch die  
thermo-mechanischen Wechselbeanspruchungen bestimmt sowie durch  
den direkten metallischen Kontakt zwischen Werkzeug und Blechmaterial.  
Durch das Einlegen der heißen Blechplatte und das anschließende  
schnelle Abschrecken des Bauteils sind Presshärte-  
werkzeuge höherem Wartungsaufwand als konventionelle Kaltumformwerkzeuge ausgesetzt  
[47]. Die primären Einflussfaktoren auf die Werkzeug- und somit Bauteil-  
qualität stellen der Dreikörperverschleiß oder die Verschleißerscheinun-  
gen infolge abrasiver sowie adhäsiver Vorgänge dar [48]. Folglich wird die  
Wahl der geeigneten Werkzeugmaterialien neben des Verschleißverhal-  
tens durch die Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Werkstoffe bestimmt  
[49]. Vor diesem Hintergrund kommen Warmarbeitsstähle für den Press-  
härteprozess zum Einsatz. In der Regel wird diese Stahlgüte für Umform-  
werkzeuge eingesetzt, sobald die Prozesstemperaturen oberhalb von  
200 °C liegen [50]. Die verwendeten Materialien sind durch ihre hohe  
Warmfestigkeit, Thermoschockbeständigkeit sowie Anlassbeständigkeit  
ausgezeichnet [50]. Zusätzlich stellt der Verschleißwiderstand ein wichti-  
ges Kriterium bei der Wahl der Warmarbeitsstähle für den industriellen  
Einsatz dar [49]. Diese Eigenschaften sind für den Einsatz im

Presshärteprozess vor dem Hintergrund der genannten thermo-mechanischen Beanspruchungen eine Voraussetzung, um eine möglichst hohe Werkzeugstandmenge zu erzielen [49]. Für Presshärtewerkzeuge werden industriell die Werkstoffe X37CrMoV5-1 (1.2343), X40CrMoV5-1 (1.2344), und X38CrMoV5-3 (1.2367) verwendet, welche über einen Kohlenstoffanteil von circa 0,3-0,4 % verfügen [51]. Durch ihre hohe Anlassbeständigkeit sind diese Stahlsorten für den Einsatz von Fertigungsprozessen geeignet, bei welchem höhere Druckberührzeiten und somit zunehmende thermische Werkzeugbeanspruchungen auftreten [34]. Während der Kohlenstoffgehalt einen entscheidenden Einfluss auf die Austenitbildung sowie die Bildung von Martensit und somit Härte ausübt, sorgt der Chromanteil infolge von Karbidbildung zu einer Steigerung der Härte [52]. Die Anteile an Molybdän, Wolfram und Vanadium steigern die Warmfestigkeit, die Temperaturwechselbeständigkeit sowie den Warmverschleißwiderstand [34]. Zusammenfassend gilt, dass an Presshärtewerkzeuge hohe Anforderungen hinsichtlich einer hohen Druckbeständigkeit, einer hohen Wärmeleitfähigkeit und einer ausreichenden Verschleißfestigkeit gestellt werden. Die Stahlgüte X38CrMoV5-3 verfügt über diese Voraussetzungen sowie über eine hohe Zähigkeit und Zerspanbarkeit [53]. Im Detail sind für die Wahl des Warmarbeitsstahls eine hohe Verschleißfestigkeit bei erhöhten Temperaturen, thermische Beständigkeit sowie eine hohe Wärmeleitfähigkeit zu nennen [54]. Im Vergleich zu den anderen Werkstoffzusammensetzungen ist der CrMoV-Stahl X38CrMoV5-3 durch eine höhere Warmverschleißfestigkeit gekennzeichnet, weshalb sich dieser Werkzeugstahl für den Einsatz im Presshärteprozess etabliert hat [55]. Durch die ansteigenden Anforderungen an die Bauteilqualität wird in der Industrie eine geringe Ausfallwahrscheinlichkeit der Umformwerkzeuge infolge eines Oberflächenverschleißes vorausgesetzt. Vor diesem Hintergrund werden neue Werkstoffzusammensetzungen entwickelt, um diesen Ansprüchen gerecht zu werden [56]. Als Sonderwerkstoff gewinnt zunehmend WP7V an Bedeutung, da dieser über eine tendenziell geringere Verschleißneigung verfügt [56]. Im Vergleich zu X38CrMoV5-3 sind in diesem Werkzeugstahl ein höherer Gehalt an Kohlenstoff, Vanadium und Chrom und ein geringerer Molybdänanteil vorhanden [57]. Die beschriebenen Warmarbeitsstähle sind durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit gekennzeichnet [34] [57]. Ein Wärmeaustausch zwischen Werkstück und Werkzeug, welcher im Presshärteprozess die Gefügeumwandlung in Martensit begünstigt, wird dadurch innerhalb kürzester Zeit realisiert.

### 2.2.2 Werkzeugversagen während des Presshärtens

Aus wirtschaftlicher Sicht wird eine hohe Werkzeugstandmenge angestrebt, um die Wartungs- und Instandhaltungskosten möglichst gering zu halten. Insbesondere ist eine Nachbearbeitung der Oberfläche von Umformwerkzeugen nötig, sobald die geforderte Bauteilqualität nicht mehr erreicht wird [58]. Das Werkzeugversagen wird durch die tribologische Beanspruchung verursacht und im Allgemeinen durch die elementaren Verschleißmechanismen, Oberflächenzerrüttung, tribochemische Reaktion, Abrasion sowie Adhäsion bestimmt [59]. Beim Presshärten tritt primär adhäsiver Verschleiß auf und sekundär Abrasion [60]. Die abrasiven Verschleißvorgänge sind dabei von Oxidpartikeln geprägt [61]. Zur Vollständigkeit werden in diesem Abschnitt ebenfalls die anderen Verschleißformen erläutert. Die Oberflächenzerrüttung stellt eine Folge zyklischer Beanspruchung von Werkzeugoberflächen dar [62]. Es kommt zu einer Rissbildung. Die Folge einer Ausbreitung dieser Mikrorisse ist eine Materialtrennung an den oberflächennahen Bereichen [62]. Unter tribochemischer Reaktion werden chemische Vorgänge der Kontaktpartner mit dem Zwischenstoff oder Umgebungsmedium verstanden [62].

Bei Prozesstemperaturen oberhalb von 800 °C ist ein Einsatz konventioneller Schmierstoffe beim Presshärteprozess nicht möglich, da ab circa 300 °C eine Zersetzung der Schmiersysteme einsetzt [60]. Folglich stehen das Werkzeug und das Werkstück in direktem metallischen Kontakt, wodurch die adhäsive Wechselwirkung zwischen Grund- und Gegenkörper begünstigt wird [63]. Durch die wirkenden Normalkräfte und Scherspannungen werden Oxidschichten durchbrochen, weshalb die Oberflächen in direktem Metallkontakt stehen [63]. Die Größe der Bindungskräfte ist in diesem Zusammenhang von der Art der Atombindung und von der Größe der Kontaktfläche abhängig [64]. Als Adhäsionsverschleiß werden stoffliche Wechselwirkungen in der Wirkfuge zwischen den in Kontakt stehenden Oberflächen bezeichnet. Auf atomarer und molekularer Ebene nehmen die Bindungskräfte zwischen grenzflächennahen Elektronen zu, wodurch neue Verbindungen entstehen und die Oberflächen lokal miteinander verschweißen [64]. Diese Wechselwirkung findet aufgrund ihrer Gitterstruktur insbesondere bei metallischen Werkstoffpaarungen statt [64]. Während der Bewegung werden diese Oberflächenbindungen voneinander getrennt, sodass im weiteren Verlauf ein Materialübertrag von einem Festkörper auf den Gegenkörper resultiert [64]. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Adhäsionsneigung metallischer Oberflächen nach dem sogenannten Jellium-Modell von der Dichte freier Elektronen im Grenzbereich der in Kontakt stehenden Flächen sowie der Elektronenstruktur abhängt [33]. Czichos

führt die Adhäsionsbindungen auf die Interaktion freier Elektronen im Grenzflächenbereich zurück. In seinem Modell nimmt die adhäsive Wechselwirkung mit steigender Anzahl dieser freibeweglichen Elementarteilchen zu [33]. Für ungleiches Metall gilt, dass die jeweiligen Festkörper über eine unterschiedliche Elektronenstruktur und ungleiche Elektronendichte verfügen. Czichos stellt einen Zusammenhang zwischen der Elektronenanzahl der metallischen Kontaktpartner, welche an der Grenzfläche auftreffen, und der für die Übertragung der Elektronen zur Verfügung stehenden Endzustände her. Folglich agiert ein Metallwerkstoff als Elektronendonator und sein Kontaktpartner als Elektronenakzeptor [33].

Pelcastre et al. führen die Adhäsionsneigung von metallischen Festkörpern beim Presshärteprozess auf zwei Ursachen zurück [65]. Im Falle einer hohen Oberflächenrauheit der Werkzeuge findet bei der Umformung ein Abtrag von AlSi-Partikeln vom Blech statt. Dieses Material wird in den Rauheitstälern der Werkzeugoberfläche konzentriert angelagert. Durch eine Verdichtung dieser Schichten nimmt der Adhäsionsverschleiß zu [65]. Für technische Oberflächen, welche eine geringe Rauheit aufweisen, wird primär Material durch adhäsiv wirkende Bindungskräfte übertragen. In diesem Zusammenhang nimmt die wahre Kontaktfläche abhängig von den lokal wirkenden Flächenpressungen zwischen dem Werkzeug und dem Blech zu, welches eine verstärkte Wechselwirkung zwischen den angrenzenden Oberflächen auf atomarer Ebene bewirkt und somit den Adhäsionsverschleiß begünstigt [65]. In einer weiteren Forschungsarbeit variieren Pelcastre et al. die Wärmebehandlungsparameter, um ihren Einfluss auf die Mikrostruktur der AlSi-Schicht und darauf aufbauend auf das adhäsive Verschleißverhalten nachzuweisen [66]. Die Versuchsproben wurden auf 700 °C und 900 °C erwärmt und anschließend wurde diese Temperatur mehrere Minuten gehalten, bevor die Verschleißcharakterisierung durchgeführt wurde. Eine Haltezeit von Null Minuten wurde als Referenz gewählt, während 4 min eine industrienähe Bedingung darstellt und innerhalb von 20 min eine Veränderung der strukturellen Zusammensetzung zu erwarten ist. Mithilfe eines Tribotesteraufbaus, welcher eine reziproke Bewegung ausübt, wurden die Untersuchungen bei 10 MPa und einer Frequenz von 12,5 Hz ausgeführt [66]. Der höchste adhäsive Verschleiß, welcher gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt ist, tritt bei einer Temperatur von 700 °C auf bei einer Wärmebehandlungszeit von 4 min auf. Eine lokal höhere Materialanhaftung wurde für die Versuchsproben bei einer Austenitisierungszeit von 0 min und 20 min nachgewiesen. Im Vergleich zu diesen Ergebnissen tritt ein geringerer adhäsiver Verschleiß für die Proben auf, welche bei 900 °C und 4 min sowie 20 min behandelt wurden [66].

Nach Pelcastre et al. sind für dieses Verschleißverhalten  $\text{Fe}_5\text{Al}_2$  und  $\text{FeAl}_2$  Phasen innerhalb der AlSi Schicht verantwortlich, die zunehmend bei  $900\text{ }^\circ\text{C}$  gebildet werden und somit für eine geringe Adhäsionsneigung sorgen [66]. Den Einfluss unterschiedlicher Austenitisierungsparameter auf die Verschleißentwicklung wurde durch Merklein et al. bestätigt [67]. Eine höhere Austenitisierungstemperatur führt hierbei zu einem verringerten Adhäsionsverschleiß und ist nach Merklein et al. auf vorhandene Al-Fe-Si Phasen in der AlSi-Beschichtung begründet [67]. Die tribologischen Untersuchungen wurden bei  $10\text{ MPa}$  Flächenpressung,  $10\text{ mm/s}$  Relativgeschwindigkeit und einer Werkzeugtemperatur von  $150\text{ }^\circ\text{C}$  ausgeführt [67].

Neben der Wärmebehandlung der Werkstoffe stellt die Werkstoffpaarung einen weiteren Einflussfaktor auf den resultierenden Oberflächenverschleiß beim Presshärten dar. Boher et al. verwendeten in ihren Untersuchungen die Werkzeugstähle  $60\text{CrMoTiV}_{16}$ ,  $50\text{CrMoV}_5$  und einen Warmarbeitsstahl, dessen Gefüge eine vollständige martensitische Struktur mit feinen kugelförmigen Karbiden sowie Wolfram und Silizium besitzt [9]. Für die Untersuchungen nutzten sie einen Tiefziehsimulator bei einer Anfangstemperatur der Blechwerkstoffe von  $875\text{ }^\circ\text{C}$  und einer Relativgeschwindigkeit von  $250\text{ mm/s}$ . Im Vergleich zu  $60\text{CrMoTiV}_{16}$  und  $50\text{CrMoV}_5$  tritt der geringste abrasive Verschleiß für die gewählte dritte Stahlgüte infolge der vorhandenen Karbide auf [9]. Die geringsten Materialanhaftungen infolge Adhäsion ermittelten sie für  $60\text{CrMoTiV}_{16}$ , welche jedoch zu einer höheren abrasiven Oberflächenbeschädigung neigt [9]. Ein unterschiedliches Verschleißverhalten von Werkzeugstählen wurde von Dessain et al. analysiert [68]. Zu diesem Zweck nutzten sie einen Tiefziehprozess-Simulator, bei welchem mithilfe einer Zieheinheit der erwärmte Blechsteifen entlang des Krümmungsradius eines Ziehwerkzeugs gezogen wird. Anhand ihrer Ergebnisse verfügen nitrierte Werkzeuge über eine geringere Verschleißneigung als konventionelle Oberflächen [68].

Zusätzlich zu den verwendeten Materialien führen die thermischen Prozessbedingungen sowie die gewählten Umformgeschwindigkeiten zu veränderten Verschleißerscheinungen. Tian et al. konnten bei einer konstanten Ziehgeschwindigkeit von  $50\text{ mm/s}$  eine starke Zunahme des Adhäsionsverschleißes ab einer Blechtemperatur von  $600\text{ }^\circ\text{C}$  anhand von Warmstreifenziehversuchen nachweisen [45]. Im Vergleich zu diesem Ergebnis resultiert eine weitere Zunahme von adhäsiven Materialanhaftungen bei einer Temperatur von  $700\text{ }^\circ\text{C}$ , während die geringsten Verschleißerscheinungen bei  $500\text{ }^\circ\text{C}$  auftraten [45]. Die Autoren führen diesen Zusammenhang auf die geringe Scherfestigkeit der AlSi-Schicht zurück, welche ab  $600\text{ }^\circ\text{C}$  vorhanden ist [45]. Das Verschleißverhalten hängt zusätzlich von

der Blechtemperatur ab. In diesem Zusammenhang führt nach Hermandes et al. eine zunehmende Werkstücktemperatur zu höherem adhäsiven Verschleiß am Werkzeug [69].

Neben adhäsiven Verschleiß tritt als sekundärer Verschleißmechanismus Abrasion auf, welcher durch Zwei- oder Dreikörperverschleiß in Erscheinung tritt. Diese Oberflächenbeschädigung tritt insbesondere nach einer hohen Anzahl von Umformzyklen auf. Im industriellen Einsatz sind die Presshärtewerkzeuge mehreren tausend Umformvorgängen ausgesetzt, wodurch abrasiver Verschleiß zunehmend begünstigt wird [70]. In diesem Zusammenhang untersuchten Veneman et al. die Reib- und Verschleißmechanismen unter Presshärtebedingungen, um die komplexe Interaktion dieser Vorgänge zu beschreiben [48]. Ein Blechstreifen wurde zunächst in einem Rollenherdofen erwärmt und anschließend in einem zweiseitigen Warmstreifenziehversuch bei 700 °C Blechtemperatur, 5 MPa Flächenpressung und 100 mm/s Ziehgeschwindigkeit analysiert. Durch die Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) konnten sie einen Materialübertrag sowie Riefen jeweils auf der Werkzeug- und Blechoberfläche nachweisen. Sie führen diese Verschleißformen auf eine Überlagerung von abrasiven und adhäsiven Vorgängen zurück, indem verdichtete Materialanlagerungen am Werkzeug infolge der Relativbewegung herausbrechen und diese Partikel Abrasion begünstigen [48]. Als weiteren Verschleißmechanismus wiesen sie reinen Adhäsionsverschleiß und einen abrasiven Materialabtrag nach, welcher durch in Riefen eingebettete Partikel verursacht wurde [48]. Abrasionsverschleiß tritt auf, sobald Rauheitsspitzen des härteren Kontaktpartners oder harte Partikel in den beanspruchten Festkörper eindringen. Aufgrund der geringeren Oberflächenhärte des Gegenkörpers wird Material während der Relativbewegung abgetrennt [70].

Eine mögliche Ursache für abrasiven Verschleiß beim Presshärten stellt der Abrieb der Werkzeugoberfläche durch harte Oxidpartikel dar [71]. Es wird folglich ein Dreikörperverschleiß hervorgerufen und die Werkzeugoberfläche infolge von tiefen Riefen beschädigt [71]. Zudem werden aufgrund der komplexen thermo-mechanischen Wechselwirkungen in der Wirkfuge adhäsiver und abrasiver Verschleiß überlagert. Während der Relativbewegung wird bereits anhaftendes Material an der Oberfläche geschert, wodurch Verschleißpartikel aus der Kontaktfläche herausgebrochen werden [72]. Unter Anwendung der Rasterelektronenmikroskopie wies Pujante Bereiche nach, in denen Materialanhaftungen während der Reibbewegung aus der Werkzeugoberfläche herausgebrochen werden [72].

Im industriellen Einsatz beeinflussen die auftretenden Verschleißvorgänge erheblich die Werkzeugstandmenge. Um ein frühzeitiges Versagen der Werkzeuge durch Oberflächenverschleiß zu verhindern, sind detaillierte Kenntnisse im Hinblick auf das Verschleißverhalten von zentraler Bedeutung. Durch eine quantitative Beschreibung des Oberflächenverschleißes an der Wirkfläche wird eine Evaluierung des oberflächenspezifischen Verschleißverhaltens möglich. Archard entwickelte ein Modell zur Bestimmung der Verschleißrate [73].

Das Modell nach Archard ist eine Methode, um in erster Näherung eine Bewertung des Verschleißverhaltens vorzunehmen [74]. Das adhäsive Verschleißvolumen  $W_{adv}$  wird hierbei in Abhängigkeit von der Normalkraft  $F_N$  in N, des Gleitweges  $s$  in m, der Härte  $H$  in Pa des weicheren Kontaktpartners sowie eines dimensionslosen Verschleißkoeffizienten  $k$  bestimmt [74].

$$W_{adv} = \frac{k * F_N * s}{H} \quad (2)$$

Allgemein wird diese Gleichung für die Bestimmung des Verschleißvolumens während der Gleitreibung verwendet [75]. Falls das Verschleißvolumen  $W_{abv}$  direkt proportional zur Normalkraft und zum Gleitweg ist, gilt folgendes vereinfachtes Modell mit  $k$  in der Einheit  $\frac{mm^3}{Nm}$  [75]:

$$W_{abv} = k_{ab} * F_N * s \quad (3)$$

In der mathematischen Darstellung der Gleichung (2) für die Beschreibung des adhäsiven Verschleißes ist der Koeffizient  $k$  eine dimensionslose Größe und hängt von einer Vielzahl von Einflussgrößen des jeweiligen tribologischen Systems sowie von den Materialparametern der Kontaktpartner ab [33]. Aus diesem Grund stellt diese Kenngröße keine Werkstoffkonstante dar. Zudem sind bedingt durch die komplexe Wechselwirkung der Reib- und Verschleißmechanismen in der Wirkfuge die Verschleißkenndaten experimentell zu ermitteln [33]. Die Anwendung des Modells nach Archard ist demnach für die Vorhersage des Oberflächenverschleißes nur in erster Näherung geeignet.

### **2.2.3 Beeinflussung des Einsatzverhaltens durch Oberflächenmodifizierung**

Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über verschiedene Verfahrenstechnologien gegeben, welche eine Anpassung der Werkzeugoberflächen an die prozessspezifischen Bedingungen ermöglichen. Es wird insbesondere auf Maßnahmen eingegangen, die Verschleißerscheinungen und somit ein frühzeitiges Werkzeugversagen verhindern. Die Eignung sowie eine Übertragbarkeit der beschriebenen industriellen Anwendungen für Presshärtewerkzeuge werden ebenfalls thematisiert.

Während des Presshärteprozesses stehen die Wirkflächen des Werkzeuges sowie des Werkstückes in direktem metallischem Kontakt, weshalb es infolge der thermo-mechanischen Wechselbeanspruchungen zu einer starken Wechselwirkung zwischen den Oberflächen kommt. Folglich wird der Oberflächenverschleiß begünstigt. Um die Werkzeugstandmenge zu erhöhen oder aus wirtschaftlicher Sicht die Wartungsintervalle zu verlängern, gilt es, diese Kontaktbedingungen zu vermeiden. Zu diesem Zweck besteht die Möglichkeit, Maßnahmen werkzeug- oder werkstückseitig sowie in der Zwischenfuge vorzunehmen. Im Bereich der Umformtechnik werden Schmierstoffe als Trennmittel eingesetzt, um die Reibung sowie den Verschleiß zwischen den Kontaktpartnern zu reduzieren und vor Korrosion zu schützen [76]. Die verschiedenen Schmiersysteme sind im Reibkontakt erheblichen Prozessbeanspruchungen ausgesetzt, welche einen signifikanten Einfluss auf deren Viskosität ausüben [77]. In diesem Zusammenhang sind beispielsweise die wirkenden Flächenpressungen sowie Scherspannungen und die thermischen Bedingungen zu nennen [77]. Konventionelle Schmiersysteme sind bis circa 300 °C temperaturstabil [60]. Jedoch liegen die üblichen Umformtemperaturen beim Presshärten bei circa 800 °C. Die thermischen Bedingungen haben einen erheblichen Einfluss auf die Viskosität und somit Tragfähigkeit des Schmiermittels, welche bei erhöhten Temperaturen sinken [78]. Um einen direkten Kontakt zwischen den metallischen Oberflächen zu verhindern, ist daher die Kenntnis hinsichtlich der Betriebstemperaturen der Schmiersysteme erforderlich [78]. Die Viskosität stellt hierbei eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung der Schmierung dar. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit üben die Prozesstemperaturen beim Presshärten einen entscheidenden Einfluss auf die Viskosität sowie auf die thermische Beständigkeit der eingesetzten Schmiersysteme aus, weshalb ein Einsatz für den Presshärteprozess bedingt durch die hohen Umformtemperaturen nicht möglich ist [10]. Dieser Zusammenhang verdeutlicht, dass alternative Methoden erforderlich sind. Um die Beständigkeit von Werkzeugen im industriellen Einsatz zu erhöhen, sind eine

Vielzahl an unterschiedlichen Oberflächenmodifikationen vorhanden. Die Anpassung der Oberflächeneigenschaften erfolgt entweder lokal oder global, wobei die Wirkflächen beschichtet oder strukturiert werden [79]. In der Regel stellen das Beschichten der Werkzeugoberflächen durch Aufbringen von Reaktionsschichten oder Auflageschichten etablierte Verfahren dar, um die Werkzeugoberflächen zu modifizieren [80]. Daneben kommen Legierungstechnologien durch Verwendung von Laserstrahllegieren zum Einsatz, um die Korrosionsbeständigkeit oder Verschleißfestigkeit sowie die Oberflächenhärte zu erhöhen [81]. In all diesen Verfahren lassen sich Materialien verarbeiten, welche die chemische Zusammensetzung der Grundwerkstoffe derart verändern, dass eine hohe Verschleißbeständigkeit bei gleichzeitiger hoher Beständigkeit gegenüber den thermischen Prozessbedingungen erreicht wird. Nachfolgend werden die jeweiligen Verfahren und die wesentlichen Forschungsarbeiten bezogen auf oberflächenmodifizierte Presshärtewerkzeuge näher beschrieben.

### ***Oberflächenmodifikation durch Laserverfahren***

Das Laserstrahllegieren und -dispergieren wird genutzt, um lokal eine Gefügemodifikation an den hochbeanspruchten Werkzeugbereichen vorzunehmen. Das Dispergieren ist dadurch gekennzeichnet, dass feine Partikel in die Bauteiloberflächen eingebracht werden, ohne hierbei vollständig aufzuschmelzen [82]. Im Vergleich zu dieser Technologie wird beim Laserlegieren das Zusatzmaterial im Schmelzbad aufgeschmolzen [82]. Um die Oberflächenmodifizierung vorzunehmen, finden zwei unterschiedliche Varianten Anwendung. Während bei dem zweistufigen Ablauf zunächst das Pulver auf die Werkzeugoberfläche aufgebracht und anschließend mit dem Laserstrahl aufgeschmolzen wird, erfolgt dieser Vorgang bei dem einstufigen Prozess simultan [83]. Vollertsen et al. nutzen das Laserlegieren und -dispergieren, um durch maßgeschneiderte Oberflächen das Reib- und Verschleißverhalten von Turbinenanwendungen und Mikroumformwerkzeugen gezielt zu beeinflussen [84]. Zu diesem Zweck wurden homogene oder gradierte Schichten erzeugt. Durch das Laserauftragsschweißen werden Pulver mit variierender Schichtdicke auf die Oberfläche aufgebracht und lokal aufgeschmolzen. Das Ziel ihrer Arbeit war es, den Stofffluss und die Reibung lokal zu verändern [84]. Ein weiterer Bestandteil ihrer Untersuchung lag auf der Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Aluminiumlegierungen durch Dispergieren von  $TiB_2$ -Partikeln in das Grundmaterial. Eine Herausforderung stellt bei dieser Vorgehensweise die homogene Verteilung des Zusatzmaterials während der Bearbeitung dar [84]. Eine Übertragung dieser Verfahren auf Presshärtewerkzeuge stellt eine geeignete Methode dar, um durch die Erzeugung von gradierten mechanischen

und chemischen Oberflächeneigenschaften gezielt die höchstbeanspruchten Werkzeugbereiche zu modifizieren. Konventionell werden pulverbasierte Lasertechniken eingesetzt, um durch Einbringen von Legierungselementen in die Wirkfläche des Substrates die tribologischen Eigenschaften gezielt zu beeinflussen [85]. Während des Legierungsprozesses ist eine hohe Durchmischung des Basismaterials mit dem Zusatzwerkstoff erforderlich, um durch Diffusionsvorgänge eine homogene Verteilung der eingebrachten Pulverpartikel zu erreichen [85]. Bonek et al. nutzen das Laserlegieren, um durch Aufbringen einer Pulverschicht aus Wolframkarbid den abrasiven Verschleißwiderstand des Warmarbeitsstahls X<sub>40</sub>CrMoV<sub>5-1</sub> zu erhöhen [86]. Zu diesem Zweck bringen sie eine Schichtdicke zwischen 0,06 mm bis 0,11 mm auf die Kontaktfläche auf. In ihrer Arbeit verwenden sie einen Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 808±5 nm und einer Ausgangsleistung von 2500 W. Durch das Laserumschmelzen und Legieren mit dem Hartmetall wurde ein feines Gefüge in der Bearbeitungszone erreicht. Zudem wiesen sie eine um 20-mal kleinere Korngröße des modifizierten Gefüges im Vergleich zum konventionellen Ausgangsmaterial nach [86]. Zur Erhöhung der Abriebfestigkeit wurde nach dem Einbringen der Wolframkarbide in die Werkzeugoberfläche eine Härte von 66,5 HRC erreicht [86]. Auf die Herausforderung, welche bei der Verwendung von Pulvern für das Laserauftragsschweißen vorhanden sind, geht Spira in seiner Arbeit ein [87]. Er konnte eine Inhomogenität der Partikelgrößen des Eisencarbids zwischen 50 bis 150 µm nachweisen, wodurch während der Verarbeitung Agglomerate gebildet werden können oder ein gleichmäßiger Pulverauftrag erschwert wird [87]. Im Falle von nicht vollständig aufgeschmolzenen Wolframpartikeln resultiert ein ungleichmäßiges Gefüge, welches beim Abkühlen zu Spannungen und somit zu einer Rissbildung im modifizierten Bereich führen kann [87]. Diesen Zusammenhang greifen ebenfalls Olakanmi et al. in ihren Arbeiten auf [88]. Nach ihren Erkenntnissen übt die Größe, die Verteilung sowie Struktur des Pulvers einen entscheidenden Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften nach dem Legieren aus, indem mikrostrukturelle Agglomeration, Schichtdelamination oder Porosität auftreten [88].

Vor diesem Hintergrund wurde von Hofmann et al. ein drahtbasiertes Laserstrahllegierungsverfahren entwickelt, um diese Anforderungen zu erfüllen [85]. Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojektes wurden im Rahmen dieser Arbeit grundlegende tribologische Untersuchungen an legierten Proben durchgeführt. Die Anlage besteht hierbei aus einem Laser, einer Scannereinheit zur Ablenkung des Laserstrahls, einer Drahtfördereinheit und einem beweglichen Schlitten zur Führung des

Substratmaterials [89]. Der Legierungsdraht wird mit einer konstanten Geschwindigkeit der Prozesszone zugeführt. Eine homogene Durchmischung zwischen Zusatzwerkstoff und dem Grundmaterial ist bei der dynamischen Laserstrahloszillation von der Oszillationsamplitude abhängig [89]. Der Linearbewegung des Schlittens, auf welchem das zu bearbeitende Werkstück aufgespannt ist, wird eine Kreisoszillation des Lasers überlagert. Während der Prozessdurchführung wird das Bauteil kontinuierlich unterhalb des Laserstrahls hinwegbewegt und gleichzeitig der zugeführte Draht sowie die Randzone des Grundmaterials aufgeschmolzen [89].

Die Anwendbarkeit dieser neuentwickelten Technologie wurde anhand von Untersuchungen zur Oberflächenmodifizierung des Sonderwerkstoffes WP7V von Hofmann et al. grundlegend analysiert [90]. Es wurde hierfür der Legierungsdraht NiMoCr90 von Alunox Schweißtechnik GmbH verwendet, welcher aufgrund seiner Eignung zur Erhöhung der Mikrohärtewahl gewählt wurde [90]. Über eine Zuführeinrichtung von DINSE G.m.b.H vom Typ FD 100 LS-WB erfolgte die Förderung des Zusatzmaterials. Zudem wird Argon als Schutzgas verwendet. Das Legieren erfolgt mit einem Yb:YAG Faserlaser, welcher über eine Ausgangsleistung von 1 kW und einer Wellenlänge von 1070 nm verfügt [90]. Die Laserstrahlbewegung wurde über eine galvanometrische Scanneroptik gesteuert, wodurch ein Spotdurchmesser von 40 µm realisiert wurde. Durch den Scanner wird eine zirkulierende Laserstrahlbewegung mit einer festen Oszillationsfrequenz von 50 Hz erzeugt [90]. Die einzelnen Legierungsspuren werden auf die Oberfläche aufgeschmolzen, indem das Substrat auf einen Schlitten mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit von 6 mm/s unterhalb der Laser- und Scannereinheit bewegt wird [90]. Während des Legierungsprozesses werden einzelne Legierungsspuren nebeneinander auf der Werkzeugoberfläche positioniert, um somit die gesamte Kontaktfläche zu modifizieren. Jedoch kühlt die aufgebrachte Spur ab und wird erneut erwärmt, sobald der angrenzende Bereich legiert wird. Es kommt hierbei zu Anlasseffekten in dieser Zone [90]. Um daher den Einfluss der Wärmeenergie zu ermitteln, welche durch den Laser in die Prozesszone eingebracht wird, wurde die Temperaturverteilung während der Versuchsdurchführung mit Thermoelementen aufgenommen [90]. Zudem wurden Härtemessungen und Gefügeanalysen durchgeführt. Ein Härteabfall zwischen zwei nebeneinander befindlichen Spuren wurde nachgewiesen, welcher durch das auftretende Anlassverhalten während des Legierungsprozesses begründet ist. Um diese Inhomogenität zu vermeiden, wurde basierend auf den Temperaturmessungen sowie mit numerischen Analysen der Einfluss der Wärmeinbringung durch den Laserstrahl auf die resultierende Gefügestruktur ermittelt [90]. In diesem

Zusammenhang wurde von Hofmann et al. nachgewiesen, dass eine Temperatur von circa 100 °C im bereits modifizierten Bereich während des Legierungsprozesses zur Aufrechterhaltung homogener Gefügeeigenschaften konstant gehalten werden muss [90]. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde diese Technologie weiterentwickelt, um eine maßgeschneiderte Werkzeugoberfläche zu realisieren [85]. Eine Übertragbarkeit zur Modifizierung von gekrümmten Matrizen wird dadurch ermöglicht. Durch Variation der Relativgeschwindigkeit zwischen Laser und Substrat wird der Anteil an aufgeschmolzenem Material variiert, wodurch lokal eine unterschiedliche Legierungskonzentration resultiert [85]. Für das Laserstrahllegieren sind vorzugsweise Übergangsmetalle zu verwenden. Durch die geringe Dichte an freibeweglichen Elektronen bei diesen Metallen ist davon auszugehen, dass im Grenzflächenbereich zwischen den Kontaktpartnern die wirkenden Bindungskräfte verringert werden und dadurch weniger neue Metallbindungen zwischen den Festkörpern entstehen. Folglich nehmen der Materialübertrag und somit der adhäsive Verschleiß ab. Die Wahl dieser Elemente beruht auf dem Modell der Adhäsionskomponente, welche von Czichos aufgestellt wurde. Als Grundlage für diesen Ansatz gilt, dass Metalle mit geringer Dichte an freien Elektronen über eine geringere Adhäsionsneigung verfügen [33].

### **Oberflächenbeschichten**

Eine etablierte Methode, den Werkzeugverschleiß zu verringern, stellen Verschleißschutzschichten dar. Im Allgemeinen werden hierbei zwei Hauptgruppen unterschieden. Während bei Reaktionsschichten die Legierungselemente durch Diffusion in den Basiswerkstoff eingebracht werden, erfolgt bei den sogenannten Auflageschichten ein Aufbringen der Beschichtung auf das Grundmaterial [80].

Zu den Reaktionsschichten zählen vor allem das Borieren, Vanadieren und Nitrieren [80]. Die Vorgehensweise bei diesen Verfahrenstechniken beruht auf dem Anreichern der Randschicht des Substrats mit Bor, Vanadium oder Stickstoff, indem die zu modifizierenden Bauteile einer thermo-chemischen Behandlung unterzogen werden. Das Plasmanitrieren findet Anwendung, um die Verschleißbeständigkeit von Werkzeugoberflächen zu erhöhen. In diesem Zusammenhang untersuchten Kondratiuk et al. das Verschleißverhalten von plasmanitrierten und beschichteten Ziehringen in Napfzugversuchen unter Presshärtebedingungen bei einer Umformgeschwindigkeit von 120 mm/s [37]. Als Austenitisierungstemperatur des 22MnB5 wurden 880 °C und 920 °C bei 360 s Verweildauer im Ofen gewählt. Der Ziehringdurchmesser betrug 64 mm mit einem Krümmungs-

radius von 10 mm. Eine Verschleißcharakterisierung wurde nach jeweils 150 Abpressungen durchgeführt [37]. Sie wiesen anhand ihrer Untersuchungen nach, dass plasmanitrierte Oberflächen zu erhöhtem abrasiven Materialabtrag neigen. Diese Oberflächenbeschädigung ist durch die geringe Anbindung der Nitrierschicht zum Substratwerkstoff begründet [71]. Zudem verfügten diese Matrizenoberflächen nicht über einen ausreichenden adhäsiven Verschleißschutz [37]. Jedoch wurden die Oberflächenmodifizierungen auf den Kaltarbeitsstahl X155CrVMo12-1 abgeschieden und analysiert, weshalb eine Bewertung hinsichtlich des Verschleißverhaltens für den Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-3 nicht möglich ist [37]. Nach derzeitigem Stand der Technik erhöhen nitrierte Oberflächen nicht signifikant die Verschleißbeständigkeit von Presshärtewerkzeugen. Jedoch ist es möglich, durch eine Kombination eines vorgeschalteten Nitrierprozesses mit anschließender Oberflächenbeschichtung eine Steigerung der Stützfähigkeit des abgeschiedenen Schichtsystems zu realisieren [91].

Das Oberflächenmodifizieren mithilfe von Auflageschichten wird bereits seit Jahrzehnten zum Schutz gegen Oberflächenverschleiß in der spanenden Metallbearbeitung eingesetzt [92]. Bei diesem Herstellungsverfahren sind die Werkzeuge hohen Schnittgeschwindigkeiten und -kräften ausgesetzt, wodurch die Verschleißentwicklung infolge der hohen tribologischen und thermischen Beanspruchung begünstigt wird [93]. Durch das Aufbringen einer Verschleißschutzbeschichtung, welche zwischen Werkzeug und Werkstück als Trennschicht fungiert, werden die chemischen und mechanischen Materialeigenschaften den jeweiligen Prozessanforderungen angepasst. Vor diesem Hintergrund stellen Beschichtungsverfahren geeignete Methoden zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit von Presshärtewerkzeugen dar. In der Regel erfolgt das Erzeugen der Werkzeugbeschichtung aus dem gasförmigen Zustand, wodurch Schichtdicken von wenigen Mikrometern entstehen. Aus diesem Grund wird dieses Verfahren auch als Dünnschichttechnologie bezeichnet [92]. Durch einen vorgeschalteten Plasmanitrierprozess wird in vielen Anwendungen die Stützfähigkeit des Schichtsystems nach dem Abscheiden realisiert [91]. Es werden hierbei zwei wesentliche Verfahren unterschieden. Infolge einer chemischen Reaktion zwischen Substratwerkstoff und dem Beschichtungsmaterial wird bei der sogenannten chemischen Gasphasenabscheidung (CVD) die Beschichtung auf die Oberfläche abgeschieden. Im Vergleich zu diesem Verfahren werden bei der physikalischen Gasphasenabscheidung (PVD) durch Kondensation des verdampften Materials die Schichten hergestellt [94]. Während bei der CVD-Technologie die Ausgangselemente bereits in einem gasförmigen Zustand der Reaktionskammer zugeführt werden, erfolgt beim PVD-

Verfahren zunächst ein Verdampfen der Schichtwerkstoffe beispielsweise durch den Beschuss mit Elektronen- oder Ionenstrahlen [94]. Ein weiterer wesentlicher Unterschied beider Verfahren besteht bei den Prozesstemperaturen, unter welchen der Abscheidvorgang durchgeführt wird. Um die chemische Reaktion und die notwendige Haftfestigkeit des Schichtsystems bei der CVD-Methode zu erzielen, sind Temperaturen von 1000 °C und darüber notwendig. Aus diesem Grund ist dieses Verfahren lediglich für temperaturbeständige Werkstoffe geeignet [92]. Im Vergleich hierzu wird die PVD-Beschichtung bei einem wesentlich geringeren Temperaturbereich bis maximal 600 °C abgeschieden [92]. Im Vergleich zu PVD sind CVD-Schichten für Presshärtewerkzeuge aufgrund der hohen thermischen Beanspruchung des Basismaterials nicht geeignet, da die maximalen Anlasstemperaturen zur Erreichung der notwendigen Oberflächenhärten von 52 HRC bis 54 HRC [95] der Werkzeuge zwischen 500 °C bis 600 °C betragen [96]. Pelcastre et al. setzen in ihrer Forschungsarbeit Beschichtungen aus AlCrN, TiAlN und DLC ein, um den adhäsiven Verschleiß von Presshärtewerkzeugen zu verringern [65]. Die Schichtdicken liegen nach dem Abscheiden auf die Werkzeugoberfläche für AlCrN bei 3 µm, für TiAlN bei 10 µm und für DLC bei 2 µm. Für ihre experimentelle Untersuchung verwenden sie einen reziproken Tribotesteraufbau. Als Versuchsparameter wählen sie eine Blechtemperatur von 800 °C, eine Flächenpressung von 10 MPa und eine Frequenz von 12,5 Hz [65]. Basierend auf ihren Ergebnissen tritt an den modifizierten Proben mit den Beschichtungen AlCrN und TiAlN starker Adhäsionsverschleiß auf. Die DLC-Schichten bieten ebenfalls keinen vollständigen Verschleißschutz [65]. Im Vergleich zu den unbeschichteten Referenzflächen wurde sogar eine tendenziell höhere Verschleißneigung für die beschichteten Varianten nachgewiesen [65]. Pelcastre et al. erklären dies durch eine höhere chemische Affinität, welche zwischen den Werkzeugbeschichtungen und der AlSi-Schicht besteht [65]. An Untersuchungen mit einem B-Säulenwerkzeug konnten hingegen Vilaseca et al. eine Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von PVD-beschichteten Oberflächen nachweisen [97]. Zu diesem Zweck wurde der Stempel mit AlCrN beschichtet, während die Matrize nach einem Plasmanitrierprozess mit CrN modifiziert wurde. Die Bleche wurden bei 900 °C für 7 min austenitisiert. Unabhängig von der Oberflächenmodifizierung tritt an der konventionellen Werkzeugoberfläche sowie an den modifizierten Varianten Adhäsionsverschleiß auf, welcher von Vilaseca et al. in Form von rauen Schichtanlagerungen und lokalen Anhaftungen nachgewiesen wurde [97]. Im Vergleich zum unbeschichteten Werkzeug ist der Adhäsionsverschleiß unter Verwendung einer Beschichtung weniger stark ausgeprägt. Zusätzlich konnten Vilaseca et al. keine Beschädigung der Schichtsysteme in Form

von Abplatzungen oder Rissen feststellen [97]. Eine Erhöhung der Verschleißbeständigkeit durch Einsatz von Werkzeugbeschichtungen wiesen auch Schwingenschlögl et al. in ihren Untersuchungen nach [98]. Sie verwendeten eine CRCn- und eine AlCrTiN- Schicht, deren Auswirkungen auf das tribologische Verhalten in Warmstreifenziehversuchen bei einer Blechtemperatur von 600 °C, einer Flächenpressung von 5 MPa und einer Ziehgeschwindigkeit von 50 mm/s analysiert wurden [98]. Anhand von Topografieaufnahmen wurde eine deutlich geringere Materialanhaftung für die Oberflächenmodifizierungen nachgewiesen, welche zudem lediglich lokal auf der Reibbackenfläche vorhanden sind [98]. Vilaseca et al. führen dieses Verhalten auf eine Verringerung der chemischen Affinität zwischen den metallischen Kontaktpartnern zurück [98]. Das Verschleißverhalten von Monolagen aus AlCrN wurde in Abhängigkeit der Austenitisierungsparameter von Wieland untersucht [99]. Zu diesem Zweck wurde die Verschleißcharakterisierung in Tribotesterversuchen bei 10 MPa und 10 mm/s durchgeführt. Die Austenitisierungstemperatur lag bei 880 °C sowie 930 °C, während die Verweildauer im Ofen zwischen 120 bis 600 s variiert wurde [99]. Anhand der ermittelten Verschleißhöhen wurde eine Reduzierung des Adhäsionsverschleißes für modifizierte sowie unmodifizierte Proben nachgewiesen [99]. Wieland erklärt dieses Verschleißverhalten durch einen zunehmenden Eisenanteil in der AlSi-Schicht infolge der Diffusionsvorgänge bei der Wärmebehandlung, welcher zu einer geringen adhäsiven Verschleißneigung führt [99].

## **2.3 Verfahren zur Untersuchung und Auswertung des Einsatzverhaltens von Presshärtewerkzeugen**

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die verschiedenen experimentellen Untersuchungsmethoden gegeben, die nach aktuellem Stand bezüglich der Reib- und Verschleißcharakterisierung angewandt werden. In den Forschungsarbeiten wird zwischen Pin-on-Disk Tests sowie Warmstreifenziehversuchen unterschieden. Zudem werden verschiedene Messverfahren zur Ermittlung der Oberflächenbeschaffenheit verwendet. Insbesondere kommen zu diesem Zweck mikroskopische Analysemethoden zum Einsatz.

### **2.3.1 Methoden zur Untersuchung des Reib- und Verschleißverhaltens von Presshärtewerkzeugen**

Um das Verschleißverhalten in Laboruntersuchungen zu analysieren, wurden eine Vielzahl an Prüfverfahren entwickelt. Unabhängig vom verwendeten Prüfaufbau werden die eingesetzten die Messeinrichtungen als

Tribometer bezeichnet [33]. Gängige Aufbauten bestehen aus einer rotierenden Scheibe, welche das Werkstück darstellen, sowie einem stationären Stempel oder Pin. Basierend auf dieser Methode legten Ghiotti et al. für die Verschleißcharakterisierung von Bor-Manganstahl einen geeigneten Prüfaufbau aus. Während der Versuchsdurchführung steht der Pin für eine festgelegte Anzahl an Umdrehungen mit einer definierten Anpresskraft mit dem Prüfkörper in direktem Kontakt [100]. Die Normal- sowie Reibkräfte werden über Kraftmessdosen aufgenommen. Daher ist neben der Verschleißcharakterisierung die Ermittlung der Reibzahl ebenfalls möglich. Im Vergleich zu Untersuchungen bei Raumtemperatur verfügt der Versuchsaufbau für die Ermittlung des Werkzeugverschleißes bei erhöhten Temperaturen über eine Heizkammer, in welcher die Scheibe zunächst auf die definierte Temperatur erwärmt wird [100]. Anschließend wird der Pin mit der erforderlichen Anpresskraft auf die Scheibe positioniert. Nach einer gewissen Anzahl an Umdrehungen wird der Stempel aus der Versuchskammer herausgefahren und mit einer Luftdüse gekühlt [100]. Eine Überwachung der Stempeltemperatur ist über Thermolemente möglich, welche durch Bohrungen in den Körper eingebracht werden [100].

Eine weitere Möglichkeit das tribologische Verhalten von Presshärtewerkzeugen zu ermitteln, stellen reziproke Reibungs- und Verschleißprüfgeräte dar, welche durch Pelcastre und Hardell et al. genutzt werden [101]. Während der Experimente schwingt ein oberes Werkzeug gegen eine feststehende Scheibe. Diese Bewegung wird durch einen elektromagnetischen Antrieb gesteuert [101]. Eine eingebaute Kartuschenheizung des unteren Probenhalters ermöglicht eine Erwärmung der Scheibe auf die erforderliche Austenitisierungstemperatur von 900 °C [101]. Die Temperaturen, die Schwinganzahl des Werkstücks, die aufgebrachte Normalkraft sowie die Frequenz der oszillierenden Bewegung werden während des Versuchs gemessen [101]. Eine Weiterentwicklung zu diesen Versuchsaufbauten stellt der Prüfstand von Wieland et al. dar [99]. Bei diesem Prüfstand wird eine translatorische Bewegung des Pins entlang des Blechs realisiert. Zu diesem Zweck wird der Stempel in eine Einspannung befestigt, welche an einem Vierachsroboter angebracht ist. Die Relativbewegung dieser Werkzeugaufnahme wird durch einen Parallelkinematik-Roboter vom Typ Tricept T605 (Co. PKMtricept) eingeleitet [99]. Während die Normalkraft über einen Hydraulikzylinder aufgebracht wird, erfolgt eine Erwärmung des Pins sowie des Blechstreifens über Heizelemente [99]. Eine Kühlung der Kontaktfläche des Stempels ist ebenfalls nach jeder Verschleißspur realisierbar [81]. Basierend auf den Arbeiten von Wieland et al. wurde die

Verschleißcharakterisierung mit diesem Prüfstand lediglich bei geringer Relativgeschwindigkeit von 10 mm/s durchgeführt [99].

Für die Charakterisierung des Reibverhaltens werden konventionell Warmstreifenziehmaschinen eingesetzt [102]. Von Deng et al. wird eine Versuchsanlage genutzt, in welcher das Blech vertikal zwischen zwei Reibbacken eingespannt wird. Die Tangentialkraft wird über DMS-Kraftaufnehmer gemessen [103]. In der Regel wird bei diesen Testaufbauten ein Blech in einem Ofen austenitisiert und anschließend auf einem beweglichen Schlitten der Anlage positioniert sowie in einer Spannvorrichtung fixiert. Während der Versuche wird eine obere Reibbacke mit der erforderlichen Anpresskraft mit dem erwärmten Werkstück in Kontakt gebracht. Die Kraftregelung erfolgt hierbei über einen Hydraulikzylinder [104]. Anschließend wird der Blechwerkstoff unter die Backe gezogen. Zu diesem Zweck besteht die Möglichkeit die Geschwindigkeit über eine Servomotor-Steuerung einzustellen [105]. Jedoch kommen auch hydraulische Systeme zum Einsatz [40]. Zur Berechnung des Reibungskoeffizienten werden die Normal- und Reibungskräfte mit Kraftaufnehmern gemessen [40]. Im Vergleich zu den bereits beschriebenen Methoden wurde durch Schwingenschlögl et al. eine Prüfanlage entwickelt, welche sowohl einen einseitigen als auch einen zweiseitigen Streifenziehversuch mit beheizbarer Reibbacke ermöglicht [40]. Während bei der ersten Variante die Relativbewegung zwischen der Oberseite des Streifens und der Oberfläche der Reibbacke bei maximal 36 kN erfolgt, wird für die zweiseitige Methodik der Blechstreifen zwischen zwei Backen bei maximal 100 kN durchgezogen [40].

### 2.3.2 Analyseverfahren zur Oberflächen- und Verschleißcharakterisierung

Um eine Bewertung des Verschleißverhaltens vornehmen zu können, ist eine Charakterisierung der Kontaktflächen vor und nach dem Einsatz der Werkzeuge erforderlich. Zu diesem Zweck werden die Oberflächentopografien und Rauheiten mithilfe von Licht- oder Konfokalmikroskopen und taktilen Messmethoden wie dem Tastschnittverfahren ermittelt [106]. Im Vergleich zur Verwendung von Tastern ist es mit den optischen Verfahren möglich, verschleißfrei zu prüfen [106]. Die genannten Messverfahren hängen von verschiedenen Einflussfaktoren ab. Materialbedingt sind beispielsweise für die taktile Messung die Oberflächenhärte der Probe und für das berührungslose Verfahren die Dispersion zu nennen [107]. Zusätzlich sind gerätespezifische und umgebungsrelevante Einflüsse zu beachten [107].

Beim Presshärten ist es von Bedeutung, den primären Verschleißmechanismus zu ermitteln, welcher für die Oberflächenbeschädigung des Werkzeuges ursächlich ist. Erst durch dieses Kenntnis ist es möglich, Maßnahmen für einen Verschleißschutz von Presshärtewerkzeugen vorzunehmen. Ein weiterer wichtiger Bestandteil ist es, eine Aussage über die Verschleißmenge zu treffen, um daraus Möglichkeiten zur Erhöhung der Verschleißbeständigkeit abzuleiten. Ein qualitativer Nachweis über die auftretenden Verschleißformen ist über die Topografieaufnahmen gegeben, welche mittels Mikroskopmessungen aufgezeichnet werden. Um die Oberflächentopografien zu bestimmen, beruht das Messprinzip auf der konfokalen Dispersion zur Bestimmung der Höhendaten [108]. Anhand der Verschleißbilder werden in der Regel die Beschädigungsmechanismen nachgewiesen und daraus Rückschlüsse auf die unterschiedlichen Mechanismen gewonnen, welche den Oberflächenverschleiß hervorruft. Zu diesem Zweck ist eine Abschätzung der verschiedenen Verschleißmechanismen durch die von Czichos vorgenommene Einteilung möglich [33]. Während Abrasion tiefe Riefen oder Furchen im Material hervorruft, führt Adhäsion zu Materialanhaftungen infolge der metallischen Interaktion der Festkörper [33]. Adhäsiver Verschleiß ist beim Presshärten durch einen Werkstoffübertrag von AlSi-Partikeln zu erkennen, welcher entweder anhand von lokalen Erhöhungen oder gleichmäßig über die gesamte Kontaktfläche verteilt auftritt [5]. Zusätzlich werden während der Relativbewegungen die verschleißten Bereiche der Kontaktpartner aufgerissen [72]. Die Folge dieser Verschleißerscheinungen ist eine Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit, welche durch konventionelle Rauheitskenngrößen nachweisbar sind. Vor diesem Hintergrund werden nach derzeitigem Stand mikroskopische Messmethoden zur Verschleißcharakterisierung herangezogen.

Ghiotti et al. vergleichen die Topografieaufnahmen von verschlissenen Werkzeugpins, um das tribologische Verhalten des Warmarbeitsstahls 38CrMoV5-1 in Kontakt mit Zn- und AlSi-beschichteten Vergütungsstählen zu identifizieren [109]. Neben den Oberflächenaufnahmen stellten sie die Höhenprofile der verschiedenen Kontaktflächen gegenüber und bestimmten den arithmetischen Mittenrauwert  $S_a$  [109]. Mithilfe dieser Vorgehensweise wiesen sie einen höheren abrasiven Verschleiß an den Pin-Oberflächen nach, welche während der Untersuchungen in Kontakt mit der Zn-Schicht standen [109]. Sie waren ebenfalls in der Lage eine höhere Neigung zu adhäsivem Verschleiß bei geringer Werkstücktemperatur von 600 °C im Vergleich zu 800 °C zu bestimmen [109].

An die Oberflächencharakterisierung von Presshärtewerkzeugen wird die Anforderung gestellt, die abrasiven und adhäsiven Verschleißvorgänge zu

bestimmen. Zu diesem Zweck stehen verschiedene Rauheitskenngrößen zur Verfügung. Der arithmetische Mittenrauwert  $S_a$  wird nicht von einer Vorzugsrichtung beeinflusst, weshalb er in der Praxis angewendet wird. Ghiotti et al. nutzen  $S_a$ , um den Oberflächenverschleiß von Warmarbeitsstählen in Kontakt mit Zn und AlSi beschichteten Blechen nachzuweisen [109]. Zu diesem Zweck stellen sie die Messwerte nach mehreren Verschleißzyklen gegenüber. In Korrelation mit den Oberflächenaufnahmen ziehen sie Rückschlüsse auf das resultierende Verschleißverhalten.

Im Vergleich zu dieser Vorgehensweise nutzen Schwingenschlögl et al. das Höhenprofil, um den Einfluss des Adhäsionsverschleißes von Werkzeugstählen auf die Oberflächenbeschaffenheit abzuleiten [43]. Durch eine farbliche Darstellung der Kontaktflächen unter Angabe des Höhenprofils können sie Materialanhaftung von AlSi-Partikeln auf der Reibbackenoberfläche nach Durchführung von Warmstreifenziehversuchen nachweisen, welche verstärkt bei zunehmenden Werkstücktemperaturen in Erscheinung tritt [43]. Mithilfe der genannten Methodiken ist es nicht möglich, eine Aussage hinsichtlich der Verschleißmenge zu treffen und eine zahlenmäßige Beschreibung und eine vereinfachte Bewertung des Verschleißverhalten durchzuführen. Zudem kann mit dem arithmetischen Mittenrauwert  $S_a$  keine Unterscheidung zwischen Riefen und Spitzen des Rauheitsprofils vorgenommen werden, somit wird in der Regel trotz unterschiedlicher Oberflächenstruktur der gleiche Wert gemessen [110]. Folglich sind für eine Beurteilung des Rauheitsprofils zusätzliche Rauheitskenngrößen notwendig. Um eine Zuordnung der verschiedenen Materialtraganteile des Höhenprofils herzustellen, ist die sogenannte Abbott-Kurve geeignet [111]. Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Beschreibung der vertikalen Materialverteilung auf die Kernrautiefe  $S_k$ , die reduzierte Spitzenhöhe  $S_{pk}$  sowie die reduzierte Riefentiefe  $S_{vk}$  zurückgegriffen [86]. Die Kernrautiefe  $S_k$  wird hierbei auf das Rauheitskernprofil bezogen und somit der Traganteil des Kernbereichs des Höhenprofils bestimmt. Die reduzierte Spitzenhöhe  $S_{pk}$  gibt die Höhe der aus dem Kernprofil herausragenden Spitzen und die reduzierten Riefentiefe  $S_{vk}$  die herausragenden Riefen wieder [111].

Eine weitere Möglichkeit, den Oberflächenverschleiß zu analysieren, stellen Analysen mithilfe der Rasterelektronenmikroskopie dar. Die Energie-dispersive Röntgenspektroskopie (EDX) wird genutzt, um einen Materialübertrag von dem Blechwerkstoff auf die Werkzeugoberfläche nachzuweisen [112]. Es wird hierbei die chemische Elementzusammensetzung der Kontaktfläche gemessen. Die Atome in der Probenoberfläche werden mit einem Elektronenstrahl angeregt, sodass diese Röntgenstrahlen aussenden

[113]. Die für das jeweilige Element spezifische Energie wird über Detektoren gemessen und dadurch die chemische Zusammensetzung bestimmt. Bei der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) werden die verschiedenen Wellenlängen gesamtheitlich erfasst [113]. Im Vergleich zu diesem Verfahren wird bei der wellendispersiven Röntgenspektroskopie (WDX) die emittierten Strahlen nacheinander ermittelt [113], wodurch die Genauigkeit hinsichtlich der Materialanalytik erhöht wird. Im Bereich Presshärten werden mit dieser Vorgehensweise insbesondere anhaftende AlSi-Partikel ermittelt, indem die elementspezifischen Energien von Aluminium und Silizium gemessen werden [112]. Medea et al. nutzen in ihrer Arbeit die EDX-Analyse, um die Verschleißentwicklung an dem patentierten Stahl von Rovalma<sup>TM</sup> mit der Bezeichnung HTCS<sup>®</sup> zu untersuchen [112]. Die Ergebnisse aus den Messungen verwenden sie zum Nachweis von Materialanhaftungen, welche in Form von Aluminium, Silizium und Sauerstoff auf der Pin-Oberfläche detektiert werden [112].

Eine konventionelle Verschleißcharakterisierung erfolgt ebenfalls durch die Bestimmung der Verschleißrate in Pin-on-disk Tests [8]. Es wird hierbei das Gewicht des Pins vor und nach der Versuchsdurchführung ermittelt. Während ein Gewichtsverlust durch abrasiven Verschleiß verursacht wird, resultiert eine Zunahme des Bauteilgewichts tendenziell durch Materialanhaftungen infolge Adhäsionsverschleißes [8]. In diesem Zusammenhang berechnen Hardell und Prakash die Verschleißrate, welche während des Reibkontaktes am Pin sowie am Werkstück aus Tribotesterversuchen entsteht [8]. Sie nutzen diese Ergebnisse, um das Verschleißverhalten von unmodifizierten und plasmanitrierten Werkzeugstählen in Kontakt mit AlSi-beschichteten Blechwerkstoffen zu analysieren.

Für eine detaillierte Bewertung des Verschleißverhaltens ist eine Quantifizierung des Oberflächenverschleißes zu bevorzugen. Im Bereich der Mikroumformung wurde daher ein Auswertalgorithmus entwickelt, welcher die Berechnung des Verschleißvolumens ermöglicht [114]. Zudem wird mit diesem analytischen Verfahren eine Trennung der Verschleißmechanismen Abrasion und Adhäsion vorgenommen. Eine Voraussetzung für die Anwendung dieses Verfahrens ist es, dass nach dem Reibkontakt zwischen den Kontaktpartnern noch ein unverschlissener Bereich auf der Werkzeugoberfläche vorhanden ist. An dieser Referenzfläche wird das gemessene Höhenprofil ausgerichtet und eine sogenannte Nullebene definiert, ab welcher eine Trennung zwischen abrasiven und adhäsiven Verschleiß erfolgt. Zu diesem Zweck wird im ersten Schritt an der Ausgangsoberfläche der arithmetische Mittenrauwert  $R_a$  bestimmt. Anschließend wird eine kritische Verschleißgrenze als dreifacher Wert von  $R_a$  festgelegt [114]. Durch

eine zeilen- und spaltenweise Abrasterung mithilfe des Algorithmus werden die Bereiche oberhalb und unterhalb dieser Grenze ermittelt und das Verschleißvolumen berechnet. Im Falle eines positiven Wertes, welcher oberhalb der kritischen Verschleißgrenze liegt, wird der adhäsive Verschleiß bestimmt. Ein Ergebnis, welches unterhalb dieser Grenze liegt, wird hingegen als abrasiver Verschleiß bewertet [114]. Unabhängig von der verwendeten Vorgehensweise stellt die Oberflächencharakterisierung eine wichtige Voraussetzung für die Bewertung des Verschleißverhaltens dar. Zudem wird durch diese Evaluierung ermöglicht, funktionale Zusammenhänge zwischen den Oberflächeneigenschaften und resultierendem Einsatzverhalten abzuleiten. Erst durch diese Erkenntnisse ist eine Modifikation der Werkzeugoberflächen realisierbar, um die Verschleißbeständigkeit zu erhöhen.

## 2.4 Zusammenfassende Bewertung

Der Presshärteprozess stellt eine Verfahrenskombination aus einer Wärmebehandlung mit gleichzeitiger Formgebung der Bauteile dar. Durch die komplexe Interaktion der thermo-mechanischen Wechselbeanspruchung während des Fertigungsprozesses wird der Werkzeugverschleiß begünstigt. Ein Einsatz von Schmierstoffen zur Verringerung von Reibung und Verschleiß ist aufgrund der hohen Prozesstemperaturen nicht möglich. Schmiersysteme verfügen in der Regel nicht über eine ausreichende Temperaturstabilität, weshalb die Viskosität und somit die Schmierwirkung eingeschränkt werden. Folglich ist kein ausreichender Verschleißschutz gegeben.

Eine wesentliche Herausforderung beim direkten Presshärten stellt die Neigung zu adhäsivem Verschleiß dar, wodurch die Werkzeugstandmenge erheblich reduziert wird. Nach derzeitigem Stand der Technik und basierend auf der Literatur fehlt es an einer geeigneten Oberflächenbeschichtung für Presshärtewerkzeuge. Schmiermittel können nicht eingesetzt werden, weshalb alternative Oberflächenmodifikationen zur Erreichung eines Verschleißschutzes beim Presshärten erforderlich sind. Eine Alternative stellen Laserlegierungsverfahren zur Modifizierung der Werkzeugkontaktfläche dar. Pulverbasierte Legierungsverfahren werden zur Oberflächenmodifizierung von Werkzeugen für die Kaltumformung eingesetzt. Jedoch ist ein Einsatz von Pulver während des Legierungsprozesses gesundheitsgefährdend, weshalb eine drahtbasierte Variante entwickelt wurde und deren Übertragbarkeit auf Presshärtewerkzeuge zu untersuchen ist.

Während durch das Legieren das Zusatzmaterial in grenzflächennahe Oberflächenbereiche eingebracht wird, erfolgt beim Beschichten ein Aufbringen der Verschleißschutzschicht. PVD-Schichtsysteme weisen in der Regel eine hohe Temperaturbeständigkeit auf. Jedoch besteht infolge der thermischen Wechselbeanspruchung die Gefahr der Schichtabplatzung im Reibkontakt. Folglich ist ein Einsatz konventioneller Beschichtungen für den Presshärteprozess nicht möglich.

Um die Verschleißbeständigkeit von Presshärtewerkzeugen zu erhöhen, sind weiterentwickelte oder neuartige Oberflächenmodifikationen erforderlich. Eine Analyse hinsichtlich des Einflusses unterschiedlicher Legierungsbestandteile auf das Verschleißverhalten war bislang noch kein Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten. Zusätzlich fehlt es an Kenntnissen, welche Zusatzmaterialien die chemische Affinität zwischen den metallischen Kontaktpartnern und somit die Adhäsionsneigung reduzieren. Dieser Nachweis ist eine Voraussetzung, um einen neuartigen Verschleißschutz insbesondere für thermisch hochbeanspruchte Werkzeuge zu entwickeln. In diesem Zusammenhang sind zudem ein Vergleich und eine Bewertung unterschiedlicher Verfahrenstechnologien durchzuführen. Ein werkstückseitiger Einfluss im Hinblick auf eine variierende AlSi-Schichtdicke auf das resultierende Verschleißverhalten ist ebenfalls noch nicht ausreichend untersucht. Die Ausbildung dieser Schicht hängt von den Diffusionsvorgängen zwischen Eisen aus dem Grundmaterial mit Aluminium und Silizium während der Austenitisierung ab.

Für die Entwicklung einer neuartigen Oberflächenmodifizierung für Presshärtewerkzeuge ist eine Evaluierung des Verschleißverhaltens notwendig. Die vorhandenen Methoden aus dem Stand der Technik sind aktuell auf die Ermittlung der Oberflächentopografien und -rauheiten beschränkt und aus diesem Grund für eine vollständige Verschleißcharakterisierung nur bedingt geeignet. Eine Aussage hinsichtlich der Verschleißmenge, welche nach dem Einsatz resultiert, wird mit diesen Verfahren nicht bestimmt. Zusätzlich können die gemessenen Rauheitskennwerte stark abweichen, da beim Presshärten Adhäsion und Abrasion simultan auftreten. Durch die Materialanhaftungen am Werkzeug werden abrasiv verschlissene Kontaktbereiche überlagert, wodurch eine separate Charakterisierung beider Verschleißmechanismen anhand von Verschleißbildern und der Oberflächenrauheit nicht durchführbar ist.

Für die Bewertung unterschiedlicher Verschleißschutzschichten ist ein Auswerteverfahren notwendig, welches das Verschleißvolumen nach dem Einsatz der Werkzeuge bestimmt. Eine bekannte Methode aus dem Bereich

der Mikroumformung wird genutzt, um lokal verschlissene Oberflächen zu bewerten. Für die Anwendung dieses Analyseverfahrens ist es zwingend erforderlich als Referenz einen unverschlissenen Kontaktbereich zu wählen. Diese Methodik ist aufgrund des komplexen Verschleißverhaltens beim Presshärten nicht realisierbar. Für die Beschreibung des Werkzeugverschleißes ist daher ein Algorithmus zu entwickeln, welcher den Oberflächenverschleiß durch eine Vergleichsfunktion der Rauheitsprofile ermittelt.



### 3 Zielsetzung und Methodik

Um den Anforderungen nach neuen Leichtbaukonzepten gerecht zu werden, stellt das Presshärten ein etabliertes Verfahren zur Herstellung sicherheitsrelevanter Karosseriebauteile dar. Durch den metallischen Kontakt mit den AlSi-beschichteten Halbzeugen kommt es während des Umformprozesses zu Adhäsionsverschleiß an der Werkzeugoberfläche. Bedingt durch einen bislang fehlenden Verschleißschutz für Presshärtewerkzeuge sind zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit daher weiterentwickelte Oberflächentechnologien erforderlich.

Motiviert durch diesen Ansatz ist das übergeordnete Ziel dieser Arbeit, die Verschleißbeständigkeit von Presshärtewerkzeugen zu erhöhen. Zu diesem Zweck gilt es, den Einfluss verschiedener Legierungselemente und variierender Elementkonzentrationen auf das resultierende Verschleißverhalten abzuleiten. Erst durch diese Kenntnisse ist eine Entwicklung sowie gezielte Anpassung einer Oberflächenmodifikation für den Presshärteprozess möglich. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus auf den Einfluss verschiedener Hauptlegierungselemente und deren chemischer Konzentration im Grundmaterial nach dem Modifizieren liegen. Welche chemische Verbindung nach dem Oberflächenmodifizieren vorliegt, wird nicht Gegenstand dieser Arbeit sein.

Um den thermischen Prozessbedingungen beim Presshärten gerecht zu werden, sind neuartige Ansätze zur Erhöhung der Warmverschleißfestigkeit erforderlich. Sobald lediglich eine lokale Anpassung hochbeanspruchter Werkzeugbereiche oder Reparaturarbeiten gefordert sind, ist das Laserstrahllegieren ein innovativer Ansatz. Zudem lassen sich mit diesem Verfahren gradierte Oberflächeneigenschaften einstellen. Letzteres ist beim Beschichten nicht zuverlässig realisierbar, da eine vollständige Abschirmung bestimmter Werkzeugbereiche durch den Einsatz von Masken nicht gewährleistet ist. Jedoch bietet das Aufbringen eines Schichtsystems den Vorteil einer Modifizierung von großflächigen Kontaktflächen am Werkzeug. Zusätzlich ist das Oberflächenbeschichten für segmentierte Umformwerkzeuge geeignet. Im Vergleich zum Laserlegieren werden die PVD-Schichten gezielt durch Dotieren mit variierenden Elementen in ihrer chemischen Zusammensetzung verändert. Im Rahmen der Untersuchungen soll das Potential dieser beiden Technologien hinsichtlich der Erhöhung der Verschleißbeständigkeit erarbeitet werden.

Anhand der in Bild 1 dargestellten Vorgehensweise wird die grundlegende Untersuchung des Einsatzverhaltens modifizierter Presshärtewerkzeuge durchgeführt. Mithilfe der Versuchsergebnisse werden anschließend die Wirkzusammenhänge abgeleitet, um darauf aufbauend eine Bewertung des Verschleißverhaltens vorzunehmen.

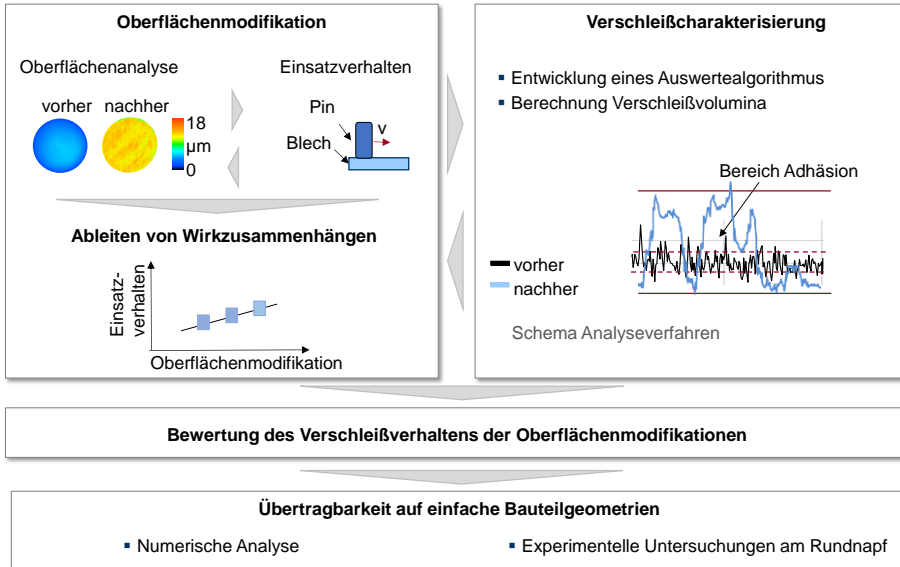


Bild 1: Methodisches Vorgehen

Für die vorliegende Arbeit werden die legierten und beschichteten Oberflächen hinsichtlich ihrer Oberflächentopografie und ihrer Legierungszusammensetzung durch EDX- sowie WDX- Analyse charakterisiert. Die Untersuchungen des Einsatzverhaltens sind in Reib- und Verschleißanalysen sowie in Abschreckversuchen gegliedert. Der Einfluss unterschiedlicher Legierungselemente auf die Verschleißfestigkeit wird unter Berücksichtigung variierender Prozessparameter bestimmt. Zusätzlich wird stichprobenartig die AlSi-Schichtdicke der Bleche erhöht, um eine werkstückseitige Auswirkung auf den Oberflächenverschleiß nachzuweisen. In Warmstreifenziehversuchen werden die tribologischen Prozessbedingungen durch Ermittlung der Reibzahlen geprüft, während als sekundärer Einflussfaktor in Abschreckversuchen das thermische Verhalten untersucht wird. Eine schnelle Abkühlung der Halbzeuge nach dem Modifizieren der Werkzeugoberflächen muss vorhanden sein, um einen Phasenübergang von Austenit zu Martensit und damit die hohe mechanische Festigkeit von warmumgeformten Bauteilen zu erzielen. Aus den Versuchsergebnissen werden Wirkzusammenhänge abgeleitet, um darauf aufbauend Rückschlüsse auf die Wechselwirkung der Oberflächenmodifikation auf das Einsatzverhalten zu

ziehen. Für die Bewertung und zur Gewährleistung einer vollständigen Verschleißcharakterisierung der eingesetzten Oberflächenmodifizierungen erfolgt eine Weiterentwicklung eines Auswertalgorithmus. Zu diesem Zweck werden über eine Vergleichsfunktion die Abweichungen der Höhenprofile zwischen der unverschlissenen und verschlissenen Kontaktfläche bestimmt. Anschließend wird das abrasive und adhäsive Verschleißvolumen berechnet. Das Verschleißverhalten wird durch Erstellen einer Bewertungsmatrix auf Basis der funktionalen Zusammenhänge sowie der Verschleißmenge bewertet. Basierend auf diesen Kenntnissen erfolgt eine Übertragbarkeit ausgewählter Oberflächenmodifizierungen auf einfache Werkzeuggeometrien. Neben einer numerischen Analyse, um die höchstbeanspruchten Werkzeugbereiche zu identifizieren, wird die Auswirkung der Oberflächenmodifizierung auf die Werkzeugstandmenge in Napfzugversuchen hergeleitet. Mithilfe der FE-Simulation wird die lokal auftretende Flächenpressung mit dem resultierenden Verschleißverhalten korreliert. Durch diese Vorgehensweise wird sichergestellt, dass insbesondere die höchstbeanspruchten Bereiche über einen ausreichenden Verschleißschutz verfügen.



## 4 Verwendete Werkstoffe, Parameter sowie Mess- und Prüfverfahren

Um eine Verschleißcharakterisierung der unterschiedlichen Oberflächenmodifikationen vorzunehmen, sind die Versuchsparameter den industriellen Bedingungen anzupassen. Erst dadurch ist eine Bewertung hinsichtlich der Verschleißbeständigkeit der untersuchten Verschleißschutzschichten für Presshärtewerkzeuge möglich. Zusätzlich werden die für das Presshärten konventionellen Werkstoffe eingesetzt. Die Werkzeugoberflächen werden durch Legieren oder Beschichten bearbeitet, um die chemische Affinität gegenüber metallischer Adhäsion zu verringern.

### 4.1 Werkzeug- und Werkstückwerkstoffe

Aufgrund der hohen thermo-mechanischen Wechselbeanspruchung, welche beim Presshärten auftritt, ist eine hohe Temperaturfestigkeit und Zähigkeit der Werkzeuge erforderlich. Im Vergleich zu Kaltarbeitsstählen werden Warmarbeitsstähle bei Prozesstemperaturen oberhalb von 200 °C eingesetzt [115]. Im Anlieferungszustand verfügen die Oberflächen über eine warmgewalzte, geschmiedete oder bearbeitete Güte [115]. Zusätzlich weisen CrMoV-Stähle eine hohe Warmfestigkeit auf. Aus diesem Grund kommen diese Stahlwerkstoffe in der Regel für Fertigungsprozesse zum Einsatz, welche hohen thermischen Beanspruchungen ausgesetzt sind [34]. Für das Presshärten ist aufgrund seiner hervorragenden Thermoschockfestigkeit insbesondere der Werkzeugstahl X38CrMoV5-3 geeignet [55]. Eine Alternative zu X38CrMoV5-3 stellt der Sonderwerkstoff WP7V dar, welcher speziell für das Presshärten entwickelt wurde, um die Verschleißbeständigkeit weiter zu erhöhen [49]. Vor diesem Hintergrund werden die Werkzeugstähle X38CrMoV5-3 und WP7V für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit als Werkzeugmaterialien gewählt. Zusätzlich soll die Übertragbarkeit der Oberflächenmodifizierung auf weitere Stahlsorten analysiert werden. In diesem Zusammenhang wird primär WP7V für den Laserstrahllegierungsprozess genutzt, da dieser Sonderwerkstoff insbesondere mit Chrom hochlegiert ist. Basierend auf den Arbeiten von Zum Gahr nimmt bei einer Zunahme des Chromgehaltes im Eisenwerkstoff die Adhäsionsneigung mit Aluminiumoxid zu [116]. Vor diesem Hintergrund ist zu überprüfen, welchen Einfluss eine weitere Steigerung des Chromanteils im Werkstoff auf die Verschleißbeständigkeit ausübt. Zusätzlich sind die Konzentrationsbereiche zu identifizieren, in welchen eine Steigerung der

Verschleißfestigkeit erzielt wird. Es ist sicherzustellen, dass eine Variation der chemischen Zusammensetzung durch das Legieren von bereits hochlegierten Stählen zuverlässig realisierbar ist. Die typischen Warmarbeitsstähle für Presshärtewerkzeuge verfügen materialbedingt über eine Härte von circa  $54 + 2$  HRC [49], weshalb das verwendete Probenmaterial ebenfalls mit dieser Oberflächenhärte eingesetzt wird. Dadurch wird sichergestellt, dass die Versuchsproben den Presshärtebedingungen entsprechen.

Durch das Beschichten werden auf die Werkzeugoberflächen Verschleißschutzschichten aufgebracht. Neben konventionellen PVD-Schichtsystemen wird primär der Ti- sowie Cr-Gehalt variiert, um deren Einfluss auf das Verschleißverhalten abzuleiten. Hartstoffschichten werden nach derzeitigem Stand als Verschleißschutzschichten im allgemeinen Maschinenbau oder in der Medizintechnik angewendet. In diesem Zusammenhang kommen sie zur Reduzierung des abrasiven und adhäsiven Verschleißes zum Einsatz [117]. Das Abscheiden der Oberflächenbeschichtung erfolgte beim Projektpartner H-O-T Härte- und Oberflächentechnik GmbH & Co.KG.

Für das Laserstrahllegieren wurden hochlegierten, mittellegierte Schweißdrähte und Massivdrähte von ALUNOX Schweißtechnik GmbH eingesetzt. Das Legieren wurde vom Projektpartner am BLZ, Bayerisches Laserzentrum Gemeinnützige Forschungsgesellschaft mbH, durchgeführt. Eine Übersicht der verschiedenen Materialien bezogen auf die Legierungsdrähte sind in Tabelle 1 gegenübergestellt.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der Legierungsdrähte [118]

#### **Chemische Elementzusammensetzung Legierungsdrähte**

<b>Bezeichnung Legierungsdraht</b>	Ni [%]	C [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ti [%]	Si [%]	Mn [%]
AX-Mo	-	0,1	-	0,5	-	0,5	1,1
AX-NiMoCr90	2,1	0,1	0,5	0,5	1	0,6	1,7
AX-308L	10	0,02	20	-	-	0,8	1,7
AX-316L	12	0,03	18	3,5	-	0,4	1,8
AX-312	9	0,12	30	-	-	0,4	1,8
AX-650W/ 1.3348	-	0,9	4	8,4	-	0,3	0,3
AX-SGZink/SG2-Ti	-	0,07	-	-	0,1	0,8	1,4

Beim Oberflächenmodifizieren mithilfe des Laserstrahllegierens werden die Hauptlegierungselemente Ti, Mo, Cr und C gewählt, welche als Übergangsmetalle tendenziell über eine geringere Elektronendichte als Metalle

verfügen. Anhand des im Stand der Technik beschriebenen Ansatzes nach dem Modell von Czichos wird untersucht, inwieweit ein Zusammenhang zwischen der Adhäsionskomponente und der Adhäsionsneigung vorliegt.

Werkstückseitig kommt der Vergütungsstahl 22MnB5 mit einer AlSi-Beschichtung mit 150 g/m<sup>2</sup> der ThyssenKrupp AG zum Einsatz, welcher für pressgehärtete Karosseriebauteile üblich ist. Im Lieferzustand verfügt dieses Material über eine Streckgrenze von 320 MPa und eine Zugfestigkeit von 500 MPa [119]. Als Werkzeugstähle wurden der Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-3 und der Sonderwerkstoff WP7V verwendet. Die chemische Zusammensetzung des Werkstückmaterials sowie der Werkzeugstähle ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Elementzusammensetzung des Vergütungsstahls 22MnB5 [119] und der Werkzeugstähle X38CrMoV5-3 [96] und WP7V [120]

Chemische Elementzusammensetzung Werkstoffe							
Werkstück- werkstoff	C [%] max.	Si [%] max.	Mn [%] max.	Cr +Mo [%] max.	Cr [%] max.	Mo [%] max.	V [%] max.
22MnB5	0,25	0,40	1,40	0,5		-	-
<b>Werkzeugstähle</b>							
X38CrMoV5-3	0,38	-	-	-	5,00	3,00	0,50
WP7V	0,50	-	-	-	7,80	1,50	1,50

## 4.2 Verfahrensparameter für das Oberflächenmodifizieren

Durch das im Stand der Technik und von Hofmann et al. [89] entwickelte Laserstrahllegieren werden ausgewählte Legierungselemente in den Randbereich des Grundmaterials eingebracht. Die Elementkonzentration sowie die chemische Zusammensetzung werden hierbei variiert, um deren Einfluss auf das Verschleißverhalten zu bestimmen. Die technische Umsetzung hierfür erfolgt durch die Veränderung der Zuführgeschwindigkeit des Materials in die Prozesszone. Es wird dadurch ein unterschiedlicher Anteil an Legierungselementen aufgeschmolzen, welche in das Substrat eindiffundieren. Die Legierungstiefe beträgt circa 1,5 mm [90], um im industriellen Einsatz im Falle eines auftretenden Werkzeugverschleißes eine mechanische Nachbearbeitung ohne erneutes Legieren zu ermöglichen. Die Entwicklung und Durchführung des drahtbasierten Legierungsverfahrens

erfolgte am Bayerischen Laserzentrum gemeinnützige Forschungsgesellschaft mbH. Im Vergleich zur pulverbasierten Variante war das Ziel mit diesem Verfahren eine homogenere Elementverteilung im Basismaterial zu erzielen, welches in der Arbeit von Hofmann et al. beschrieben ist [89]. Für die Prozessdurchführung wurde ein Yb:YAG Faserlaser mit einer nominalen Ausgangsleistung von 1 kW und einer Wellenlänge von 1070 nm verwendet [90]. In dieser Arbeit eine Laserleistung von 500 kW wurde für die zu legierenden Proben gewählt sowie eine kreisförmige Oszillationsbewegung des Laserstrahls zur Gewährleistung einer homogenen Durchmischung der Legierungsbestandteile mit dem Substratmaterial [90].

Im Vergleich zum Laserlegieren wird mithilfe der Physikalischen Gasphasenabscheidung (PVD) eine Oberflächenbeschichtung auf die Werkzeuge abgeschieden, um primär großflächige Kontaktflächen zu modifizieren. In diesem Zusammenhang verfügen die Beschichtungssysteme AlCrN und AlCrTiN über eine ausreichende thermische Beständigkeit, welche für den Einsatz im Presshärteprozess eine Voraussetzung darstellt. Die Schichten sind bis circa 1.100 °C temperaturbeständig [121]. Aus diesem Grund werden diese Beschichtungen auf ihr Verschleißverhalten untersucht und mit den legierten Oberflächen verglichen. Zudem wird durch ein gezieltes Dotieren mit zusätzlichem Ti-Gehalt die Elementzusammensetzung von AlCrTiN variiert. Das Ziel dieser Untersuchungen ist die Ableitung des Zusammenhangs zwischen der Ti-Konzentration und der resultierenden Verschleißbeständigkeit. Zusätzlich wird der Einfluss des Chromanteils auf das Verschleißverhalten nachgewiesen. Die Entwicklung sowie die Abscheidung einer neuartigen Oberflächenbeschichtung wurden bei H-O-T Härte- und Oberflächentechnik GmbH & Co.KG durchgeführt. Der Beschichtungsprozess wird in einer evakuierten Kammer durchgeführt, in welcher das Zusatzmaterial verdampft und auf die Substratoberfläche abgeschieden wird. In der Regel wird Argon mit einer Durchflussmenge von circa 800 ml / min in die Kammer eingeführt und durch Anlegen einer Spannung von 200 V wird ein Plasma erzeugt [122]. Die Ionen kollidieren mit dem Beschichtungsmaterial und Partikel werden aus der Oberfläche herausgeschlagen. Üblicherweise werden diese Elemente auf die Kontaktfläche des Basismaterials bei 450 °C abgeschieden [122]. Durch einen vorgeschalteten Plasmanitrierprozess soll die Stützfähigkeit des Schichtsystems mit der Substratoberfläche erhöht werden. Zu diesem Zweck liegen die Standardparameter für den Nitrierprozess in einem Vakuumofen bei circa 450 °C und einer Behandlungszeit von 300 min. Das verwendete Gasgemisch besteht hierbei aus 20 Vol.-% N<sub>2</sub> und 80 Vol.-% H<sub>2</sub> [123].

Eine lokale Oberflächenmodifikation von höchstbeanspruchten Werkzeugbereichen ist mit beiden Verfahren realisierbar. Zu diesem Zweck wird beim Laserstrahllegieren die Drahtfördergeschwindigkeit verringert, wodurch ein höherer Anteil an Drahtvolumen aufgeschmolzen und somit in das Substrat eingebracht wird. Beim Beschichten werden hierbei ausgewählte Bereiche mithilfe von Masken abgedeckt, um ein Abscheiden der Beschichtungsmaterialien primär an den Wirkflächen zu realisieren. Jedoch ist bei dieser Vorgehensweise davon auszugehen, dass eine vollständige Abschirmung der Partikel des Targetwerkstoffes nicht gegeben ist. Vor diesem Hintergrund begünstigt das PVD-Beschichtungsverfahren im Vergleich zum Legierungsprozess ein großflächiges Modifizieren der Werkzeugoberfläche in wesentlich kürzerer Zeit und mit technisch geringerem Aufwand.

Der Einfluss der Hauptlegierungselemente Cr, Ni, C, Ti und Mo wird im Hinblick auf das adhäsive Verschleißverhalten analysiert. Während Ni die Korrosionsbeständigkeit erhöht, sorgen Cr, Ti und Mo für eine Steigerung der Warmfestigkeit sowie des Verschleißwiderstandes. Als Übergangsmetalle verfügen insbesondere Ti und Cr über eine geringere Anzahl an freibeweglichen Elektronen, wodurch die chemische Affinität nach dem Ansatz von Czichos durch Berücksichtigung der Adhäsionskomponente zwischen den Metallkontaktflächen reduziert werden soll [33]. Als Nichtmetall verfügt Kohlenstoff über einen zu Metallen unterschiedlichen atomaren Aufbau und bildet dadurch in Bindungen eine unterschiedliche Gitterstruktur aus. Folglich ist dieses Element geeignet, um den Adhäsionsverschleiß als Legierungsanteil zu verringern. Der Einfluss variierender Elementzusammensetzungen, welche nach dem Oberflächenmodifizieren vorhanden sind, wird auf das tribologische Verhalten untersucht. Diese Ergebnisse werden miteinander korreliert, um anhand der untersuchten Oberflächenmodifikationen die chemische Zusammensetzung zur Erreichung der höchsten Verschleißbeständigkeit von Presshärte Werkzeugen zu identifizieren. Als Beschichtungssysteme kommen AlCrN sowie AlCrTiN aufgrund ihrer hohen thermischen Beständigkeit bis circa 1000 °C zum Einsatz [121], welche zusätzlich als Referenz für weiterentwickelte Schichten dienen. In diesem Zusammenhang wird die Oberflächenbeschichtung durch gezieltes Dotieren mit variierendem Ti-Gehalt verändert, wodurch insbesondere der Einfluss dieses Legierungselements auf die Erhöhung der Verschleißbeständigkeit hergestellt werden soll. Im Vergleich zu Cr und Mo verfügt Ti über die geringste Elektronendichte, weshalb die Verschleißcharakterisierung unter Veränderung der chemischen Zusammensetzung mit diesem Element fokussiert wird. Eine CrN-Schicht wird als Alternative

untersucht, um im Vergleich zu AlCrN sowie AlCrTiN einen Einfluss von Cr, Al sowie Ti auf den Oberflächenverschleiß auszuschließen. Als weiteres Schichtsystem werden sogenannte Dickschichten auf ihr Verschleißverhalten geprüft, da diese Varianten bereits erfolgreich beim Schmieden Anwendung finden [124]. Die Übertragbarkeit dieser Schichten auf Presshärte-werkzeuge wird daher erarbeitet.

### **4.3 Analysemethoden zur Oberflächencharakterisierung**

Die Bestimmung der Oberflächenrauheit vor und nach dem Einsatz der Werkzeuge erlaubt es, eine Verschleißcharakterisierung vorzunehmen. Anhand von Topografieaufnahmen werden die Verschleißformen und somit die auftretenden Verschleißmechanismen bestimmt, welche beim Presshärten in Erscheinung treten. Durch die Rauheitskenngrößen wird eine Bewertung des Oberflächenverschleißes vorgenommen. Eine Aussage über die resultierende Verschleißmenge ist mit dieser Methode nicht möglich, weshalb lediglich eine quantitative Beschreibung des Verschleißverhaltens durchgeführt wird und die Notwendigkeit eines weiterentwickelten Auswertalgorithmus verdeutlicht. Das gemessene Oberflächenprofil der Ausgangsoberfläche sowie der verschlissenen Kontaktfläche der jeweiligen Versuchsproben wird als Eingangsgröße für das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Auswerteskript genutzt.

Eine Oberflächencharakterisierung erfolgt mithilfe eines Laser-Scanning Mikroskops vom Typ VK-X2000 der Firma Keyence. Es werden die Topografie der Versuchsprobe bestimmt und eine Qualifizierung der Oberfläche ermöglicht. Um eine quantitative Bewertung der Oberflächenbeschaffenheit vorzunehmen, werden in dieser Arbeit die 3D-Rauheitskenngrößen  $S_a$ ,  $S_k$ ,  $S_{pk}$  und  $S_{vk}$  bestimmt. Aus der Literatur ist bekannt, dass für die Verschleißcharakterisierung von Presshärte-werkzeugen der arithmetische Mittenrauheit  $S_a$  verwendet wird [109]. Zusätzlich werden in dieser Arbeit die Parameter Kernrautiefe  $S_k$ , die reduzierte Spitzenhöhe  $S_{pk}$  und die reduzierte Riefentiefe  $S_{vk}$  angewandt. Anhand dieser Bewertung des unterschiedlichen Materialtraganteils ist eine erste Abschätzung hinsichtlich des auftretenden Oberflächenverschleißes beim Presshärten möglich [111]. Durch die Verwendung dieser Messgrößen wird die Oberflächenbeschädigung im Spitzen-, Kern- und Talbereich des Rauheitsprofils beurteilt, um daraus Rückschlüsse auf das Verschleißverhalten zu ziehen. Anhand dieser Kenntnis wird in dieser Arbeit eine Aussage hinsichtlich des Werkzeugversagens sowie der Beanspruchbarkeit lokaler Werkzeugbereiche getroffen.

Eine Bewertung des Oberflächenverschleißes wird anhand der Messdaten des Höhenprofils vorgenommen, welche vor und nach der Versuchsdurchführung mithilfe des Laser-Scanning Mikroskops erfasst werden. Zudem stellt dieser Datensatz die Eingangsgrößen für das weiterentwickelte Auswerteverfahren zur Berechnung des Verschleißvolumens dar. Das Ziel ist es, durch die Methodik den gesamten Oberflächenverschleiß nach dem Einsatz quantitativ zu erfassen sowie automatisiert zwischen Adhäsion und Abrasion zu unterscheiden. Eine Herausforderung stellt die Überlagerung dieser Verschleißvorgänge während des Presshärteprozesses dar. Während des Reibkontaktes wird bereits anhaftendes Material auf der Werkzeugoberfläche infolge der Relativbewegung des Werkstücks herausgebrochen. Dieser Werkzeugbereich wird durch neue Materialanhaftungen überlagert, wodurch eine vollständige Beschreibung des Abrasionsverschleißes nur bedingt möglich ist. Jedoch treten abrasive Vorgänge beim Presshärten nicht signifikant in Erscheinung [60]. Vor diesem Hintergrund wird durch die entwickelte Methodik eine zahlenmäßige Beschreibung des Verschleißverhaltens sowie eine Unterscheidung je nach dominierendem Verschleißmechanismus realisiert. Im ersten Schritt werden die Profile einer unverschlissenen und einer verschlissenen Kontaktfläche im Messprogramm des Mikroskops an einer Ebene ausgerichtet. Falls die Proben während der Messung leicht geneigt sind, führt die schiefe Oberfläche zu abweichenden Ergebnissen bei der Ermittlung des Verschleißes. Durch den Hersteller ist in dem Auswerteprogramm des Mikroskops eine Ebenenfunktion zur Neigungskorrektur der Höhendaten integriert. Die Winkelfunktion ist hierbei auf einen Referenzpunkt oder eine Linie bezogen [125].

Die korrigierten Messdaten werden anschließend in ein Auswerteprogramm eingelesen. Über eine integrierte Vergleichsmessungsfunktion werden die Rauheitsdatensätze der Ausgangsfläche sowie der eingesetzten Oberfläche übereinandergelegt. Durch diese Vorgehensweise wird ein direkter Vergleich der Höhenwerte hergestellt. Aufgrund von Verschleißerscheinungen wird die Oberflächenbeschaffenheit verändert und somit weicht das Höhenprofil der Proben nach den tribologischen Untersuchungen von seinem Ausgangsprofil ab. Anhand der Differenz zwischen einzelnen Messpunkten ist es möglich, quantitativ den Verschleiß innerhalb der Kontaktfläche zu bestimmen. Aus diesem Grund wird in dem Auswerteprogramm ein Befehl integriert, mit welchem die Höhendifferenzen gebildet werden. Die Berechnung des Verschleißvolumens basiert auf dem Riemann-Integral, mit welchem der Flächeninhalt zwischen Abzisse und dem Graphen bestimmt wird. Durch die Multiplikation dieses Ergebnisses mit der Schrittweite der einzelnen Messpunkte wird das Volumen berechnet.

Während ein negativer Wert auf abrasive Verschleißphänomene zurückzuführen ist, wird infolge von Materialanhaftungen eine positive Größe ermittelt.

Um Rückschlüsse hinsichtlich der unterschiedlichen Legierungselemente auf das Verschleißverhalten zu ziehen, werden metallografische Untersuchungen durchgeführt. Zu diesem Zweck kommen EDX- und WDX-Analysen nach dem Oberflächenmodifizieren zur Bestimmung der Elementzusammensetzung zum Einsatz.

#### 4.4 Experimentelle Untersuchungen zum Einsatzverhalten

Aufgrund der thermo-mechanischen Wechselwirkungen, welche in der Wirkfuge zwischen Werkzeug und Werkstück beim Presshärten auftreten, ist neben einer tribologischen Analyse eine Untersuchung des thermischen Verhaltens oberflächenmodifizierter Werkzeuge erforderlich. Vor diesem Hintergrund kommen ein Tribotester, eine Warmstreifenziehanlage sowie ein Abschreckwerkzeug zum Einsatz. Eine Übertragbarkeit ausgewählter Oberflächenmodifikationen auf einfache Bauteilgeometrien wird in Napfzugversuchen evaluiert.

Eine Verschleißcharakterisierung erfolgt in dieser Arbeit mit einem modifizierten Tribotesteraufbau. Dieser Prüfstand in Bild 2 stellt ein offenes tribologisches System dar. Die Pin-Oberfläche steht nach Abfahren einer Verschleißspur mit einem neuen Bereich der Blechoberfläche in Kontakt.

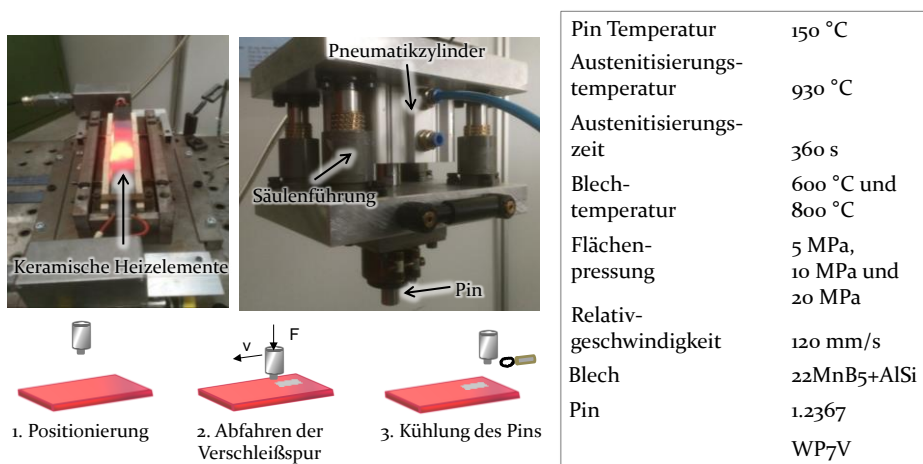


Bild 2: Versuchsaufbau und Parameter

Nach der Austenitisierung wird das Blechmaterial auf zwei keramische Heizelemente positioniert, welche auf einem beweglichen Schlitten befestigt sind. Eine Blechtemperatur von maximal 850 °C wird bei einer Blechdicke von 1,5 mm realisiert. Die experimentelle Durchführung erfolgt bei einer Pintemperatur von 150°C und einer Werkstücktemperatur von 800°C. Beide Einstellungen entsprechen den im industriellen Presshärteprozess auftretenden Temperaturen. Übliche Umformtemperaturen beim Presshärten liegen zwischen 600 °C und 800 °C [126]. Vor diesem Hintergrund ist es nicht auszuschließen, dass ein Verschleißschutz durch veränderte Prozessbedingungen beeinflusst wird. Um einen Einsatz der neuartigen Werkzeugbeschichtung für den Einsatz im Presshärteprozess zu gewährleisten, ist es von zentraler Bedeutung, diesen Zusammenhang in den Analysen zu berücksichtigen. Aus diesem Grund erfolgt eine stichprobenartige Untersuchung des Verschleißverhaltens ebenfalls für 600 °C Blechtemperatur. Zu diesem Zweck werden die Oberflächenmodifikationen gewählt, welche während der Versuchsdurchführung bei 800 °C Werkstücktemperatur die höchste Verschleißbeständigkeit aufweisen.

Vor der Versuchsdurchführung wird die erforderliche Normalkraft mithilfe einer 10 kN-Kraftmessdose vom Typ C9B von HBM gemessen, indem der Roboter den Pin auf den Kraftsensor positioniert. Diese Vorgehensweise gewährleistet eine genaue Einstellung der Kraft. Nach dem Einstellen der Normalkraft und der Wärmebehandlung des Werkstückmaterials bewegt der Roboter den Pin mit der eingestellten Anpresskraft über den heißen Blechwerkstoff. Infolge der Relativbewegung zwischen Pin und Blech wird der Schlitten gegen eine Kraftmessdose mit Messbereich 1 kN gedrückt, welche die Reibkraft misst. Unter dem Schlitten sind drei Kraftsensoren des Typs C9B der Firma HBM mit einer Nennkraft von 2 kN installiert, um die Normalkraft während der Tests zu überwachen.

Für eine Bewertung des Verschleißverhaltens unterschiedlicher Werkstoffe ist eine vollständige Erfassung der gesamten Kontaktfläche der Werkzeugoberfläche erforderlich. Die für diese Anlage konzipierten Pins weisen jeweils einen Kontaktbereich von 5 mm Durchmesser auf. Durch die gewählte Kontaktfläche von 19,63 mm<sup>2</sup> wird die erforderliche Messdauer mittels des Laser-Scanning Mikroskops verringert, wodurch eine Bewertung und Auswahl einer geeigneten Oberflächenmodifizierung in kürzerer Zeit als bei größeren Flächen realisierbar ist. Vor Versuchsbeginn wird der Pin auf der Blechoberfläche mit der erforderlichen Normalkraft positioniert. In dieser Arbeit wird eine Kraft von 196 N aufgebracht, um eine Flächenpressung von 10 MPa für eine Kontaktfläche von 19,63 mm<sup>2</sup> zu erreichen. Zusätzlich wurden Untersuchungen bei 98 N und 392 N durchgeführt, welche

5 MPa und 20 MPa entsprechen. Anlagenbedingt weisen hierbei 5 MPa und 20 MPa das Prozessfenster des Tribotesters auf. Das Prozessfenster ist hierbei durch die maximal aufzubringende Anpresskraft durch den Roboter und die gewählte Kontaktfläche von 19,63 mm<sup>2</sup> begründet. Im nächsten Schritt bewegt der Roboter den Pin 50 mm mit einer Gleitgeschwindigkeit von 120 mm/s über das Blechmaterial.

Die Bewegung des Roboters ist in eine Beschleunigungs- und Verzögerungsphase unterteilt. Folglich wurde der Bewegungsablauf des Roboters mit ARAMIS Professional 2018 von GOM gemessen, um die verschiedenen Geschwindigkeitsbereiche zu bestimmen. Es handelt sich hierbei um eine optische Methode, welche infolge einer Verschiebung von Fixpunkten innerhalb einer Bildfolge die Bewegung analysiert [127]. Dieses berührungslose und materialunabhängige Messsystem bietet eine exakte Erfassung der 3D-Koordinatenverschiebungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Prüfstandes. Die Messung der Geschwindigkeitsverteilung zeigte, dass die Gleitgeschwindigkeit bei einem Fahrweg von 50 mm für 30 mm konstant ist. Die gewählten Einstellungen sind ähnlich zu Bedingungen industrieller Umformprozesse von pressgehärteten Karosseriebauteilen, da die Ziehtiefen 30 mm [128] oder auch 50 mm [129] betragen können. Nach jeder Verschleißspur wird die Kontaktfläche des Pins durch ölfreie Druckluft gekühlt, um eine thermische Wechselbeanspruchung der Werkzeugoberfläche vergleichbar zu Presshärteprozessen zu gewährleisten. Ein Werkzeugpin wird für einen Gesamtverfahrweg von 1250 mm verwendet, welcher in 25 Verschleißspuren von jeweils 50 mm Länge unterteilt ist. Dieser Fahrweg wurde gewählt, da in [P4] nach 750 mm bereits eine signifikante Zunahme des adhäsiven Verschleißes am Werkzeugpin nachgewiesen wurde. Es ist somit davon auszugehen, dass innerhalb dieser Verschleißstrecke eine zuverlässige Aussage hinsichtlich des Verschleißverhaltens möglich ist. Die Abmessung der für die Versuche verwendeten Blechzuschnitte beträgt 200 mm x 30 mm bei einer Blechdicke von 1,5 mm. Der Pin verfügt über eine Länge von 70 mm, einem Durchmesser von 22 mm und einer Kontaktfläche von 19,63 mm<sup>2</sup>.

Das Reibverhalten wird konventionell mit Streifenziehversuchen analysiert [34], weshalb ein Warmstreifenziehprüfstand in dieser Arbeit zum Einsatz kommt. Die eingesetzten Reibbacken weisen eine Kontaktfläche von 47 mm x 52 mm auf. Im Vergleich zu der Pin-Oberfläche aus den Tribotesterversuchen ist eine Charakterisierung der gesamten Kontaktfläche mit optischen Messmethoden deutlich aufwendiger. Jedoch sind die Experimente bei geringeren Normalkräften durchführbar, welche aufgrund der Anlagenkonstruktion des Tribotesters nicht einstellbar sind. Um zu

überprüfen, ob die tribologischen Bedingungen mit dem Presshärteverfahren vergleichbar sind, ist eine Ermittlung der Reibzahlen für ausgewählte Oberflächenmodifizierungen ausreichend. Aus diesem Grund wurden die Experimente nur für die Varianten mit den höchsten Verschleißfestigkeiten aus den Tribotesterversuchen durchgeführt. Die Anlage besteht aus einer beheizbaren Werkzeugaufnahme für die Reibbacke und einem beheizbaren Schlitten. Nach dem Austenitisieren des Werkstücks wird das Blech auf den Heizelementen des Schlittens positioniert. Die Untersuchung wird bei 600 °C Blechtemperatur durchgeführt, um einen Einfluss von unerwünschten Verschleißmechanismen auf das tribologische Verhalten zu verhindern. Durch diese Vorgehensweise wird sichergestellt, dass gültige Reibzahlen bestimmt werden. Eine Thermografiekamera misst die Oberflächentemperatur des Blechs, um eine homogene Temperaturverteilung während der Versuchsdurchführung sicherzustellen. Die Normal- und Ziehkräfte werden von zwei Hydraulikzylindern aufgebracht und von piezoelektrischen Kraftsensoren gemessen. Ein Hydraulikaggregat stellt hierbei die notwendige Energie bereit, um die erforderlichen Kräfte aufzubringen. Auf die Blechoberfläche wird eine Normalkraft von 10 kN ausgeübt, was einer Flächenpressung von 5 MPa entspricht. Während der Versuchsdurchführung wird das Blech unter dem Werkzeug mit einer Ziehgeschwindigkeit von 120 mm/s gezogen. Die Relativbewegung erfolgt ausschließlich zwischen der Oberseite des Blechstreifens und der Reibbacke.

Neben dem tribologischen Einsatzverhalten ist eine Analyse der thermischen Bedingungen erforderlich, um eine hohe Abkühlgeschwindigkeit nach dem Oberflächenmodifizieren zu gewährleisten. Zu diesem Zweck wird überprüft, ob die für das Presshärten erforderliche Wärmeübertragung durch den Werkzeugkontakt erreicht wird. Die hohe Festigkeit von pressgehärteten Bauteilen resultiert aus einer Umwandlung von Austenit in eine Martensitstruktur während der Warmumformung. Insbesondere durch Aufbringen einer Oberflächenbeschichtung ist es nicht auszuschließen, dass die thermische Wechselwirkung zwischen Werkzeug und Blech beeinflusst werden. Aus diesem Grund wird der Wärmeübergang mithilfe eines Abschreckwerkzeugs mit zwei austauschbaren Kontaktplatten analysiert. Nach dem Austenitisierungsprozess werden die Blechzuschnitte auf drei federnden Stiften positioniert, um ein schnelles Abkühlen der Oberflächen vor Schließen des Werkzeuges zu vermeiden. Die Blechdicke beträgt 1,5 mm. Die Proben sind mit Thermoelementen ausgestattet, um die Temperaturkurve während der Experimente zu messen. Die Abschreckplatten werden über integrierte Heizpatronen auf 150 °C erwärmt. Diese Werkzeugtemperatur wurde auf Basis der Arbeiten von Wieland gewählt

[99], um die nachgewiesene Wechselbeanspruchung der Kontaktfläche gerecht einzuhalten. Durch das Einlegen des heißen Halbzeuges in das Umformwerkzeug und die schnelle Abkühlung des Bauteils während des Prozesses wird im industriellen Einsatz das Werkzeug erwärmt. Die Versuche werden in einer hydraulischen Presse vom Typ 100 So der Firma Lasco durchgeführt. Auf das Werkstück wird eine Normalkraft von 92,8 kN ausgeübt. Bei einer Fläche von 160 x 58 mm<sup>2</sup> entspricht dieser Wert einer Flächenpressung von 10 MPa. Anhand der mittels der Thermoelemente aufgezeichneten Temperaturprofile kann die Abkühlgeschwindigkeit ermittelt werden. Aus den abgeschreckten Blechen werden Sekundärproben entnommen, um in Zugversuchen die resultierenden Zugfestigkeiten zu bestimmen. Dadurch soll nachgewiesen werden, dass die geforderten mechanischen Festigkeiten von pressgehärteten Bauteilen erreicht werden.

Der Einfluss auf die Werkzeugstandmenge und die Übertragbarkeit einer Oberflächenmodifizierung auf einfache Werkzeuggeometrien erfolgt in Napfzugversuchen. Für die Analysen werden die Verschleißschutzschichten verwendet, welche in den Tribotesterversuchen den höchsten Verschleißwiderstand aufweisen. Im Vergleich zu herkömmlichen Methoden werden die hochbeanspruchten Bereiche mit einer numerischen und experimentellen Analyse bestimmt. Es wird ein Simulationsmodell in LS-DYNA aufgebaut und dieses mit den experimentell ermittelten Kraft-Weg- und Temperaturverläufen validiert. Zu diesem Zwecke werden die Verläufe aus Experiment und Simulation gegenübergestellt. Die Verteilung der Flächenpressung entlang der Werkzeugkrümmung wird numerisch berechnet, um die Bereiche mit der höchsten Beanspruchung zu identifizieren. Zusätzlich werden 200 Abpressungen durchgeführt und die Werkzeugoberfläche nach 100 und 200 Zyklen mit dem Laser-Scanning Mikroskop vermessen. Durch die Bestimmung der Oberflächenrauheit und der Topographien werden die Bereiche mit der höchsten Materialhaftung von AlSi-Partikeln ermittelt. Diese Messergebnisse werden mit der numerisch analysierten Flächenpressungsverteilung korreliert. Anhand dieser Vorgehensweise wird der Einfluss der Werkzeugmodifikation auf die Werkzeugstandzeit bewertet. Die Versuche werden mit der hydraulischen Presse 100 So der Firma Lasco durchgeführt. Der Matrizendurchmesser des Werkzeuges beträgt 59 mm und besitzt eine Oberflächenhärte von 54 + 1 HRC. Der Stempel hat einen Durchmesser von 50 mm. Beide Werkzeuge weisen einen Radius von 10 mm auf. Die Tests wurden bei der Maximalgeschwindigkeit der Presse von 50 mm/s und bei einer Werkzeugtemperatur von 150 °C durchgeführt. Um eine schnelle Abkühlung des Rohlings zu vermeiden, wird ein Distanzring von 3 mm Dicke verwendet.

## 5 Weiterentwicklung eines Auswerteverfahrens zur Quantifizierung des Verschleißes

Um eine Bewertung der Verschleißbeständigkeit unterschiedlicher Oberflächenmodifizierungen vorzunehmen, ist eine quantitative Erfassung des Werkzeugverschleißes erforderlich. Derzeitige Methoden sind auf eine qualitative Beschreibung der auftretenden Verschleißmechanismen anhand von Oberflächentopografien und die Ermittlung der Oberflächenrauheiten vor und nach dem Einsatz der Werkzeuge beschränkt. Wie im Stand der Technik beschrieben, nutzen beispielsweise Ghiotti et al. [109] und Schwingenschlögl et al. [43] diese Vorgehensweise, um in ihren Untersuchungen Rückschlüsse auf das Verschleißverhalten zu ziehen. Eine detaillierte Charakterisierung der Rauheitsprofile ist durch die sogenannte Abbott-Kurve oder Materialtraganteilkurve gegeben. Es erfolgt eine Einteilung des Profils in einen Spitzen-, Kern- und Riefenbereich. In diesem Zusammenhang kommen die reduzierte Spitzenhöhe  $Sp_k$ , die Kernrautief  $Sk$  und die reduzierte Riefentiefe  $Svk$  zum Einsatz [111]. Eine Erfassung von Topografieänderungen, welche durch Verschleißvorgänge während des Reibkontaktes entstehen, ist durch diese Kenngrößen möglich.

Jedoch ist eine vollständige Analyse des Verschleißverhaltens mit diesem Ansatz nur eingeschränkt möglich. Eine Aussage über das Verschleißvolumen der verschlissenen Oberfläche kann nicht getroffen werden. Vor diesem Hintergrund ist ein Analyseverfahren nötig, welches den Verschleiß der Kontaktfläche quantitativ erfasst und zusätzlich Abrasion und Adhäsion voneinander trennt. Eine Herausforderung stellt die Interaktion dieser beiden Verschleißmechanismen im Bereich der Warmumformung dar. Während der Reibbewegung werden beim Presshärten die Rauheitsriefen mit AlSi-Partikeln überlagert. Eine Beurteilung des Oberflächenverschleißes wird dadurch erschwert, indem entstandene Furchen infolge von abrasiven Vorgängen wegen anschließender Materialanhaftungen nicht mehr identifizierbar sind.

Das Ziel ist es daher, das abrasive und adhäsive Verschleißvolumen getrennt voneinander durch eine geeignete Auswertemethodik darzustellen. In diesem Zusammenhang wurde ein Verfahren speziell für Mikroumformprozesse entwickelt [114]. Für die Anwendung dieser Methodik wird eine Bezugsfläche an einem unverschlissenen Bereich vorausgesetzt. Die Verschleißerscheinungen treten beim Presshärteprozess über die gesamte Kontaktfläche verteilt auf, weshalb die Festlegung einer Referenz wie bei Schrader nicht möglich ist. Es wird, bedingt durch den stirnseitigen Radius

der verwendeten Pin-Oberflächen, die Definition einer Nullebene erschwert. Ein wesentlicher Unterschied der in dieser Arbeit erstellten Methodik zu dem bereits entwickelten Verfahren in [114] besteht darin, dass die Ermittlung der Verschleißvolumina durch einen direkten Bezug der Rauheitsprofile vor und nach dem Einsatz erfolgt. Zu diesem Zweck werden die gemessenen Datensätze miteinander verglichen. Auf eine Festlegung einer kritischen Verschleißgrenze anhand von Rauheitsparametern, wie bei der im Stand der Technik beschriebenen Methode von Schrader [114], wird hierbei ebenfalls verzichtet. Für die Berechnung der Verschleißvolumina wird auf die Differenzen zwischen den Höhenprofilen der verschlissenen und unverschlissenen Oberflächen zurückgegriffen. Die Funktionsweise und eine Abgrenzung zu bisherigen Methoden werden in den nachfolgenden Kapiteln aufgezeigt.

## 5.1 Ablauf der Oberflächencharakterisierung und Funktion des Auswerteprogramms

Der Ablauf des Analyseprogramms ist in sieben wesentliche Abläufe eingeteilt. Wie in Bild 3 dargestellt, werden die Oberflächen zunächst mikroskopisch gemessen sowie mit der Software des Mikroskops bearbeitet. Anschließend erfolgt die Auswertung mit dem programmierten Algorithmus.



Bild 3: Ablauf der Oberflächencharakterisierung

Zunächst werden die Ausgangsoberflächen sowie die verschlissenen Werkzeugpins nach der Versuchsdurchführung mit einem Laser-Scanning-Mikroskop gemessen. Durch eine geeignete Einspannvorrichtung erfolgt eine Ausrichtung der Proben, um eine vergleichbare Messposition für jede Probe sicherzustellen. Zu diesem Zweck werden Winkel auf dem Messtisch angebracht. Zudem werden die Pins in einer Haltevorrichtung auf zwei Endmaßen fixiert, welche am Winkel zentriert sind. Die für die Ausrichtung verwendeten Endmaße entsprechen einer Höhe von 4,5 mm, um für alle Proben eine Bezugshöhe zu deren Haltevorrichtung herzustellen. Die reflektierten Lichtstrahlen werden von dem Objektiv des Mikroskops erfasst. Um eine ausreichende Tiefenschärfe zu erreichen, wird die Objektivlinse in die vertikale Richtung der optischen Achse bewegt [130]. Nachdem die Höhendaten gemessen wurden, erfolgt zunächst eine Neigungskorrektur der Aufnahmen mithilfe der integrierten Auswertesoftware des Mikroskops. Die Korrektur der Bildneigung basiert in diesem Zusammenhang auf der Berechnung einer Ebenengleichung [125]. Diese Vorgehensweise ist erforderlich, um eine flache Ebene für die Auswertung zu erhalten. Anschließend wird der auszuwertende Messbereich durch eine Bildverarbeitung ausgewählt. Eine kreisrunde Kontaktfläche mit 5 mm Durchmesser steht während der Versuchsdurchführung mit dem Blechwerkstoff in Kontakt. Die Bereiche außerhalb dieser Fläche berühren nicht die Werkstückoberfläche und sind somit für die Verschleißcharakterisierung nicht zu berücksichtigen. Um eine Trennung dieser beiden Oberflächenbereiche vorzunehmen, erfolgt eine Vorauswahl des Bildausschnittes bereits mithilfe des Laser-Scanning-Mikroskops. Zunächst wird mit der standardisierten Software der Bildausschnitt verkleinert, indem die verschlissenen Bereiche ausgewählt werden. Aufgrund der Kreisfläche sind in dieser Auswahl weiterhin Bereiche außerhalb der Kontaktfläche beinhaltet.

Eine weitere Verarbeitung des korrigierten Höhenprofils wird anschließend mithilfe des programmierten Auswerteprogramms durchgeführt. Zu diesem Zweck wird ein Punktdatensatz durch das zugehörige Auswerteprogramm des verwendeten Messmikroskops ausgeleitet. Durch die Ausgabe dieser Daten werden die Messpunkte bezüglich der Tischposition in X- und Y-Richtung mit dem jeweils zugehörigen Z-Höhenwert in einer Matrix gespeichert. Mithilfe des entwickelten Auswerteverfahrens werden die Datensätze in einen mit Matlab erstellten Algorithmus importiert. Es werden die Messdaten der Ausgangsoberflächen sowie der zugehörigen verschlissenen Fläche nach der Versuchsdurchführung eingelesen, siehe hierzu den vollständigen Code im Anhang. Beide Messreihen sind nötig, um einen Vergleich des Rauheitsprofils vor und nach dem Einsatz durchzuführen.

Mithilfe des Algorithmus wird geprüft, ob die eingelesenen Rauheitsdaten über eine identische Länge verfügen. Es wird anhand dieser Vorgehensweise gewährleistet, dass während des Programmdurchlaufs zur Auswertung der Verschleißmenge die Ergebnisgenauigkeit erhöht wird. Die Berechnung der Verschleißvolumina basiert auf der Matrizenrechnung. Folglich ist es notwendig, dass die Matrizen dieselbe Anzahl an Spalten sowie Zeilen und somit eine identische Menge an Messpunkten aufweisen. Zu diesem Zweck wird die Länge anhand der Zeilenanzahl der importierten Daten miteinander verglichen. Im Befehlsfenster von Matlab wird ausgegeben, ob die Anzahl der Messpunkte gleich oder ungleich ist. Zusätzlich wird die Zeilenanzahl beider Originaldaten angezeigt, welche der Größe der Matrix entspricht. Je höher die Anzahl der aufgenommenen Messwerte, desto größer ist die Genauigkeit des berechneten Ergebnisses bezüglich des Verschleißvolumens.

Zusätzlich wird geprüft, ob identische Wertepaare in beiden Datensätzen vorliegen. Es ist möglich, dass durch die Mikroskopsoftware eine unterschiedliche Anzahl an Messpunkten zwischen zwei Messungen erfasst wird. Eine Ursache hierfür ist, dass der Messbereich der Kontaktfläche vor der Messung manuell festgelegt wird und es dadurch zu Abweichungen der Größe der festgelegten Messfläche kommt. Aufgrund der hohen Datenmenge ist dieser Unterschied vernachlässigbar. Um die Höhendifferenz vor und nach der Versuchsdurchführung an derselben X- und Y-Position des Rauheitsprofils erfassen zu können, sind durch das Auswerteprogramm dieselben Positionen der beiden Höhenprofile zu ermitteln. Erst dadurch ist ein direkter Vergleich zwischen dem Rauheitsprofil der Ausgangsoberfläche und der verschlissenen Kontaktfläche durchführbar. Vor diesem Hintergrund ist eine Identifizierung derselben Ortsposition relevant. Zu diesem Zweck werden die Werte in X- und Y-Richtung miteinander korreliert. Zu jeder Position ist ein Höhenwert in Z-Richtung zugeordnet. Um diese Vorgehensweise zu realisieren, werden zunächst die X- und Y-Werte von den Höhendaten separat zwischengespeichert. Mithilfe des Auswertalgorithmus wird auf die jeweiligen Datenreihen zugegriffen. Die ersten beiden Spalten beinhalten die X- und Y-Positionen, während in der dritten Spalte die Höhenwerte dargestellt sind. Durch das Programm werden anschließend alle X- und Y-Koordinaten von den zugehörigen Z- Werten getrennt. Folglich werden vier verschiedene Matrizen erzeugt. Als Beispiel sollen an dieser Stelle als Dokumentbezeichnung für die Ausgangsoberfläche  $A_{XY}$  für die Parameter der Tischposition und  $A_Z$  für die Höhendaten genannt werden. Die entsprechenden Größen der verschlissenen Kontaktfläche sind in  $E_{XY}$  und  $E_Z$  beinhaltet. Durch den Algorithmus wird für

die Bestimmung der identischen Wertepaare auf die X- und Y-Werte der Referenzfläche mit A\_XY zeilenweise zugegriffen und mit den Werten aus der eingesetzten Fläche mit E\_XY verglichen.

Um eine hohe Ergebnisgenauigkeit zu gewährleisten, wird die Übereinstimmung dieser Messpositionen ermittelt. Zu diesem Zweck wird die Anzahl der gemeinsamen Messpaare miteinander verglichen. Es werden lediglich die Ergebnisse berücksichtigt, welche in X- und Y-Richtung denselben Wert aufweisen. Es gilt hierbei darauf zu achten, dass eine ausreichende Datenmenge für die Bestimmung des Verschleißvolumens vorhanden ist. Im vorliegenden Fall sind nach dem Aussortieren noch circa 3.000.000 Messdaten vorhanden. Erst dadurch ist eine vollständige Beurteilung hinsichtlich des Oberflächenverschleißes von Presshärtewerkzeugen sichergestellt. Die ermittelten Wertepaare werden mit den jeweils zugehörigen Höhendaten in eine neue Matrix geschrieben, indem durch einen Vergleich der ermittelten X- und Y-Wertepaare mit den eingelesenen Datensätzen die entsprechenden Z-Höhenwerte gesucht werden. Es wird ein Zwischenspeicher erzeugt, welcher diese Ortspositionen mit zugehörigen Z-Daten beinhaltet. Diese neue Zusammensetzung der Messpunkte wird als Valuepairs\_A und Valuepairs\_E bezeichnet.

Die durch den bisherigen Programmablauf aufbereiteten Messdaten beinhalten noch Messpunkte, welche außerhalb der tatsächlichen Kontaktfläche liegen. Während der Messung mit dem Laser-Scanning-Mikroskop werden, bedingt durch die Kreisfläche auch Bereiche außerhalb dieses Gebiets erfasst. Mittels der Standardsoftware des Mikroskops ist es nicht möglich, diesen Bereich bereits vor dem Einlesen in das Matlab-Programm vorzuselektieren. Es erfolgt mit dem Analyseprogramm des Messmikroskops lediglich eine Vorselektion der Auswertebereiche. Die Bildgrenzen werden mit der Mikroskopsoftware bezogen auf den Durchmesser von 5 mm der ebenen Auflagefläche gesetzt. Jedoch ist es mit diesem Programm nicht durchführbar, einen kreisförmigen Bereich hierüber auszuwählen. Aus diesem Grund wird mit dem Algorithmus durch Anwenden einer Kreisfunktion die tatsächliche Kontaktfläche des Pins definiert. Um eine Verfälschung bei der Berechnung des abrasiven und adhäsiven Verschleißvolumens zu vermeiden, werden nur die Messpunkte auf der Stirnfläche des Pins berücksichtigt. Für die Umsetzung wird im Skript zunächst auf die zwischengespeicherten Daten, welche im vorherigen Schritt erstellt wurden, zugegriffen und die X- und Y-Paare von den Z-Werten separiert. Die so erzeugten Profilhöhen werden zum besseren Verständnis als A\_Z\_Short und E\_Z\_Short bezeichnet. Die zugehörigen Positionsangaben in X- und Y-Richtung sind A\_XY\_Short und E\_XY\_Short zugeordnet.

Diese Datenzusammensetzung wird genutzt, um mit dem Algorithmus durch eine Kreisfunktion die tatsächliche Kontaktfläche des Pins zu bestimmen. Zu diesem Zweck werden die Maximalwerte in X- und Y-Richtung identifiziert, welche den realen Durchmesser darstellen. Diese Vorgehensweise wird auf die Ausgangsoberfläche sowie auf die verschlissene Probe angewendet. Zunächst wird zeilenweise geprüft, an welcher Stelle die Extremwerte stehen. Durch die mechanische Bearbeitung des Kontaktbereichs mittels Hartpolieren ist es möglich, dass die Geometrie von der idealen Kreisform abweicht. Folglich werden die Extremwerte der ermittelten X- und Y-Positionen miteinander verglichen. Anschließend wird der geringere Wert ausgewählt, welcher als Grenzwert zur Trennung der Randbereiche von der Kreisfläche definiert wird. Durch die Ermittlung des jeweiligen Minimums wird sichergestellt, dass alle Messwerte innerhalb der kreisförmigen Kontaktfläche liegen. Diese Vorgehensweise ist bedingt durch die in dieser Arbeit vorliegende Pin-Geometrie erforderlich. Das Prinzip ist jedoch auf andere Rahmenbedingungen übertragbar.

Um die Fläche zur Auswertung zu definieren, werden mittels der Kreisgleichung die relevanten Daten gefiltert. Das Ziel ist es, alle Werte zu identifizieren, welche innerhalb der Kreisfläche liegen. Zu diesem Zweck wird die Menge aller Punkte, welche einen konstanten Abstand zum Mittelpunkt des Kreises aufweisen, mithilfe der Funktion berechnet. Zur Anwendung dieser mathematischen Gleichung wird zunächst der Mittelpunkt des Kreisbereiches in X- und Y-Richtung ermittelt. Zu diesem Zweck werden die bereits erfassten identischen Wertepaare nacheinander durchlaufen. Gleichzeitig wird durch die Kreisfunktion geprüft, inwieweit diese Daten innerhalb oder außerhalb der Kontaktfläche liegen. Es werden die X- und Y-Koordinaten gesucht, welche kleiner als der Kreisradius sind. Falls diese Bedingung zutrifft, werden die zugehörigen Messpunkte dem Kreisbereich zugeordnet und als ContactArea gespeichert. Falls diese Voraussetzung nicht erfüllt wird, erfolgt eine Prüfung, ob die Werte größer als der Radius sind. In diesem Fall werden diese Zahlenwerte durch Not-a-number ersetzt. Eine Löschung der Werte ist somit nicht erforderlich, wodurch der Rechenaufwand des Skripts reduziert wird.

Die Positionsangaben mit den entsprechenden Höhendaten, welche innerhalb des Kreises liegen, werden in eine neue Matrix geschrieben. Es werden hierbei erneut alle identischen Wertepaare identifiziert. Die zwischengespeicherten Datensätze werden mit Circle\_before, welche der Ausgangsoberfläche entspricht, sowie mit Circle\_after für die eingesetzte Probe bezeichnet. Die Ergebnisgenauigkeit wird sichergestellt, indem eine ausreichende Anzahl an Messpunkten vorhanden ist. Folglich wird die

Datenmenge bestimmt, welche nach dieser Auswahl noch vorliegt. Es wird die Anzahl der ermittelten Zeilen, welche innerhalb des Kontaktbereichs liegen, für die durchlaufenen Datensätze ausgegeben.

Während der Messung mit dem Mikroskop werden die Bilder auf verschiedenen Fokusebenen aufgenommen und zusammengefügt. Der voreingestellte Z-Messabstand des Objektivs wird bei jeder Messung automatisch eingestellt, wodurch innerhalb eines Toleranzbereichs Abweichungen zwischen zwei verschiedenen Messungen innerhalb der Höhendaten auftreten. Vor diesem Hintergrund ist das unterschiedliche Niveau der gemessenen Höhenprofile auszugleichen. Da die Kontaktfläche nach dem Einsatz Verschleißerscheinungen aufweist, werden für den Höhenausgleich die Messbereiche verwendet, welche außerhalb dieser Kreisfläche liegen. An diesen Bezugsebenen tritt kein Oberflächenverschleiß auf, wodurch vergleichbare Rauheitsprofile vorliegen und somit eine Verfälschung während des Niveaueingleichs ausgeschlossen wird. Vor diesem Hintergrund ist eine Ausgleichsfunktion im Auswertalgorithmus integriert, um die Profile übereinander zu legen. Die entsprechenden Messdaten werden als `Valuepairs_OutofContact_before` oder `Valuepairs_OutofContact_after` gespeichert. Es wird der Mittelwert bestimmt und als Parameter für die Verschiebung definiert. Zusätzlich wird die Standardabweichung berechnet sowie der maximale Abstand zwischen den Bereichen, um die Genauigkeit der Berechnung zu prüfen. Als weitere Kontrollfunktion wird die Länge der Matrizen identifiziert, welche die Messdaten der Bereiche außerhalb der Kontaktfläche beinhalten. Über eine im Auswertalgorithmus integrierte Vergleichsfunktion werden Höhenprofile der Ausgangsfläche sowie der eingesetzten Oberfläche anschließend übereinandergelegt, indem die Höhendifferenzen voneinander subtrahiert werden. Zu diesem Zweck werden die Rauheitsprofile der Bezugsebenen zeilen- und spaltenweise abgerastert und die Summe der Differenzen zwischen den einzelnen Höhenwerten bestimmt. Über eine Vergleichsoperation wird zunächst kontrolliert, in welche Richtung der Höhenversatz während der Mikroskopmessung aufgetreten ist. Zu diesem Zweck werden die Werte miteinander verglichen, welche im Messbereich außerhalb der tatsächlichen Kontaktfläche liegen. Bei dieser Vorgehensweise ist darauf zu achten, wie sich der Höhenversatz auf die Messwerte und somit das Rauheitsprofil auswirkt. Es ist möglich, dass durch den Z-Messabstand das Höhenprofil der Ausgangsoberfläche höher liegt als das Profil der eingesetzten Oberfläche. Trifft diese Bedingung zu, werden die Profilhöhen der Ausgangsoberfläche um die zuvor berechnete Verschiebung in negative Richtung korrigiert. Ein neuer Datensatz mit den aktualisierten Positionswerten wird in `NEWPos_A_Z` hinterlegt sowie den

ursprünglichen Messpunkten in NEWPos\_E\_Z zugeordnet. Als Alternative wird eine weitere Schleife durchlaufen, sobald die Anweisung nicht zutrifft. In diesem Fall erfolgt eine Korrektur der Messpunkte, welche aus dem Datensatz vor dem Einsatz stammen, in positive Richtung. Die aktuellen Höhendaten in Z-Richtung werden mit ihren zugehörigen X- und Y-Werten, welche nach der Positionskorrektur vorliegen, jeweils in eine neue Datei mit der Bezeichnung NEW\_circle\_before und NEW\_circle\_after gespeichert.

Für die Berechnung des abrasiven und adhäsiven Verschleißvolumens sind die Informationen der Z-Koordinaten erforderlich. Es werden die Differenzen zwischen den einzelnen Höhendaten innerhalb des Kreisbereichs zwischen der verschlissenen Oberfläche und der Ausgangsfläche gebildet. Durch abrasive Vorgänge erfolgt ein Materialabtrag, wodurch Riefen entstehen. In diesem Fall gilt, dass der Abstand zwischen dem Ausgangsprofil und der eingesetzten Fläche maximal wird. Die Bereiche, welche diese Bedingung erfüllen, werden bestimmt und dem abrasiven Verschleiß zugeordnet. Die Einzelmesspunkte werden durch den Algorithmus nacheinander durchlaufen. Bei Adhäsionsverschleiß werden AlSi-Partikel auf der Pin-Oberfläche angelagert, weshalb die resultierenden Rauheitswerten oberhalb des ursprünglichen Profils liegen. Im Vergleich zur Abrasion wird der Abstand zwischen den eingesetzten Flächen und der Ausgangsfläche maximal und diese Daten als Adhäsion definiert. Die Summe über die ermittelten Differenzen wird jeweils gebildet, um das abrasive und adhäsive Verschleißvolumen zu bestimmen. Für diese Berechnung wird das sogenannte Riemann-Integral verwendet. Mittels dieser Integralfunktion wird der Flächeninhalt zwischen dem gemessenen Rauheitsprofil und der Abszisse ermittelt. Das Integrationsintervall wird in Teilabschnitte mit dem Wert 1 geteilt. Jedoch muss dieser Parameter für den vorliegenden Fall angepasst werden. Die tatsächliche Breite ist durch die Schrittweite zwischen zwei Messpositionen in X- und Y-Richtung vorgegeben. Die Flächeninhalte bezogen auf den abrasiven und adhäsiven Verschleiß werden mit diesem Wert zur Berechnung des jeweiligen Volumens multipliziert. Die Endergebnisse werden in der Einheit  $\text{mm}^3$  ausgegeben.

Mithilfe des entwickelten Auswerteprogramms ist eine Abschätzung der Verschleißvolumina für überlagerte abrasive und adhäsive Verschleißvorgänge möglich. Es kann davon ausgegangen werden, dass Riefen infolge von Abrasion durch eine anschließende Materialanhaftung nicht vollständig wieder überlagert werden. Wie in Bild 4 dargestellt, werden Ausgangsprofil und verschlissenes Profil übereinandergelegt. Durch diese Vorgehensweise wird sichergestellt, dass alle Profilabweichungen erfasst werden.

In diesem Zusammenhang wird durch den Algorithmus das ursprüngliche Profil zentral im Bereich des Höhenprofils der verschlissenen Oberfläche positioniert. Falls abrasiv entstandene Riefen lediglich mit neuen Materialanhaftungen bedeckt wurden und somit keine AISi-Partikel in diesen Vertiefungen selbst vorhanden sind, ist eine Erfassung von Abrasion und Adhäsion an dieser Stelle möglich. Eine Trennung der Verschleißformen ist jedoch nicht realisierbar, sobald Material der AISi-Schicht in den Tälern während der Relativbewegung in die Täler eingelagert wird. Das ursprüngliche Rauheitsprofil dient als Bezug. Der zeilen- und spaltenweise ProgrammDurchlauf sorgt dafür, dass alle Messpunkte erfasst werden. Es werden dadurch auch abrasiv entstandene Riefen identifiziert, welche mit Materialanhaftungen überlagert sind.

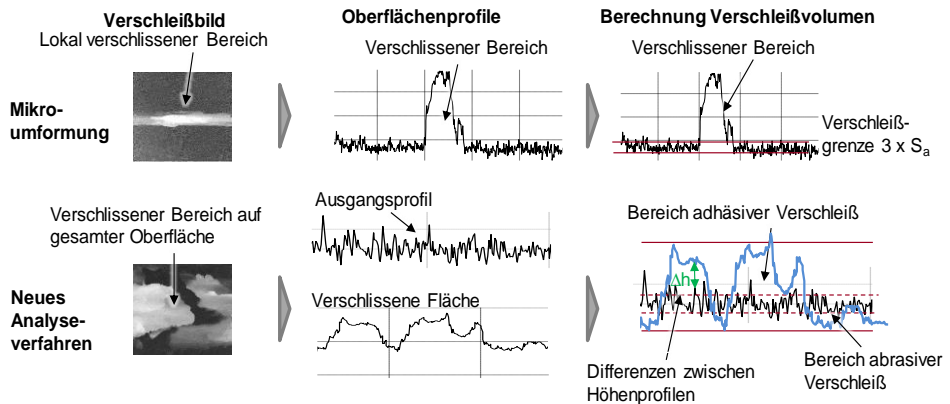


Bild 4: Beispiel zur Überlagerung der gemessenen Höhenprofile

## 5.2 Ergebnisgenauigkeit des Algorithmus

Um eine ausreichende Genauigkeit des Algorithmus hinsichtlich der ermittelten Ergebnisse nachzuweisen, wird im ersten Schritt das Volumen anhand von einfachen mathematischen Zusammenhängen ermittelt. Ziel ist die Prüfung, ob die mathematische Beschreibung zur Berechnung der Verschleißmenge korrekt in das Auswerteprogramm implementiert ist. Zu diesem Zweck werden manuell Datensätze erzeugt, welche in den Auswerteprogramm importiert werden. Anhand der Korrelation zwischen den berechneten Ergebnissen sowie der bestimmten Werte unter Anwendung des Auswerteverfahrens erfolgt eine Bewertung der Methodik. Die erstellten Dateien beinhalten die erforderlichen X- und Y-Positionen, welche jeweils zeilenweise die Werte Null bis Drei durchlaufen. Diese Parameter stellen die identischen Wertepaare dar, welche mithilfe des in Kapitel 5.1 beschriebenen Programms eindeutig erfasst werden. Eine Evaluierung des

Programmablaufes erfolgt anhand der Bestimmung der Verschleißvolumina. Der gewählte Maximalwert der X- und Y-Parameter entspricht einem Durchmesser von 3 mm. Die zugehörigen Z-Parameter werden für den Ausgangszustand auf den Wert Null definiert und mit  $V_0$  bezeichnet. Um eine Materialanhaftung infolge des adhäsiven Verschleißes nachzubilden, wird in einer zweiten Datei ein konstanter Höhenparameter mit 2 mm definiert und mit  $V_1$  bezeichnet. Insgesamt beinhalten die beiden Matrizen 16 Zeilen. Diesen theoretisch ermittelten Ergebnissen werden die Analysen aus experimentellen Untersuchungen gegenübergestellt. Zu diesem Zweck wurde auf die Kontaktfläche des Werkzeugpins ein rechteckiges Plättchen mit den Maßen 2,5 x 2,8 x 0,45 mm positioniert. Das adhäsive Verschleißvolumen wurde anschließend mithilfe des Auswertprogramms bestimmt. Die Identifizierung und Trennung von Abrasion und Adhäsion werden mithilfe der erstellten Datensätze  $V_3$  und  $V_4$  bestimmt. Es werden die Grenzen zunächst auf -2 und 2 gesetzt und anschließend auf -2 und 5 erhöht. Insgesamt werden somit vier Varianten geprüft. Anhand dieser Methodik wird sichergestellt, dass durch den Algorithmus identische Werte zu den theoretisch ermittelten Ergebnissen berechnet werden. Eine Übersicht über die verschiedenen Varianten ist in Bild 5 gegeben.

Messpositionen in X- und Y- Richtung		Höhenwerte Ausgangs- fläche		Variation der Höhenwerte nach dem Einsatz			
x	y	z	z	Adhäsion $V_1$	Adhäsion $V_2$	Adhäsion und Abrasion $V_3$	Adhäsion und Abrasion $V_4$
0	3	0	0	0	0	0	0
1	3	0	2	2	2	-2	-2
2	3	0	2	2	2	2	5
3	3	0	0	0	0	0	0
0	2	0	2	2	2	-2	-2
1	2	0	2	2	2	2	5
2	2	0	2	2	2	-2	-2
3	2	0	2	2	2	2	5
0	1	0	2	2	2	-2	-2
1	1	0	2	2	2	2	5
2	1	0	2	2	2	-2	-2
3	1	0	2	2	2	2	5
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	2	2	-2	-2
2	0	0	0	2	2	2	5
3	0	0	0	0	0	0	0

Experimentell mit vorgegebener Geometrie

Bild 5: Übersicht der idealisierten Messwerte zur Validierung des Algorithmus

Basierend auf diesen erstellten Datenwerten wurden die Verschleißvolumina mathematisch auf Grundlage des Riemann-Integrals mathematisch

berechnet und mit den ermittelten Werten des Algorithmus verglichen. Die Anwendung der Integralgleichung ist nachfolgend zusammengefasst.

$$\int_a^b f(t)dt = \sum_{i=1}^n \int_{a_{i-1}}^{a_i} f_i(t)dt \quad (2)$$

In diesem Zusammenhang werden die Differenzen von der jeweiligen Variante nach dem Einsatz mit dem Bezug  $V_0$  bestimmt und aufsummiert. Dieses Zwischenergebnis wird mit der Schrittweite, welche zwischen zwei angrenzenden X- oder Y-Positionen besteht, für die Berechnung des Verschleißvolumens multipliziert. Es wird davon ausgegangen, dass die Schrittweiten für X und Y identisch sind. In dem vorliegenden Fall ist dieser Wert auf 1 festgelegt. In Bild 6 sind die erwarteten Werte mit den Ergebnissen aus dem Auswerteverfahren gegenübergestellt. Das Volumen, welches durch das Auflegen des Metallplättchens auf die Pin-Oberfläche aus den Experimenten resultiert, wird anhand der Quaderformel mathematisch mit  $3,15 \text{ mm}^3$  berechnet.

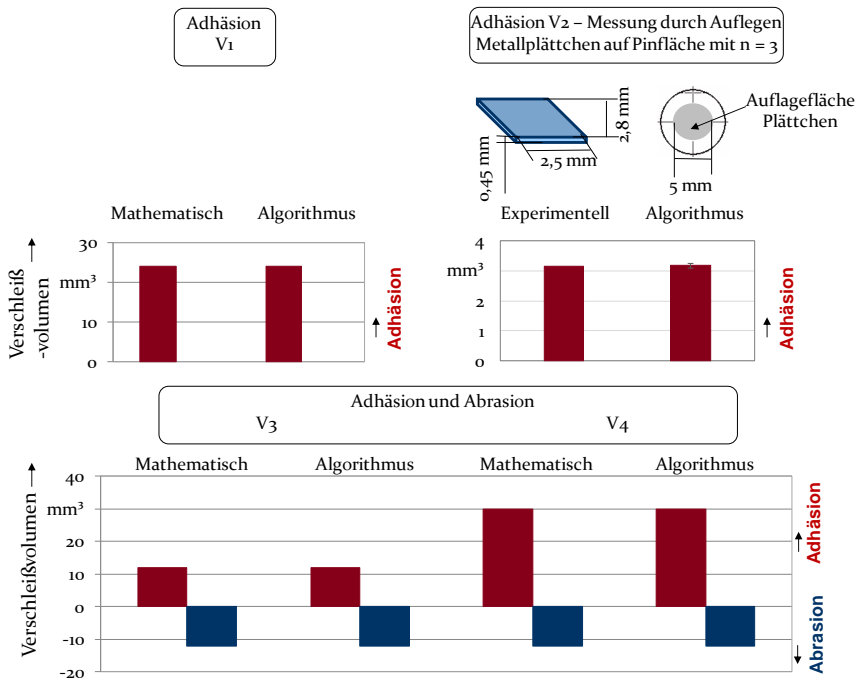


Bild 6: Gegenüberstellung der mathematisch berechneten Volumina mit den Ergebnissen unter Anwendung des Algorithmus und experimenteller Untersuchungen

Die Gegenüberstellung der berechneten und durch das Auswerteprogramm bestimmten Ergebnisse macht deutlich, dass eine hohe Zuverlässigkeit der Ergebnisdaten unter Anwendung der erstellten Auswertemethodik gegeben ist. Die mathematischen Zusammenhänge sind demnach korrekt in das Programm implementiert. Die erwarteten Werte werden mit dem Skript exakt ausgegeben. Während bei V<sub>1</sub> der adhäsive Verschleiß durch den vorgegebenen Datensatz ermittelt wird, erfolgt bei V<sub>2</sub> die Bestimmung der Verschleißmenge anhand von Messdaten. Zu diesem Zweck wurden die Höhenprofile des Pins ohne Metallplättchen als Ausgangszustand in den Algorithmus eingelesen sowie die Daten aus den Messungen mit dem Plättchen. Nach drei Wiederholvorgängen wurde der Mittelwert mit  $3 \text{ mm}^3 \pm 0,07 \text{ mm}^3$  berechnet. Dieser Wert weicht um  $0,15 \text{ mm}^3$  vom theoretischen Wert von  $3,15 \text{ mm}^3$  ab. Durch die Erweiterung der Datenzusammensetzung bei V<sub>3</sub> und V<sub>4</sub> wird Abrasion sowie Adhäsion ermittelt. Die Ergebnisse stimmen mit ausreichender Genauigkeit mit den theoretischen Parametern überein.

Anhand dieser Vorgehensweise ist der Nachweis erbracht, dass exakte Volumina berechnet werden. Jedoch ist keine Aussage hinsichtlich der Wiederholgenauigkeit möglich. Aus diesem Grund erfolgt eine weitere Validierung unter Verwendung realer Messdaten. Zu diesem Zweck wurden an einem Werkzeugpin drei Wiederholmessungen an identischer Messposition durchgeführt. Um ebenfalls zu gewährleisten, dass auch vergleichbare Verschleißmengen bei geringen Abweichungen der X- und Y-Positionen oder bei veränderter Winkelausrichtung der Pin-Oberfläche vorhanden sind, werden die Versuchsprüben bewusst unterschiedlich, wie in Bild 7 veranschaulicht, auf dem Messtisch positioniert.

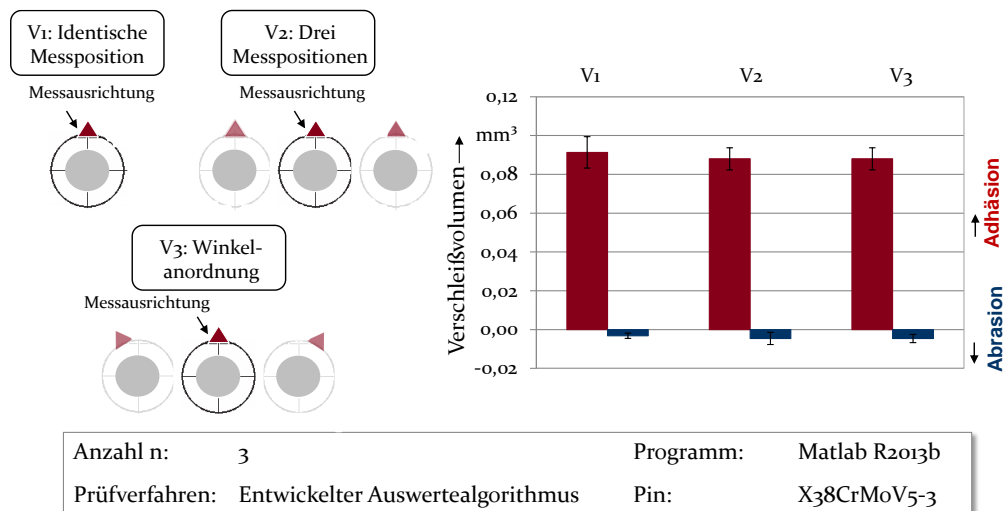


Bild 7: Messwiederholungen in Abhängigkeit von der Messposition

Anhand der ermittelten Verschleißvolumina ist eine hohe Wiederholgenauigkeit des Algorithmus gegeben. In Abhängigkeit der Messposition liegen die Werte des adhäsiven Verschleißes im Bereich von  $0,09 \text{ mm}^3$ . Die ermittelten Standardabweichungen liegen für den Adhäsionsverschleiß bei circa  $0,003 \text{ mm}^3$ . Eine mögliche Ursache für diese Streuung ist dadurch begründet, dass die Messtischoberfläche keine ideale ebene Fläche aufweist. Bereits eine geringe Krümmung der Auflage oder Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit sorgt für eine Differenz im Messergebnis. Zudem ist zu berücksichtigen, dass im Mikrometerbereich die Oberflächenrauheit der Werkzeugpins erfasst wird, weshalb eine Abweichung der Messdaten zu erwarten ist. Zusätzlich wird durch das Mikroskop automatisch der Fokusbereich eingestellt. Für die Bildzusammensetzung werden auf unterschiedlichen Fokusebenen Einzelbilder gemessen und anschließend zusammengefügt. Infolge des Toleranzbereiches durch das Objektiv wird hierdurch ebenfalls das resultierende Messergebnis beeinflusst. Aufgrund der geringen Standardabweichung ist jedoch ein signifikanter Einfluss variierender Pinausrichtungen auf dem Messtisch auszuschließen. Die unterschiedliche Positionsanordnung des Pins in  $V_2$  ist um circa  $25 \text{ mm}$  zur Ausgangsposition verschoben. Für die Ermittlung der Auswirkungen einer Variation der Winkelausrichtung der geprüften Verschleißfläche in  $V_3$  wurde der Pin zwischen den Messungen um  $\pm 45^\circ$  gedreht. Eine Aussage über höhere Schwankungen in den Messanordnungen ist demnach nicht möglich. Jedoch wird in dem verwendeten Messaufbau sichergestellt, dass die jeweiligen Pins möglichst exakt an derselben Position und Ausrichtung mit dem Laser-Scanning Mikroskop gemessen werden. Vor diesem Hintergrund ist eine hinreichende Genauigkeit und Anwendbarkeit der neuartigen Auswertemethodik gegeben.

### 5.3 Gegenüberstellung mit konventionellen Methoden

Die entwickelte Analysemethodik wird im Folgenden mit konventionellen Auswerteverfahren verglichen. Eine wesentliche Herausforderung im Hinblick auf die Verschleißcharakterisierung stellt die Unterscheidung der verschiedenen auftretenden Verschleißmechanismen voneinander dar, welche abhängig von den Prozessparametern und Werkstoffpaarungen auftreten. Erst durch die Kenntnisse der Wirkzusammenhänge zwischen Verschleiß und Prozessbedingungen ist es möglich, die wesentlichen Einflussfaktoren auf das Werkzeugversagen infolge der vorhandenen Oberflächenbeschädigung und dadurch Verschleißschutzmaßnahmen abzuleiten. Die bekannten Auswerteverfahren aus dem Stand der Technik in Kapitel 2.3.2 sind auf eine qualitative Bewertung des Oberflächenverschleißes

beschränkt, indem die unterschiedlichen Verschleißformen anhand von Oberflächenbildern nachgewiesen werden. Zusätzlich wird mithilfe dieser Verschleißcharakterisierung festgestellt, ob die Wirkfläche vollständig verschliffen ist oder lediglich lokaler Verschleiß auftritt. Eine quantitative Beschreibung des Oberflächenverschleißes ist nicht möglich, weshalb eine Bewertung unterschiedlicher Werkstoffpaarungen hinsichtlich der Verschleißbeständigkeit eingeschränkt ist. Klassische Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen (REM) und Mikroskopbilder der Kontaktflächen stellen etablierte Verfahren zur Qualifizierung des Verschleißverhaltens von tribologischen Systemen dar. Folglich werden REM-Analysen zum Nachweis von Materialanhaftungen oder der chemischen Elementzusammensetzung der Werkstoffe genutzt, welche jedoch nur einen definierten Ausschnitt der Messproben erfassen. Eine Auswertung der vollständigen Kontaktfläche ist nicht realisierbar. Durch Höhenbilder aus Mikroskopmessungen werden hingegen ein größerer Aufnahmebereich erfasst und zusätzlich mithilfe einer Farbskala die Oberflächenveränderungen infolge des Verschleißes illustriert. Eine Aussage hinsichtlich des Verschleißverhaltens ist mit dieser Vorgehensweise erst durch einen Vergleich der unverschliffenen Ausgangsoberfläche mit der Kontaktfläche nach dem Einsatz möglich. Dieser Zusammenhang wird in Bild 8 durch die REM-Aufnahmen sowie Höhenbilder verdeutlicht.

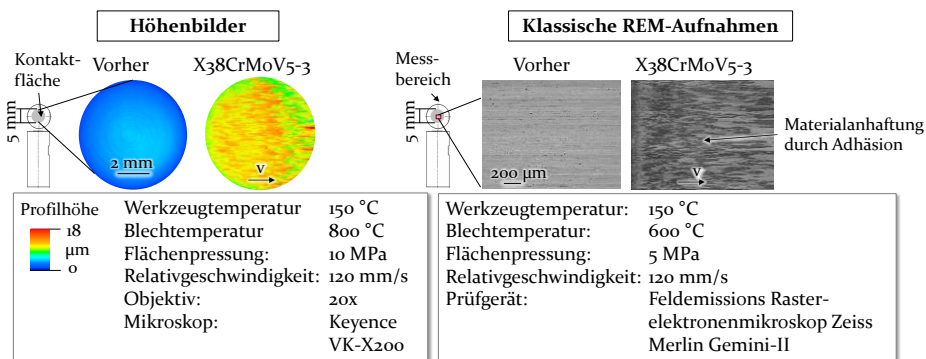


Bild 8: Qualitative Messmethoden zur Bewertung des Oberflächenverschleißes

Anhand der Höhenbilder ist zu erkennen, dass der Oberflächenverschleiß über den gesamten Kontaktbereich auftritt, während die Ausgangsoberfläche poliert ist. Die Verschleißerscheinungen sind in Bewegungsrichtung orientiert. Unter Berücksichtigung der Farbskala der Profilhöhe wird eine signifikante Zunahme der Oberflächenrauheit nachgewiesen. Die auftretenden Oberflächenbeanspruchungen, welche von den Kontaktbedingungen auf mikroskopischer Ebene abhängen, beeinflussen während der Relativbewegung zwischen Grund- und Gegenkörper das Verschleißverhalten.

Folglich nimmt der Werkzeugverschleiß in den Bereichen zu, an denen die höchste mechanische Beanspruchung auftritt. Zusätzlich werden die Kontaktbereiche, welche infolge der Adhäsionsneigung miteinander verschweißt sind, durch die Gleitbewegung wieder voneinander getrennt, indem Material aus beiden Kontaktflächen herausgerissen wird. Unter dieser Annahme sind die roten Bereiche mit Profilhöhe von 18  $\mu\text{m}$  sowie die gelben und grünen Regionen erklärbar, welche im Bereich 9  $\mu\text{m}$  liegen. Diese Farbbereiche stellen die unterschiedlichen Höhendifferenzen dar, welche einen Grenzbereich bis 18  $\mu\text{m}$  angeben und dadurch die lokalen Unterschiede der Verschleißerscheinungen beschreiben. Diese Höhenunterschiede und die Aufnahme der Oberflächentopografie deuten darauf hin, dass Adhäsionsverschleiß eine mögliche Ursache für die Oberflächenbeschädigung darstellt. Um diese Annahme zu bestätigen, werden die Topografien den klassischen REM-Aufnahmen gegenübergestellt. Im Vergleich zur Ausgangsoberfläche sind die Materialanhaftungen durch AlSi-Partikel auf der Pin-Oberfläche durch die dunklen Bereiche zu erkennen. Die dunklen Bereiche stellen Materialanhaftungen dar, welche während der Gleitbewegung zwischen den Kontaktpartnern durch einen Materialübertrag des weicheren Materials auf den Werkzeugoberflächen resultieren. Als dominierender Verschleißmechanismus tritt metallische Adhäsion in Erscheinung. Unabhängig von der verwendeten Messmethode ist durch die Verschleißcharakterisierung mithilfe von Oberflächenaufnahmen keine Angabe der Verschleißmenge der jeweiligen Werkstoffe möglich. Es kann daher keine eindeutige Aussage darüber getroffen werden, unter welchen Prozessvoraussetzungen die Verschleißneigungen begünstigt werden. Für eine Aussage des Verschleißanteils erfolgt in Bild 9 eine Quantifizierung des Oberflächenverschleißes.

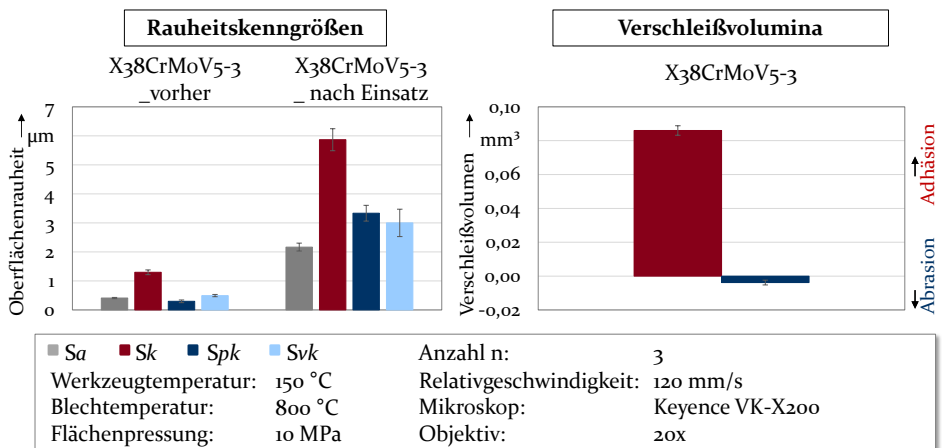


Bild 9: Gegenüberstellung der Rauheitskenngrößen mit berechneten Verschleißvolumina

Die Ermittlung von Rauheitskenngrößen stellt ein Verfahren zur Abschätzung der Verschleißneigung von Festkörpern dar. Für diese Vorgehensweise ist ein Vergleich der Messdaten vor und nach dem Einsatz erforderlich, um eine Oberflächenbeschädigung infolge von Verschleiß nachzuweisen. In Bild 9 ist eine Zunahme aller Rauheitswerte ersichtlich. Es ist zu empfehlen, für die Verschleißcharakterisierung auf die Kennwerte des arithmetischen Mittenrauwerts  $S_a$ , die Kernrautiefe  $S_k$ , die reduzierte Spitzenhöhe  $S_{pk}$  und die reduzierte Riefentiefe  $S_{vk}$  zurückzugreifen, da diese Angaben zur Beurteilung der Oberflächenqualität etabliert sind. Der Vorteil dieser Größen ist, dass durch  $S_a$  die mittlere Abweichung des Rauheitsprofils angegeben wird, während durch die Kombination von  $S_k$ ,  $S_{pk}$  und  $S_{vk}$  eine Einteilung des Profils in die drei Traganteile erfolgt und somit Strukturänderungen erfasst werden [111]. Durch den Spitzenbereich, welcher  $S_{pk}$  zugeordnet ist, wird es ermöglicht, eine Aussage hinsichtlich des Adhäsionsverschleißes zu treffen. Durch  $S_{vk}$  als Riefenanteil erfolgt eine Bewertung des abrasiven Verschleißes. Ein Vergleich der gemessenen Rauheitswerte zeigt, dass eine Aussage der verschiedenen Verschleißmechanismen nicht eindeutig erfasst werden kann. In diesem Zusammenhang weisen  $S_{pk}$  und  $S_{vk}$  vergleichbare Werte von circa  $3 \mu\text{m}$  auf. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung ist keine eindeutige Aussage hinsichtlich der dominierenden Verschleißerscheinungen möglich. Durch Verwendung der Rauheitskenngrößen ist die Verschleißcharakterisierung auf die Bewertung der Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit infolge des Verschleißes beschränkt. Treten mehrere Verschleißmechanismen wie beispielsweise Abrasion und Adhäsion simultan während des Reibkontaktes auf, ist eine Unterscheidung mithilfe konventioneller Rauheitsmessungen nicht zuverlässig durchführbar. Zusätzlich führen Materialanhaftungen auf der Werkzeugoberfläche, welche durch adhäsive Wechselwirkung bedingt sind, nicht in allen Fällen zu einer signifikanten Zunahme oder Veränderung der Rauheitskenngrößen, da lediglich eine dünne Schicht auf der ursprünglichen Fläche angelagert ist. Vor diesem Hintergrund ist dieses Auswerteverfahren nur für eine erste Abschätzung des Oberflächenverschleißes geeignet. Die Berechnung der Verschleißvolumina mittels der in 5.1 vorgestellten Methodik stellt hingegen ein einfaches Verfahren dar, um eine Aussage über die Verschleißmenge zu treffen. In diesem Zusammenhang werden nicht vier Kenngrößen wie bei der Ermittlung der Oberflächenrauheit benötigt, sondern nur jeweils ein Zahlenwert für Adhäsion und Abrasion. Eine Unterscheidung zwischen diesen beiden Verschleißanteilen wird mithilfe dieses Auswerteverfahrens eindeutig möglich. Im Vergleich zu konventionellen Verfahren wird durch die neu entwickelte Methodik der Auswerteaufwand deutlich reduziert.

## **6 Analyse der Oberflächeneigenschaften und des Einsatzverhaltens beschichteter und legierter Presshärtewerkzeuge**

Eine Bewertung von oberflächenmodifizierten Werkzeugen wird hinsichtlich des Einsatzverhaltens vorgenommen. Zu diesem Zweck sind Kenntnisse über die Wirkzusammenhänge zwischen der jeweiligen Oberflächenmodifizierung und dem resultierenden tribologischen sowie thermischen Verhalten erforderlich. Nach der Oberflächencharakterisierung der Werkzeuge werden die Ergebnisse von legierten und beschichteten Proben gegenübergestellt. Um einen Einfluss der Oberflächenrauheit auf das Verschleißverhalten auszuschließen, wird zunächst der arithmetische Mittenrauwert vor und nach dem Modifizieren ermittelt. Zusätzlich wird anhand von WDX-Analysen die Legierungskonzentration gemessen, um Rückschlüsse der chemischen Elementzusammensetzung auf das Verschleißverhalten abzuleiten. Für die Verschleißcharakterisierung werden die Oberflächentopografien vor und nach der Versuchsdurchführung ermittelt. Mithilfe der neuartigen Auswertemethodik erfolgt eine Evaluierung des Verschleißverhaltens von unterschiedlichen Oberflächenmodifikationen. Es wird hierbei zwischen legierten und beschichteten Werkzeugoberflächen unterschieden.

Durch Einbringen von Legierungselementen in den Grundwerkstoff erfolgt beim Laserstrahllegieren eine Gefügemodifizierung zur Verringerung der chemischen Affinität der Kontaktpartner. Mithilfe dieses Verfahrens ist eine lokale Behandlung von höchstbeanspruchten Werkzeugbereichen möglich. Eine großflächige Oberflächenbehandlung ist durch Aufbringen einer Verschleißschutzschicht gegeben, welche durch gezieltes Variieren der Ti-Konzentration an den Presshärteprozess angepasst wird.

Nach den experimentellen Untersuchungen wird mithilfe des entwickelten Auswerteprogramms die Variante mit der höchsten Verschleißbeständigkeit identifiziert, indem die Ergebnisse von legierten und beschichteten Flächen gegenübergestellt werden. Abschließend wird der Wärmeübergang zwischen Werkstück und Werkzeug untersucht, um anhand dieser Ergebnisse nach Aufbringen einer Verschleißschutzschicht auf die Oberfläche eine hohe Abkühlgeschwindigkeit für den Einsatz im Presshärten zu gewährleisten. Erst dadurch wird eine Phasenumwandlung in eine martensitische Struktur erreicht.

## 6.1 Ermittlung der Oberflächeneigenschaften

Neben der Werkstoffpaarung hat die Oberflächentopografie der Kontaktflächen einen erheblichen Einfluss auf das tribologische Verhalten metallischer Festkörper. Die Rauheitshügel werden durch die Interaktion zwischen Werkstück und Werkzeug im mikroskopischen Bereich elastisch und plastisch verformt. Es dringen die Rauheitsspitzen der härteren Oberflächen in die Kontaktbereiche des weicheren Gegenkörpers ein. Als Folge wird insbesondere die Reibung durch die vorhandene Mikrostruktur bestimmt [131]. Im Falle einer geringeren Oberflächenrauheit nimmt die Anzahl der Unebenheiten ab und die wahre Kontaktfläche zu, wodurch ebenfalls die tribologischen Verhältnisse beeinflusst werden. Um in dieser Arbeit eine Bewertung hinsichtlich des Verschleißverhaltens der unterschiedlichen Oberflächenmodifizierungen vornehmen zu können, ist daher die Oberflächenbeschaffenheit der Werkzeugoberflächen im Ausgangszustand zu ermitteln. Die Ergebnisse vor und nach dem Modifizieren sind für den Grundwerkstoff WP7V in Bild 10 illustriert.

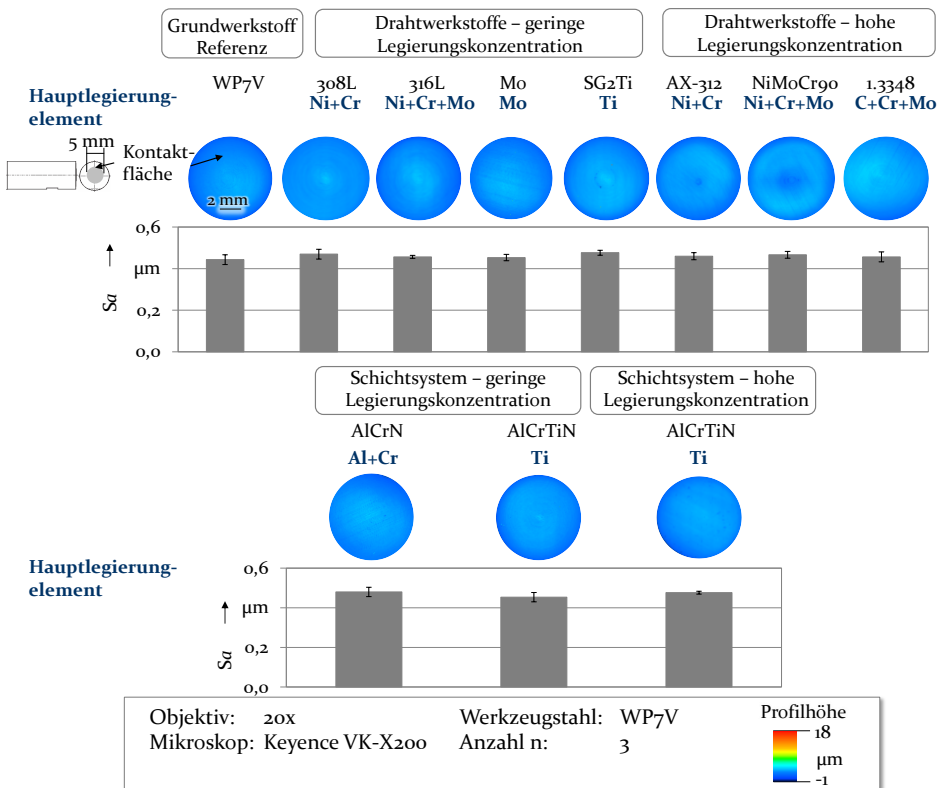


Bild 10: Oberflächenrauheiten vor und nach dem Modifizieren

Von Pelcastre et al. wurden für das Presshärten zwei wesentliche Ursachen für den adhäsiven Werkzeugverschleiß nachgewiesen [65]. Eine raue Werkzeugoberfläche, welche beispielsweise nach mehreren Umformzyklen durch abrasive Vorgänge entstanden ist, führt zu verstärktem Abtrag der AlSi-Schicht des Bleches. Die AlSi-Partikel werden in den Rauheitstälern der Kontaktfläche des Werkzeuges angelagert. Im weiteren Prozessablauf werden infolge der hohen Werkzeugbeanspruchungen neue Metallbindungen und somit festhaftende Schichten auf der Werkzeugoberfläche gebildet. An metallischen Oberflächen tritt dominierend Adhäsion in Erscheinung [65]. In den Berührungsflächen findet eine Wechselwirkung angrenzender Atome statt, wodurch chemische Bindungen zwischen der AlSi-Schicht mit der Grenzfläche des Werkzeuges entstehen [33].

Vor diesem Hintergrund werden die unmodifizierten Oberflächen den legierten sowie beschichteten Varianten gegenübergestellt. Als Rauheitskenngröße wird zur Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit der arithmetische Mittenrauwert  $S_a$  verwendet, da dieser Parameter im industriellen Einsatz als Vorgabe für die Werkzeugoberfläche eingesetzt wird. Ein Vergleich der ermittelten Kennwerte zeigt, dass durch das Legieren sowie durch das Beschichten der arithmetische Mittenrauwert  $S_a$  zunimmt. Diese Tendenz tritt jedoch nur marginal in Erscheinung und die Messergebnisse liegen in einem vergleichbaren Bereich. Durch den Fertigungsprozess des Hartdrehens mit anschließendem Polieren resultiert für alle Proben insgesamt eine geringe Oberflächenrauheit von circa  $0,45 \mu\text{m}$ . Dieser Zusammenhang wird anhand der Oberflächencharakterisierung des Grundwerkstoffes X38CrMoV5-3 in Bild 11 bestätigt.

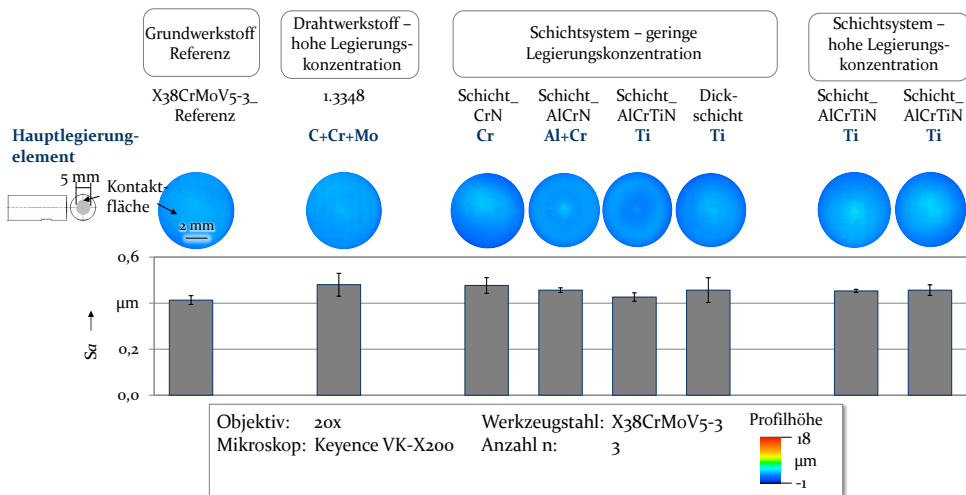


Bild 11: Rauheit der Pin-Oberfläche vor und nach dem Modifizieren

Die ermittelte Oberflächenrauheit ist vergleichbar mit industriellen Werkzeugoberflächen [132]. Ein Vergleich der ermittelten  $Sa$ -Werte mit den Oberflächentopografien zeigt, dass in allen Fällen eine polierte Kontaktfläche vorhanden ist. Es werden keine Riefen nachgewiesen, welche aus dem Fertigungsprozess der Pin-Oberfläche resultieren. Anhand dieser Ergebnisse ist ein primärer Einfluss der Oberflächenstruktur auf das Verschleißverhalten auszuschließen. Ein Eindringen von Unebenheiten durch die Werkzeugoberfläche in die AlSi-Schicht des Blechmaterials ist durch die vorhandene Oberflächenqualität der gefertigten Kontaktfläche minimiert. Eine Analyse für unterschiedliche Werkstoffe ist erforderlich, da eine variierende Materialzusammensetzung zu veränderten Bedingungen hinsichtlich der Oberflächenbearbeitung führt. Es ist daher möglich, dass trotz identischer Fertigungsabfolge und Nachbearbeitung der Kontaktbereiche durch das Polieren Abweichungen in der Oberflächenbeschaffenheit entstehen. Während die Referenzmaterialien aus WP7V und X38CrMoV5-3 mit  $0,41\ \mu\text{m}$  und  $0,44\ \mu\text{m}$  den geringsten  $Sa$ -Wert aufweisen, nimmt diese Rauheitsgröße durch das Beschichten maximal auf  $0,48\ \mu\text{m}$  zu. Durch das Aufbringen eines Schichtsystems auf die Werkzeugoberfläche werden die Partikel des Zusatzmaterials sowohl zwischen als auch auf den Oberflächenunebenheiten angelagert, wodurch tendenziell die Oberflächenrauheit ansteigt. Aus diesem Grund ist nach dem Beschichtungsprozess ein zusätzlicher Poliervorgang erforderlich, um eine glatte Struktur einzustellen.

## 6.2 Untersuchung des Einsatzverhaltens

Im Presshärteprozess ist das Einsatzverhalten der Werkzeuge entscheidend für die resultierende Bauteilqualität sowie deren mechanischen Festigkeiten. Durch den Werkzeugkontakt werden die tribologischen sowie thermischen Verhältnisse während des Umform- und Härtevorgangs der Bauteile beeinflusst. Neben der Verschleißcharakterisierung ist daher eine Analyse des Reibverhaltens erforderlich. In diesem Zusammenhang wird zunächst die Verschleißbeständigkeit von legierten und beschichteten Oberflächen bewertet, indem die Verschleißvolumina nach dem Reibkontakt mithilfe der entwickelten Analysemethodik ermittelt werden. Anschließend erfolgt ein Vergleich der Ergebnisse durch Gegenüberstellen mit den unmodifizierten Referenzproben. Durch diese Vorgehensweise wird ermöglicht, die Oberflächenmodifizierung mit der höchsten Verschleißbeständigkeit zu ermitteln, welche anschließend für Warmstreifenziehversuche zur Untersuchung der Reibbedingungen eingesetzt wird. Durch eine Analyse des Abkühlverhaltens in Abschreckversuchen findet

eine Evaluierung der thermischen Prozessbedingungen statt. Nach Aufbringen einer Verschleißschutzschicht ist ein vergleichbarer Wärmeübergang durch den Werkzeugkontakt vor und nach dem Modifizieren der Werkzeugoberfläche mit dem Blech zu gewährleisten. Zudem werden die mechanischen Kennwerte in Zugversuchen bestimmt, indem Sekundärproben aus den abgeschreckten Platinen entnommen werden.

### 6.2.1 Analyse des Verschleißverhaltens

Um ein tieferes Verständnis hinsichtlich des Verschleißverhaltens zu erhalten, ist in Bild 12 repräsentativ für den unmodifizierten Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-3 die Verschleißentwicklung dargestellt. Die Oberflächentopografien wurden nach 50 mm, 250 mm, 500 mm und 1250 mm Verfahrenweg gemessen. Diese Verschleißstrecken wurden gewählt, da in [P4] nachgewiesen wurde, dass bereits die höchste Zunahme des Oberflächenverschleißes nach 750 mm erreicht wird. Die Versuchsdurchführung beinhaltet pro Pin das Abfahren von 25 Spuren mit jeweils einer Länge von 50 mm. Neben der Analyse der Kontaktfläche des Pins werden die einzelnen Verschleißspuren des Blechs untersucht, um Rückschlüsse auf Materialabtrag der AlSi-Schicht anhand der Topografien zu ziehen.

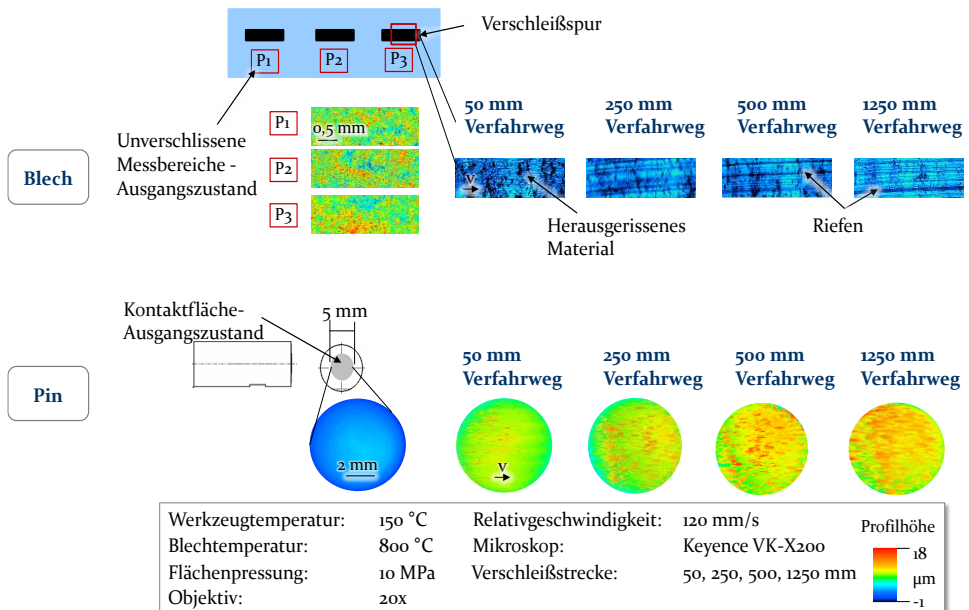


Bild 12: Repräsentative Darstellung der Verschleißentwicklung anhand der Topografie für X38CrMoV5-3 und 22MnB5

Die Ausgangsoberfläche des Pins weist eine glattpolierte Struktur auf. Eine Vorzugsrichtung durch Riefen ist nicht zu erkennen. Um einen Einfluss dieser Unebenheiten infolge einer Oberflächenbearbeitung auf den Oberflächenverschleiß auszuschließen, wurden die Kontaktflächen durch Hartdrehen, Schleifen und Nachbearbeitung durch Polieren gefertigt. Durch diese Bearbeitungsschritte wird verhindert, dass lokale Anhaftungen beispielsweise infolge von  $90^\circ$  zur Bewegungsrichtung orientierte Schleifriefen auftreten [P5]. In [P5] fand ein Nachweis statt, dass durch eine Vorzugsrichtung von Riefen auf der Pin-Oberfläche das Verschleißverhalten beeinflusst wird. Es kommt insbesondere vermehrt zu Materialanhaftungen auf den Rauheitsspitzen, sobald diese  $90^\circ$  zur Relativbewegung ausgerichtet sind [P5].

Die Topografieaufnahmen des Bleches vor Versuchsbeginn deuten auf eine hohe Oberflächenrauheit des Blechwerkstoffes hin. Die Messung wurde nach dem Austenitisieren aufgenommen, um die Oberflächenbeschaffenheit vor dem Reibkontakt von Werkzeug und Werkstück zu bewerten. Für die Messungen wurden drei verschiedene Positionen auf der Werkstückoberfläche gewählt. Anhand der Aufnahmen wird nachgewiesen, dass die Oberflächenstruktur lokale Erhöhungen und Vertiefungen aufweist. Dieser Zusammenhang ist durch die Übergänge zwischen den roten und blauen Farbbereichen der Höhenprofile dargestellt. In Kontakt mit dem Werkzeugpin wird Material primär an den Spitzenbereichen der Blechoberfläche abgetragen. Folglich kommt es zu verstärkten Anhaftungen von AlSi-Partikeln an den Kontaktbereichen der Pin-Oberfläche, welche in direktem Kontakt mit den Erhöhungen des Bleches stehen. Dieses Verschleißverhalten wird an den Oberflächentopografien des Pins durch die teilweise stärker ausgeprägten roten Farbbereiche veranschaulicht.

Infolge der Relativbewegung zwischen Pin und Werkstück findet eine elastische und plastische Deformation des weicheren Kontaktpartners statt [41]. Während des Reibkontaktes werden AlSi-Partikel aus der Blechoberfläche in Gleitrichtung herausgebrochen. Zudem kommt es bereits nach 50 mm Verfahrensweg zu einer Einglättung der Kontaktfläche des Blechs, welche durch die gleichmäßige Verteilung der blauen Bereiche deutlich wird. Es sind keine Differenzen mehr zwischen unterschiedlichen Farbbereichen zu erkennen. Das Rauheitsprofil bleibt auf einem identischen Niveau und es treten keine signifikanten Höhenunterschiede auf. Zusätzlich sind Bereiche an herausgerissenem Material sowie tiefe Furchen entlang der Verschleißspur am Blech identifizierbar. Eine mögliche Ursache hierfür ist durch harte Oxidpartikel begründet. Aus der Literatur ist bekannt, dass Oberflächen auf Eisen- oder Aluminiumbasis zur Bildung von

Oxidschichten neigen [133]. Während der Wärmebehandlung beim Presshärten entsteht infolge der hohen Temperaturen eine feste Oxidschicht auf dem Blechmaterial, welches durch die Arbeit von Chang et al. bestätigt wird [134]. Infolge der Relativbewegung werden diese harten Partikel aus der Blechoberfläche abgetragen, welche anschließend in das Werkstückmaterial eindringen. In Bewegungsrichtung wird die AlSi-Schicht durch diese abrasiven Vorgänge in Form von Riefen beschädigt.

Im Vergleich zum Blechmaterial weist der Werkzeugpin eine signifikant höhere Oberflächenhärte auf, sodass auf makroskopischer Ebene eine Verformung der Oberflächenunebenheiten des Werkzeuges auszuschließen ist. Jedoch führen die wirkenden Bindungskräfte zwischen den metallischen Festkörpern zu Materialanhaftungen an der Pin-Oberfläche [33]. Diese Wechselwirkung wird durch eine Zunahme der wahren Kontaktflächen zwischen der Werkstoffpaarung begünstigt, indem die Anzahl der Bindungen zunehmen. Anhand der Verschleißentwicklung in Bild 12 ist ein kontinuierlicher Anstieg des adhäsiven Oberflächenverschleißes nachweisbar, welcher jedoch nach der ersten Verschleißspur bei einer Verfahrstrecke von 50 mm noch nicht wesentlich in Erscheinung tritt. Eine Zunahme von Materialanhaftungen wird bereits nach 250 mm Gleitweg deutlich. Nach einer Verschleißstrecke von 500 mm und 1250 mm ist die höchste Zunahme des Materialübertrages auf dem Pin erkennbar. Die Messungen werden durch die Berechnungen der Verschleißvolumina in Bild 13 bestätigt.

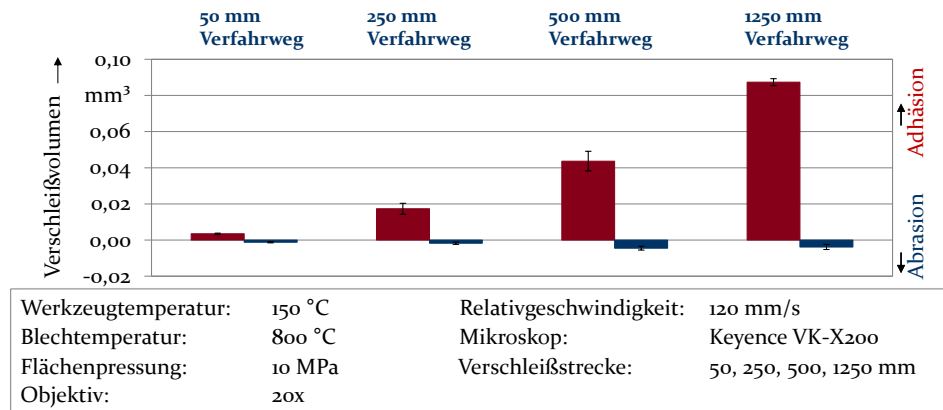


Bild 13: Repräsentative Ermittlung der Verschleißvolumina für X38CrMoV5-3

Während nach der ersten Verschleißspur lediglich  $0,006 \text{ mm}^3$  ermittelt werden, ist bereits nach 250 mm Verschleißstrecke ein Anstieg auf  $0,024 \text{ mm}^3$  vorhanden. Nach fünf Verschleißspuren beträgt das adhäsive Verschleißvolumen demnach das Vierfache. Diese Tendenz wird nach einem Verfahrweg von 500 mm mit  $0,045 \text{ mm}^3$  und nach einer

Gesamtstrecke von 1250 mm mit  $0,085 \text{ mm}^3$  nachgewiesen. Vergleichbare Ergebnisse konnten Schirdewahn et al. mit ihrer Methode zur Ermittlung der Verschleißmenge infolge von Adhäsion nachweisen [135]. Anhand der in Bild 13 berechneten Volumina wird die Auswirkung der wirkenden Bindungskräfte, welche in der Wirkfuge zwischen Blech und Pin in Wechselwirkung stehen, hinsichtlich des resultierenden Adhäsionsverschleißes deutlich. Im Vergleich zur Adhäsion tritt sekundär Abrasion in Erscheinung, welche basierend auf den berechneten Ergebnissen nicht stark ausgeprägt ist. Anhand der Oberflächentopografien ist kein Abrasionsverschleiß in Form von Riefen oder Furchen auf der Pin-Oberfläche erkennbar. Im Presshärteprozess tritt dieser Verschleißmechanismus erst nach einer hohen Anzahl von Umformvorgängen am Werkzeug auf, weshalb anhand der Topografien keine eindeutige Aussage hinsichtlich abrasiver Vorgänge getroffen werden kann [9]. Die ermittelten Verschleißvolumina deuten darauf hin, dass abrasiv beschädigte Oberflächenbereiche des Pins durch erneute Materialanhaftungen der AlSi-Schicht überlagert wurden. Folglich sind diese Bereiche anhand der Oberflächentopografien nicht mehr nachweisbar, weshalb das Auswerteprogramm zur Ermittlung von Abrasion erforderlich ist. Mittels klassischen REM-Aufnahmen sowie WDX-Analysen werden in Bild 14 die Materialanhaftungen von AlSi-Partikeln an der Werkzeugoberfläche bestimmt.

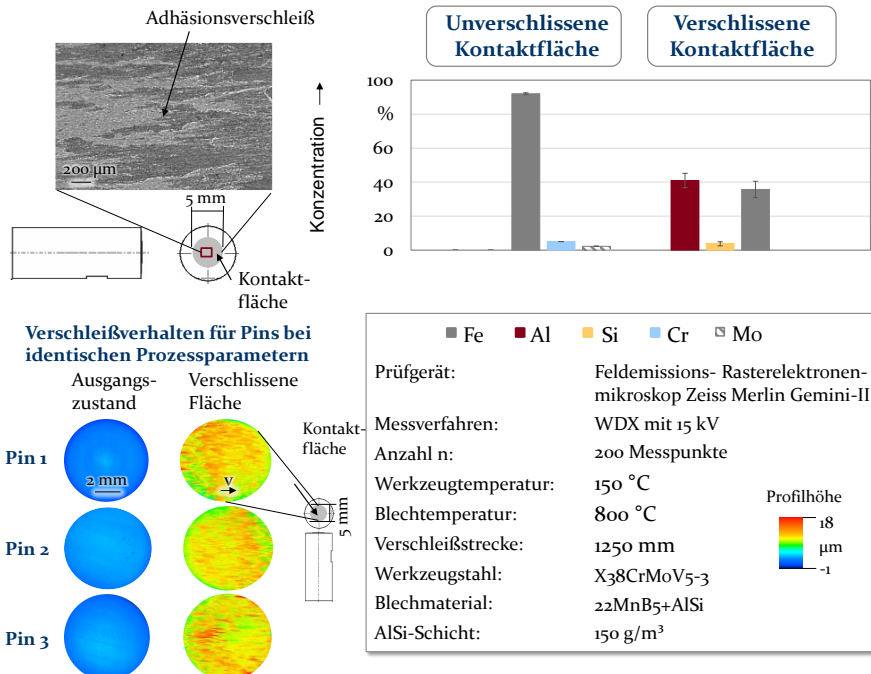


Bild 14: Nachweis von AlSi-Anhaftung infolge des tribologischen Verhaltens

Zusätzlich ist das Verschleißverhalten von drei Pins repräsentativ für die unmodifizierte Referenzprobe X38CrMoV5-3 aufgeführt. Die Oberflächentopografien wurden für jeweils drei Werkzeugpins aufgenommen, welche unter identischen Prozessparametern getestet wurden. Durch diese Messungen wird sichergestellt, dass ein vergleichbares Verschleißverhalten auch für Wiederholmessungen erreicht wird. Alle drei Kontaktflächen der Pins weisen eine ähnliche Verteilung der Materialanhaftungen auf, welche ebenfalls über die gesamte Oberfläche verteilt sind. Eine hohe Messwiederholgenauigkeit ist somit gegeben. In den Oberflächenaufnahmen ist die Materialanhaftung in Form von AlSi-Partikeln durch die dunklen Bereiche erkennbar. Eine Angabe des Höhenprofils ähnlich zu den Topografieaufnahmen ist bei klassischen REM-Aufnahmen nicht möglich. Der ausgewählte Kontaktbereich ist hierbei fast vollständig adhäsiv verschliffen. Nach dem Reibkontakt ist das Blechmaterial infolge der Bildung neuer Metallbindungen mit der Werkzeugoberfläche verschweißt. Durch die strukturelle Ähnlichkeit der metallischen Festkörper kommt es in der Kontaktfläche auf atomarer Ebene zu Diffusionsvorgängen. Die Festkörperbindung des weicheren Blechwerkstoffes wird aufgebrochen, wodurch das herausgebrochene Material an der Werkzeugoberfläche haften bleibt. Um die Anhaftungen von AlSi-Bestandteilen nach dem Einsatz auf dem Pin nachzuweisen, wurden WDX-Analysen durchgeführt. Im Werkzeugstahl X38CrMoV5-3 sind keine Zusätze aus Aluminium oder Silizium vorhanden [51]. Es wird für die Referenzprobe die übliche chemische Zusammensetzung aus Chrom mit 5 Gew.-% und Molybdän mit circa 2 Gew.-% nachgewiesen [51]. Ein Materialübertrag vom Blech auf die Wirkfläche des Werkzeugs ist daher zuverlässig anzunehmen. An der verschliffenen Kontaktfläche wird basierend auf den Messdaten ein Aluminiumanteil von circa 40 Gew.-% gemessen, während Silizium lediglich mit 5 Gew.-% nachgewiesen wird. Der Eisenanteil beträgt hingegen 35 Gew.-%. Während des Reibkontaktes werden AlSi-Partikel auf die Pin-Oberflächen übertragen. Die komplexen tribologischen Vorgänge beeinflussen neben der Bauteilqualität die Werkzeugstandmenge. Vor diesem Hintergrund wird die Wichtigkeit der Verwendung einer geeigneten Oberflächenmodifizierung deutlich. Nachfolgend wird der Einfluss unterschiedlicher Modifizierungsmethoden sowie Legierungsbestandteile auf das Verschleißverhalten untersucht.

### ***Laserstrahllegieren und Einfluss der Elemente Nickel und Chrom***

Um eine geeignete Legierungszusammensetzung zur Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Presshärtewerkzeugen zu ermitteln, wurden zunächst als Hauptlegierungselemente Nickel und Chrom verwendet. Für die Auswahl dieser Elemente wurde auf das Modell von Czichos

zurückgegriffen [33]. In seiner Arbeit wird die Abhängigkeit der Adhäsionsneigung von der Elektronenstruktur der in Kontakt stehenden Metalloberflächen erarbeitet. Die Bildung von neuen Metallbindungen beruht dabei auf der Adhäsionskomponente, welche für die einzelnen Elemente im Periodensystem von links nach rechts tendenziell zunimmt [33]. Im Vergleich zu Chrom verfügt Nickel über eine höhere Dichte an Elektronen. Durch die beiden Elemente ist es möglich, Rückschlüsse zu ziehen, inwieweit die Elektronenstruktur der verwendeten Legierungsbestandteile nach dem Oberflächenmodifizieren einen Einfluss auf die resultierenden Bindungsenergien ausübt. Zusätzlich wird analysiert, ob bei gleichbleibendem Nickelanteil durch eine Steigerung der Chromkonzentration im Grundmaterial eine Veränderung hinsichtlich der adhäsiv wirkenden Bindungskräfte erzielt wird. Für die Oberflächenmodifizierung wurden die Drahtwerkstoffe 308L und AX-312 verwendet und anhand von WDX-Analysen die Elementkonzentration nach dem Legieren wie in Bild 15 bestimmt.

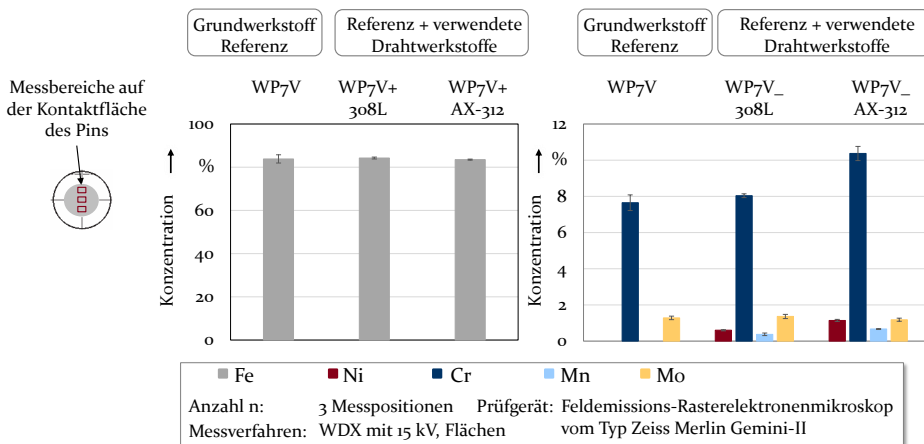


Bild 15: Eingebroughte Elementkonzentration von Nickel und Chrom nach dem Legieren

Für die Messungen wurden drei verschiedene Bereiche auf der Kontaktfläche des Werkzeugpins gewählt. Ein positionsbezogener Einfluss auf das Messergebnis wird dadurch ausgeschlossen und zusätzlich eine gleichmäßige Legierungskonzentration im Grundwerkstoff über die gesamte Fläche sichergestellt. Es wurde eine Flächenmessung durchgeführt. Um eine homogene Verteilung der Legierungselemente im Substrat sicherzustellen, wurde eine Drahtfördergeschwindigkeit von 2 m/min gewählt. Diese Vorgehensweise wurde auch in [P6] angewandt. Zusätzlich wird durch eine konstante Zuführgeschwindigkeit sichergestellt, dass während des Legierungsprozesses eine gleichbleibende Menge des Drahtwerkstoffes der verwendeten Materialien aufgeschmolzen wird. Es wird dadurch ein

vergleichbarer Anteil an Zusatzmaterial in den Grundwerkstoff eingebracht [P6]. Die gemessenen Werte für WP7V entsprechen den zu erwartenden Werten aus dem Datenblatt [120]. Anhand der Ergebnisse aus den WDX-Analysen führt ein Chromanteil des Drahtmaterials AX-312 von 30 Gew.-%, wie in Tabelle 1 aufgeführt, zu einer Konzentration von circa 10,4 Gew.-% im Basismaterial. Die resultierende Legierungskonzentration nach dem Oberflächenmodifizieren ist abhängig von der gewählten Drahtfördergeschwindigkeit, mit welcher der Legierungsdraht in die Prozesszone zugeführt und mit dem Laser aufgeschmolzen wird. Um eine ausreichende Menge an Legierungsbestandteilen in den Grundwerkstoff einzubringen, wurden für den Legierungsprozess eine Geschwindigkeit von 0,2 m/min gewählt [P6]. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass eine Durchmischung der eingebrachten Legierungselemente mit den Elementen aus dem Grundwerkstoff stattfindet. Es kommt dadurch zu einer signifikanten Steigerung der Chromkonzentration. Mangan ist im Grundmaterial WP7V nicht vorhanden, jedoch in den verwendeten Legierungsdrähten. Basierend auf den Angaben im Datenblatt ist ein Mangangehalt nach dem Laserstrahllegieren von circa 1 Gew.-% zu erwarten, welcher durch die Messergebnisse bestätigt wird. Zusätzlich sind die ermittelten Werte für alle legierten Oberflächen auf einem identischen Niveau, weshalb ein signifikanter Einfluss von Mangan auf das Verschleißverhalten zwischen den verschiedenen oberflächenmodifizierten Pins hierbei als unkritisch bewertet werden kann.

Im Vergleich zu Nickel-Bor-Schutzschichten weisen Hartbeschichtungen auf Chrombasis einen hohen Widerstand gegenüber Adhäsion sowie Abrasion auf [136]. Nach Fildes et al. wird im Vergleich zur Nickel-Bor-Beschichtung durch eine Chromschicht die Verschleißbeständigkeit um circa 15 % gesteigert [136]. Vor diesem Hintergrund ist zu erwarten, dass durch Einbringen einer signifikant höheren Chrom- als Nickelkonzentration die chemische Affinität des Grundmaterials reduziert wird. Als weitere Bestandteile werden Molybdän und Mangan mit 1,5 Gew.-% nachgewiesen, welche zwischen den beiden Varianten sowie zum Substratmaterial keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Von einem primären Einfluss dieser Elemente auf das Verschleißverhalten ist somit nicht auszugehen. Der Nickelanteil der legierten Oberflächen variiert lediglich um circa 0,4 Gew.-%. Aufgrund dieses geringen Konzentrationsunterschiedes ist eine Veränderung auf die Adhäsionsneigung auszuschließen. Basierend auf diesen Erkenntnissen sind in Bild 15 die berechneten Verschleißvolumina gegenübergestellt. Für die Untersuchungen werden die Zusatzwerkstoffe mit der Bezeichnung 308L und AX-312 verwendet, welche über einen Nickelanteil von 10 Gew.-% und 9 Gew.-% verfügen. Während die Konzentration an

Nickel annähernd konstant bleibt, weisen die Legierungsdrähte einen unterschiedlichen Chromgehalt auf. Die detaillierte chemische Zusammensetzung der Zusatzmaterialien 308L und AX-312 ist Tabelle 1 zu entnehmen. Durch die Variation lediglich eines Legierungsbestandteiles wird eine Aussage über die Wirkung der jeweiligen Elemente auf die Verschleißbeständigkeit ermöglicht.

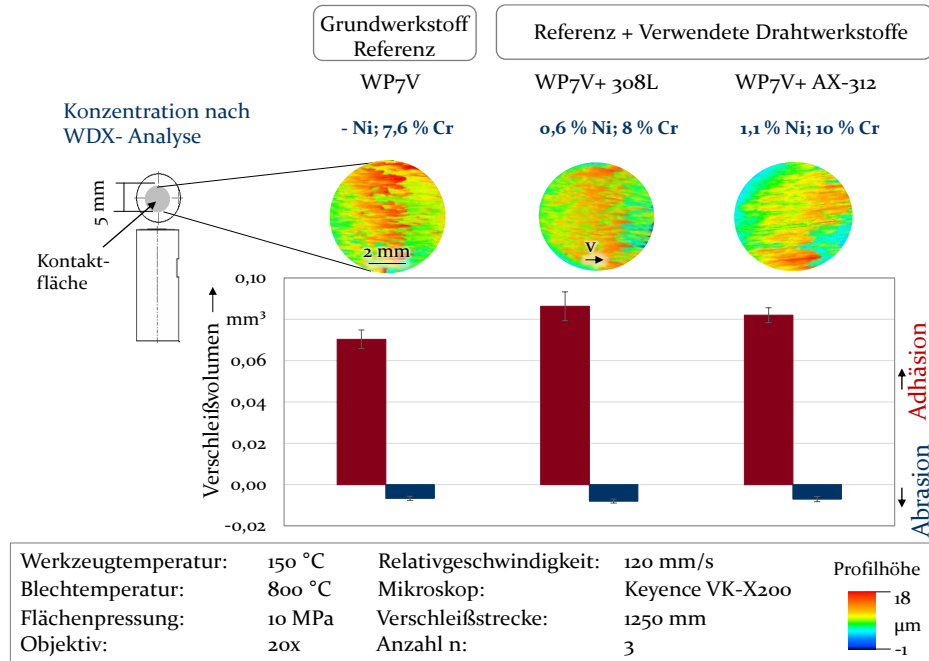


Bild 15: Einfluss der Hauptlegierungselemente Nickel und Chrom

Nach der Versuchsdurchführung haftet Material der AlSi-Schicht an allen Werkzeugpins. Diese Anhaftungen sind durch die gelben und roten Bereiche zu erkennen. Für alle Versuchsproben tritt der Oberflächenverschleiß über die gesamte Kontaktfläche auf. Anhand der Topografieaufnahmen wird deutlich, dass alle Oberflächen zu einer hohen Adhäsionsneigung tendieren. Zusätzlich weisen lokale Bereiche tendenziell stärkere Materialanhaftungen auf. Dieses Verhalten ist dadurch begründet, dass infolge der Oberflächenstruktur der Blechoberfläche während der Relativbewegung vermehrt Materialbereiche mit hoher Rauheit abgetragen werden. Diese AlSi-Partikel führen zu stärkeren Anhaftungen am Werkzeugpin. Dieser Zusammenhang wurde ebenfalls anhand der Untersuchungen hinsichtlich der Verschleißentwicklung in Bild 12 gegenübergestellt, indem eine hohe lokale Oberflächenrauheit der Blechoberfläche nachgewiesen wurde. Eine weitere Ursache ist in der Überlagerung adhäsiver und abrasiven

Verschleißvorgänge begründet. Pujante konnte ebenfalls eine komplexe Interaktion dieser beiden Verschleißformen an polierten Werkzeugoberflächen unter Presshärtebedingungen ermitteln [72]. Während der Relativbewegung wird bereits anhaftendes AlSi-Material aus der Pin-Oberfläche herausgebrochen. An anderen Kontaktbereichen findet eine erneute Anlagerung von herausgebrochenem Blechmaterial statt.

Im Vergleich zu Referenzproben nimmt der Adhäsionsverschleiß für die legierten Proben sogar zu. In diesem Zusammenhang weist 308L ein adhäsives Verschleißvolumen von  $0,096 \text{ mm}^3$  und AX-312 einen ermittelten Wert von  $0,082 \text{ mm}^3$  auf. Beide Werte liegen oberhalb von  $0,075 \text{ mm}^3$  der Referenzprobe WP7V. Als dominierender Verschleißmechanismus tritt Adhäsion ebenfalls für Werkstoffpaarungen bei Raumtemperatur an chemisch vernickelten Kontaktflächen auf [137]. In diesem Zusammenhang besteht eine hohe chemische Affinität zwischen dem Nickel der Beschichtung und dem Eisen des Kontaktpartners [137]. Ebenfalls tritt an laserbeschichteten Cr-Ni-Oberflächen adhäsiver Verschleiß auf, welcher durch den hohen Anteil von Nickel begründet ist [138]. Ein Vergleich zwischen der Schichtzusammensetzung aus 17 % Chrom und 83 % Nickel und der Beschichtung aus 24 % Chrom und 76 % Nickel zeigt, dass durch eine Erhöhung des Chromanteils die Adhäsionsneigung verringert wird [138]. Durch das Einbringen von Nickel in den Substratwerkstoff resultiert demnach tendenziell eine hohe Adhäsionsneigung. Eine mögliche Ursache hierfür ist die hohe Elektronendichte von Nickel. Nach Czichos nimmt die Adhäsionsneigung für Metalle mit einer hohen Dichte an Elektronen zu [33]. Vor diesem Hintergrund sorgt der zusätzliche Nickelbestandteil im Grundwerkstoff für eine Zunahme der atomaren Wechselwirkung zwischen den kontaktierenden Festkörpern. Als Folge treten verstärkt Mikroverschweißungen an der Werkzeugoberfläche auf. Neben der Zunahme des Adhäsionsverschleißes durch Nickel ist jedoch mit einem erhöhten Chromanteil eine Steigerung der adhäsiven Verschleißbeständigkeit möglich. Dieser Zusammenhang wird durch die Verringerung des adhäsiven Verschleißvolumens durch das Modifizieren mit AX-312 gegenüber der legierten Variante mit 308L deutlich. Der Verschleiß wird dabei um circa 15 % reduziert. Eine Gegenüberstellung der ermittelten Verschleißmengen von 308L und AX-312 verdeutlicht, dass hierbei ein dreifach höherer Chromgehalt als Nickel im Drahtwerkstoff für die Modifizierung erforderlich ist. In diesem Zusammenhang wiesen Izdiyad Sidik et al. in ihren Arbeiten nach, dass im Schichtsystem  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  ein höherer Chromgehalt als Nickel vorhanden ist [139]. Basierend auf ihren Ergebnissen verfügt Chrom über eine höhere Verschleißfestigkeit als Nickel [139]. Anhand ihrer Untersuchungen wurde

der geringste Verschleiß für Werkzeugbereiche bestimmt, welche über einen höheren Chrom- als Nickelanteil im Schichtsystem verfügten [139]. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Substratwerkstoff WP7V bereits über 7,8 Gew.-% Chrom verfügt. Folglich ist davon auszugehen, dass ab einer kritischen Chromkonzentration die Adhäsionsneigung zunimmt. Diese Grenze der maximalen Konzentration führt wieder zu einer Erhöhung der Dichte an frei beweglichen Elektronen, wodurch die Bindungskräfte und somit die Bildung neuer Metallbindungen zunehmen. In diesem Zusammenhang wies Zum Gahr nach, dass ab einer Chromkonzentration von 15 Gew.-% in Eisen die Adhäsionsneigung mit Aluminiumoxid zunimmt [116].

Der höchste abrasive Werkzeugverschleiß ist für die modifizierten Oberflächen mit 308L vorhanden. Dieses Ergebnis ist darin begründet, dass eine Überlagerung von adhäsiven und abrasiven Verschleißvorgängen während des Reibkontaktes stattfindet. Es werden hierbei bereits anhaftende Mikroverschweißungen infolge der Relativbewegung herausgebrochen, wodurch eine Beschädigung bis in das Substrat entsteht. Diese Bereiche werden im weiteren Versuchsdurchlauf mit neuem Material der AlSi-Schicht überlagert, weshalb kein Nachweis dieser Oberflächenbeschädigung mit den Topografieaufnahmen möglich ist. Für die Ermittlung des abrasiven Verschleißvolumens mithilfe des Auswerteprogramms ist zu berücksichtigen, dass eine vollständige Erfassung der abrasiven Vorgänge bedingt durch die Überlagerung mit Adhäsionsverschleiß nur bedingt möglich ist. Es kommt während des Reibkontaktes zu Materialanhaftungen in Riefen, welche durch Abrasionsverschleiß hervorgerufen wurden, sodass keine Aussage hinsichtlich überlagerter Verschleißmechanismen getroffen werden kann. Die berechneten Verschleißmengen hinsichtlich Abrasion liegen nahe Null, weshalb Adhäsion den dominierenden Verschleißmechanismus darstellt. Diese Annahme wird durch die Literatur bestätigt [140]. In diesem Zusammenhang entwickelten Le Roux et al. ein Modell zur Beschreibung des adhäsiven und abrasiven Verschleißes [140]. Zu diesem Zweck wurde eine Definition der Verschleißkriterien festgelegt. Ausgehend von einer Referenzlinie wird am Rauheitsprofil der Adhäsionsverschleiß in  $\mu\text{m}^2/\text{mm}$  angegeben. Es wurden lediglich lokale Bereiche entlang der Matrize ausgewählt und diese Vorgehensweise ebenfalls für den abrasiven Verschleiß wiederholt [140]. Abrasion trat geringfügig in Erscheinung, während adhäsive Materialanhaftungen dominierten [140]. Abrasion ist somit sekundär zu betrachten. Eine mögliche Ursache für den geringen Anteil des ermittelten abrasiven Verschleißvolumens besteht darin, dass Material vollständig zwischen den Riefen eingelagert wird. Da durch das Auswerteskript das

Profil der unverschlissenen Oberflächen den Bezug zum Höhenprofil der verschlissenen Kontaktfläche darstellt, werden die freiliegenden Riefenbereiche ermittelt.

### Laserstrahllegieren und Einfluss von Nickel, Chrom und Molybdän

Im Vergleich zu Nickel und Chrom stellt Molybdän ebenfalls einen wichtigen Legierungsbestandteil dar, um neben der Warmfestigkeit die Adhäsionsneigung von Stählen zu erhöhen [141]. Durch Molybdän werden tendenziell die Adhäsionskräfte verringert [141]. Ein Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit wird in diesen Untersuchungen ermittelt. Im Vergleich zum Drahtwerkstoff 316L weisen NiMoCr90 und Mo eine insgesamt geringere Elementkonzentration auf. Die Ergebnisse aus den WDX-Analysen in Bild 16 verdeutlichen, dass nach dem Legieren der resultierende Legierungsgehalt vom verwendeten Draht abhängt. Ein Einfluss des Mangangehalts auf das Verschleißverhalten kann ausgeschlossen werden, da vergleichbare Werte nach dem Legieren im Grundmaterial vorliegen.

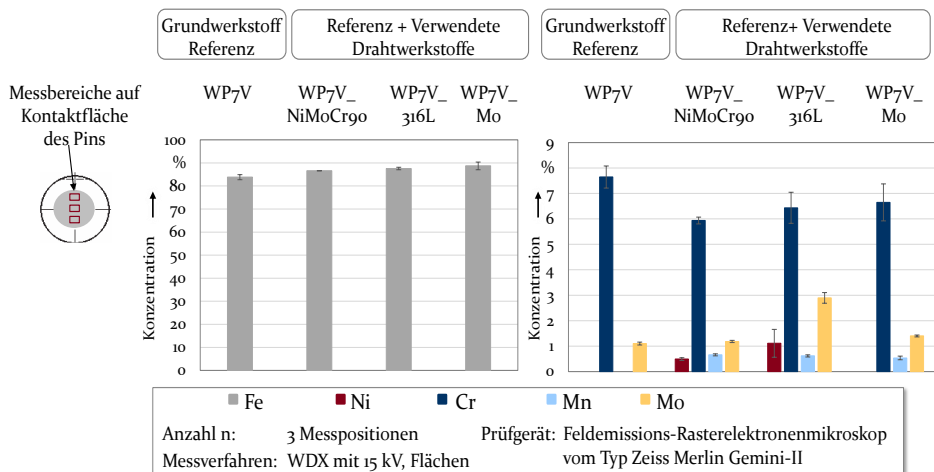


Bild 16: Legierungskonzentration nach dem Legieren mit Nickel, Chrom und Molybdän

Für den unmodifizierte Grundwerkstoff WP7V und die legierte Oberfläche mit NiMoCr90 werden vergleichbare Molybdänkonzentrationen gemessen. Eine signifikante Zunahme der Legierungskonzentration wird daher nach dem Legieren nicht erreicht. Das Legieren mit dem Legierungsdraht Mo führt ebenfalls lediglich zu einem Anstieg von Molybdän um 0,04 Gew.-%. Eine mögliche Ursache hierfür ist, dass der Molybdänanteil mit 0,5 Gew.-% in diesen Drahtwerkstoffen zu gering ist, um eine deutliche Veränderung der chemischen Werkstoffzusammensetzung zu ermöglichen. Die ermittelten Messwerte hinsichtlich des Chromgehalts liegen unterhalb der Ergebnisse von WP7V. Während nach dem Legieren mit 316L

der geringste Anteil an Chrom gemessen wurde, nimmt die Konzentration durch das Verwenden von 316L und Mo tendenziell zu. Die beschriebenen Tendenzen hinsichtlich des resultierenden Molybdängehalts sowie des Chrombestandteils sind auf die Diffusionsvorgänge im Schmelzbad zurückzuführen. Während des Legierungsprozesses findet eine Vermischung zwischen den eingebrachten Elementen und dem Substrat statt [83], sodass insgesamt keine Summierung der einzelnen Bestandteile resultiert. Die resultierende chemische Konzentration nach dem Oberflächenmodifizieren hängt beim Laserlegieren von der Zusammensetzung und den Bestandteilen im Grundwerkstoff ab. Die eingebrachten Legierungsanteile werden dabei hin zum chemischen Aufbau des Basiswerkstoffes verschoben [83]. Um einen höheren Chromgehalt als im Ausgangszustand nach dem Legieren zu erreichen, ist somit ein signifikant höherer Anteil im Draht erforderlich. Während in Mo und NiMoCr90 lediglich 0,5 Gew.-% vorhanden ist, verfügt 316L bereits über 18 Gew.-% Chrom, wodurch eine Steigerung der Chromkonzentration nach dem Legieren erklärbar ist.

Die ermittelten Verschleißvolumina sind in Bild 17 den gemessenen Oberflächentopografien gegenübergestellt. Für die verschiedenen Pin-Oberflächen sind die Legierungskonzentrationen der Hauptlegierungselemente Chrom, Nickel und Molybdän, welche nach dem Laserstrahllegierungsprozess vorliegen, zur Bewertung des Verschleißverhaltens aufgeführt.

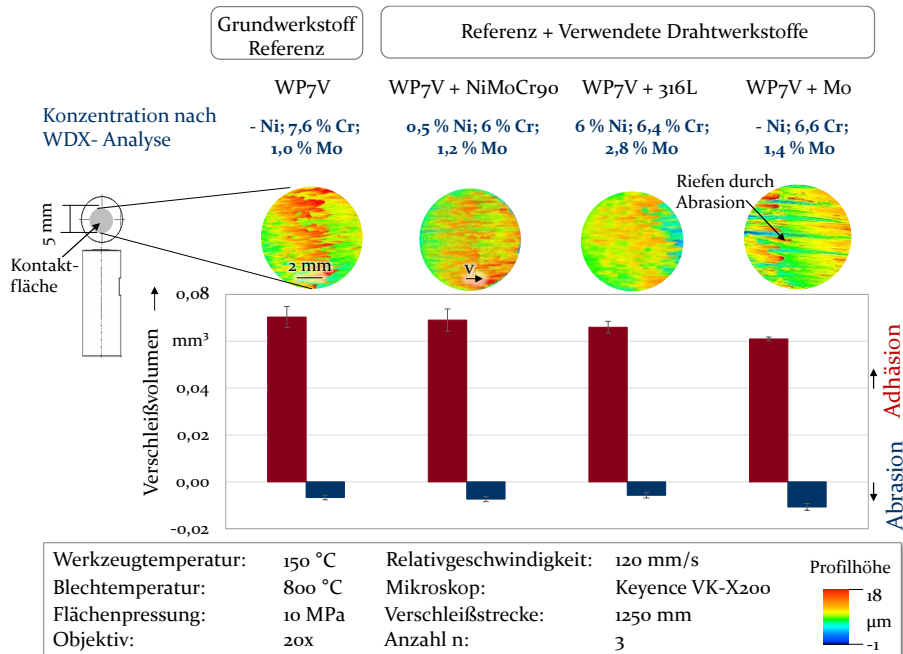


Bild 17: Verschleißvolumina der legierten Werkzeugpins

In den Untersuchungen wurden Legierungsdrähte verwendet, welche primär über eine unterschiedliche Konzentration an Molybdän verfügen. Der Einfluss des Molybdängehalts in Kombination mit Chrom und Nickel wird daher analysiert. In diesem Zusammenhang verfügt die legierte Oberfläche unter Verwendung des Drahtwerkstoffes 308L mit 2,8 Gew.-% über den höchsten Nickel- sowie Molybdänanteil. Die Oberflächenmodifizierung mit NiMoCr90 weist ein ähnliches Verschleißverhalten zu WP7V auf. Im Vergleich zum Referenzwerkstoff ist ein geringer Anteil von Nickel mit 0,5 Gew.-% und ein um circa 1,6 Gew.-% niedrigerer Chromgehalt vorhanden. Die berechneten adhäsiven Verschleißvolumina liegen für beide Versuchsproben im Bereich von 0,7 mm<sup>3</sup>. Ein Vergleich der Oberflächentopografien zeigt ebenfalls eine ähnliche Materialanhaftung der Pin-Oberflächen von WP7V und der legierten Variante mit NiMoCr90. Basierend auf diesen Ergebnissen sorgt eine Kombination aus geringem Zusatz von Nickel bei einer Chromkonzentration von circa 6 Gew.-% im Grundwerkstoff nicht zu einer signifikanten Erhöhung der adhäsiven Verschleißbeständigkeit. In diesem Zusammenhang ergaben Untersuchungen von Yamanoglu et al., dass die adhäsive Verschleißneigung vom Nickelgehalt abhängig ist. Anhand ihrer Untersuchungen ist für die Reduzierung des Adhäsionsverschleißes eine niedrige Konzentration an Nickel im Basismaterial notwendig [142]. Die Ergebnisse bestätigen die Annahme, dass infolge der hohen Elektronendichte von Nickel tendenziell die Bindungskräfte zwischen den Kontaktpartnern zunehmen. Folglich treten vermehrt Materialanhaftungen am Werkzeugpin auf. Trotz des Nickelanteils mit 6 Gew.-% nach dem Modifizieren mit dem Draht 316L nimmt die adhäsive Verschleißmenge für diese Oberflächenmodifikation ab. Eine mögliche Ursache ist im höheren Molybdängehalt mit 2,8 Gew.-% begründet. Sobald kein Nickel in den Substratwerkstoff eingebracht wird und der Molybdängehalt um circa 0,4 Gew.-% erhöht wird, tritt eine tendenzielle Verringerung des Adhäsionsverschleißes auf. Der abrasive Verschleiß nimmt zu, welches anhand der Riefen der Oberflächentopografie sowie des berechneten Volumens mit 0,01 mm<sup>3</sup> nachgewiesen wird. Nach Lin et al. neigen Oberflächenmodifikationen, welche nur Molybdän als Legierungsbestandteil enthalten, zu adhäsivem und abrasivem Verschleiß [143]. Es findet eine Überlagerung dieser Verschleißmechanismen während des Reibkontaktes statt, wodurch die Adhäsionsbindungen aufgebrochen werden. Die Ursache des zunehmenden Abrasionsverschleißes ist, dass abgetragene Materialanhaftungen zur Riefenbildung beitragen [143]. Anhand dieses Zusammenhangs ist die abrasive Oberflächenbeschädigung am legierten Pin in Bild 17 erklärbar.



oberhalb von WP7V liegt, wird nach dem Laserstrahllegieren insgesamt die Legierungszusammensetzung erhöht. Entgegen der Annahme, dass durch eine Reduzierung der Drahtfördergeschwindigkeit eine zunehmende Menge an Zusatzmaterial in den Grundwerkstoff eingeschmolzen wird, findet keine Steigerung des Molybdänanteils statt. Anhand der WDX-Analysen kann eine Abnahme der Legierungskonzentration von 5,8 Gew.-% auf circa 3 Gew.-% nachgewiesen werden. Eine mögliche Ursache ist der Ausgleich von Konzentrationsunterschieden zwischen Substrat und Drahtmaterial infolge einer vollständigen Durchmischung im Schmelzbad. In der flüssigen Phase diffundieren die zugeführten Elemente in den Grundwerkstoff sowie Bestandteile aus der unmodifizierten Grenzfläche in die Legierungszone. Es kommt zu einer gleichmäßigen Verteilung der Elementkonzentration [83]. Durch das Oberflächenmodifizieren des Substratwerkstoffes X38CrMoV5-3 ist eine Übertragung des Legierungsprozesses auf weitere Werkzeugstähle wie in Bild 19 gegeben.

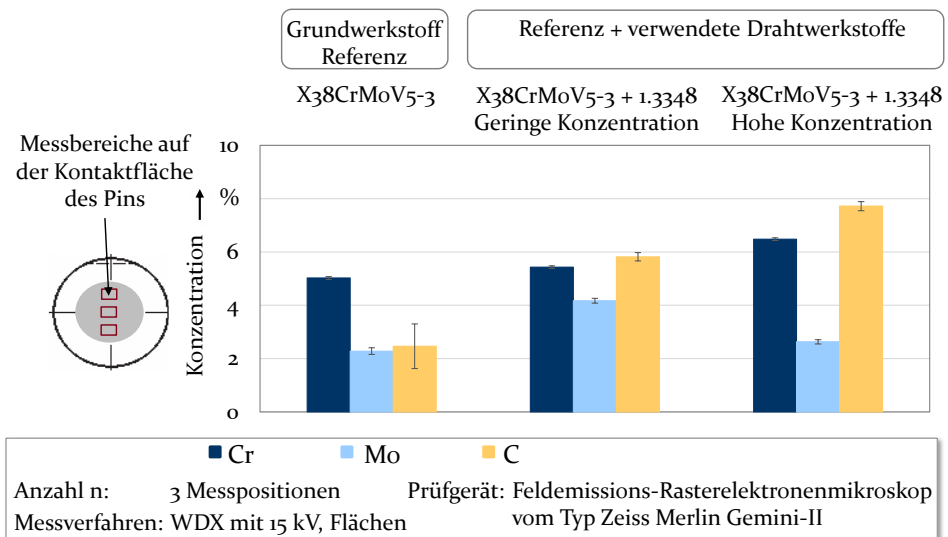


Bild 19: WDX-Messungen für den Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-3

Unter identischen Prozessparametern wurden die Legierungselemente Chrom, Molybdän und Kohlenstoff in den Werkzeugstahl X38CrMoV5-3 eingebracht. Der Kohlenstoffanteil wird wie beim WP7V signifikant von 2,4 Gew.-% auf 7,7 Gew.-% erhöht. Zusätzlich wird der Chromanteil schrittweise erhöht, indem die Drahtfördergeschwindigkeit variiert wird. Es wird hierbei maximal 6,4 Gew.-% an Chrom erreicht. Eine Ausnahme stellt auch bei diesem Werkstoff Molybdän dar. Trotz der Gewährleistung des Aufschmelzens eines hohen Drahtvolumens bei niedriger Drahtfördergeschwindigkeit von 2 m/min nimmt tendenziell der Molybdängehalt ab und

ist mit 2,6 Gew.-% vergleichbar zum Ausgangswerkstoff X38CrMoV5-3. Auch in diesem Fall ist der Ausgleich von Konzentrationsunterschieden eine mögliche Ursache.

Basierend auf den WDX-Analysen erfolgte anschließend eine Untersuchung des Einsatzverhaltens. Die Auswirkung von Titan unter Variation des Legierungsgehalts wird in Bild 20 zunächst für den Grundwerkstoff WP7V grundlegend analysiert.

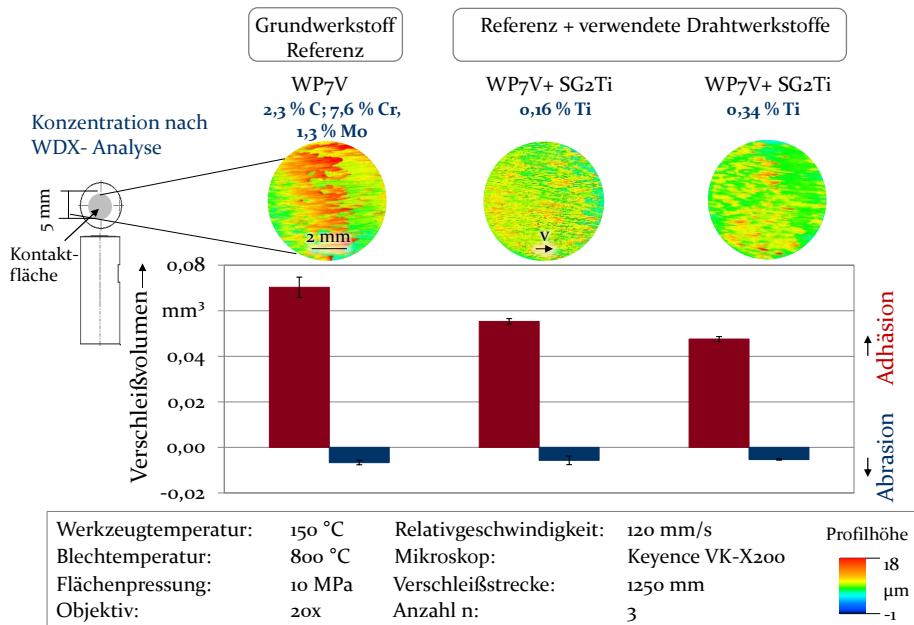


Bild 20: Einfluss von Titan auf das Verschleißverhalten

Der adhäsive Oberflächenverschleiß wird durch Modifizieren mit SG2Ti verringert. Anhand der Ergebnisse aus Bild 20 ist zu erkennen, dass durch eine Variation der eingebrachten Legierungsmenge gezielt das Verschleißverhalten beeinflusst wird. Ein circa doppelt so hoher Titangehalt von 0,34 Gew.-% gegenüber 0,016 Gew.-% im Grundmaterial führt zu einer Reduzierung des adhäsiven Verschleißes um weitere 13 %. Unter Berücksichtigung des Modells von Czichos verfügt Titan über eine geringe Dichte an freibeweglichen Elektronen [33]. Vor diesem Hintergrund ist zu erwarten, dass die chemische Affinität zwischen Pin-Oberfläche und der AlSi-Schicht verringert wird. Basierend auf Czichos Annahme hinsichtlich der sogenannten Adhäsionskomponente nimmt die adhäsive Wechselwirkung der Elemente im Periodensystem mit der Hauptgruppe zu [33]. Da Titan als Übergangsmetall der vierten Gruppe zugeordnet wird, ist eine geringe Neigung dieses Elements gegenüber metallischer Adhäsion zu erwarten.

Untersuchungen des tribologischen Verhaltens von Oberflächenbeschichtungen auf Titanbasis von Wilson et al. bestätigen, dass diese Schichtsysteme über eine hohe Verschleißbeständigkeit verfügen [144]. Das Duplex-Plasmanitrier-PAPVD-TiN-Verfahren verfügt über das höchste Potential, abrasiven und adhäsiven Verschleiß zu verringern [144].

Aufbauend auf den Untersuchungen mit dem Basismaterial WP7V erfolgte anschließend eine Übertragbarkeit auf den konventionellen Warmarbeitsstahl X38CrMoV-3. Die Ergebnisse sind in Bild 21 dargestellt.

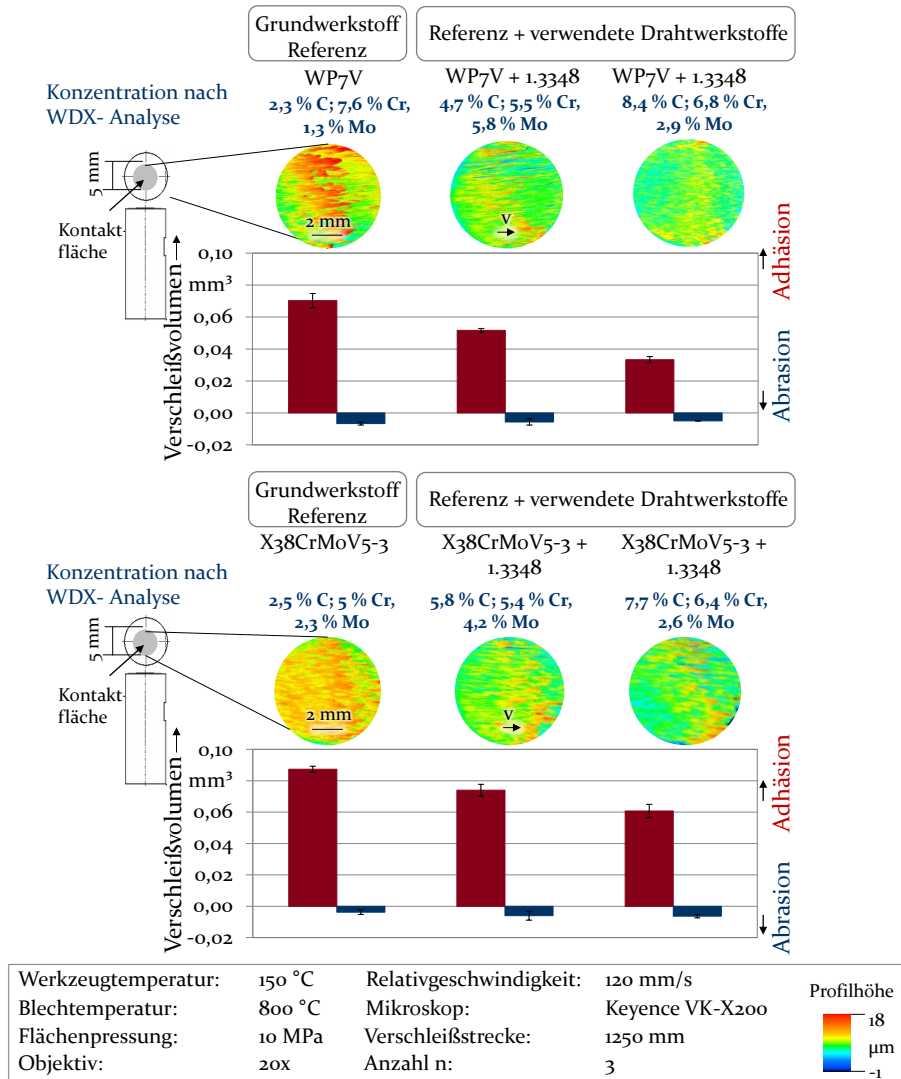


Bild 21: Einfluss der Legierungskonzentration und Übertragbarkeit auf X38CrMoV5-3

Es wurde der Legierungsdraht 1.3348 gewählt. Im Vergleich zum Drahtwerkstoff SG2Ti wurde anhand der berechneten Verschleißvolumina eine deutlichere Reduzierung des adhäsiven Verschleißes erzielt. Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass eine definierte Konzentration an Legierungselementen für eine ausreichende Verschleißbeständigkeit bei Warmarbeitsstähle erforderlich ist. Durch Einbringen einer erhöhten Menge an Legierungselementen wird sowohl für den WP7V als auch für X38CrMoV5-3 eine weitere Steigerung der adhäsiven Verschleißfestigkeit erzielt. In diesem Zusammenhang weisen der unmodifizierte Substratwerkstoff X38CrMoV5-3 und seine Oberflächenmodifikationen eine höhere Adhäsionsneigung als WP7V auf. Ein Erklärungsansatz stellt die unterschiedliche chemische Zusammensetzung der Grundwerkstoffe dar. Während X38CrMoV5-3 über einen geringeren Chromgehalt verfügt, weist der WP7V mit 1,3 Gew.-% eine niedrigere Molybdänkonzentration auf. Zusätzlich wird der WP7V als Alternative zum konventionellen Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-3 im Presshärten eingesetzt, da dieser Sonderwerkstoff eine höhere Verschleißfestigkeit aufweist [18].

Zusammenfassend gilt, dass durch die Variation der Legierungszusammensetzung im Grundmaterial das resultierende Verschleißverhalten verändert wird. Bei geringer Legierungskonzentration werden beim WP7V nach dem Legieren mit SG2Ti und 1.3348 vergleichbare Verschleißvolumina hinsichtlich des adhäsiven Verschleißes berechnet. Erst durch Einbringen einer höheren Menge an den Zusatzelementen Titan sowie Chrom, Molybdän und Kohlenstoff in das Basismaterial wird ein wesentlicher Unterschied zwischen SG2Ti und 1.3348 erzielt. Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass eine Verringerung des Adhäsionsverschleißes durch Erhöhen der Legierungskonzentration mit 1.3348 um weitere 30 % erreicht wird. Im Rahmen der gewählten Prozessparameter, welche durch das Laserstrahllegieren gegeben sind, ist aufgrund des geringen Titananteils von 0,1 Gew.-% im Drahtwerkstoff SG2Ti eine gezielte Beeinflussung der chemischen Affinität zwischen den Kontaktpartnern nur eingeschränkt möglich. Der Drahtwerkstoff 1.3348 hingegen besteht bereits aus einem hohen Anteil an den Hauptlegierungselementen Kohlenstoff, Chrom und Molybdän. Aus diesem Grund wird eine deutliche Reduzierung der chemischen Affinität erzielt, sobald der Legierungsanteil im Grundwerkstoff zunimmt. Während für den WP7V der Adhäsionsverschleiß um circa 50 % verringert wird, ist eine Reduzierung um circa 25 % für den X38CrMoV5-3 realisierbar. Da Molybdän und Chrom die Bildung von Karbiden begünstigen, ist eine Verringerung der chemischen Affinität zwischen Pin und der AlSi-Beschichtung des Bleches zu erwarten. In diesem Zusammenhang analysierten Fontalvo

et al. das adhäsive Verschleißverhalten von Werkzeugstählen in Abhängigkeit der Karbidstrukturen [145]. Es bestehen zwei wesentliche Einflussfaktoren auf die Adhäsionsbindungen. Der Karbidgehalt im Stahlwerkstoff sowie der Abstand zwischen den einzelnen Karbiden üben während des Reibkontaktes bei Raumtemperatur einen Einfluss auf die Bildung neuer Metallbindungen infolge adhäsiven Verschleißes aus [145]. Die Materialanhaftung nimmt durch eine höhere Karbidkonzentration bei gleichzeitiger Verringerung des Abstandes zwischen einzelnen Karbiden ab [145]. Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass Primärkarbide aus Molybdän und Chrom zu einer Steigerung der adhäsiven Verschleißbeständigkeit beitragen. Neben Chrom und Molybdän weist Titan eine hohe Affinität zu Kohlenstoff auf, wodurch ebenfalls Karbide gebildet werden [146]. Die zunehmende Verschleißbeständigkeit der Oberflächen auf Titanbasis ist nach dem Ansatz von Fontalvo [145] zusätzlich zur geringen Elektronendichte von Titan in der Bildung von Titankarbiden begründet. Einen Zusammenhang zwischen Karbidbildung und Erhöhung der adhäsiven und abrasiven Verschleißbeständigkeit wiesen Schwingenschlögl et al. in ihren Untersuchungen nach [147]. Im Vergleich zum konventionellen Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-3, welcher Chromkarbide aufweist, verfügt ein neuentwickelter Warmarbeitsstahl 45MoV14-13 über vanadiumreiche Karbide. Durch den Einsatz dieser neuen Stahlsorte wird die Verschleißbeständigkeit im Vergleich zu X38CrMoV5-3 erhöht [147]. Anhand dieser Erkenntnisse wird die Annahme bestätigt, dass durch die Art von Karbiden das Verschleißverhalten begünstigt wird.

Im Allgemeinen gilt, dass die Neigung zu metallischer Adhäsion beim X38CrMoV5-3 stärker ausgeprägt ist als beim WP7V. Ein Oberflächenmodifizieren mit einer geeigneten Verschleißschicht stellt daher mit diesem Substratwerkstoff eine größere Herausforderung dar. Vor diesem Hintergrund wird im weiteren Verlauf eine detaillierte Analyse hinsichtlich des Verschleißverhaltens für diesen Werkzeugstahl durchgeführt. Zudem wird X38CrMoV5-3 konventionell für Presshärtewerkzeuge eingesetzt und ist in der industriellen Anwendung etabliert.

### ***Oberflächenbeschichten und Einfluss von Chrom und Titan auf das Verschleißverhalten***

Im Vergleich zum Laserstrahllegieren werden die Zusatzmaterialien bei der Beschichtungstechnologie primär auf die Probenoberfläche aufgebracht. Eine Diffusionszone, welche infolge chemischer Reaktionen zwischen dem Grundmaterial und dem Schichtsystem ausgebildet wird, sorgt für die erforderliche Haftfestigkeit der Schutzschicht mit dem metallischen Festkörper. Während des Abscheideprozesses wird durch das Verdampfen des

Beschichtungsmaterials eine höhere Menge an Zusatzmaterial auf die Wirkfläche aufgetragen als durch das Legierungsverfahren. Basierend auf den bisherigen Ergebnissen ist eine Zunahme der Elementkonzentration zur Reduzierung der chemischen Affinität und somit Steigerung der Verschleißbeständigkeit primär für den Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-3 erforderlich. Im Vergleich zum Substratmaterial WP7V weist diese Stahlgüte tendenziell eine höhere adhäsive Verschleißneigung auf. Zudem stellt X38CrMoV5-3 eine kostengünstigere Alternative dar. Um die chemische Elementzusammensetzung nach dem Beschichten zu ermitteln, wurden WDX-Analysen an den jeweiligen Beschichtungssystemen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 22 den Referenzwerkstoffen WP7V und X38CrMoV5-3 gegenübergestellt. Um die chemische Elementzusammensetzung zu variieren und dadurch gezielt die Verschleißbeständigkeit zu erhöhen, wurde die Titankonzentration verändert. Dieses Element wurde gewählt, da Titan nach dem Modell von Czichos über eine niedrige Adhäsionskomponente verfügt [33]. Folglich ist eine Verringerung der Adhäsionsneigung zu erwarten.

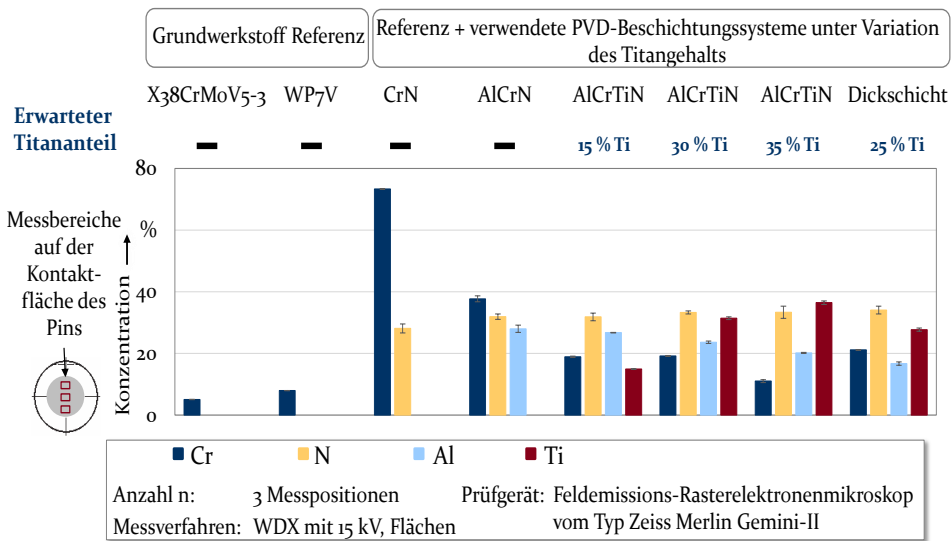


Bild 22: Chemische Elementzusammensetzungen der Beschichtungssysteme

Zusätzlich hat nach Czichos die Elektronenstruktur sowie die Dichte der freibeweglichen Elektronen einen Einfluss auf die Bildung von Adhäsionsbindungen [33]. Basierend auf diesem theoretischen Ansatz ist zu erwarten, dass Titan ein Element ist, welches die Adhäsionskräfte verringert. Vor diesem Hintergrund wurde die Auswirkung von Titan auf das Verschleißverhalten untersucht. Es wurden vier verschiedene Schichtsysteme gewählt, deren zu erwartender Titananteil bei circa 15 Gew.-%, 25 Gew.-%, 30 Gew.-%

% und 35 Gew.-% liegt. Neben der AlCrTiN-Schicht wird ein Dickschichtsystem verwendet, welches eine Dicke oberhalb von 10  $\mu\text{m}$  aufweist [124]. Im Vergleich zur Dickschicht verfügen die AlCrTiN-Beschichtungen über eine Dicke bis maximal 6  $\mu\text{m}$  [121]. Der Abscheideprozess wurde beim Kooperationspartner H-O-T Härte- und Oberflächentechnik GmbH & Co.KG durchgeführt, indem durch gezieltes Dotieren mit Titan die Schichtzusammensetzung angepasst wurde. In Bild 22 wurden zusätzlich als Referenz die konventionellen Beschichtungssystem CrN und AlCrN aufgeführt, um ebenfalls Rückschlüsse auf den Einfluss von Chrom auf die Verschleißfestigkeit von Werkzeugstählen im Bereich Warmumformung zu schließen.

Im Vergleich zu den Grundmaterialien verfügen alle Oberflächenmodifizierungen über einen signifikant höheren Chromgehalt, welcher bei CrN mit circa 73 Gew.-% maximal ist. Zusätzlich wird ein geringerer Anteil an Chrom in AlCrN mit 32 Gew.-% sowie Aluminium mit 27 Gew.-% ermittelt. Beide Schichtsysteme werden als Referenz zu den Beschichtungen auf Titanbasis herangezogen. In diesem Zusammenhang wird anhand von CrN der Einfluss von Chrom auf das Verschleißverhalten abgeleitet, während anhand von AlCrN die Adhäsionsneigung ohne Titan analysiert wird. Folglich ist die AlCrN-Schicht als Ausgangszustand zu betrachten, welche anschließend gezielt mit Titan dotiert wird. Die Konzentration wurde dabei schrittweise erhöht. Anhand der Messergebnisse bleibt für die unterschiedlichen AlCrTiN-Modifikationen der Anteil von Aluminium und Stickstoff konstant. Chrom weist ebenfalls ein identisches Niveau von circa 20 Gew.-% auf. Eine Ausnahme stellt dabei die AlCrTiN-Beschichtung mit einem Chromgehalt von 11 Gew.-% dar. Durch geringfügig veränderte Prozessparameter während des Beschichtungsprozesses ist es möglich, dass es hierdurch zu Abweichungen der Schichtzusammensetzung kommt [148]. Um die chemische Zusammensetzung zu variieren, werden während der Abscheidung unterschiedliche Materialkombinationen aus Chrom, Stickstoff, Aluminium und Titan der jeweiligen Targets verwendet. Zusätzlich werden die Beschichtungsparameter zur Einbringung der geforderten Titanmenge angepasst. Die WDX-Analysen deuten darauf hin, dass bedingt durch diese Prozessveränderungen ein wesentlich geringerer Chromanteil prozessbedingt realisierbar ist. Ein Vergleich der resultierenden Titankonzentrationen innerhalb der jeweiligen AlCrTiN-Schichten verdeutlicht, dass die Messergebnisse den Zielwerten annähernd entsprechen. Durch die Anpassung des Beschichtungsprozesses durch H-O-T Härte- und Oberflächentechnik GmbH & Co.KG wurde demnach erfolgreich eine Erhöhung von Titan im Schichtaufbau realisiert. Die ermittelten Werte liegen bei den

AlCrTiN-Schichten bei 14,8 Gew.-%, 31,4 Gew.-%, 36,4 Gew.-% und für die Dickschicht bei 27,7 Gew.-%.

Im Vergleich zu den legierten Versuchsproben wird durch das Beschichten im Allgemeinen eine höhere Elementkonzentration nach dem Oberflächenmodifizieren erzielt. In diesem Zusammenhang liegen die ermittelten Werte im Allgemeinen um circa 30 % bis 50 % oberhalb der Legierungskonzentration der laserstrahllegierten Oberflächen. Im Falle von Titan wird eine Erhöhung von über 90 % erreicht. Vor diesem Hintergrund ist eine signifikante Auswirkung auf das Verschleißverhalten zu erwarten, welche anhand der Verschleißvolumina in Bild 23 dargestellt ist.

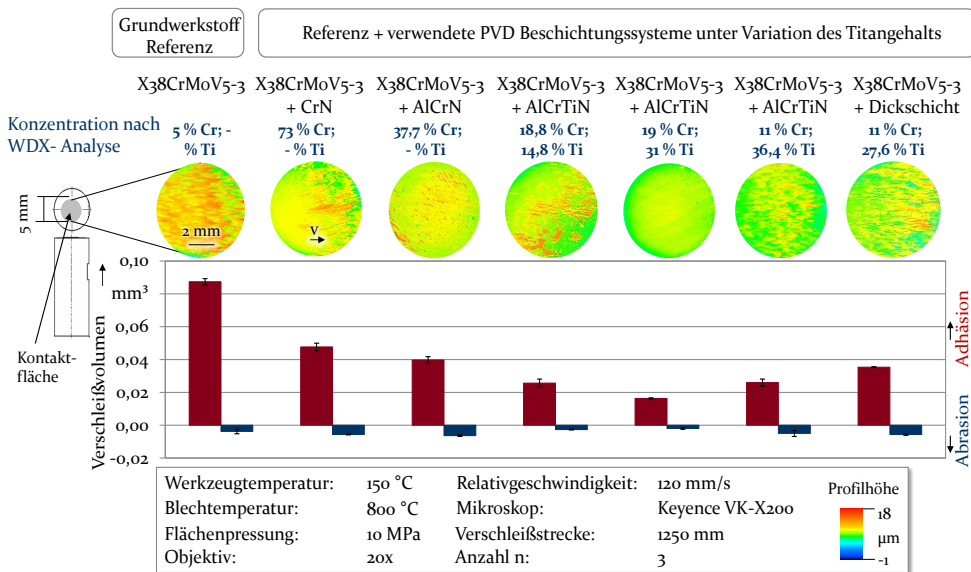


Bild 23: Verschleißvolumina beschichteter Oberflächen

Die Annahmen bezüglich des Einflusses von Chrom und Titan auf die adhäsive Verschleißbeständigkeit, welche für die legierten Pins getroffen wurden, sind auch auf die beschichteten Oberflächen übertragbar. Für CrN und AlCrN wird durch den hohen Chromanteil das adhäsive Verschleißvolumen verringert, welches ebenfalls auf Bildung von Primärkarbiden zurückzuführen ist [145]. Zusätzlich verfügt Chrom als Element der sechsten Hauptgruppe im Periodensystem über eine geringe Elektronendichte, wodurch nach Czichos die chemische Affinität von Metallkontaktpaarungen verringert wird [33]. Im Vergleich zur unbeschichteten Pin-Oberfläche wird nach Aufbringen von CrN und AlCrN der Adhäsionsverschleiß um 45 % und 55 % reduziert. Tendenziell verfügen AlCrN-Schichten über eine höhere Verschleißfestigkeit als CrN-Beschichtungen [149]. Aus der

Literatur ist bekannt, dass mit zunehmendem Aluminiumanteil die Verschleißneigung der Stahloberflächen verringert wird. Bekannte Konzentrationen von Aluminium im Schichtsystem liegen hierbei zwischen 2,5 Gew.-% und 7,15 Gew.-% [149].

Die gemessenen Oberflächentopografien in Bild 23 zeigen ebenfalls eine unterschiedliche Neigung zu Materialanhaftungen auf. Während der höchste adhäsive Verschleiß für den Referenzwerkstoff X38CrMoV5-3 erkennbar ist, nimmt der Materialübertrag von AlSi-Partikel für CrN- und AlCrN- beschichtete Kontaktflächen ab. Dieser Zusammenhang wird dadurch ersichtlich, dass die Profilhöhe nicht mehr im maximal roten Farbbereich von 18  $\mu\text{m}$  liegt. Das Höhenprofil, welches gelb dargestellt ist, weist vielmehr einen Bereich von circa 9  $\mu\text{m}$  auf. In Verschleißuntersuchungen wies Wieland nach, dass eine Monolagenschicht aus AlCrN eine deutliche Verringerung des Oberflächenverschleißes bewirkt [99]. Dieses Verschleißverhalten wurde für die Austenitisierungstemperaturen von 880 °C und 930 °C in Tribotesterversuchen bei einer Flächenpressung von 10 MPa und einer Relativgeschwindigkeit von 10 mm/s untersucht. Beide Versuchsreihen wiesen vergleichbare Ergebnisse auf [99]. Das Potential von AlCrN-Schichten wird durch Wieland bestätigt [99].

Eine weitere Steigerung der adhäsiven Verschleißfestigkeit wird durch Einbringen von Titan in die Beschichtung erzielt. Ein Vergleich der unterschiedlichen Schichtsysteme aus AlCrTiN mit variierendem Titananteil verdeutlicht, dass durch eine Zunahme der Titankonzentration auf 31 Gew.-% eine maximale Reduzierung des adhäsiven Oberflächenverschleißes um 80 % erreicht wird. Die Neigung zu metallischer Adhäsion ist dabei abhängig von der chemischen Affinität der Kontaktpartner, welches durch Schwingenschlögl et al. in ihren Untersuchungen des tribologischen Verhaltens von CrCn und AlCrTiN- Schichten ebenfalls nachgewiesen wurde [98]. Basierend auf den Untersuchungen mithilfe einer Warmstreichziehyanlage tritt eine Verringerung von adhäsivem Verschleiß für die beschichteten Reibbackenoberflächen gegenüber der unmodifizierten Referenzoberfläche auf. Die unterschiedliche chemische Zusammensetzung der verwendeten Beschichtungen wird als möglicher Einflussfaktor auf die Reduzierung der Adhäsionsneigung zurückgeführt [98].

Das Einbringen von Titan in das Beschichtungssystem sorgt für eine Verringerung der wechselwirkenden Bindungskräfte in der Wirkfuge während des direkten Kontaktes von Werkzeug und Werkstück. In diesem Zusammenhang verfügt dieses Element als Übergangsmetall über eine geringe Dichte an Elektronen, wodurch im Grenzbereich der kontaktierenden

Flächen die atomare Wechselwirkung reduziert wird [33]. In ihren Arbeiten wiesen Albdardi et al. nach, dass eine Multilagebeschichtung aus CrTiAlN die Verschleißbeständigkeit im Vergleich zur konventionellen Beschichtung TiAlN signifikant erhöht [150]. Die untersuchte CrTiAlN-Schicht verfügte dabei über einen Chromanteil von 23 bis 30 Gew.-% und Titan über eine Konzentration von 6 bis 7 Gew.-%. Eine Korrelation dieser Ergebnisse mit den ermittelten Messwerten im Rahmen dieser Arbeit aus Bild 23 weist darauf hin, dass die chemische Schichtzusammensetzung entscheidend für die resultierende Verschleißfestigkeit von Stahlwerkstoffen ist. Vor diesem Hintergrund ist für zukünftige Arbeiten zu empfehlen, die Abhängigkeit der vorliegenden Verbindungen nach dem Beschichten mit dem Verschleißverhalten grundlegend zu analysieren. Die Ergebnisse aus Bild 23 zeigen zudem, dass ab einem Titananteil von circa 36,4 Gew.-% die Adhäsionsneigung der Oberflächen erneut zunimmt. Ein höherer Gehalt von Titankarbid führt auch in hochlegierten Stählen auf Nickelbasis zu keiner Steigerung der Verschleißfestigkeit [151]. Folglich nehmen die Bindungskräfte zwischen den Kontaktpartnern zu, wodurch der adhäsive Verschleiß begünstigt wird.

Zusätzlich zu Chrom und Titan ist in den untersuchten Beschichtungen in Bild 23 Stickstoff enthalten. Kontaktpaarungen, welche eine identische Metallstruktur aufweisen, neigen zu hoher metallischer Adhäsion. Verfügen Stähle in ihrer Mikrostruktur über nichtmetallische Phasen, werden die wirkenden Adhäsionskräfte verringert [152]. Folglich verfügt Stickstoff als Nichtmetall über eine von Metallen unterschiedliche Elektronenstruktur und verringert somit den Adhäsionsverschleiß. In diesem Zusammenhang ermittelten Wilson et al. eine weitere Steigerung der Verschleißbeständigkeit von Stahloberflächen nach Aufbringen von Duplex-Plasmanitrierten-PAPVD-TiN-Schichten [144]. Neben Chrom und Titan ist daher ebenfalls Stickstoff als weiterer Bestandteil zur Reduzierung des Oberflächenverschleißes zu betrachten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde jedoch der Stickstoffanteil in den Verschleißschutzschichten konstant gehalten, sodass eine Aussage hinsichtlich der Verschleißneigung unter variierender Stickstoffkonzentration nicht möglich ist.

Um die Erkenntnisse zu bestätigen, wurden Verschleißuntersuchungen zur Übertragbarkeit auf einen weiteren Substratwerkstoff durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde in Bild 24 als Substrat WP7V gewählt. Eine Oberflächenmodifizierung erfolgte mit Schichtsystemen auf AlCrN-Basis unter Variation des Titangehalts.

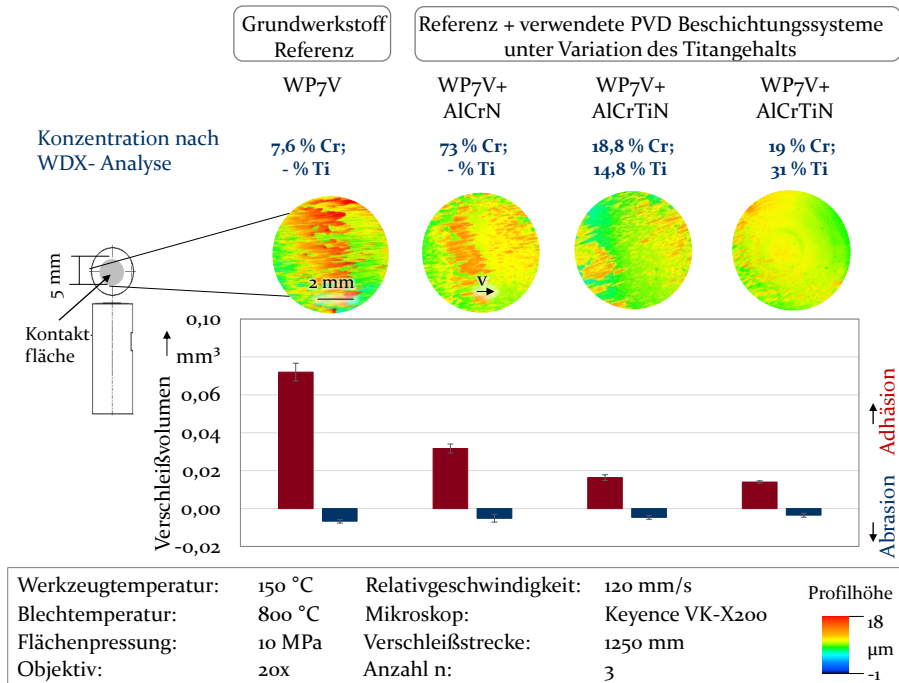


Bild 24: Übertragbarkeit der Oberflächenbeschichtung auf den Substratwerkstoff WP7V

Im Vergleich zu den legierten Oberflächen weisen die beschichteten Werkzeuge ein höheres Potential auf, um den Verschleißwiderstand von Presshärtewerkzeugen zu erhöhen. Dieser Zusammenhang wird durch die Ergebnisse beider Basismaterialien bestätigt. Das geringste Verschleißvolumen wurde für WP7V und X38CrMoV5-3 durch Aufbringen eines Schichtsystems mit AlCrTiN und einem zusätzlichen Titananteil von 31 % ermittelt. Anhand der Oberflächentopografien ist zu erkennen, dass durch die Beschichtungen geringere Materialanhaftungen auf der Pin-Oberfläche erkennbar sind. Zusätzlich weist die Kontaktfläche mit AlCrTiN und einem Titananteil von 31 Gew.-% lediglich eine dünne Schichtanhaftung von AlSi-Partikeln auf, welches durch das ermittelte adhäsive Verschleißvolumen bestätigt wird. Eine Übertragbarkeit auf andere Werkzeugstähle ist gegeben. Für beide Substratmaterialien wird ein identisches Verschleißverhalten ermittelt, indem die Adhäsionsneigung durch einen erhöhten Titananteil im Schichtsystem reduziert wird. Während die Oberflächenbeschichtungen CrN und AlCrN ebenfalls den Adhäsionsverschleiß reduzieren, beeinflusst ein zusätzlicher Anteil an Titan entscheidend die chemische Wechselwirkung der kontaktierenden Festkörper.

Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass eine definierte Titankonzentration für einen ausreichenden Verschleißschutz erforderlich ist. Im Vergleich zu legierten Oberflächen mit SGzTi ist prozessbedingt durch das Beschichten eine deutliche Steigerung der Titankonzentration realisierbar, wodurch das höhere Potential der Beschichtungen erklärbar ist. Jedoch stellt der Vorteil des Laserstrahllegierens die Möglichkeit zur lokalen Modifizierung von Werkzeugoberflächen dar. Anhand der ermittelten Verschleißvolumina aus Bild 23 wird auch die Grenze der Menge an einzubringenden Legierungselementen in das Schichtsystem deutlich. Die Neigung zu adhäsiver Materialanlagerung am Werkzeug wird bei einer Titankonzentration oberhalb von 36 % wieder verstärkt. Ein möglicher Erklärungsansatz ist dadurch gegeben, dass bedingt durch diesen maximalen Anteil an Titan von 31 % stabile Bindungen im Beschichtungssystem vorliegen. Durch eine höhere Konzentration hingegen nehmen im Grenzflächenbereich der Kontaktpartner die auf atomarer Ebene wirkenden Bindungskräfte und somit der Adhäsionsverschleiß zu, was durch die Arbeiten von zum Gahr bestätigt wird [116]. In ihren Untersuchungen nahm der Oberflächenverschleiß ab einer Chromkonzentration von circa 15 Gew.-% wieder zu [116].

### **6.2.2 Einfluss der Prozessparameter sowie der AlSi-Schichtdicke auf den Oberflächenverschleiß**

Im Folgenden werden Analysen unter variierenden Prozessparametern durchgeführt, um den Einfluss der Flächenpressung und Blechtemperatur auf den resultierenden Oberflächenverschleiß zu bestimmen. Zusätzlich wird werkstückseitig die Auswirkung einer variierenden AlSi-Schichtdicke auf das Verschleißverhalten abgeleitet. Zu diesem Zweck wurden die Modifikationen gewählt, welche in vorangegangenen Versuchen aus Abschnitt 6.2.1 die höchste Verschleißbeständigkeit aufwiesen. Ziel hierbei ist die Sicherstellung, dass ein hoher Verschleißschutz unter veränderten Prozessbedingungen weiterhin gegeben ist. Im Hinblick auf die komplexe thermo-mechanische Wechselwirkung im Presshärteprozess ist dieser Nachweis des Potentials einer neuentwickelten Oberflächenmodifikation erforderlich. In diesem Zusammenhang treten während des Umform- und Abschreckvorganges in der Wirkfuge zwischen Werkzeug und Werkstück unterschiedliche Temperaturen und Flächenpressungen auf, welche das tribologische Verhalten entscheidend beeinflussen. Übliche Umformtemperaturen beim Presshärten liegen beispielsweise zwischen 600 °C und 850 °C. Es ist weiterhin zu berücksichtigen, dass abhängig vom industriellen Anwendungsfall die Prozessparameter variieren. Vor diesem Hintergrund ist ein Einfluss

auf die Verschleißigenschaften von oberflächenmodifizierten Werkzeugen nicht auszuschließen. Für den Einsatz und die Übertragbarkeit auf das Presshärteverfahren ist es daher von zentraler Bedeutung, diesen Zusammenhang in den Analysen zu berücksichtigen.

Einen Einfluss auf das tribologische Verhalten stellt die Blechtemperatur dar. In Bild 25 sind die ermittelten Verschleißvolumina gegenübergestellt.

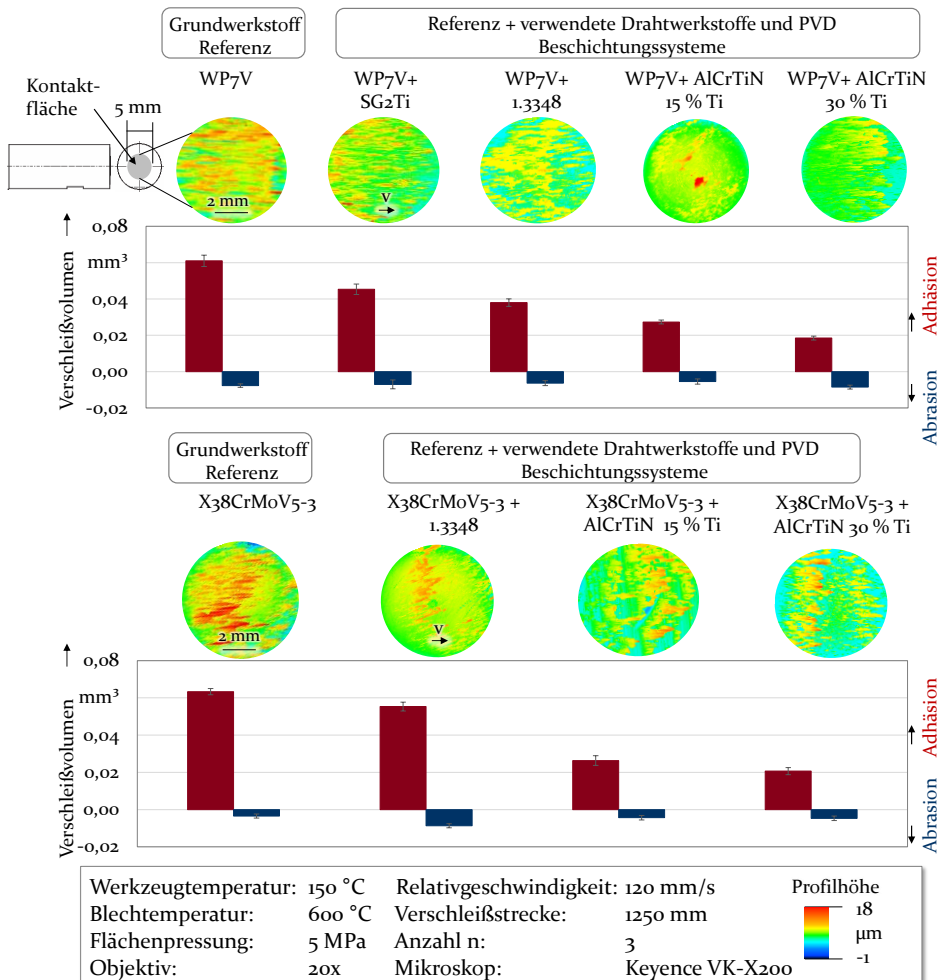


Bild 25: Variation der Blechtemperatur zur Analyse des Verschleißverhaltens

Die Substratmaterialien mit ihren Modifikationen sind separat illustriert, um die Unterschiede im Verschleißverhalten zwischen den oberflächenmodifizierten Varianten zu vergleichen. Im industriellen Einsatz erfolgt zur Erreichung von maßgeschneiderten Bauteilen eine lokale Erwärmung des Halbzeugs bei unterschiedlichen Temperaturen direkt im Ofen oder das

Werkzeug selbst weist verschiedene Temperaturbereiche auf [153]. Die Phasenumwandlung des Gefüges während des Umformens und des Abschreckvorgangs wird dadurch beeinflusst, dass Bauteilbereiche mit höherer Zähigkeit entstehen. Um einen Einsatz der Oberflächenmodifikationen für den Presshärteprozess zu gewährleisten, erfolgten zusätzlich Untersuchungen für 600 °C Blechtemperatur. Als Flächenpressung wurde 5 MPa gewählt, um eine Vergleichbarkeit mit den tribologischen Untersuchungen aus Warmstreifenziehversuchen zu gewährleisten. Die gewählten Prozessparameter stellen für den Tribotester sowie für die Warmstreifenzieh-anlage übertragbare Einstellungen innerhalb des Prozessfensters beider Anlagen dar, wodurch identische Verfahrensbedingungen für beide Versuchsdurchführungen sichergestellt sind. Zusätzlich sind 600 °C und 5 MPa typische Beanspruchungen beim Presshärten. Für die Untersuchungen wurden die unmodifizierten Grundwerkstoffe WP7V und X38CrMoV5-3, die legierten Varianten mit dem Drahtwerkstoff 1.3348 sowie die beschichteten Oberflächen mit AlCrTiN mit einem Titananteil von 15 % und 30 % eingesetzt.

Für den WP7V wird durch das Legieren mit SG2Ti eine Reduzierung des adhäsiven Verschleißvolumens um circa 30 % realisiert. Während mit der Oberflächenmodifikation 1.3348 für den WP7V der Adhäsionsverschleiß um circa 40 % verringert wird, nimmt für X38CrMoV5-3 der Verschleiß um 20 % ab. Diese Ergebnisse bestätigen die Zusammenhänge, welche anhand der Untersuchungen in Abschnitt 6.2.1 bereits getroffen wurden. Für die beschichteten Pin-Oberflächen wird eine Steigerung der Verschleißfestigkeit erzielt. In diesem Zusammenhang wird durch das Schichtsystem AlCrTiN mit einem Titananteil von 30 Gew.-% das geringste Volumen des Adhäsionsverschleißes bestimmt. Die Verschleißmenge liegt dabei um circa 70 % unterhalb der Verschleißmenge des unmodifizierten Ausgangszustandes. Ein Vergleich der Diagramme zeigt zwischen den jeweiligen Oberflächenmodifikationen des Grundmaterials WP7V und des X38CrMoV5-3 ein vergleichbares Verschleißverhalten. Eine Anwendung für unterschiedliche Werkzeugstähle ist somit gegeben. Der zusätzliche Titangehalt von 30 Gew.-% in der PVD-Schicht AlCrTiN sorgt für eine signifikante Reduzierung der chemischen Affinität, wodurch lediglich in beiden Fällen eine Verschleißmenge von circa 0,020 mm<sup>3</sup> die Folge ist. Durch das Legieren und Beschichten wird auch unter veränderten Prozessbedingungen ein ausreichender Verschleißschutz hergestellt und die bisher gewonnenen Erkenntnisse werden basierend auf dem Verschleißverhalten bestätigt.

Der Nachweis, dass auch bei veränderten Blechtemperaturen ein ausreichender Verschleißschutz der Pin-Oberfläche gegeben ist, wird durch die

Festigkeitseigenschaften der AlSi-Schicht deutlich. Da die Schmelztemperatur von circa 600 °C der AlSi-Beschichtung beim Presshärten überschritten wird [24], ist eine deutliche Verringerung der mechanischen Festigkeit zu erwarten. Folglich nimmt die Anbindung der AlSi-Schicht an das Blechmaterial und somit die Scherfestigkeit ab, weshalb der Materialabtrag durch den Werkzeugkontakt begünstigt wird. Es kommt vermehrt zu lokalen Aufschweißungen von AlSi-Partikeln auf der Kontaktfläche des Pins.

Zusammenfassend gilt, dass die Verschleißneigung zunimmt. Die Werkstücktemperatur beeinflusst zusätzlich die Diffusionsvorgänge zwischen dem Eisen aus dem Grundwerkstoff 22MnB5 und dem Aluminium sowie dem Silizium aus der Schicht [24]. Es werden verschiedene intermetallische Phasen gebildet. Nach Fan et al. nimmt diese Durchmischung zwischen 500 °C und 900 °C stetig zu, wodurch verstärkt spröde intermetallische Verbindungen aus Fe, Al und Si gebildet werden [24]. Von diesen Vorgänge hängt das Verschleißverhalten entscheidend ab, da die Verformbarkeit sowie Bindung der AlSi-Beschichtung zur Blechoberfläche verringert wird [24]. Für die Versuchsdurchführung wird pro Blech eine Zeitspanne von 120 s benötigt. Vor diesem Hintergrund ist nicht auszuschließen, dass eine Vermischung zwischen Eisen, Aluminium und Silizium stattfindet und, abhängig von der Blechtemperatur, unterschiedlich ausgeprägt ist. Eine signifikante Zunahme des abrasiven Verschleißes wird anhand der Ergebnisse aus Bild 25 nicht nachgewiesen. Als weiterer Einflussfaktor auf das Verschleißverhalten ist jedoch der sogenannte Dreikörperverschleiß nicht auszuschließen [48]. Durch Partikel, welche im Kontaktbereich zwischen Pin und Blech vorhanden sind, wird der Abrasionsverschleiß begünstigt. In diesem Zusammenhang führen harte Oxidpartikel, welche während der Wärmebehandlung des Bleches entstehen, zu einer Oberflächenbeschädigung.

Ein Einsatz bei einer Flächenpressung von 5 MPa und einer Werkstücktemperatur von 600 °C ist für die verwendeten Versuchsproben möglich. Zusätzlich verdeutlichen die Verschleißvolumina, dass durch Aufbringen einer Verschleißschutzschicht tendenziell die chemische Affinität zwischen den Kontaktpartnern am stärksten reduziert wird. Aus tribologischer Sicht ist für die Reibpaarung die Oberflächenbeschaffenheit entscheidend, während das Grundmaterial für die Verschleißschutzschicht lediglich eine ausreichende Stützwirkung sicherstellen muss. Vor diesem Hintergrund ist für die weiterführenden Versuche eine stichprobenartige Untersuchung für einen Substratwerkstoff ausreichend. Zudem zeigen die analysierten Oberflächenmodifizierungen, dass eine Übertragbarkeit für unterschiedliche Prozessbedingungen gegeben ist und für WP7V und X38CrMoV5-3 ein vergleichbares Verschleißverhalten aufweisen. Da der Warmarbeitsstahl

X38CrMoV5-3 konventionell für das Presshärten eingesetzt wird und aus wirtschaftlicher Sicht eine kostengünstige Alternative zum WP7V darstellt, wurde diese Stahlgüte für die nachfolgenden Analysen gewählt.

Die Abhängigkeit des Verschleißverhaltens von der Flächenpressung ist in Bild 26 illustriert. Es wurden hierbei 5 MPa, 10 MPa und 20 MPa gewählt.

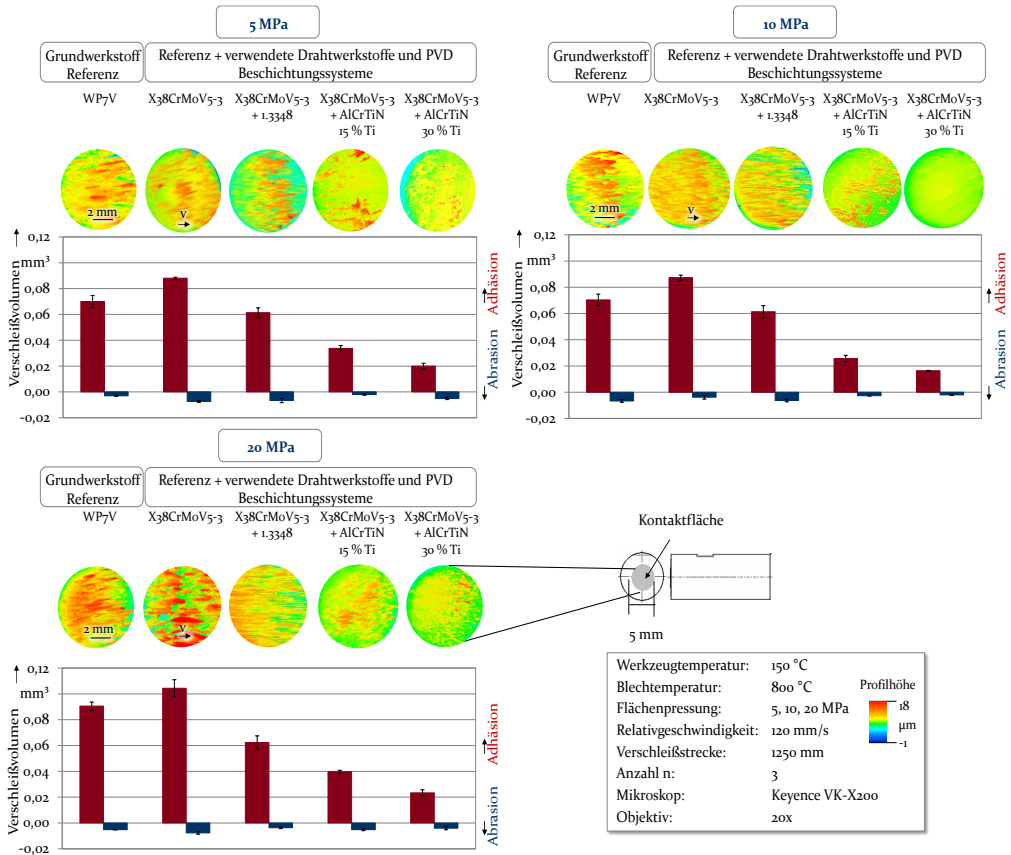


Bild 26: Einfluss der Flächenpressung auf das resultierende Verschleißverhalten

Basierend auf der Arbeit von Lechler sind die thermischen Kontaktbedingungen beim Presshärten abhängig von der auftretenden Flächenpressung. Vor diesem Hintergrund wurden seine Untersuchungen unter industrierelevanten Bedingungen zwischen 0 MPa und 40 MPa durchgeführt [154]. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte eine Versuchsdurchführung für 5 MPa, 10 MPa und 20 MPa, welche den Beanspruchungen im Presshärteprozess entsprechen. Zudem stellen 5 MPa und 20 MPa die Prozessgrenzen des verwendeten Tribotesteraufbaus dar. Das Prozessfenster ist anlagenbedingt durch den Einstellbereich der Normalkraft durch das verwendete Robotersystem begründet. Die Verschleißcharakterisierung erfolgt für die

unmodifizierten Referenzproben aus WP7V und X38CrMoV5-3. Für das Substrat X38CrMoV5-3 wurden zusätzlich die legierte Variante mit 1.3348 sowie die beschichteten Proben mit AlCrTiN und einem Titangehalt von 15 % und 30 % gewählt.

Für die konventionelle Werkzeugoberfläche tritt insgesamt der höchste Oberflächenverschleiß in Form von Adhäsion auf, während unabhängig von der Flächenpressung für die beschichteten Pins ein signifikant geringeres Verschleißvolumen ermittelt wird. Ein wesentlicher Unterschied im abrasiven Verschleißverhalten ist nicht nachweisbar. Für die unmodifizierten Oberflächen ist kein Unterschied des adhäsiven Verschleißvolumens bei einer Flächenpressung von 5 MPa und 20 MPa feststellbar. Die Ergebnisse liegen für WP7V bei  $0,07 \text{ mm}^3$  und für X38CrMoV5-3 bei circa  $0,088 \text{ mm}^3$ . Ein Anstieg der Verschleißmenge tritt bei 20 MPa auf. Während für den WP7V der Adhäsionsverschleiß auf  $0,091 \text{ mm}^3$  zunimmt, wird für X38CrMoV5-3 eine Verschleißmenge von  $0,1 \text{ mm}^3$  ermittelt. Dieses Verschleißverhalten ist ebenfalls anhand der Oberflächentopografien qualitativ zu erkennen. Tendenziell sind die höchsten Materialanhaftungen anhand der gelben und roten Farbskala bei 20 MPa zu erkennen. Zusätzlich treten diese Bereiche verstärkt auf der Kontaktfläche für X38CrMoV5-3 auf. Während für die legierte Versuchsprobe lediglich eine Zunahme des adhäsiven Verschleißes bei 20 MPa um circa 10 % auf  $0,065 \text{ mm}^3$  nachweisbar ist, ist ebenfalls ein marginaler Anstieg bei 5 MPa für die beschichteten Oberflächen zu erkennen. Jedoch liegt diese Tendenz für das Schichtsystem mit 30 Gew.-% Titananteil zwischen  $0,016 \text{ mm}^3$  bei 10 MPa und  $0,02 \text{ mm}^3$  für 5 MPa. Bei dieser PVD-Beschichtung nimmt der adhäsive Verschleißanteil bei 20 MPa lediglich auf  $0,023 \text{ mm}^3$  zu. Im Rahmen der gewählten Versuchsparameter weisen, basierend auf diesen Ergebnissen, die Oberflächenmodifizierungen mit 30 % Titan unabhängig von der auftretenden Flächenpressung ein gleichbleibendes Verschleißverhalten auf. Eine mögliche Begründung für einen ansteigenden Verschleiß bei niedriger Flächenpressung ist durch eine zunehmende Scherung der Mikrokontakte während der Gleitbewegung gegeben. In diesem Zusammenhang dringen trotz der polierten Pin-Oberfläche Unebenheiten in die raue AlSi-Schicht des Bleches ein. Ein lokaler Abtrag der Werkstückbeschichtung und somit Materialübertrag auf den Werkzeugpin ist die Folge. Pelcastre et al. wiesen in ihren Untersuchungen eine Abhängigkeit der Oberflächenrauheit mit dem resultierenden Verschleißverhalten nach [46]. Ein Einfluss der Flächenpressung auf den Materialabtrag der AlSi-Schicht ermittelte Wieland in seiner Arbeit anhand von Tribotesterversuchen [99]. In diesem Zusammenhang wurden die Rauheit der Blechoberfläche nach Versuchs-

durchführung bei 10 MPa und 30 MPa gemessen und miteinander verglichen. Als Kenngrößen wurden die Kernrautief  $R_k$ , die reduzierte Spitzenhöhe  $R_{pk}$  und die reduzierte Riefentiefe  $R_{vk}$  verwendet. Eine Verringerung dieser Rauheitskenngrößen bei 30 MPa wird hierbei auf eine mögliche zunehmende Einglättung der AlSi-Beschichtung zurückgeführt [99]. Folglich nimmt bei den Untersuchungen mit 10 MPa und 20 MPa die wahre Kontaktfläche zwischen Grund- und Gegenkörper zu, wodurch die Wechselwirkung der Adhäsionskräfte im Grenzflächenbereich begünstigt wird. Durch die Bildung neuer Metallbindungen verschweißen vermehrt Bereiche der AlSi-Schicht des Werkstücks mit der Werkzeugoberfläche. Dieses Verhalten wird durch die Kenntnisse von Czichos bezüglich der Abhängigkeit der Adhäsionsneigung vom wahren Kontaktbereich bestätigt [33].

Zusammenfassend gilt, dass durch das Legieren und Beschichten auch unter variierenden Prozessbedingungen eine deutliche Reduzierung des Adhäsionsverschleißes realisierbar ist und ein ausreichender Verschleißschutz für das Presshärten gewährleistet wird. Durch das Legieren des Sonderwerkstoffes WP7V sowie des Warmarbeitsstahles X38CrMoV5-3 wird die chemische Affinität durch Einbringen von Zusatzmaterialien in die Grenzflächenbereiche der Kontaktfläche der Versuchsprobe verringert. Die höchste Verschleißbeständigkeit wird dabei mit einer PVD-Schicht erzielt, welche über einen Titananteil von 30 Gew.-% verfügt. Die in Abschnitt 6.2.1 bereits diskutierten und erarbeiteten Wirkzusammenhänge werden auch unter veränderten Werkstücktemperaturen bestätigt.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf das Verschleißverhalten ist werkstückseitig durch den Schichtaufbau des AlSi-Auftrages gegeben, welcher abhängig von den gewählten Austenitisierungsparametern variiert. Es ist davon auszugehen, dass durch die Erhöhung der Schichtdicke veränderte chemische Eigenschaften innerhalb der AlSi-Schicht des Blechmaterials hervorgerufen werden. Die Auswirkung auf das Verschleißverhalten ist daher zu analysieren. Die Austenitisierungsdauer sowie die Prozesstemperaturen während der Wärmebehandlung beeinflussen das Diffusionsverhalten zwischen dem Eisen des Grundwerkstoffes und der AlSi-Beschichtung. Um ein detailliertes Verständnis gegenüber der Adhäsionsneigung in Warmumformprozessen zu erhalten, wurden die weiterführenden Untersuchungen mit dem Referenzwerkstoff X38CrMoV5-3 sowie mit den beschichteten Pin-Oberflächen unter Verwendung von AlCrTiN mit 30 % Titan durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden die Prozessparameter konstant gehalten und die Blechzuschnitte für 360 s und für 480 s im Ofen wärmebehandelt. Die Abhängigkeit der Korngröße des Austenits von der Austenitisierungszeit und somit auf die resultierenden Härteeigenschaften nach

dem Presshärten wies Hoff nach [15]. In diesem Zusammenhang tritt eine Abnahme der Oberflächenhärte von pressgehärteten Bauteilen für eine Verweildauer von 600 s im Ofen auf [15]. Vor diesem Hintergrund wurde für die Versuchsdurchführung eine Wärmebehandlung der Blechwerkstoffe bei 480 s gewählt. Durch die Verschleißcharakterisierung wird ermittelt, inwieweit durch eine veränderte Gefügestruktur der AlSi-Schicht der Oberflächenverschleiß verändert wird. Als Flächenpressung wurde 10 MPa gewählt und die Blechtemperatur betrug während der Versuchsdurchführung 800 °C. Die berechneten Verschleißvolumina sowie die Topografieaufnahmen sind in Bild 27 aufgeführt.

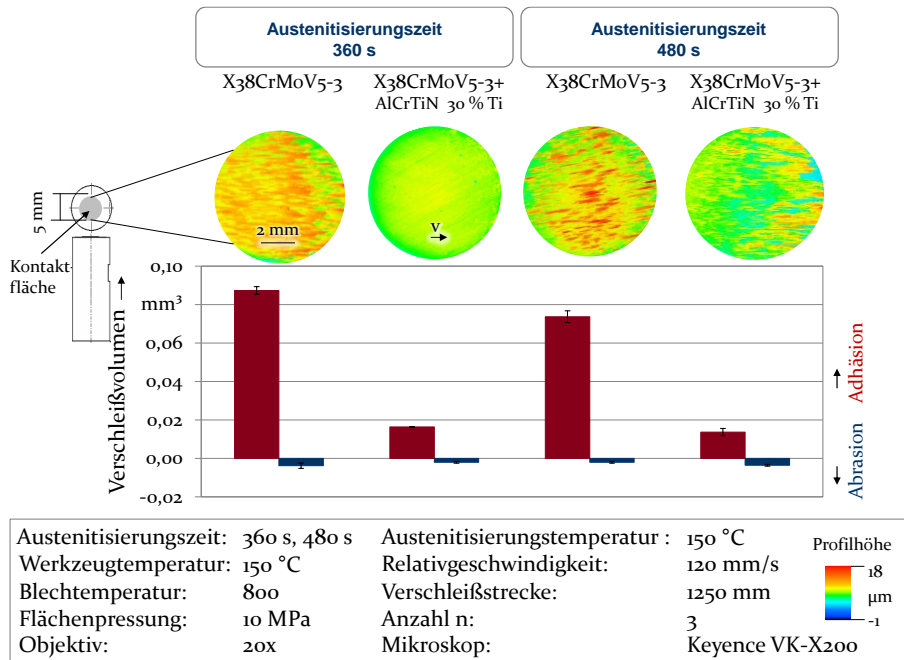


Bild 27: Verschleißverhalten in Abhängigkeit von der Austenitisierungszeit

Durch die veränderten Prozessbedingungen während der Austenitisierung wird der Einfluss der chemischen Zusammensetzung der AlSi-Schutzschicht auf das Verschleißverhalten deutlich. Während eine Verweildauer von 360 s im Ofen tendenziell in eine höhere Adhäsionsneigung an der Pin-Oberfläche führt, wird nach 480 s die anhaftende Verschleißmenge reduziert. Dieses Verhalten tritt dominierend für die unmodifizierte Oberfläche des Substrats X38CrMoV5-3 in Erscheinung. Die ermittelten Verschleißvolumina liegen bei 0,087  $\text{mm}^3$  und 0,074  $\text{mm}^3$ , somit resultiert ein um circa 13 % geringerer Oberflächenverschleiß. Eine verschleißmindernde Auswirkung tritt basierend auf diesen Ergebnissen infolge von längeren

Austenitisierungszeiten auf. Diesen Zusammenhang wies Wieland bereits nach einer Austenitisierungsdauer von 240 s nach [99]. Um die Ursache für dieses Verhalten zu identifizieren, wurde mit mikroskopischen Aufnahmen sowie EDX-Analysen die Auswirkung der veränderten Wärmebehandlungsparameter auf die Schichtausbildung des Blechmaterials 22MnB5 untersucht. Die gemessene Elementzusammensetzung ist in Bild 28 dargestellt.

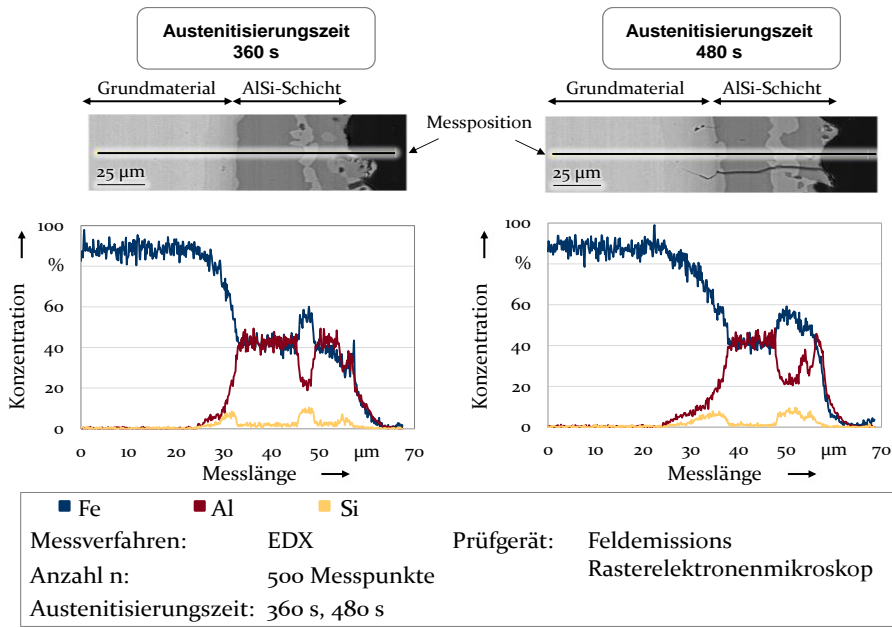


Bild 28: Verschleißverhalten in Abhängigkeit von der Austenitisierungszeit

Die Messergebnisse bestätigen die getroffenen Annahmen. Eine Erhöhung der Austenitisierungszeit führt zu einer Zunahme der Diffusionsvorgänge im Vergütungsstahl. Es findet eine Vermischung der Anteile aus Eisen, Aluminium und Silizium statt, welches eine Bildung von unterschiedlichen intermetallischen Phasen zur Folge hat. Die jeweilige Elementkonzentration variiert abhängig von dem jeweiligen Mischungsverhältnis. In der Übergangszone zwischen dem Grundmaterial des 22MnB5 und der AlSi-Schicht ist ein identischer Anteil von Aluminium und Eisen von circa 40 Gew.-% nachweisbar. In der AlSi-Schicht selbst nimmt der Eisenanteil von circa 40 Gew.-% auf 58 Gew.-% zu, während Aluminium auf circa 23 Gew.-% verringert wird. Ein Vergleich der Analysen zeigt zudem, dass die Breite dieser Metallphasen infolge der Durchmischungsvorgänge verändert wird. Während nach 360 s eine Dicke von circa 5 µm vorhanden ist, nimmt diese Schichtdicke nach 480 s auf 10 µm zu. Diese Bereiche liegen im Diagramm

zwischen den Messpositionen bei 45  $\mu\text{m}$  und 50  $\mu\text{m}$  sowie zwischen 46  $\mu\text{m}$  und 56  $\mu\text{m}$ . Basierend auf den Ergebnissen ist eine Kombination aus längerer Ofenverweilzeit und geeigneter Werkzeugbeschichtung ist zu empfehlen, um die Werkzeugstandmenge im Hinblick auf die Verschleißreduzierung zu erhöhen.

Als weiterer Bestandteil nimmt Silizium nach 480 s in der Schicht zwischen 47  $\mu\text{m}$  und 57  $\mu\text{m}$  zu. Während eine Phase, welche primär aus Aluminium und Eisen besteht, zu einem spröden Verhalten neigt, bewirkt ein zusätzlicher Siliziumanteil eine zunehmende Duktilität [24]. Zudem wird die Anbindung an den Grundwerkstoff erhöht, welche im Hinblick auf das Verschleißverhalten von wesentlicher Bedeutung ist. Eine hohe Schichtfestigkeit ist eine Voraussetzung, um einen unerwünschten Materialabtrag von AlSi-Partikeln zu verhindern und somit die adhäsive Verschleißneigung zu reduzieren. Ein weiterer Nachteil der chemischen Schichtzusammensetzung aus Eisen und Aluminium ist nach Fan et al. die verringerte Verformbarkeit der Beschichtung [24]. Ein Herausbrechen von AlSi-Bestandteilen und somit die Materialanhaftungen an der Werkzeugoberfläche wird dadurch begünstigt. Der Siliziumgehalt sorgt in aluminieren Auflage-schichten zu einer Bildung von mehrlagigen Mikrostrukturen [24].

### 6.2.3 Untersuchung des Reibverhaltens in Warmstreifenziehversuchen

Die Ermittlung der Reibzahlen wurde stichprobenartig durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden die Oberflächenmodifizierungen gewählt, welche aus den Verschleißanalysen die höchste sowie geringste Beständigkeit gegenüber Adhäsion aufwiesen. Während des Reibkontaktes stehen Verschleiß und Reibung in Wechselwirkung [36]. Infolge der unterschiedlichen Neigung zu Adhäsionsverschleiß der verwendeten Legierungs- oder Beschichtungssysteme ist davon auszugehen, dass im industriellen Einsatz das Reibverhalten und somit die resultierende Bauteilqualität beeinflusst wird. Infolge eines zunehmenden Oberflächenverschleißes ist eine Zunahme der Reibung zwischen den Kontaktflächen möglich. Das Ziehverhältnis des Halbzeuges wird verringert und das Risiko von Bodenreißen wird erhöht [155]. Vor diesem Hintergrund wird durch den Vergleich der Proben mit höchster und niedrigster Verschleißfestigkeit eine Aussage über den Einfluss der Verschleißneigung auf das tribologische Verhalten ermöglicht. Durch die Kombination von Tribotesterversuchen mit den Untersuchungen der Warmstreifenziehanlage wird eine vollständige Beschreibung der tribologischen Verhältnisse sichergestellt. Beide Prüfstände

werden konventionell für die Charakterisierung des Reib- und Verschleißverhaltens eingesetzt [156].

Basierend auf den Untersuchungen von Schwingenschlögl et al. wurden für die Versuchsdurchführung insgesamt sechs Blechstreifen pro Reibbacke gewählt [43]. In diesem Zusammenhang wurde nachgewiesen, dass erst nach drei Durchläufen die ermittelten Reibzahlen auf einem konstanten Niveau bleiben. Gleichzeitig nehmen mit zunehmender Anzahl an Versuchsdurchläufen die Materialanhaftungen auf der Reibbackenoberfläche zu [43].

Für die Versuchsdurchführung ist zu berücksichtigen, dass die Prozessparameter Temperatur, Gleitgeschwindigkeit und Anpresskraft das Reibverhalten beeinflussen. Schwingenschlögl et al. [40] bestätigten diesen Zusammenhang in ihrer Studie. Eine mögliche Ursache in diesem Zusammenhang ist, dass bei einer erhöhten thermischen Beanspruchung die Anbindung der AlSi-Schicht an die Blechoberfläche abnimmt. Es kommt dadurch zu einer Beschädigung der Blechbeschichtung während des Reibkontakts, wodurch die Neigung zu adhäsivem Verschleiß am Werkzeug steigt [40]. Zusätzlich hängt die Reibung von dem von Czichos aufgestellten Modell in [33] von der Adhäsionskomponente ab. Um die lokalen Verbindungen zwischen Werkzeug und Werkstück während des Reibkontaktes aufzubrechen, sind die Bindungskräfte zu überwinden. Je geringer die Adhäsionskomponente ist, desto geringer ist die erforderliche Kraft. Folglich nimmt die Reibung ab [40]. Nach Tian und Zhang nimmt die Reibzahl bei geringen Gleitgeschwindigkeiten zu [45]. Infolge der längeren Kontaktzeiten zwischen den Reibpartnern steht mehr Zeit zur Bildung neuer Metallbindungen zur Verfügung, wodurch der Materialübertrag von AlSi-Partikeln auf die Werkzeugoberfläche begünstigt wird [45]. Vor diesem Hintergrund ist ein weiterer möglicher Erklärungsansatz, dass die lokale Temperaturverteilung in der Kontaktzone zwischen Reibbacke und Blech bei geringen Relativgeschwindigkeiten verändert wird. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten steigt die Temperatur zwischen Werkzeug und Werkstück an, wodurch es zu einer Zunahme der Erwärmung entlang des Kontaktbereichs der Reibbacke kommt. Dadurch wird zusätzlich die Bindung der AlSi-Schicht an das Blechmaterial verringert, wodurch zunehmend Partikel abgetragen werden und auf der Kontaktfläche des Werkzeuges anhaften. Die Neigung zu adhäsiver Materialanhaftung nimmt zu. Es ist davon auszugehen, dass durch eine zunehmende thermo-mechanische Beanspruchung der Reibbackenoberfläche der adhäsive und abrasive Verschleiß zunehmen. Aufgrund dieser komplexen Wechselwirkung ist es nicht mehr möglich, auf gültige Reibzahlen zu schließen. Nach dem Reibgesetz von Coulomb bleibt die

Wechselwirkung zwischen adhäsiven Verschleiß und Reibung unberücksichtigt. Es werden lediglich die Beziehungen von Normal- zur Reibkraft berücksichtigt [36]. Nimmt daher die Adhäsionsneigung zwischen den Kontaktpartnern zu, ist keine gültige Aussage mehr hinsichtlich der Reibzahlen mehr möglich. Zu einer vergleichbaren Erkenntnis gelangten Schwingenschlögl et al. in ihren Untersuchungen zu den Reibbedingungen beim Presshärten [45]. Um eine Aussage hinsichtlich der Reibung vor und nach dem Oberflächenmodifizieren zu ziehen, wurden daher die Versuchsparameter entsprechend den industriellen Bedingungen angepasst. In diesem Zusammenhang stellen die Blechtemperatur von 600 °C, eine Flächenpressung von 5 MPa und eine Relativgeschwindigkeit von 120 mm/s prozessrelevante Parameter dar. Es ist weiterhin zu berücksichtigen, dass nach von Mises die Reibzahlen für Werkstoffpaarungen in der Blechumformung unterhalb von 0,57 liegen, da sonst das Reibgesetz keine Gültigkeit mehr hat [34]. Repräsentativ sind die Verläufe der Reibwerte für die unmodifizierten Referenzwerkstoffe WP7V und X38CrMoV5-3 in Bild 29 gegenübergestellt.

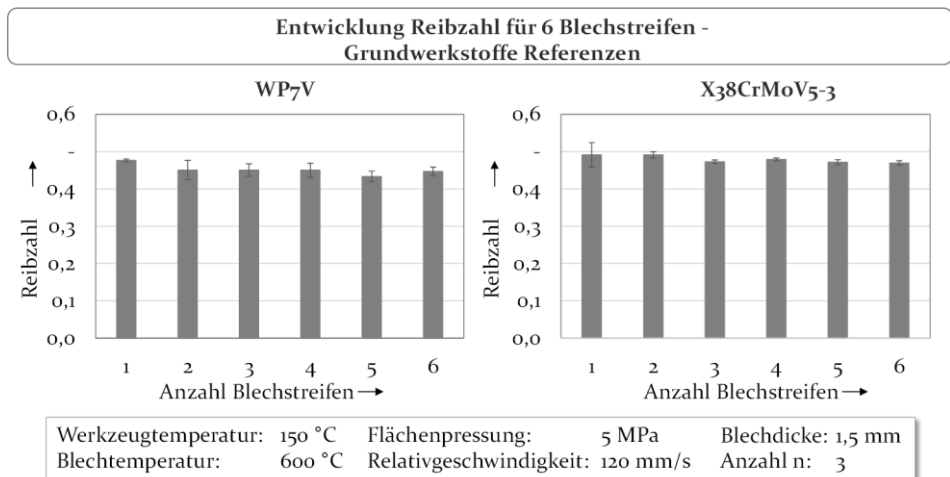


Bild 29: Reibzahlentwicklung nach Versuchsdurchführung mit den Referenzwerkstoffen

Unter Berücksichtigung der Standardabweichung tritt kein signifikanter Unterschied in den Ergebnissen auf. Jedoch dient der Nachweis dazu, den Einfluss des Verschleißverhaltens auf die Reibung nach neuem Einsatz der Werkzeuge zu analysieren. Zu diesem Zweck wurden die Versuche für insgesamt sechs Blechstreifen durchgeführt. Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass nach den ersten zwei bis drei Durchläufen tendenziell die höchsten Werte ermittelt werden. Nach dem vierten Blechstreifen bleiben die Reibzahlen auf einem annähernd gleichen Niveau. Eine Ausnahme

stellt hierbei der WP7V dar. Nach dem fünften Versuchsablauf nimmt die Reibzahl von 0,45 auf 0,43 marginal ab. Eine mögliche Ursache hierfür ist, dass durch den Oberflächenverschleiß die Reibung beeinflusst wird und somit eine geringe Abweichung zwischen zwei Blechen auftritt. Während des Reibkontakts tritt eine Schmierwirkung von bereits anhaftendem Al-Partikel auf der Reibbacke auf [43]. Infolge der hohen Temperaturen in der Wirkfläche zwischen den Kontaktpartnern weist Aluminium eine zunehmend geringere Festigkeit auf, da der Schmelzpunkt dieses Elements überschritten wird [44]. Um aufbauend auf diesen Erkenntnissen eine detaillierte Bewertung hinsichtlich der Reibwerte vorzunehmen, werden in dieser Arbeit die ersten drei Abläufe als Einlaufverhalten betrachtet. Es erfolgt anschließend eine Auswertung der Messergebnisse für die Versuche vier bis sechs. Auch im industriellen Einsatz findet in der Regel eine Einlaufphase von Werkzeugen statt [157], weshalb durch die gewählte Vorgehensweise industriennahe Bedingungen geschaffen werden. Die Ergebnisse der Oberflächenmodifizierungen werden den Untersuchungen an Referenzproben in Bild 30 gegenübergestellt.

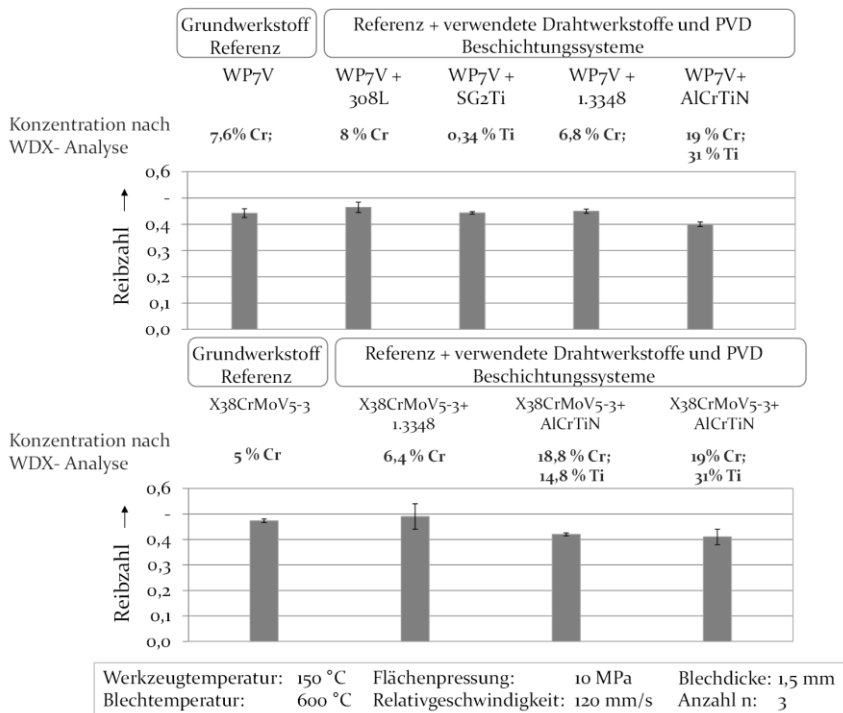


Bild 30: Reibzahlen für den Kontakt legierter und beschichteter Flächen mit 22MnB5+AlSi

Eine Abschätzung des Reibverhaltens zwischen den Grundwerkstoffen WP7V und X38CrMoV5-3 mit jeweils der AlSi-Schicht des Werkstücks ist

durch den Vergleich der dargestellten Diagramme möglich. Für die Kontaktpaarungen der legierten Varianten mit den Drahtwerkstoffen SG2Ti und 1.3348 mit dem AlSi beschichteten Blechmaterial 22MnB5 werden vergleichbare Reibzahlen erreicht. Die Werte liegen hierbei bei 0,44 und 0,45. Für die Reibpaarung mit dem unmodifizierten Substratwerkstoff WP7V wird ebenfalls ein Wert von 0,44 ermittelt. Ein marginaler Anstieg auf 0,46 ist durch die Oberflächenlegierung mit 308L in Kombination mit dem Blech zu erkennen. Unter Berücksichtigung der Standardabweichungen ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen nachweisbar. Erst nach dem Aufbringen einer Beschichtung auf die Werkzeugoberfläche führt während der Relativbewegung zwischen Reibbackenoberfläche und dem Blechmaterial zu einer Reduzierung der Reibzahl auf 0,4. Ein identisches Verhalten ist bei den Analysen mit dem Grundwerkstoff X38CrMoV5-3 nachweisbar. Während 0,47 oberhalb des Ergebnisses nach den Untersuchungen mit WP7V liegt, nimmt die Reibung der Werkstoffpaarungen mit beschichteten Kontaktflächen auf 0,42 und 0,41 ab. Durch das Legieren der Oberfläche der Reibbacke mit 1.3348 ist für das tribologische System kein signifikanter Unterschied gegenüber der unmodifizierten Variante nachweisbar. Nach [158] liegen typische Reibzahlen für die Warmumformung zwischen 0,4 und 0,5, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass im Rahmen dieser Untersuchungen die analysierten Varianten die tribologischen Presshärtebedingungen erfüllen. Zusätzlich ist bedingt durch die geringe Abweichung zwischen den jeweiligen Kontaktpaarungen kein signifikanter Einfluss auf das Reibverhalten durch die gewählten Oberflächenmodifizierungen zu erwarten. Es ist zu berücksichtigen, dass durch die Erhöhung der Verschleißbeständigkeit infolge der AlCrTiN-Werkzeugbeschichtungen gleichzeitig die Reibverhältnisse beeinflusst werden. Die Adhäsionsneigung hat in diesem Zusammenhang eine entscheidende Wirkung auf die resultierende Reibung. Durch die lokalen Mikroverschweißungen, welche während des Metallkontaktes zwischen Werkzeug und Blechoberfläche gebildet werden, ist eine zunehmende Reibkraft zur Trennung dieser Bindungen erforderlich. Eine Charakterisierung der tribologischen Bedingungen für unterschiedlichen Werkstoffe führten Schwingenschlögl et al. durch, um daraus Rückschlüsse auf die Wechselwirkung zwischen Reibung und Verschleiß zu ziehen [98]. Während des Einsatzes von AlCrTiN und CrCn beschichteten Proben wird eine deutliche Reduzierung der Reibzahl bewirkt. Diese Oberflächen weisen dabei eine geringere adhäsive Materialanhaftungen auf [98]. Es ist davon auszugehen, dass eine geringe Neigung zu Adhäsionsverschleiß zu einer Reduzierung der Reibung führt. Während nach Hardell et al. CrN-Schichten bei 400 °C bereits abrasiv beschädigt werden und somit Schwankungen in den Reibzahlen

auftreten, verfügen TiAlN-Schichten über eine höhere Verschleißbeständigkeit. Folglich wird das Reibverhalten nicht signifikant beeinflusst [159].

Um zusätzlich einen Einfluss des Verschleißverhaltens auf die resultierende Reibung abzuschätzen, erfolgte eine Oberflächencharakterisierung der Reibbacken. Aufgrund der wesentlich größeren Reibfläche von 1000 mm<sup>2</sup> im Vergleich zu den Pins mit 19,63 mm<sup>2</sup> ist eine Erfassung des gesamten Kontaktbereichs mit höherem Aufwand verbunden. Die in Bild 31 dargestellten Messungen sind auf repräsentative Bereiche beschränkt.

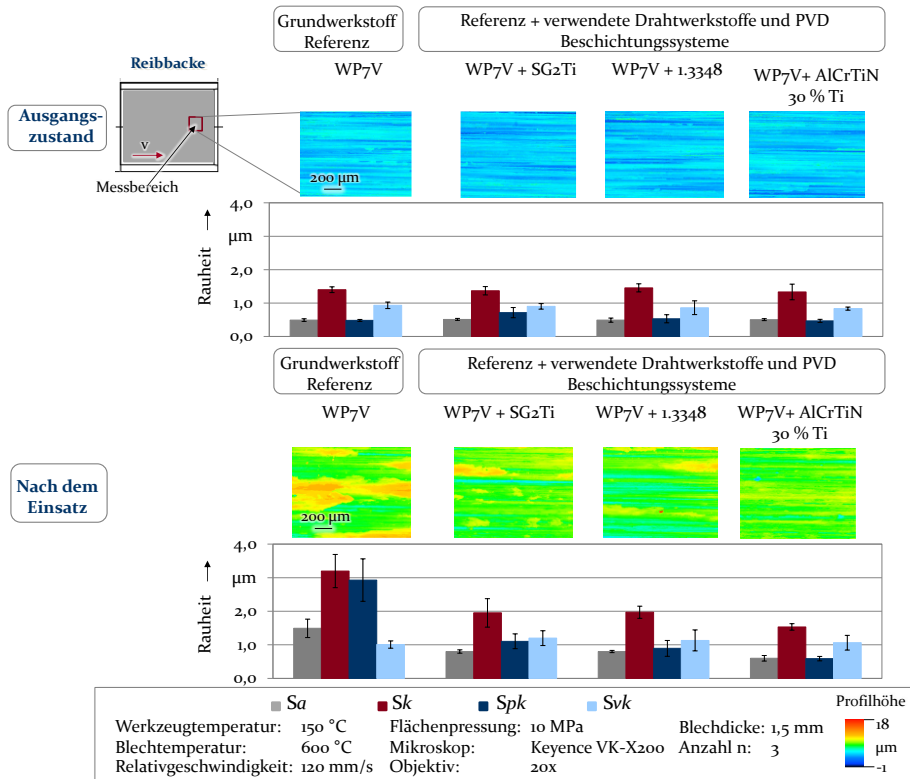


Bild 31: Topografieaufnahmen und Rauheiten der eingesetzten Reibbacken

Als verschleißkritisch sind die Regionen in der Einlaufzone der Reibbacke zu betrachten, da bedingt durch einen Kantenbereich der Abrieb von AlSi-Partikeln in Bewegungsrichtung begünstigt wird. Der in Bild 31 rot markierte Messbereich wurde jeweils an drei unterschiedlichen Reibbacken gemessen und der Mittelwert gebildet. Eine detaillierte Bewertung hinsichtlich des Oberflächenverschleißes ist zwar mit dieser Methode nur bedingt möglich, jedoch kann eine erste Aussage zur Adhäsionsneigung getroffen werden. Zudem wird durch dieses Analyseverfahren sichergestellt, dass die

höchstbeanspruchten Kontaktbereiche analysiert werden. Ein Materialabtrag der AlSi-Schicht des Blechstreifens wird in Bewegungsrichtung begünstigt. Durch eine Phase im Einlaufbereich wird zwar diesem Vorgang entgegengewirkt, jedoch tritt infolge der Relativbewegung vermehrt Adhäsion in diesen Regionen auf. Anhand von Rauheitskenngrößen erfolgt zusätzlich eine Bewertung der Oberflächenveränderung, welche durch Verschleißerscheinungen hervorgerufen werden.

Die Oberflächentopografien des Ausgangszustandes zeigen, dass Schleifriefen durch den Fertigungsprozess in Bewegungsrichtung orientiert vorhanden sind. Ein Unterschied zwischen verschiedenen Oberflächenmodifikationen tritt nicht in Erscheinung. Durch die Materialanlagerung von AlSi-Partikeln auf der Reibbacke findet auf lokalen Bereichen eine Geometrieänderung der ebenen Kontaktfläche statt, wodurch die Oberflächenstruktur verändert wird. Nach der Versuchsdurchführung sind diese Veränderungen durch die roten und gelben Farbbereiche zu erkennen. Den höchsten Adhäsionsverschleiß weist dabei die unmodifizierte Reibbacke aus WP7V auf, da auf der Kontaktfläche diese Bereiche am stärksten ausgeprägt sind. Im Vergleich zur Referenz nehmen die Anhaftungen für die legierten sowie für die beschichteten Proben ab. Der geringste Verschleiß wird für die AlCrTiN-Schicht nachgewiesen. Dieses Ergebnis bestätigt die Erkenntnisse aus den Verschleißuntersuchungen. Eine Abschätzung des Oberflächenverschleißes erfolgt zusätzlich durch die Ermittlung der Rauheitskenngrößen  $S_k$ ,  $S_{pk}$ ,  $S_{vk}$  und  $S_a$ .

Durch eine gesamtheitliche Untersuchung dieser Parameter ist eine Bewertung hinsichtlich der Verschleißneigung realisierbar. Während für die Ausgangsoberflächen die Rauheitsdaten auf einem vergleichbaren Niveau liegen, nimmt die Oberflächenrauheit der eingesetzten Kontaktflächen zu. In diesem Zusammenhang tritt der höchste Anstieg für die Kernrautiefe  $S_k$  auf. Für die Referenzfläche WP7V nimmt der Wert von  $1,40 \mu\text{m}$  auf  $3,20 \mu\text{m}$  zu. Zusätzlich steigt die reduzierte Spitzenhöhe  $S_{pk}$  von  $0,48 \mu\text{m}$  auf  $2,93 \mu\text{m}$  signifikant an, wodurch eine Neigung zu hohem Oberflächenverschleiß bestätigt wird. Durch das Legieren mit SG2Ti und 1.3348 wird anhand der ermittelten Rauheitsdaten deutlich, dass geringere Verschleißerscheinungen auftreten. Ein Anstieg von  $S_k$  wird in beiden Fällen von  $1,37 \mu\text{m}$  auf  $2 \mu\text{m}$  nachgewiesen, für  $S_{pk}$  eine Zunahme von circa  $0,5 \mu\text{m}$ . Insgesamt liegen die Oberflächenrauheiten für die legierten Kontaktflächen nach dem Einsatz unterhalb der Werte vom unmodifizierten WP7V. Eine weitere Steigerung der Verschleißfestigkeit wird durch das Aufbringen der AlCrTiN-Verschleißschutzschicht erzielt. Durch das Gegenüberstellen der Topografieaufnahme mit den Rauheitsparametern ist zu

erkennen, dass die geringste Oberflächenbeschädigung aus adhäsiven Materialanhaftungen resultiert. In diesem Zusammenhang liegt  $Sk$  nach dem Einsatz bei  $1,53 \mu\text{m}$  und  $Spk$  bei  $0,59 \mu\text{m}$ , welches einem Anstieg um jeweils  $0,20 \mu\text{m}$  entspricht. Die Werte von  $Sa$  und  $Svk$  weisen in der Regel eine geringere Zunahme als die bereits diskutierten Kenngrößen auf.

Eine Ausnahme stellt WP7V dar, bei welchem  $Sa$  von  $0,5 \mu\text{m}$  auf  $1,5 \mu\text{m}$  ansteigt. Es ist daher von einer höheren Verschleißneigung des Grundmaterials WP7V gegenüber seinen modifizierten Varianten auszugehen. Die Rauheitskenngröße  $Svk$  nimmt tendenziell stärker für die legierten und beschichteten Varianten zu. Jedoch liegen alle ermittelten Werte dieser Oberflächen unterhalb der Referenzprobe WP7V. Anhand dieser Ergebnisse wird bestätigt, dass durch eine geeignete Oberflächenmodifikation die Neigung zu metallischer Adhäsion deutlich verringert wird. Die Reduzierung der chemischen Affinität zwischen Reibbackenoberfläche und der AlSi-Schicht des Bleches erklärt ebenfalls die niedrige Reibzahl von  $0,4$  für die beschichtete Oberfläche des Substrats WP7V mit AlCrTiN. Zu vergleichbaren Resultaten kommen auch Schwingenschlögl et al. [98] unter Verwendung beschichteter Flächen mit AlCrTiN und CrCn. Die bereits getroffene Annahme bezüglich der Wechselwirkung der Adhäsionskomponenten mit der Reibung wird basierend auf diesen Erkenntnissen bestätigt. Nimmt die Neigung zu metallischer Adhäsion ab, wird dadurch tendenziell die Reibung reduziert.

Für eine Übertragbarkeit wurden in Bild 32 die Analysen für den Substratwerkstoff X38CrMoV5-3 gegenübergestellt. Die Ausgangsoberflächen weisen auch in diesem Falle fertigungsbedingte Schleifriefen auf und die Oberflächenrauheiten sind ebenfalls vergleichbar. Der höchste adhäsive Verschleiß tritt an der konventionellen Werkzeugoberfläche des Warmarbeitsstahls X38CrMoV5-3 auf. Anhand der Oberflächentopografie tritt als sekundärer Verschleißmechanismus Abrasion auf, welcher durch die tiefe Riefe gekennzeichnet ist. Dieser Nachweis bestätigt die Annahmen aus der Verschleißcharakterisierung. Infolge der komplexen thermo-mechanischen Wechselwirkung ist es möglich, dass während des Reibkontaktes harte Oxidpartikel in die Werkzeugoberfläche eindringen, wodurch ein abrasiver Abtrag entsteht. Die auf dem Blechwerkstoff aufgebrauchte AlSi-Schicht bietet keinen vollständigen Korrosionsschutz, sondern lediglich einen Barrierschutz, sodass eine Oxidation der Werkstückoberfläche nicht vollständig ausgeschlossen werden kann [24]. Durch die Relativbewegung zwischen der Reibbacke und dem Blechstreifen kommt es zu einem Materialabrieb an der Werkzeugkontaktfläche.

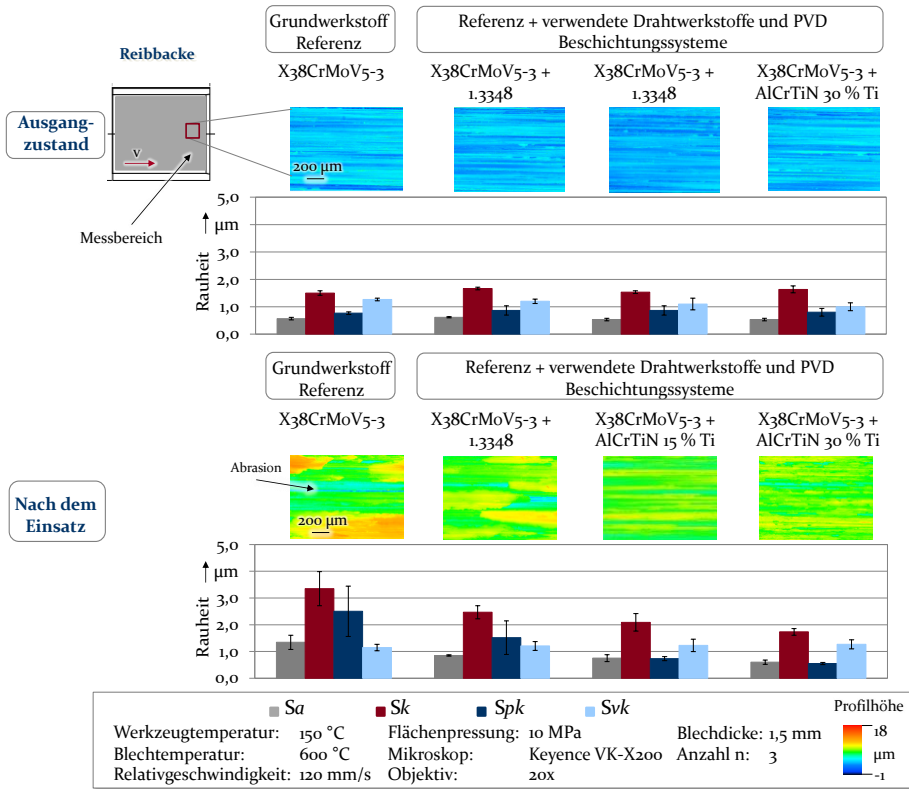


Bild 32: Oberflächentopografien und Rauheitskenngrößen für den X38CrMoV5-3

Ein vergleichbarer Zusammenhang wie für den Grundwerkstoff WP7V tritt auch für die legierten und beschichteten Varianten des X38CrMoV5-3 auf. Während an den Oberflächentopografien geringere Materialanhaftungen zu erkennen sind, nehmen die Rauheitskenngrößen ab. Die Rauheitskenngrößen  $S_a$ ,  $S_k$ ,  $S_{pk}$  und  $S_{vk}$  liegen auch für die legierten sowie beschichteten Reibbacken deutlich unterhalb des unmodifizierten Warmarbeitsstahls. Dieser Zusammenhang soll anhand von  $S_k$  und  $S_{pk}$  verdeutlicht werden, da diese Werte die höchste Zunahme aufweisen. Für X38CrMoV5-3 liegt nach der Versuchsdurchführung  $S_k$  mit  $3,35 \mu\text{m}$  um circa  $2 \mu\text{m}$  oberhalb des Ausgangszustandes, während  $S_{pk}$  von  $0,77 \mu\text{m}$  auf  $2,5 \mu\text{m}$  ansteigt. Im Vergleich dazu nehmen für die beschichtete Reibbacke mit AlCrTiN und einem Titananteil von 30 Gew.-% diese Werte marginal um  $0,5 \mu\text{m}$  zu. Auch hier tritt in den ermittelten Reibzahlen mit  $0,41$  eine Abnahme der Reibung auf. Zusammenfassend gilt, die gewählten Oberflächenmodifizierungen beeinflussen durch Reduzierung der Adhäsionsneigung die Reibverhältnisse und es kann eine geringere Reibzahl erzielt werden.

### 6.2.4 Ermittlung des Abkühlverhaltens oberflächenmodifizierter Werkzeuge

Um die Auswirkungen der Oberflächenmodifikation auf die thermischen Bedingungen des Presshärteprozesses zu analysieren, wurden Abschreckversuche durchgeführt. Durch das Aufbringen einer Verschleißschicht ist eine Verringerung des Wärmeübergangs zwischen den Kontaktflächen zu erwarten. Ein Einfluss stellt die Mikrostruktur des Beschichtungssystems dar. Nach [160] verfügt eine feinkörnigere Struktur über eine geringere Wärmeleitfähigkeit als ein grobkörniges Gefüge. Im Hinblick auf das primäre Ziel dieser Arbeit, einen Ansatz zur Erhöhung der Verschleißbeständigkeit der Umformwerkzeuge zu identifizieren, wurde für die Untersuchungen die AlCrTiN-Beschichtung mit 30 % Titananteil gewählt. Die Ergebnisse der beschichteten Varianten wurden mit unmodifizierten Referenzwerkstoffen aus X38CrMoV5-3 sowie WP7V korreliert. Die ermittelten Abkühlkurven und ein repräsentatives Schlibbild sind in Bild 33 dargestellt.

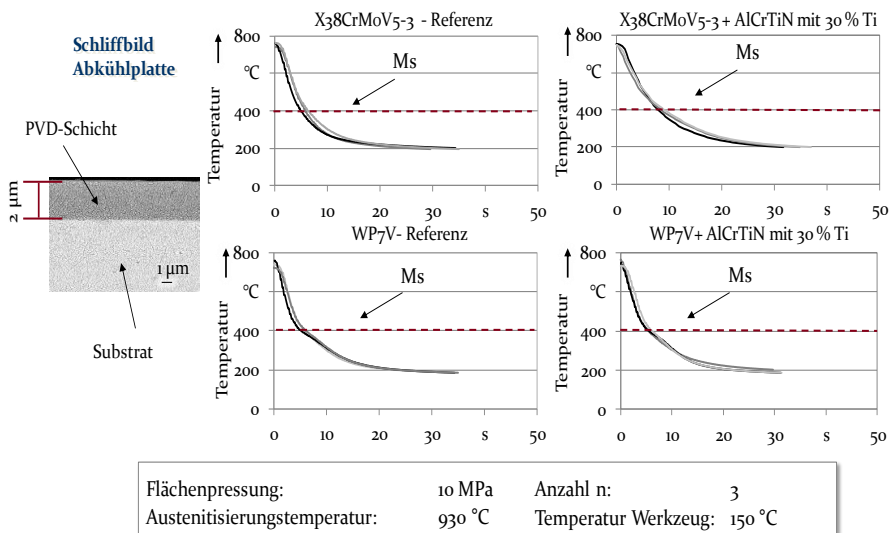


Bild 33: Abkühlkurven für unmodifizierte und beschichtete Werkzeuge

Die Temperatur der Abschreckplatten wurde bei der Versuchsdurchführung konstant auf 150 °C gehalten. Im industriellen Einsatz werden die Umformwerkzeuge aktiv gekühlt. Jedoch nimmt die Temperatur an der Werkzeugkontaktfläche bedingt durch das Einlegen des heißen Blechwerkstoffes während des Abschreckvorganges zu. Basierend auf der Arbeit von Wieland wird aufgrund dieser thermischen Wechselbeanspruchung eine konstante Werkzeugtemperatur bei 150 °C ± 50 °C erreicht [99], weshalb die Versuchsdurchführung bei dieser Temperatur erfolgte. In der

ersten Testreihe wurden unbeschichtete Substratwerkstoffe aus X38CrMoV5-3 und WP7V eingesetzt. Während des Abschreckens wurden die Temperaturverläufe mithilfe von Thermoelementen mit einer Aufnahmefrequenz von 5 Hz gemessen.

Ein Vergleich der Kurvenverläufe zeigt, dass ein ähnliches Abkühlverhalten auftritt. Die Starttemperatur nach dem Einlegen des Bleches und vor dem Schließen des Werkzeuges beträgt circa 750 °C. Die Werkstücke kühlen innerhalb von 25 s bis 30 s auf 200 °C ab. Diese Temperatur ist vergleichbar mit pressgehärteten Bauteilen direkt nach dem Fertigungsprozess und entspricht deren Entnahmetemperatur [161]. Ein ähnliches thermisches Verhalten ist nach dem Beschichten der Kontaktflächen mit AlCrTiN mit einem Titangehalt von 30 % gegeben. Die Schichtdicke beträgt laut Hersteller bis 6 µm [121]. Anhand des Schliffbildes beträgt die AlCrTiN-Schicht eine Dicke von 2 µm. Aufgrund dieser dünnen Beschichtung ist davon auszugehen, dass der Wärmeübergang nicht signifikant beeinflusst wird. Um diese Annahme zu bestätigen, sind jedoch weiterführende Untersuchungen in zukünftigen Arbeiten unter Verwendung dickerer Schichtsysteme erforderlich. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass durch die Arbeiten von Siniarski et al. ein Einfluss der Schichtdicke von Multilagensystemen auf den Wärmeübergang nachgewiesen wurde [162].

Basierend auf dem Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild (ZTU) [163] ist die Phasenumwandlung in ein Martensitgefüge abhängig von der Abkühlgeschwindigkeit. Während eine geringe Abkühlung in Bainit, Perlit oder Ferrit resultiert, ist eine Mindestabkühlgeschwindigkeit von 30 °C/s durch den Werkzeugkontakt zur Erreichung von Martensit erforderlich [163]. Für die Stahlsorte 22MnB5 liegt die Martensitstarttemperatur  $M_s$ , bei welcher die martensitische Umwandlung beginnt, bei circa 400 °C [163]. Anhand der gemessenen Verläufe wird diese Temperatur in allen Fällen nach circa 5 s bis 10 s erreicht. Die resultierende Abkühlgeschwindigkeit wird in dieser Arbeit mit nachfolgender Formel bestimmt.

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\Delta t} \quad (3)$$

In diesem mathematischen Zusammenhang entspricht  $T_1$  der Anfangstemperatur von circa 750 °C (1023,15 K) und  $T_2$  der Martensitstarttemperatur von 400 °C (673,15 K). Unter Berücksichtigung der Messzeit von  $\Delta t$  zwischen 6 s und 8 s, wird für die unbeschichteten sowie für die beschichteten Varianten die Mindestabkühlgeschwindigkeit von 27 K/s erreicht und sogar überschritten. Für die modifizierten Oberflächen liegt der Wert

durchschnittlich bei circa 45 K/s und für die Referenzproben bei circa 50 K/s. Eine vollständige Phasenumwandlung in ein martensitisches Gefüge ist somit gewährleistet und die thermischen Anforderungen für den Einsatz im Presshärteprozess gegeben. Aus den abgeschreckten Blechzuschnitten des Vergütungsstahls 22MnB5 wurden anschließend Sekundärproben entnommen. Wesentliche Einflussfaktoren auf die Spannungsverläufe stellen neben der Werkstücktemperatur die Abkühlraten dar [164]. Dieser Zusammenhang kann anhand von Warmzugversuchen zur Materialcharakterisierung mithilfe einer Prüfanlage Gleeble 1500 nachgewiesen werden [164]. Im Rahmen dieser Arbeit sind jedoch die Kenntnisse hinsichtlich der finalen mechanischen Festigkeitseigenschaften nach dem Abschreckvorgang entscheidend. Vor diesem Hintergrund wird auf eine grundlegende Analyse hinsichtlich unterschiedlicher Prozessparameter auf die Spannungskurven verzichtet. In Bild 34 ist die Geometrie der Zugproben mit den Fließkurvenverläufen dargestellt. Die Probendicke betrug 1,5 mm mit einer Versuchslänge von 50 mm sowie einer Breite von 12,5 mm.

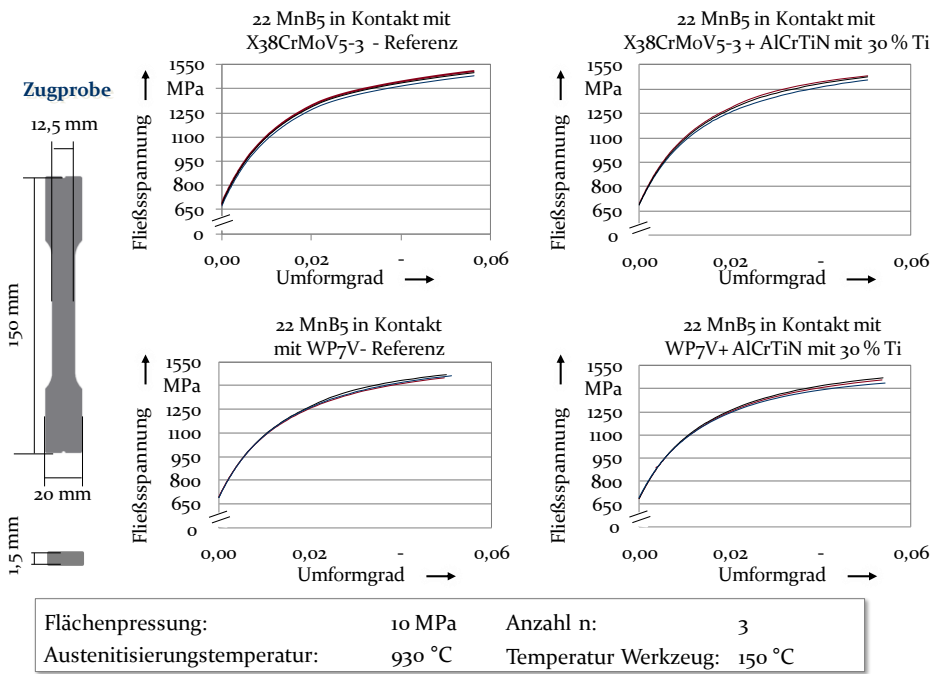


Bild 34: Fließkurven der abgeschreckten Proben aus 22MnB5 in Kontakt mit modifizierten Werkzeugoberflächen

Unabhängig von der Oberflächenmodifikation des eingesetzten Abschreckwerkzeuges treten vergleichbare Kurvenverläufe nach den Zugversuchen auf. Zusätzlich ist keine signifikante Abweichung der ermittelten

Fließkurven für jede Versuchsreihe nach den drei Wiederholversuchen nachweisbar. In allen Fällen liegen die maximalen Fließspannungen bei circa 1500 MPa. Nach [165] werden basierend auf diesen Ergebnissen die relevanten Fließspannungen von pressgehärteten Bauteilen erreicht. In der Forschungsarbeit der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) erfolgte eine dehnratenabhängige Materialcharakterisierung für den Vergütungsstahl 22MnB5. Während die Fließspannungen nach dem konventionellen Presshärteprozess zwischen 1700 MPa und 1800 MPa liegen, nehmen die Spannungswerte von partiell pressgehärteten Versuchsproben auf circa 1000 MPa ab [165]. Das partielle Presshärten erfolgte bei einer Werkzeugtemperatur von 550 °C [165]. Da die Abschreckversuche im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls bei erhöhter Temperatur der Abkühlplatten durchgeführt wurden, ist demnach die geringere Fließspannung von 1500 MPa im Vergleich zu den Arbeiten der FAT erklärbar. Dieser Zusammenhang wird ebenfalls dadurch bestätigt, dass in [165] insgesamt die Fließkurven nach dem partiellen Härteprozess bei einer Temperatur der Werkzeugoberfläche von 550 °C abnehmen. Für die im Rahmen dieser Arbeit analysierten Oberflächenmodifikationen werden während des Werkzeugkontakts mit 22MnB5 die erforderlichen Bauteilfestigkeiten erreicht.

### **6.3 Zusammenhänge zwischen Einsatzverhalten und Oberflächeneigenschaft**

Ein Vergleich der ermittelten Verschleißvolumina zwischen den Referenzproben aus WP7V und X38CrMoV5-3 mit den legierten sowie beschichteten Oberflächen haben gezeigt, dass durch das Modifizieren das Verschleißverhalten signifikant beeinflusst wird. Konventionelle Werkzeugflächen verfügen über eine hohe Neigung zu adhäsivem Verschleiß bedingt durch Anlagerung von AlSi-Partikeln des Blechwerkstoffes. Durch das Behandeln mit dem Laserstrahllegieren sowie durch das Aufbringen von Verschleißschutzschichten wird die chemische Affinität zwischen den metallischen Festkörpern verringert.

Die legierten Varianten weisen deutliche Unterschiede hinsichtlich ihres Verschleißverhaltens auf. Ein steigender Nickelgehalt, welcher in das Grundmaterial eingebracht wird, führt tendenziell zu einer Zunahme des Adhäsionsverschleißes an der Werkzeugoberfläche. Die ermittelte Verschleißmenge liegt für diesen Fall um circa 20 % oberhalb des Adhäsionsvolumens des Referenzwerkstoffes. Erst durch Reduzierung des Nickelanteils oder durch Erhöhung von Chrom oder Molybdän im modifizierten Oberflächenbereich wird eine tendenzielle Verringerung des adhäsiven

Verschleißes erzielt. Eine Variation der Elementzusammensetzung aus Nickel, Chrom und Molybdän hingegen führt, bedingt durch den zusätzlichen Molybdänanteil, zu einer weiteren Reduzierung der chemischen Affinität. Eine Korrelation mit der unmodifizierten Oberfläche zeigt nur eine geringfügige Verringerung von adhäsiven Materialanhaftungen auf der Werkzeugkontaktfläche. Im Hinblick auf die hohe Elektronendichte von Nickel ist eine Zunahme der Bindungskräfte zwischen den Kontaktpartnern zu erwarten. Nach Czichos nimmt die Adhäsionsneigung mit der Anzahl an freien Elektronen tendenziell zu [33]. Zusätzlich neigen nickelbeschichtete Oberflächen zu erhöhtem adhäsiven Verschleiß [136]. Folglich ist für den industriellen Einsatz zu empfehlen, auf den Zusatz von Nickel zu verzichten.

Eine signifikante Steigerung der Verschleißbeständigkeit wird durch das Einbringen von Titan oder durch eine Kombination aus Chrom, Molybdän und dem Nichteisenelement Kohlenstoff erreicht. Dieses Verhalten ist auf die geringere Dichte freibeweglicher Elektronen der verwendeten Zusatzwerkstoffe zurückzuführen. Zusätzlich hängt die Verschleißneigung von der eingebrachten Legierungskonzentration ab, welche insbesondere durch Titan und Kohlenstoff beeinflusst wird. In beiden Fällen wird jeweils näherungsweise ein doppelt so hoher Anteil des Zusatzmaterials in den Ausgangswerkstoff eingebracht. Der resultierende Titangehalt ist jedoch mit 0,034 Gew.-% im Vergleich zu der modifizierten Variante mit Kohlenstoff von 8 Gew.-% signifikant geringer, wodurch zusammenfassend die höchste Verschleißbeständigkeit unter Einsatz eines Drahtwerkstoffes aus Chrom, Molybdän und Kohlenstoff gegeben ist. Neben dem Einfluss der diskutierten Adhäsionskomponente nach Czichos [33] wird infolge des atomaren Aufbaus von Nichteisenmaterialien eine Reduzierung der chemischen Affinität zwischen Werkzeug und AlSi-Schicht erreicht. Für den Einsatz des Laserstrahllegierungsprozesses sind basierend auf diesen Erkenntnissen die Legierungselemente Chrom, Molybdän, Kohlenstoff und Titan zu bevorzugen. Diese Elemente neigen zudem zur Bildung von Karbiden, woraus eine Verringerung der Adhäsionskräfte resultiert [145].

Im Vergleich zu den legierten Oberflächenmodifikationen zeigen die beschichteten Proben tendenziell ein weiteres Potential, um den adhäsiven Verschleiß zu reduzieren. Um durch das Laserstrahllegieren eine vergleichbare Verschleißfestigkeit einzustellen, sind Drahtwerkstoffe zu entwickeln, deren chemische Elementzusammensetzung deutlich oberhalb der Konzentration der in dieser Arbeit verwendeten Drähte liegen. Ein weiterer Ansatz ist, durch den Legierungsprozess die Karbidbildung im Grundmaterial zu steigern. Durch die Bildung von Primärkarbiden ist davon auszugehen,

dass die adhäsive Neigung von metallischen Festkörpern reduziert werden kann [145]. Eine Möglichkeit ist, die Prozessparameter während des Laserstrahllegierens zu variieren. In diesem Zusammenhang ist eine veränderte Anpassung der Fördergeschwindigkeit mit der Bewegungsgeschwindigkeit der Versuchsprobe denkbar, um eine höhere Menge an Zusatzmaterial in den Grundwerkstoff einzubringen. Im Detail ist eine Analyse für Drahtfördergeschwindigkeiten unterhalb von 0,2 m/min und Vorschubgeschwindigkeiten von 6 mm/s zu empfehlen.

Die Ergebnisse der ermittelten Verschleißvolumina und WDX-Analysen zeigen, dass durch Aufbringen einer Verschleißschutzschicht deutlich höhere Konzentrationen der Zusatzmaterialien entstehen als beim Legieren. In der Regel liegen für die CrN, AlCrN sowie AlCrTiN-Schichten der Chromgehalt zwischen 18 Gew.-% und 37 Gew.-%, während für die legierten Varianten ein Chromanteil von 5 Gew.-% bis 8 Gew.-% nachgewiesen wird. Folglich ist davon auszugehen, dass für den Einsatz im Presshärteprozess ein hoher Legierungsgehalt der Oberflächenmodifizierung erforderlich ist. Durch ein gezieltes Dotieren mit Titan erfolgt eine schrittweise Veränderung des Schichtaufbaus, wodurch eine für das Presshärten angepasste Verschleißschutzschicht realisiert wurde. Das geringste Verschleißvolumen in Form von Adhäsion tritt für die Schicht mit einem Titangehalt von 30 % auf. Titan verfügt als Übergangsmetall über eine geringe Dichte an Elektronen, wodurch die chemische Affinität verringert wird [33]. Auch dieser Gehalt ist deutlich höher als beim Legieren. Eine geringere oder höhere Konzentration hingegen bewirkt beim Beschichten eine höhere Neigung zu metallischer Adhäsion, wodurch folglich die Verschleißneigung zunimmt. Dieser Zusammenhang ist auf die Zunahme der Bindungskräfte der vorhandenen Elektronenstruktur der vorliegenden Oberflächenmodifizierung zurück zu führen. Wird ein kritischer Anteil an Titankarbiden für Nickelbasisstähle überschritten, wird keine signifikante Steigerung der Verschleißbeständigkeit erzielt [151]. Diese Wirkzusammenhänge zeigen, dass die chemische Affinität zwischen den Kontaktflächen durch eine definierte Legierungszusammensetzung verändert wird und ein Optimum besitzt. Basierend auf diesen Erkenntnissen führt ein weiteres Dotieren der Verschleißschutzschicht mit Titan zu Metallbindungen, deren molekulare Wechselwirkung an den Grenzflächenbereichen wieder verstärkt in Erscheinung tritt und somit vermehrt lokale Aufschweißungen auf der Werkzeugoberfläche vorhanden sind. Dieses Verhalten ist für die Grundmaterialien WP7V und X38CrMoV5-3 nachweisbar, sodass eine Übertragbarkeit auf weitere Werkzeugmaterialien vorhanden ist. Zusätzlich verfügen die verwendeten Schichtsysteme über einen Stickstoffanteil von circa

30 Gew. - %. Da Stickstoff ein Nichtmetall ist, verfügt dieses Element über eine veränderte Elektronenstruktur im Vergleich zu Metallen oder Übergangsmetallen. Es ist davon auszugehen, dass dadurch die Bindungskräfte und somit die Adhäsionsneigung zusätzlich verringert werden. Diese Erkenntnis bestätigt die für das Legieren getroffenen Annahmen mit kohlenstoffhaltigen Drahtwerkstoffen.

Neben der chemischen Elementzusammensetzung der eingesetzten Oberflächenmodifikationen ist als weiterer wesentlicher Einflussfaktor auf den resultierenden Werkzeugverschleiß die auftretende Flächenpressung nachweisbar. Im Vergleich zu 5 MPa und 10 MPa ist unter einer mechanischen Beanspruchung von 20 MPa ein signifikant höherer Adhäsionsverschleiß für die unmodifizierte Probe vorhanden, während insbesondere die beschichteten Oberflächen lediglich geringfügig höhere Verschleißerscheinungen als bei 10 MPa aufweisen. Aufgrund der zunehmenden wahren Kontaktfläche nimmt bei höheren Flächenpressungen die Bildung neuer Metallbindungen zu. Folglich verschweißen vermehrt lokale Kontaktbereiche der Reibpartner miteinander. Während der Relativbewegung werden diese Bereiche voneinander geschert und es kommt zu einem stärkeren Materialübertrag von AlSi-Partikeln auf der Werkzeugoberfläche als bei geringerer mechanischer Oberflächenbeanspruchung. Durch einen geeigneten Verschleißschutz wird anhand der Ergebnisse auch für unterschiedliche Prozessbedingungen ein konstantes Einsatzverhalten gewährleistet, indem kein signifikanter Anstieg des Adhäsionsverschleißes nachgewiesen werden konnte. Zudem konnte weder eine signifikante Veränderung des Reibverhaltens noch der thermischen Bedingungen durch das Modifizieren der Kontaktflächen nachgewiesen werden, welche insbesondere bei den aufgetragenen dünnen Verschleißschutzschichten zu berücksichtigen ist. Vor diesem Hintergrund treten diese Einflüsse nicht wesentlich in Erscheinung. Folglich sind die erforderlichen tribologischen Voraussetzungen sowie eine hohe Abschreckgeschwindigkeit für den Einsatz im Presshärteprozess erreicht. Zusätzlich werden die hohen Bauteilfestigkeiten sichergestellt, welches anhand der Fließkurven der abgeschreckten Bauteile in Kontakt mit den beschichteten Abkühlplatten analysiert wurde. Zu diesem Zweck wurden die weiterentwickelten Schichtsysteme auf AlCrTiN-Basis eingesetzt

## 7 Übertragbarkeit auf einfache Bauteilgeometrien

In dieser Studie werden die Zusammenhänge bezüglich der Verschleißcharakterisierung in Napfzugversuchen validiert. Das primäre Ziel dieser Analyse besteht darin, zu überprüfen, ob eine Übertragbarkeit der Oberflächenmodifizierung auf eine Werkzeuggeometrie sichergestellt werden kann. Eine Analyse des Einflusses von beschichteten Oberflächen auf die Werkzeugstandmenge erfolgt durch einen Vergleich der Ergebnisse mit unmodifizierten Werkzeugen. Im Gegensatz zur Verschleißprüfung mit dem modifizierten Tribotester verursachen Tiefziehvorgänge eine lokal höhere mechanische Beanspruchung entlang der Werkzeugoberfläche, wodurch das Verschleißverhalten beeinflusst wird. Aus diesem Grund sind die Verschleißerscheinungen an den jeweiligen Kontaktbereichen unterschiedlich stark ausgeprägt. Es gilt daher, insbesondere die hochbeanspruchten Werkzeugbereiche durch Aufbringen einer Verschleißschicht zu modifizieren. Um die Anwendbarkeit einer geeigneten Oberflächenmodifizierung für das Presshärten zu bewerten, erfolgt zunächst eine numerische Analyse des Beanspruchungskollektivs im Tiefziehprozess. Es werden hierbei die Verteilung der Flächenpressung entlang der Matrizenkrümmung und dadurch die höchstbeanspruchten Bereiche ermittelt. Zusätzlich werden Napfzugversuche durchgeführt, um einen Einfluss der Verschleißschicht auf die Werkzeugstandmenge abzuschätzen. Die Ergebnisse aus der Simulation werden mit den Topografiebildern korreliert und die verschleißkritischen Werkzeugbereiche identifiziert.

### 7.1 Numerische Analyse des Beanspruchungskollektivs

Um die Verteilung der Flächenpressung entlang des Werkzeugradius zu bestimmen, wurde ein numerisches Modell in LS-Dyna V7.9.1 erstellt. Anhand dieses Beanspruchungskollektivs werden die höchstbeanspruchten Bereiche identifiziert. Die Simulation wurde für eine Rundnapfgeometrie aufgebaut. Eine Validierung erfolgte hierbei anhand von experimentell gemessenen Kraft-Weg-Verläufen und der Temperaturverteilung des umgeformten Bauteils. Zu diesem Zweck wird eine Thermokamera vom Typ SC7600 der Firma Flir Altair verwendet. Um die Bauteiltemperatur mit hoher Messgenauigkeit zu erfassen, ist hierbei der korrekte Emissionskoeffizient einzustellen. Dieser Wert ist von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängig. In diesem Zusammenhang sind die Oberflächenbeschaffenheit,

der Messwinkel sowie die Temperatur entscheidend [166]. Vor diesem Hintergrund ist vor der Validierung des Simulationsmodells sicherzustellen, dass der Emissionsgrad für den vorliegenden Versuchsaufbau richtig ausgewählt ist. Es ist daher erforderlich, diesen Koeffizienten zunächst zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden auf die Platinenoberflächen Thermolemente aufgeschweißt, um durch den direkten Kontakt mit der heißen Oberfläche die Messgenauigkeit zu erhöhen. Jedoch ist eine Erfassung der Temperaturverteilung während der Formgebung nicht möglich, da das Element zerstört wird. Nach Aufbringen der Elemente erfolgte die Austenitierung des Werkstücks bei 930 °C für 360 s. Nach der Wärmebehandlung wurde das Halbzeug lediglich in die Presse eingelegt, ohne den Umformvorgang einzuleiten. Die Abkühlung der Blechoberfläche wurde zeitgleich mit einer Thermokamera bestimmt. Dieser Vorgang wurde für einen umgeformten Napf wiederholt. Als Messzeit wurde 60 s gewählt, um eine ausreichende Kühlung des Blechwerkstoffes zu erreichen. Die Ergebnisse sind in Bild 35 gegenübergestellt.

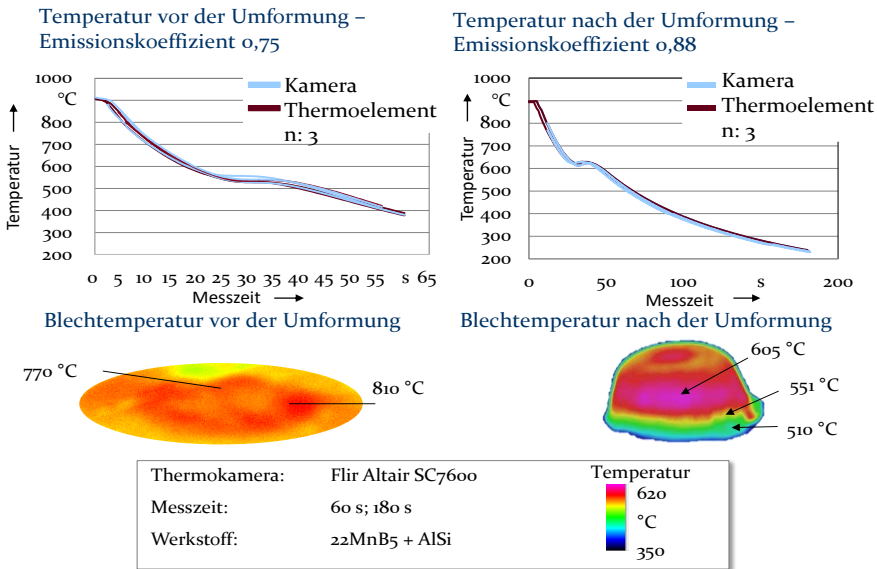


Bild 35: Ermittelte Emissionskoeffizienten des Bleches und des umgeformten Napfs

Die Emissionskoeffizienten wurden ermittelt, indem die Messverläufe der Thermolemente sowie der Thermokamera übereinandergelegt wurden. Für jede Messmethode erfolgten zur statistischen Absicherung jeweils drei Wiederholungen. Ein Vergleich zeigt hierbei, dass identische Kurven bei einem Wert von 0,75 vor der Umformung vorhanden sind. Nach der Umformung jedoch ist bereits eine Abweichung zu erkennen. Es wurde in

diesem Fall ein Emissionskoeffizient von 0,88 bestimmt. Anhand dieser Ergebnisse wird deutlich, dass bereits geringe Abweichungen in der Messposition zwischen Messkörper und Thermokamera zu Schwankungen des Messergebnisses führt. Die Wärmestrahlung des ebenen Bleches tritt unter einem anderen Winkel auf die Sensorik des Kamerasystems auf als die Strahlung des bereits umgeformten Bauteils. Zusätzlich sind hierbei die unterschiedlichen Blechtemperaturen von Bedeutung. Während vor der Umformung noch 800 °C vorherrschen, sinkt die Bauteiltemperatur nach dem Tiefziehen auf circa 200 °C. Basierend auf der hohen Übereinstimmung der Ergebnisse wurden die Emissionskoeffizienten von 0,75 und 0,88 verwendet, um das numerische Modell zu validieren.

Als Simulationssoftware kam LS DYNA V7.9.1 zum Einsatz. Für die Implementierung der Materialkenngrößen wurde auf den Datensatz von [154] zurückgegriffen. Basierend auf den Ergebnissen von [37] wurde als Reibzahl 0,4 gewählt, da dieser Wert dem industriellen Standard von Presshärtevorgängen entspricht. Die Wärmekapazität wurde basierend auf [167] und der Wärmeübergang nach [22] implementiert. Zur Validierung des FE-Modells sind in Bild 36 die experimentellen Ergebnisse der Kraft-Weg-Verläufe sowie der Temperaturverteilung am umgeformten Napf den numerischen Resultaten gegenübergestellt.

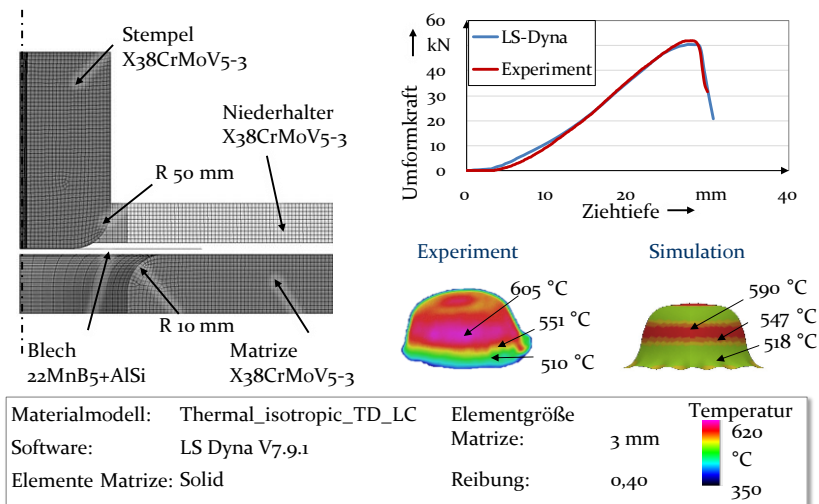


Bild 36: FE-Modell einer Rundnapfgeometrie mit den Ergebnissen aus der Validierung

Als Umformgeschwindigkeit wurde 50 mm/s eingestellt sowie eine Ziehtiefe von 30 mm. Diese Parameter entsprechen den eingestellten Prozessgrößen aus den experimentellen Analysen. Anlagenbedingt wird eine maximale Geschwindigkeit des Stößels von 50 mm/s erreicht. Ein Vergleich

der ermittelten Kraft-Weg-Verläufe zeigt eine hohe Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment. Im Hinblick auf die Validierung weist die Temperaturverteilung des Bauteils ebenfalls nur geringe Abweichungen auf. In diesem Zusammenhang ist die lokal höchste Differenz zwischen 605 °C und 590 °C mit 15 °C zu verzeichnen. Während die numerische Analyse eine ideale Verteilung der Temperaturen voraussetzt, sind in der Realität materialbedingt Temperaturschwankungen zu erwarten. Vor dem Hintergrund der komplexen thermischen Wechselwirkung, welche im Presshärteprozess vorliegt, bildet das aufgebaute Simulationsmodell den Warmumformprozess präzise ab und somit ist eine Identifizierung höchstbeanspruchter Werkzeugbereiche mit hoher Genauigkeit gewährleistet.

Um numerisch den Einfluss unterschiedlicher Werkzeuggeometrien auf die mechanische Oberflächenbeanspruchung zu identifizieren, wurde in einer weiteren Simulation der Rundnapf durch eine Mini-B Säule ersetzt. Die Validierung erfolgte anhand der Ausdünnung der Blechdicke, indem die Ergebnisse aus dem FE-Modell mit experimentellen Untersuchungen verglichen wurde. Aufgrund von der stärker ausgeprägten Werkzeugrun- dung und Radienverläufen ist, bedingt durch die veränderten tribologischen Verhältnisse, eine höhere lokale Beanspruchung zu erwarten. Das FE-Modell ist in Bild 37 abgebildet.

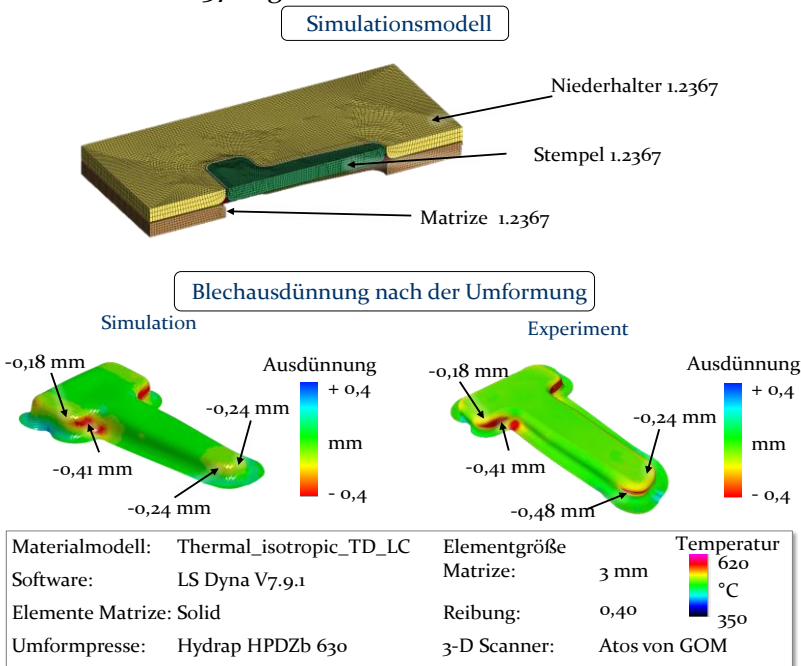


Bild 37: Erweitertes Simulationsmodell einer Mini-B Säule

Die Blechverdünnung zur Validierung des FE-Modells wurde nach dem Umformvorgang bestimmt. Die experimentelle Untersuchung wurde hierbei mit einer Presse vom Typ Hydrap HPDZb 630 durchgeführt. Anschließend wurden die umgeformten Bauteile mithilfe eines optischen 3D-Scanners Atos von GOM vermessen. Durch diese Messmethode ist eine Analyse von Maß- und Formabweichungen möglich. Ein Vergleich der resultierenden Blechdicken aus Simulation und Experiment deuten auf eine hohe Genauigkeit des FE-Modells der Mini-B-Säule hin. Die größte Abweichung tritt am Stegbereich zwischen  $-0,48$  mm und  $-0,24$  mm auf. Aufgrund der starken Rundung in diesem Bereich wird die hohe Beanspruchung simulativ unterschätzt. Basierend auf den Ergebnissen der Validierung bildet das FE-Modell den Umformprozess hinreichend genau ab, um das Beanspruchungskollektiv zu identifizieren.

Um eine Übertragung der in den Tribotesterversuchen analysierten Oberflächenmodifikationen auf einfachen Bauteilgeometrien zu ermöglichen, werden die höchstbeanspruchten Werkzeugbereiche ermittelt. Die Ergebnisse aus beiden Simulationen werden miteinander verglichen. Zu diesem Zwecke wurde bei unterschiedlichen Ziehtiefen die Verteilung der Flächenpressung jeweils am Rundnapf- sowie am B-Säulenwerkzeug bestimmt. Durch diese Vorgehensweise wird sichergestellt, dass bereits eine Abschätzung der lokalen Werkzeugbeanspruchung wie in Bild 38 mit Modellgeometrien im Labormaßstab ohne Einschränkung umsetzbar ist.

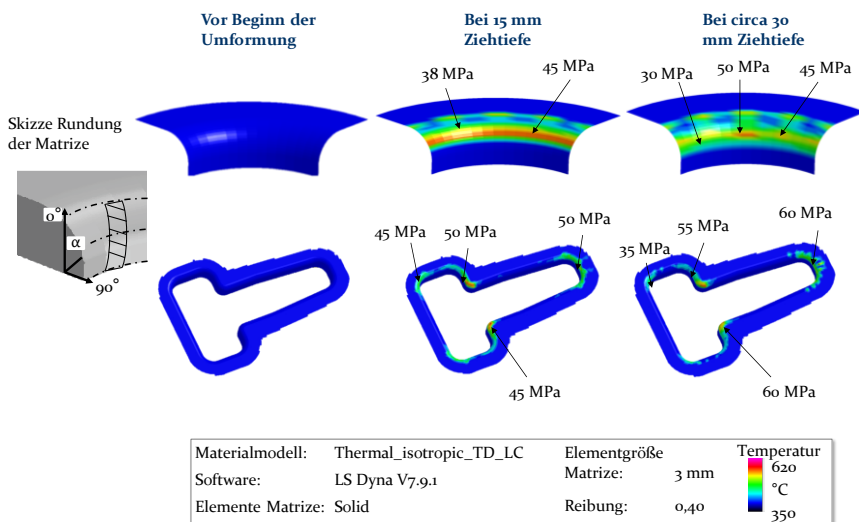


Bild 38: Ermittlung hochbeanspruchter Werkzeugbereiche und lokaler Maximalwerte

Basierend auf den Ergebnissen ist zu erkennen, dass in beiden Fällen die höchste Werkzeugbeanspruchung bei circa  $45^\circ$  des Rundungsradius eintritt. Während am Rundnapf in diesem Bereich eine maximale Beanspruchung von 45 MPa bei einer Ziehtiefe von 15 mm auftritt, steigt die Flächenpressung bis auf 50 MPa bei einer Ziehtiefe von 30 mm an. Bedingt durch die komplexere Geometrie der B-Säule weist die Matrize hierbei insbesondere an den ausgeprägten Radienübergängen die höchste Flächenpressungen auf. Im Vergleich zum Napf liegen die Werte bei circa 50 MPa. Die höchste Beanspruchung ist im Stegbereich mit lokal bis zu 60 MPa vorhanden, weshalb in den experimentellen Untersuchungen eine Blechausdünnung von  $-0,48$  mm erklärbar ist. Aus der Literatur ist bekannt, dass Analysen hinsichtlich des Presshärteprozesses in der Regel bei Flächenpressungen bis circa 40 MPa durchgeführt werden. Dieser Beanspruchungsbereich bildet industriennahe Bedingungen ab [154]. Aus den Ergebnissen der FE-Simulation werden teilweise höhere Flächenpressungen bis 55 MPa und 60 MPa ermittelt, welche jedoch auf geringe lokale Bereiche beschränkt sind und die maximal auftretenden Spannungswerte darstellen. Durch die Simulation werden die Regionen, welche einer extremen Beanspruchung ausgesetzt sind, berücksichtigt und dargestellt. In diesem Zusammenhang treten diese Maximalwerte primär an starken Radienkrümmungen des Werkzeugs der Mini-B-Säule auf, was eine mögliche Ursache für die vorhandenen mechanischen Beanspruchungen bis 60 MPa ist. An der Matrize des Rundnapfes wurden hingegen maximal 45 MPa nachgewiesen. Eine Erklärung hierfür ist, dass es aufgrund der komplexeren Werkzeuggeometrie der Mini-B-Säule zu höherer Oberflächenbeanspruchung kommt. Aus diesem Grund kommt es zu Abweichungen in der resultierenden Flächenpressung. Unter Berücksichtigung dieser Bedingungen ist jedoch ein Rundnapfwerkzeug für eine Abschätzung und Bewertung des Einsatzverhaltens von Presshärtewerkzeugen geeignet.

## 7.2 Untersuchung in Tiefziehprozessen

Während der Verschleißcharakterisierung mit dem Tribotester stehen ebene Auflageflächen in direktem Kontakt. Es bleibt eine Biegebeanspruchung des Bleches infolge der Krümmungsradien der Matrize unberücksichtigt, wodurch lokal höhere Flächenpressungen möglich sind. Dieser Zusammenhang wurde bereits durch die numerische Simulation mit 55 MPa bis 60 MPa nachgewiesen. In Untersuchungen der Blechmassivumformung tritt für AlSi-beschichtete Blechwerkstoffe ebenfalls eine erhöhte

Beanspruchung auf [168]. Es konnte an oberflächenmodifizierten Werkzeugen mit einer AlCrN-Beschichtung nachgewiesen werden, dass infolge des Adhäsionsverschleißes die Oberflächenrauheit zunimmt. Der höchste Verschleiß tritt dabei in Bereichen mit höchster Flächenpressung auf [168]. Vor diesem Hintergrund tritt beim Tiefziehprozess eine komplexere thermo-mechanische Wechselbeanspruchung auf, weshalb eine Analyse des Einsatzverhaltens von oberflächenmodifizierten Matrizen erforderlich ist. Erst dadurch wird eine Bewertung hinsichtlich der Übertragbarkeit von Verschleißschutzschichten auf den Presshärteprozess durchführbar. Es ist zu erwarten, dass der Verschleiß an höchstbeanspruchten Bereichen stärker ausgeprägt ist. Um die Übertragbarkeit in Napfzugversuchen nach 100 Abpressungen zu prüfen, werden die Modifikationen mit der höchsten Verschleißbeständigkeit aus den Untersuchungen mit dem Tribotester und der Warmstreifenziehmaschine gewählt. Die Ergebnisse sind in Bild 39 für das Schichtsystem AlCrTiN mit einem Titangehalt von 30 % dargestellt. Als Referenz werden die konventionelle Beschichtung AlCrTiN sowie unmodifizierte Matrizen aus X38CrMoV5-3 und WP7V verwendet.

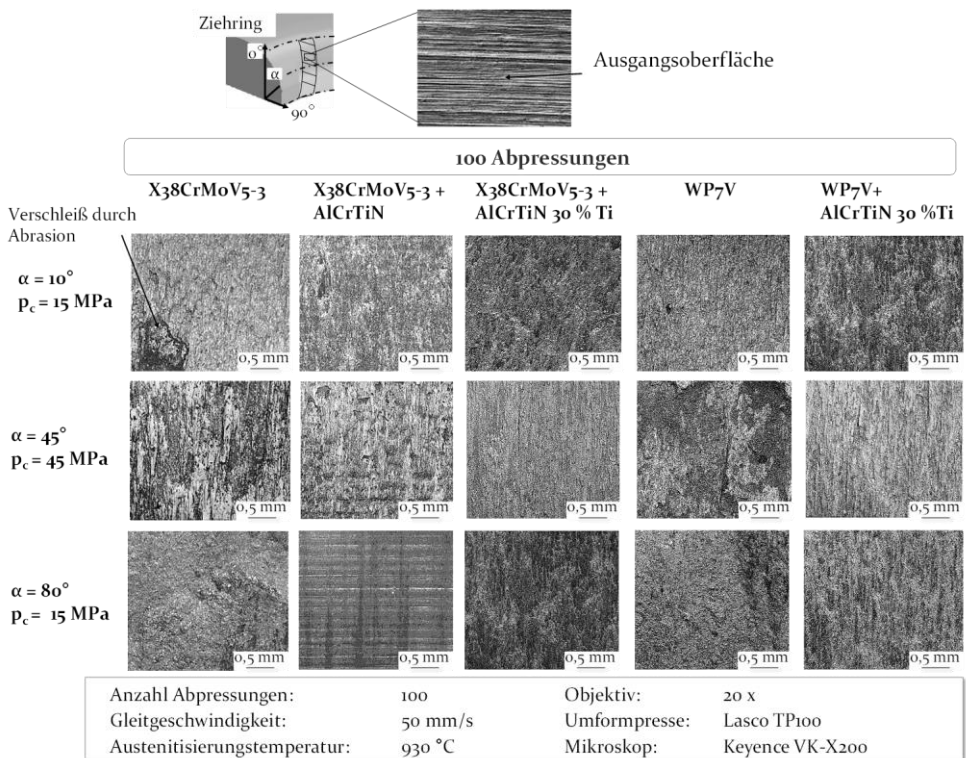


Bild 39: Gegenüberstellung Mikroskopaufnahmen nach 100 Abpressungen

Eine geeignete Beschichtung zur Erhöhung der Verschleißbeständigkeit ist primär für hochbeanspruchte Regionen relevant. Das lokale Oberflächenmodifizieren stellt aus wirtschaftlicher Sicht eine kostengünstige Methode dar. Zusätzlich ist ein Einsatz für segmentierte Umformwerkzeuge möglich, wodurch ein Austausch verschlissener Werkzeugteile ermöglicht wird. Während an der Ausgangsoberfläche fertigungsbedingt Schleifriefen zu erkennen sind, weisen alle Matrizen nach dem Einsatz Materialanhaftungen entlang des Krümmungsradius auf. In diesem Zusammenhang ist zu erkennen, dass die Oberflächenbeschichtung AlCrTiN mit 30 % Titan für beide Substratwerkstoffe Wp7V und X38CrMoV5-3 zu ähnlichen Oberflächen führt. Anhand der Mikroskopaufnahmen sind für diese modifizierten Matrizenoberflächen die geringsten Materialanhaftungen für die verschiedenen Kontaktbereiche bei 10°, 45° und 80° entlang des Krümmungsradius erkennbar. Zusätzlich sind keine signifikanten Unterschiede im Verschleißverhalten nachweisbar. Basierend auf diesen Ergebnissen wird unabhängig vom verwendeten Grundmaterial eine vergleichbare Reduzierung des Adhäsionsverschleißes durch Oberflächenmodifizieren erreicht. Da das Beschichtungssystem während des Umformprozesses in direktem Kontakt mit der AlSi-Schicht des Blechmaterials steht, ist durch das Substrat eine hohe Stützwirkung der Oberflächenbeschichtung zu gewährleisten. Im Vergleich zu WP7V tendiert X38CrMoV5-3 zu höherem adhäsiven Verschleiß. Durch den Einsatz der AlCrTiN-Schicht wird sichergestellt, dass der kostengünstigere Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-3 bei gleichzeitiger Zunahme der Verschleißfestigkeit verwendet werden kann. Die Verschleißbilder werden weiterhin mit den lokalen mechanischen Beanspruchungen verglichen. In diesem Zusammenhang deuten die Ergebnisse darauf hin, dass der höchste Verschleiß bei circa 45° der Werkzeugrundung auftritt. Diese Ergebnisse stimmen mit den numerischen Analysen überein, da bei 45° die höchste mechanische Beanspruchung auftritt. Bedingt durch die hohe Flächenpressung nimmt die wahre Kontaktfläche zwischen Blech und Matrize während des Tiefziehens zu, wodurch die Adhäsionsneigung durch Bildung neuer Metallbindungen zunimmt. Insbesondere die unmodifizierten Grundwerkstoffe X38CrMoV5-3 und WP7V neigen zu hohen Materialanhaftungen infolge metallischer Adhäsion. Dieses Verschleißverhalten ist für alle Kontaktbereiche entlang der Ziehringrundung stärker ausgeprägt als bei den oberflächenmodifizierten Varianten. Neben diesem Verschleißmechanismus wird Material aus der Kontaktfläche herausgebrochen, welches für X38CrMoV5-3 bei 10° Matrizenradius deutlich wird. Durch das Mikroskopbild wird deutlich, dass Bereiche mit abrasiven Beschädigungen in Form von herausgebrochenem Material vorhanden sind. Bereits anhaftende AlSi-Partikel werden hierbei während der Gleitbewegung zwischen

Blech und Werkzeug abgeschert. Im Presshärteprozess werden Abrasion und Adhäsion überlagert. Die Ursache hierfür ist durch die wirkenden Bindungskräfte im Grenzflächenbereich der beiden Kontaktpartner begründet. Während des Umformvorgangs findet auf atomarer Ebene eine Wechselwirkung zwischen den angrenzenden Molekülen statt. Es werden neue Metallbindungen gebildet, wodurch die Kontaktflächen lokal miteinander verschweißen. Infolge der Relativbewegung werden diese Bindungen aufgerissen. Aufgrund der hohen Blechtemperaturen wird die AlSi-Schicht des Werkstücks abgetragen, welche anschließend auf die Werkzeugoberfläche übertragen wird. Der Adhäsionsverschleiß nimmt mit der Anzahl der Abpressungen zu. Sobald eine kritische Menge an Materialanhaftungen überschritten wird, führt die Scherbewegung zwischen Blech und Matrize zu einem Materialabtrag dieser Anlagerungen. Im Vergleich hierzu wird durch das Aufbringen einer geeigneten Verschleißschicht die Neigung zu adhäsivem Verschleiß signifikant verringert. Zudem wird an den modifizierten Matrizen keine Oberflächenbeschädigung in Form von Abrasion nachgewiesen. Ein Vergleich mit der konventionellen Beschichtung auf Al-CrTiN-Basis zeigt, dass bereits durch Aufbringen dieses Schichtsystems eine Erhöhung gegenüber metallischer Adhäsion erzielt wird. Jedoch treten tendenziell höhere Materialanhaftungen an der Matrizenoberfläche im Vergleich zur Beschichtung mit einem Titangehalt von 30 % auf. Nach 200 Abpressungen wurden in Bild 40 die Matrizen erneut analysiert.

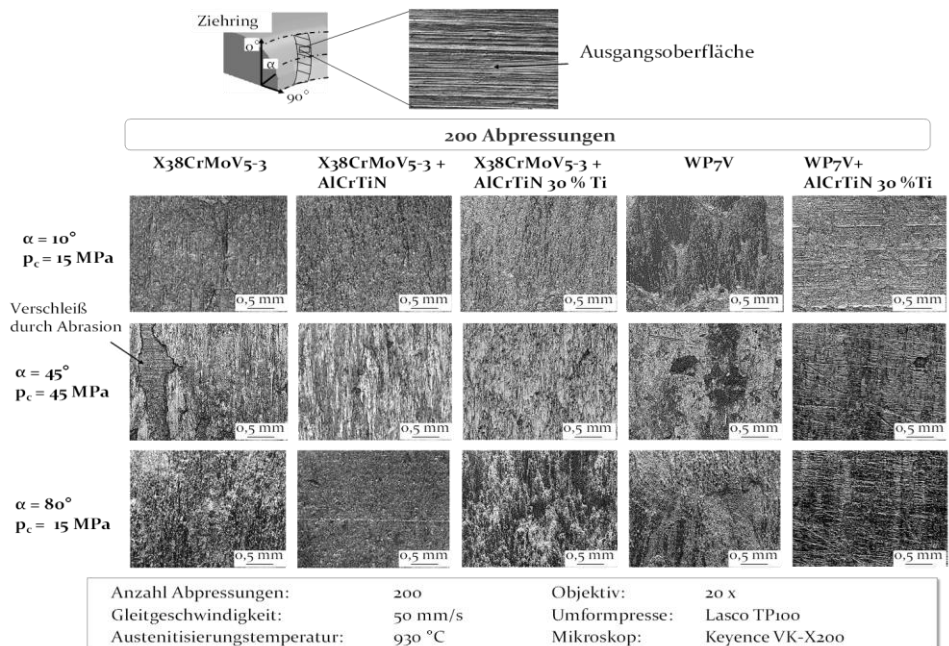


Bild 40: Gegenüberstellung Mikroskopaufnahmen nach 200 Abpressungen

Nach Wieland treten bereits nach 20 Abpressungen hohe Materialanhaftungen an der Matrizenrundung auf [99]. Um darauf aufbauend eine Abschätzung des Einflusses der Oberflächenmodifizierung auf die Werkzeugstandmenge durchzuführen, wird daher eine größere Anzahl an Umformzyklen vorgenommen. Industrierelevante Umformzyklen liegen deutlich höher, jedoch ist eine erste Aussage und Bewertung hinsichtlich des Einflusses auf die Verschleißentwicklung möglich. Eine vergleichbare Versuchsdurchführung erfolgte ebenfalls an beschichteten Matrizen durch Kondriatuk für 150 Abpressungen [37].

Auch in diesem Fall ist der höchste Adhäsionsverschleiß an den unmodifizierten Werkzeugen zu erkennen. Zusätzlich tritt Abrasion primär ebenfalls am X38CrMoV5-3 und WP7V auf. In diesem Zusammenhang sind bei 45 ° Krümmungsradius Bereiche von herausgebrochenem Material identifizierbar. Eine gleichmäßigere Verteilung der AlSi-Anhaftungen wird an den modifizierten Matrizen deutlich. Zudem tendieren die beschichteten Varianten zu geringerem Oberflächenverschleiß. Die Verschleißschicht verringert die chemische Affinität. Als Folge haftet lediglich eine dünne AlSi-Schicht an der Kontaktfläche des Werkzeuges an. Eine Erhöhung der Werkzeugstandmenge und somit der Wirtschaftlichkeit von Presshärtewerkzeugen ist realisierbar.

Um diese Erkenntnisse quantitativ zu charakterisieren, wurden die Rauheitsdaten in Bild 41 für die Versuche erfasst. Die Ergebnisse sind für die Versuche nach 100 Abpressungen mit den auftretenden Flächenpressungen gegenübergestellt, welche aus der FE-Simulation ermittelt wurden. Die ermittelten Rauheitskenngrößen sind jeweils am Krümmungsradius bei 10 °, 45 ° und 80 ° aufgeführt. Während bei 10 ° der Einlaufbereich analysiert wird, erfolgt eine Charakterisierung des Oberflächenverschleißes im Auslaufbereich bei 80 °. Eine Erfassung der Werkzeugfläche bei 90 ° ist aufgrund einer Werkzeugkante messtechnisch nicht möglich. Bedingt durch die insgesamt geringe Anzahl an Umformvorgängen ist eine detaillierte Bewertung des Verschleißverhaltens aus industrieller Sicht nur bedingt möglich. Jedoch sind Tendenzen ableitbar. Die bislang getroffenen Annahmen werden auch hier bestätigt. Während die Substratwerkstoffe tendenziell zum höchsten Werkzeugverschleiß neigen, wird durch das Beschichten die Verschleißbeständigkeit deutlich erhöht. Dieser Zusammenhang wird insbesondere für das Schichtsystem mit 30 % Titananteil erreicht. Durch die Korrelation der Oberflächenrauheiten mit der Verteilung der Flächenpressung werden die hochbeanspruchten sowie verschleißkritischen Werkzeugbereiche bestätigt. Zudem ist eine Bewertung des Verschleißverhaltens in Tiefziehoperationen möglich. Als Kenngrößen wurden hierbei der

arithmetische Mittenrauwert  $S_a$ , die Kerntiefe  $S_k$ , die reduzierte Spitzenhöhe  $S_{pk}$  und die verringerte Riefentiefe  $S_{vk}$  gewählt. Die Matrizen wurden an drei verschiedenen Zonen vermessen und der Durchschnittswert jedes Rauheitsparameters berechnet. Die Aussagen, welche hinsichtlich der Topografieaufnahmen getroffen wurden, können bestätigt werden.

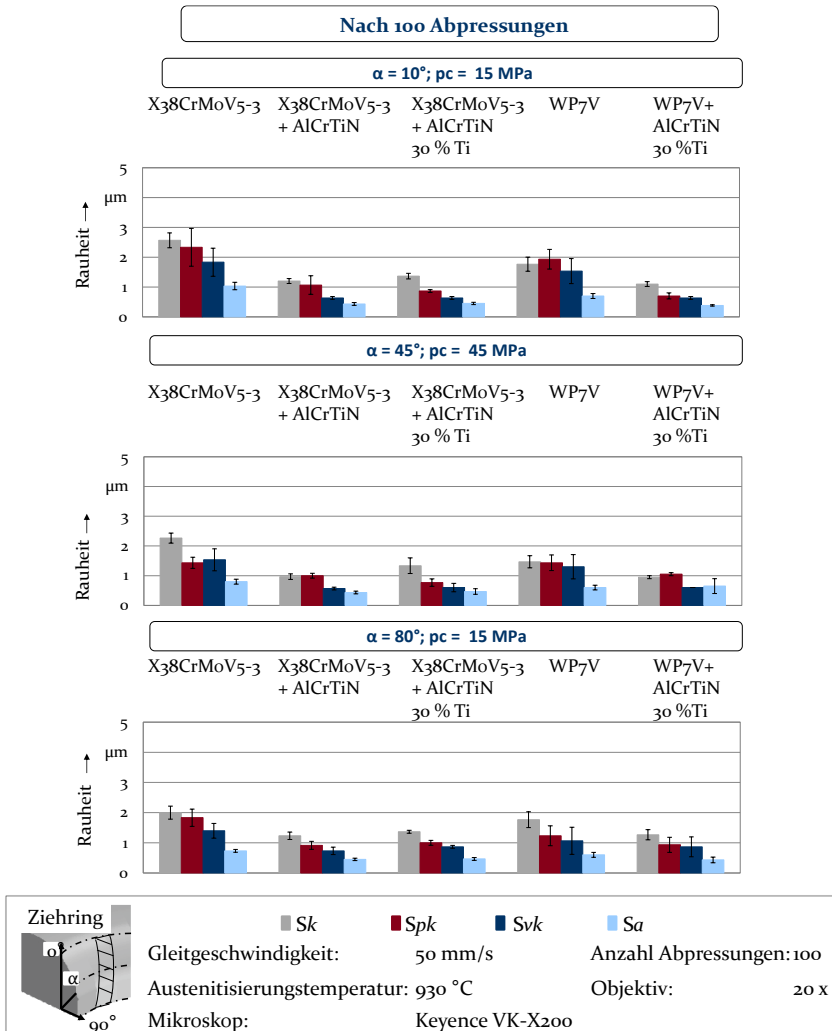


Bild 41: Oberflächenrauheit nach 100 Abpressungen

Der resultierende Oberflächenverschleiß ist abhängig von der wirkenden Flächenpressung. In diesem Zusammenhang tritt eine signifikante Topografieänderung bei  $45^\circ$  am Matrizenradius auf, welcher die höchste mechanische Beanspruchung mit 45 MPa erfährt. Bei zunehmenden Umformvorgängen wird durch die Materialanhaftungen von AlSi-Partikeln in diesem

Bereich die wahre Kontaktfläche weiterhin vergrößert, wodurch vermehrt neue Metallbindungen gebildet werden. Als sekundärer Verschleißmechanismus tritt Abrasion auf. Durch eine Überlagerung von adhäsiven und abrasiven Vorgängen wird die resultierende Oberflächenrauheit der verschlissenen Matrizen beeinflusst.

Dieser Zusammenhang soll durch einen Vergleich der Rauheitskenngrößen nach 100 und 200 Abpressungen verdeutlicht werden. Die Ergebnisse nach 200 Abpressungen sind in Bild 42 dargestellt.

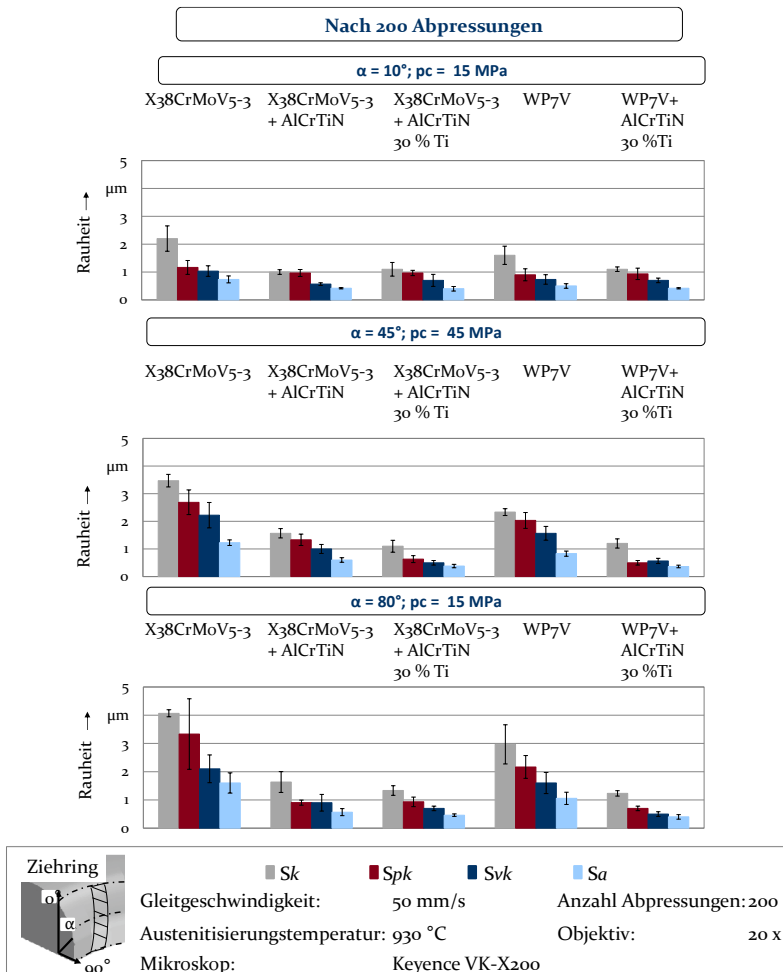


Bild 42: Rauheitskenngrößen nach 200 Abpressungen

Die Werte liegen für den unmodifizierte Substratwerkstoff X38CrMoV5-3 bei 45 ° für Sk nach 100 Umformvorgängen bei 4 µm und nach 200 Abpressungen bei 3,5 µm. Eine Abnahme von 3,3 µm auf 2,6 µm ist für Spk

nachweisbar, wobei eine hohe Standardabweichung infolge der Überlagerung von Adhäsion und Abrasion vorhanden ist. Im Vergleich dazu wird ein höherer *Svk*-Wert gemessen. Vergleichbare Tendenzen sind für WP7V zu erkennen, wobei die Rauheitswerte tendenziell um circa 40 % niedriger sind als für den X38CrMoV5-3. Dadurch wird die komplexe Wechselwirkung der Verschleißvorgänge deutlich. Neues Material der AlSi-Schicht wird angelagert, aber auch infolge der Relativbewegung ebenfalls herausgebrochen. Folglich nimmt die Oberflächenrauheit nicht stetig zu, sondern variiert um einen gewissen Bereich, nachdem die Oberfläche vollständig verschlissen ist.

Es ist weiterhin zu erkennen, dass durch das Oberflächenbeschichten die Verschleißbeständigkeit erhöht wird. Während alle ermittelten Rauheitskenngrößen der unmodifizierten Werkzeuge aus X38CrMoV5-3 und WP7V zunehmen, bleiben diese für alle modifizierten Varianten auf einem gleichen Niveau. In diesem Zusammenhang wird für das Substrat X38CrMoV5-3 mit AlCrTiN und einem Titananteil von 30 % ein *Sk*-Wert nach 100 Abpressungen mit circa 1,3  $\mu\text{m}$  und nach 200 Hüben mit 1,1  $\mu\text{m}$  ermittelt, während *Spk* von 0,9  $\mu\text{m}$  auf 0,6  $\mu\text{m}$  sinkt. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung liegt *Svk* bei circa 0,5  $\mu\text{m}$  bis 0,7  $\mu\text{m}$ . Im Vergleich zu diesen Rauheitskenngrößen weist *Sa* einen Wert von circa 0,4  $\mu\text{m}$  auf. Auch für den beschichteten WP7V wird eine vergleichbare Tendenz nachgewiesen und die Oberflächenrauheiten sind ebenfalls ähnlich. Das Verschleißverhalten der AlCrTiN-Schicht wird daher für andere Grundmaterialien bestätigt. Für die konventionelle Oberflächenbeschichtung aus AlCrTiN bleibt *Sk* bei 1,6  $\mu\text{m}$ , aber *Spk* nimmt von 0,9  $\mu\text{m}$  auf 1,3  $\mu\text{m}$  zu. Nach 200 Abpressungen steigt *Sa* auf 0,6  $\mu\text{m}$  und *Svk* auf 1  $\mu\text{m}$ . Insgesamt sind diese Rauheitskenngrößen höher als für die beschichteten Varianten aus AlCrTiN mit einem Titangehalt von 30 %. Diese Ergebnisse sind identisch zu den Analysen aus den Tribotesterversuchen.

Bei einem Krümmungsradius von  $10^\circ$  liegen die Rauheitswerte in der Regel bei allen Fällen bei circa 1  $\mu\text{m}$  und für die beschichteten Oberflächen tendenziell niedriger. Eine Ausnahme stellt *Sk* mit 2  $\mu\text{m}$  dar. Ein ähnliches Verhalten ist auch bei  $80^\circ$  Radiuskrümmung erkennbar. Tendenziell sind die Werte geringfügig höher als 1  $\mu\text{m}$  für die beschichteten Proben und die unmodifizierten Oberflächen verfügen über eine Oberflächenrauheit von circa 2  $\mu\text{m}$ . Auf Grundlage dieser Ergebnisse tritt ein vergleichbares Verschleißverhalten bei  $10^\circ$  und  $80^\circ$  Matrizenkrümmung auf. Die größten Unterschiede sind bei  $45^\circ$  vorhanden. Folglich ist durch das Aufbringen einer Verschleißschicht eine Steigerung der Verschleißbeständigkeit von höchstbeanspruchten Werkzeugbereichen sichergestellt.

Zudem ist eine hohe Streuung der Messwerte für die Basismaterialien vorhanden. In diesem Zusammenhang ist diese Schwankung für die reduzierte Spitzenhöhe  $Spk$  beim X38CrMoV5-3 sowie für die Kernrautiefe  $Sk$  bei WP7V nachweisbar. Eine mögliche Ursache ist dadurch begründet, dass adhäsive Materialanhaftungen nicht gleichmäßig entlang der Matrizenoberfläche verteilt sind. Es kommt zu einer Schwankung in den Messwerten. Zusätzlich findet während des Tiefziehprozesses eine Überlagerung von Adhäsion und Abrasion statt. Bereits anhaftendes Material wird wieder aus der Werkzeugoberfläche herausgerissen. Während der Relativbewegung zwischen Blech und Matrize werden aufgrund der hohen Bindungskräfte die Mikroverschweißungen aufgebrochen. Im Einlauf- und Auslaufbereich bei  $10^\circ$  und  $80^\circ$  nimmt der Verschleiß an allen Oberflächen ab. Der Materialtransfer der AlSi-Schicht auf die Matrizenoberflächen führt zu veränderten Kontaktbedingungen zwischen den Kontaktpartnern. Während des Umformprozesses nimmt hierbei primär die wahre Kontaktfläche bei  $45^\circ$  und somit die adhäsive Verschleißmenge zu. Als Folge wird die atomare Wechselwirkung der beiden Grenzflächen bei  $80^\circ$  reduziert. Zudem liegen nach der numerischen Simulation geringe Flächenpressungen bei 15 MPa vor, weshalb eine geringere Adhäsionsneigung vorhanden ist. Es entsteht daher in diesem Bereich eine geringere Anzahl Mikroverschweißungen. Ein Vergleich der Ergebnisse zwischen den einzelnen Messpositionen deutet darauf hin, dass durch das Oberflächenmodifizieren eine homogenere Rauheit über den gesamten Bereich der Matrizenkrümmung gewährleistet wird. Dadurch wird verhindert, dass lokal unterschiedliche Kontaktverhältnisse das Verschleißverhalten beeinflussen. Die Sicherstellung einer gleichbleibenden Bauteilqualität ist somit über eine größere Anzahl von Abpressungen möglich. Zusammenfassend gilt, dass die höchste Verschleißbeständigkeit durch die weiterentwickelte PVD-Beschichtung aus AlCrTiN mit einem Anteil von 30 % Titan für Presshärtewerkzeuge erreicht wurde.

## **8 Wissenschaftliche Bewertung der Ergebnisse**

Für die Anwendbarkeit geeigneter Verschleißschutzschichten für Warmumformprozesse werden in dieser Arbeit verschiedene Ansätze zur Oberflächenmodifizierung untersucht. Eine Ableitung von Empfehlungen sowie Maßnahmen durch neuartige Ansätze, welche eine Erhöhung der Verschleißbeständigkeit ermöglichen, erfordert eine Analysemethodik zur quantitativen Bewertung des unterschiedlichen Verschleißverhaltens. Um die Zuverlässigkeit des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Auswertalgorithmus sicherzustellen, wird die Anwendbarkeit dieses Verfahrens durch einen Vergleich mit konventionellen Messverfahren analysiert. Mithilfe dieses Analyseprogramms findet eine Beurteilung der unterschiedlichen Oberflächenmodifizierungen hinsichtlich der Verschleißbeständigkeit insbesondere gegenüber Adhäsion statt. Zusätzlich werden die Erkenntnisse anhand von Topografieaufnahmen qualifiziert. Durch Aufstellen einer Bewertungsmatrix wird ein Überblick über die Eignung von legierten und beschichteten Werkzeugoberflächen sowie der Einfluss variierender Elementkonzentrationen auf das Verschleißverhalten gegeben. Abschließend erfolgt ein Ausblick hinsichtlich weiterführender Entwicklungsmöglichkeiten der Oberflächenmodifizierungen.

### **8.1 Anwendung des Auswertverfahrens zur Verschleißcharakterisierung**

Eine Aussage zur Verschleißneigung unterschiedlicher Werkstoffe kann unter der Voraussetzung getroffen werden, dass der Verschleißmechanismus ermittelt wird, welcher primär die Ursache für die Oberflächenbeschädigung von Presshärtewerkzeugen ist. Konventionelle und etablierte Messmethoden stellen zu diesem Zweck die Erfassung von Rauheitskenngrößen vor und nach dem Einsatz sowie klassische REM-Aufnahmen dar. Durch diese Art der Oberflächencharakterisierung wird eine Tendenz hinsichtlich des Verschleißverhaltens abgeleitet. Anhand der Topografiebilder aus mikroskopischen Messungen sowie der REM-Bilder erfolgt eine Qualifizierung des Werkzeugverschleißes. Die Interpretation der typischen Verschleißmerkmale wird im Allgemeinen bei tribologischen Systemen für die Identifizierung der dominierenden Verschleißform verwendet, sodass diese Untersuchungen ebenfalls für das Presshärten eine geeignete Analysemethode darstellen. Erst durch die Kenntnisse, welche Erscheinungsformen für den

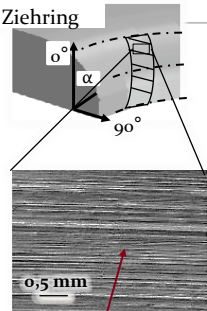
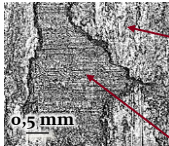

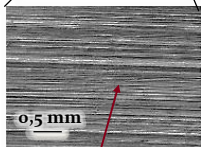
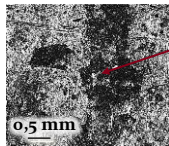
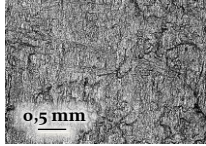


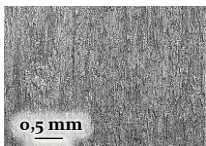
Werkzeugverschleiß verantwortlich sind, können gezielt Maßnahmen zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit abgeleitet werden. Im Hinblick auf das Presshärten wird anhand der in dieser Arbeit ermittelten Oberflächenaufnahmen Adhäsionsverschleiß, bedingt durch Materialanhaftung, als dominierende Verschleißform nachgewiesen und durch die Anwendung des in dieser Arbeit entwickelten Auswerteprogramms bestätigt.

Folglich werden zwar durch diese Qualifizierung die Erscheinungsformen des durch den Reibkontakt entstehenden Verschleißes bestimmt, jedoch ist keine Aussage möglich, welche Oberflächenmodifizierung zu höherem und geringerem Verschleiß tendiert. Vor diesem Hintergrund ist eine Quantifizierung des Verschleißbetrages notwendig, um eine Bewertung hinsichtlich des Einsatzverhaltens der verschiedenen Werkstoffpaarungen vorzunehmen und dadurch gezielt die Möglichkeiten zur Erhöhung der Verschleißbeständigkeit abzuleiten. Anhand einer zahlenmäßigen Beschreibung des Oberflächenverschleißes wurde die geeignete Elementzusammensetzung und die Konzentration der Legierungsbestandteile eindeutig identifiziert, um einen ausreichenden Verschleißschutz von Presshärtewerkzeugen zu erzielen. Zusammenfassend wurde herausgefunden, dass erst durch die Korrelation der Ergebnisse zwischen Oberflächentopografie und ermittelten Verschleißvolumina die Anforderungen an die Werkzeugoberflächen erfasst werden. Die Entwicklung eines Verschleißschutzes für den Einsatz im Presshärteprozess macht erst diese Korrelation möglich.

Für die Anwendung des neu entwickelten Auswertalgorithmus ist jedoch im Vorfeld die Kenntnis erforderlich, welche Verschleißerscheinungen dominierend in Erscheinung treten. Während ein abrasiver Abtrag zu einem Materialverlust auf der Werkzeugoberfläche und somit tiefe Furchen zur sowie zusätzliche Materialausbrüche zur Folge hat, findet bei metallischer Adhäsion eine Grenzflächen-Haftverbindung statt. Diese lokal miteinander verschweißten Kontaktbereiche werden während der Relativbewegung in Bewegungsrichtung gesichert und aufgebrochen. Es haftet Material des weichen Blechmaterials an der härteren Werkzeugoberfläche an. Die unterschiedlichen Ursachen hinsichtlich des Verschleißverhaltens erfordern verschiedene Möglichkeiten zur Verschleißminderung. Während eine Erhöhung der Oberflächenhärten das Eindringen des Gegenkörpers in den Kontaktbereich und somit Abrasionsverschleiß verhindert, ist bei Adhäsion die chemische Affinität zwischen den Grenzflächen zu verringern. Beim Presshärten tritt primär adhäsiver Verschleiß auf, welcher durch abrasive Vorgänge überlagert wird, indem bereits anhaftendes Material aus der Werkzeugoberfläche herausgebrochen wird. Basierend auf diesen

Erkenntnissen sind zunächst eine Interpretation und Analyse der Verschleißbilder durchzuführen. Durch eine Kombination dieser Vorgehensweise mit Ermittlung der Verschleißvolumina mithilfe der entwickelten Auswertemethodik ist eine eindeutige Evaluierung der Verschleißneigung im Presshärtenprozess möglich. Um diesen Zusammenhang zu veranschaulichen, sind in Bild 41 die unterschiedlichen Verschleißformen noch einmal gegenübergestellt.

Tabelle 3: Überblick ermittelter Verschleißformen beim Presshärten

<b>Verschleißformen</b>			
Ausgangszustand	Oberflächenmodifikation	Überlagerung Adhäsion und Abrasion Messung bei 45° Ziehringrundung	Adhäsionsverschleiß Messung bei 45° Ziehringrundung
 <p>Ziehring</p> <p>0°</p> <p>α</p> <p>90°</p> <p>Schleifriefen</p>	<p>X38CrMoV5-3 unmodifiziert</p>	 <p>AlSi-Anhaftung</p> <p>0,5 mm</p>	 <p>0,5 mm</p>
 <p>0,5 mm</p>	<p>WP7V unmodifiziert</p>	 <p>Herausgebrochenes Material</p> <p>0,5 mm</p>	 <p>0,5 mm</p>
 <p>0,5 mm</p>	<p>AlCrTiN mit 30% Titananteil</p>	 <p>0,5 mm</p>	 <p>0,5 mm</p>

An den unmodifizierten Matrizen werden sowohl Bereiche mit herausgebrochenem Material sowie Adhäsionsverschleiß identifiziert. Anhand der Oberflächenaufnahmen wird daher deutlich, dass für diese Werkzeugoberflächen verstärkt eine Überlagerung von abrasivem und adhäsivem Verschleiß auftritt. Dieses Verhalten wurde für die beschichteten Oberflächen nicht nachgewiesen. Folglich war es möglich, durch den Einsatz einer

geeigneten Verschleißschutzschicht die Verschleißfestigkeit der verwendeten Werkzeuge zu erhöhen. Um ein tiefes Verständnis hinsichtlich der Wechselwirkung der verschiedenen Verschleißformen beim Presshärten zu erhalten, ist zusammenfassend neben der Quantifizierung der Verschleißmenge ebenfalls eine Bewertung der Oberflächen durch Mikroskopaufnahmen erforderlich. Erst durch die qualitative und quantitative Verschleißcharakterisierung ist es möglich, Rückschlüsse hinsichtlich der Verschleißentwicklung beim Presshärteprozess zu ziehen.

Die Gegenüberstellung der berechneten Ergebnisse mithilfe des Algorithmus mit den Rauheitskenngrößen aus den mikroskopischen Analysen zeigt, dass anhand der Verschleißvolumina nur jeweils ein Kennwert für die unterschiedlichen Oberflächenmodifikationen miteinander verglichen wird. Bei dem konventionellen Verfahren, welches auf einem Vergleich der Oberflächenrauheit der Ausgangsfläche mit dem verschlissenen Kontaktbereich beruht, ist eine Anwendung von mehreren Kenngrößen zu empfehlen. In diesem Zusammenhang stellen die Parameter aus der Abbott-Kurve sowie der arithmetische Mittenrauwert  $S_a$  geeignete Bewertungskenngrößen dar. Eine Aussage hinsichtlich der Verschleißmenge kann hingegen mit diesen Ergebnissen nicht eindeutig getroffen werden, da eine dünne Schicht infolge von Materialanlagerungen durch Adhäsion nicht in allen Fällen zu einer Erhöhung der Oberflächenrauheit führt. Vor diesem Hintergrund wird durch die Quantifizierung des Verschleißbetrages mithilfe des Auswerteskripts eine Abschätzung hinsichtlich des abrasiven und adhäsiven Verschleißvolumens realisiert. Das entwickelte Auswerteprogramm stellt eine zentrale Ergänzung zur Verschleißcharakterisierung dar, um eine Bewertung des Verschleißverhaltens vorzunehmen.

Die Messwiederholungen sowie die Validierung der Methodik zeigen zudem, dass eine hohe Wiederholgenauigkeit bei der Anwendung des Auswerteverfahrens vorliegt. Die Streuung der Ergebnisse fällt mit durchschnittlich  $0,005 \text{ mm}^3$  gering aus. Zudem liefert das Verfahren auch bei geringen Positionsabweichungen und variierender Winkelausrichtung der Messfläche des Probeköpers, welcher auf dem Messtisch des Mikroskops aufgebracht ist, zuverlässige Zahlenwerte bei maximalen Abweichungen von  $0,005 \text{ mm}^3$ . Eine hohe Genauigkeit dieser Methodik ist somit für die Verschleißcharakterisierung sichergestellt.

## 8.2 Bewertung der Oberflächenmodifikation im Hinblick auf die Verschleißbeständigkeit

Vor dem Hintergrund, dass Presshärtewerkzeuge zu Adhäsionsverschleiß neigen, sind Maßnahmen zur Erhöhung der Verschleißbeständigkeit zu treffen. Infolge der hohen Prozesstemperaturen ist ein Einsatz von Schmiersystemen nicht möglich. Um die Werkzeugstandmenge zu erhöhen, sind alternative Lösungsstrategien erforderlich, um einen geeigneten Verschleißschutz der Werkzeuge zu realisieren. Das drahtbasierte Laserstrahllegieren sowie das Aufbringen eines Schichtsystems stellen zu diesem Zweck zwei relevante Methoden dar, welche hinsichtlich der thermo-mechanischen Wechselbeanspruchungen für den Einsatz im Presshärteprozess geeignet sind. In Tabelle 4 ist eine Bewertungsmatrix hinsichtlich des Einflusses unterschiedlicher Elementzusammensetzungen der laserlegierten Oberflächen auf das Verschleißverhalten dargestellt. Zusätzlich werden die Substratwerkstoffe WP7V und X38CrMoV5-3 miteinander verglichen.

Tabelle 4: Bewertungsmatrix der oberflächenmodifizierten Warmarbeitsstähle

### Neigung zu adhäsivem Verschleiß der Oberflächenmodifizierungen












Referenzwerkstoffe unmodifiziert					
X38CrMoV5-3					
WP7V					
Element-zusammensetzung	Laserstrahllegieren				
Ni + Cr	<table border="1"> <tr> <td>Ni:</td> <td> </td> <td>Cr:</td> <td> </td> </tr> </table>	Ni:		Cr:	
Ni:		Cr:			
Ni+Mo+Cr	<table border="1"> <tr> <td>Geringe Konzentration Ni+Cr+Mo:</td> <td> </td> <td>Hoher Cr+Mo Anteil Ni+Cr+Mo:</td> <td> </td> </tr> </table>	Geringe Konzentration Ni+Cr+Mo:		Hoher Cr+Mo Anteil Ni+Cr+Mo:	
Geringe Konzentration Ni+Cr+Mo:		Hoher Cr+Mo Anteil Ni+Cr+Mo:			
Mo	<table border="1"> <tr> <td>Mo:</td> <td> </td> </tr> </table>	Mo:			
Mo:					

Während der konventionelle Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-3 die höchste Verschleißneigung aufweist, wird durch einen Einsatz des Sonderwerkstoffes WP7V der Oberflächenverschleiß bereits reduziert. Durch eine geeignete Oberflächenmodifikation wird eine weitere Steigerung der Verschleißfestigkeit erzielt. Eine Elementzusammensetzung, welche nach dem Laserstrahllegieren Nickel beinhaltet, führt zu einer deutlichen Zunahme des adhäsiven Verschleißes an der Werkzeugoberfläche im Vergleich zu einer unmodifizierten Probe. Es ist davon auszugehen, dass der Nickelanteil, bedingt durch eine hohe Dichte an freibeweglichen Elektronen, zu einer hohen chemischen Affinität mit der AlSi-Schicht des Blechmaterials neigt, wodurch die Bindungskräfte auf atomarer Ebene steigen. Folglich nimmt der Materialtransfer zu. Diese Annahme wird durch die von Czichos aufgestellte Adhäsionskomponente bestätigt [33]. Die in dieser Arbeit eingesetzten Legierungsdrähte bestehen primär aus Nickel sowie Chrom. Die Ergebnisse zur Verschleißcharakterisierung zeigen, dass bei diesen Zusatzwerkstoffen Nickel dominierend in Erscheinung tritt. Durch die WDX-Analysen wird dieser Zusammenhang ebenfalls verdeutlicht, indem nach dem Legieren Nickelanteile zwischen 0,5 Gew.-% und 1,2 Gew.-% ermittelt wurden. Ein vergleichbares Verschleißverhalten wiesen Haseeb et al. ebenfalls nach. Nickelbasierende Kontaktflächen neigen zu erhöhtem Adhäsionsverschleiß, während durch einen Zusatz von Wolfram eine höhere Verschleißfestigkeit erzielt wurde [169]. Basierend auf den Erkenntnissen aus dieser Arbeit ist zu empfehlen, weder Nickel als reinen Werkstoffzusatz in das Ausgangsmaterial einzubringen noch in Kombination mit anderen Elementen einzusetzen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde nachgewiesen, dass zusätzlich zu Nickel als weitere Bestandteile Chrom und Molybdän für eine tendenzielle Verringerung des Adhäsionsverschleißes erforderlich sind. Zusätzlich sind höhere Konzentrationen an Chrom und Molybdän als Nickel durch das Laserstrahllegieren in das Substrat einzubringen. Zwar wird durch den Zusatz eines Molybdängehaltes tendenziell die Verschleißneigung verringert, jedoch ist diese nur marginal zu verzeichnen. In diesem Zusammenhang führt eine modifizierte Oberfläche, welche lediglich mit Molybdän legiert wurde, bedingt durch den geringen Anteil von 0,45 Gew.-% geringfügig zu einer Reduzierung der Materialanhaftungen. Dieser Zusammenhang wurde durch Sidik et al. bestätigt, indem abhängig vom Chromgehalt in Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr eine höhere Verschleißfestigkeit vorhanden ist [139]. Diese untersuchten Zusatzmaterialien reichen, basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen für einen ausreichenden Verschleißschutz, bedingt durch ihre chemische Elementzusammensetzung sowie der resultierenden Konzentration

nicht aus. Um das Potential von Chrom und Molybdän für eine angepasste Oberflächenmodifizierung zukünftig zu analysieren, ist eine Entwicklung von geeigneten Legierungszusammensetzungen basierend auf diesen Elementen zu empfehlen, um eine höhere Menge insbesondere von Molybdän in das Grundmaterial einzubringen. In Tabelle 5 ist eine weitere Bewertungsmatrix bezüglich der Laserlegierung mit dem Oberflächenbeschichten dargestellt. In diesem Zusammenhang wird beim Legieren auf den Titanteil eingegangen.

Tabelle 5: Bewertungsmatrix der legierten und beschichteten Warmarbeitsstähle

Neigung zu adhäsivem Verschleiß der Oberflächenmodifizierungen					
Referenzwerkstoffe unmodifiziert					
X38CrMoV5-3	↑↑				Kontaktfläche
WP7V	↑				
Elementzusammensetzung	Laserstrahllegieren		PVD-Schichtsysteme		
Cr			Cr:		
Al+Cr			Al+Cr:		
Ti; Cr+C+Mo	Ti:	Cr+C+Mo:	Ti-Anteil 15 %:	Ti-Anteil 30 %:	Ti-Anteil 35 %:
					
	↑↑↑	↑↑	↓↓↓	↓↓	↓
	↑↑ Hoher Verschleiß	↑↑↑ Höchster Verschleiß	↓↓↓ Verringerung Verschleiß	↓↓ Starke Verringerung Verschleiß	↓ Höchste Verringerung Verschleiß

Durch das Einbringen von Titan sowie unter Verwendung von Drahtwerkstoffen aus Chrom, Molybdän und Kohlenstoff wird eine signifikante Steigerung der Verschleißfestigkeit erzielt. Diese Hauptlegierungsbestandteile verfügen über eine geringe Elektronendichte, wodurch die metallische Adhäsion verringert wird. Bereits eine geringe Menge des Titananteils von 0,02 Gew.-% und 0,03 Gew.-% führt zu einer deutlichen Reduzierung von AlSi-Materialanhaftungen auf der Kontaktfläche der Probekörper. Die Legierungszusammensetzung aus Chrom, Molybdän und Kohlenstoff verfügt zwar tendenziell über ein höheres Potential als der Titanwerkstoff, jedoch verdeutlichen die Versuchsergebnisse ebenfalls, dass eine Variation der Elementkonzentration einen entscheidenden Einfluss auf das Verschleiß-

verhalten ausübt. In diesem Zusammenhang tritt eine deutlich höhere Verschleißfestigkeit bei einem Gehalt von circa 8 Gew.-% Kohlenstoff gegenüber 0,03 Gew.-% Titan auf. Als Nichtmetall verfügt der Kohlenstoffbestandteil über eine andere Gitterstruktur als metallische Werkstoffe, weshalb die chemische Affinität zwischen Werkzeug und Blech verringert wird. Vor diesem Hintergrund sind sowohl Oberflächenmodifizierungen aus Titan als auch aus einer Kombination von Chrom, Molybdän und Kohlenstoff für den Einsatz im Presshärteprozess geeignet.

Im Vergleich zu den legierten Oberflächen ist tendenziell durch Aufbringen einer Verschleißschicht unter Verwendung von PVD-Schichtsystemen auf AlCrN-Basis eine weitere Steigerung der Verschleißbeständigkeit der Werkzeuge erreichbar. Eine mögliche Ursache ist, dass die verwendeten Schichtsysteme über eine signifikant höhere Elementkonzentration verfügen als die legierten Oberflächen. Infolge der chemischen Zusammensetzung der eingesetzten Drahtwerkstoffe ist die Variation des resultierenden Legierungsgehalts nach dem Modifizieren limitiert. Zusätzlich beeinflussen die einzustellenden Laserparameter den Legierungsprozess. Für zukünftige Arbeiten besteht die Möglichkeit, die Drahtwerkstoffe weiterzuentwickeln, indem die Materialzusammensetzung gezielt variiert oder deren Legierungsanteil erhöht wird. Zusätzlich ist eine weitere Anpassung der Drahtzuführgeschwindigkeit sowie der Vorschubbewegung des zu legierenden Bauteils an den Legierungsprozess in Abhängigkeit der verwendeten Materialien denkbar. In diesem Zusammenhang sind möglichst geringe Geschwindigkeiten zu wählen, um eine hohe Menge des Drahtwerkstoffes aufzuschmelzen und in den Basiswerkstoff einzubringen. Ein weiterer Ansatz ist, dass lediglich die Legierungselemente in oberflächennahe Bereiche des Werkzeuges eingebracht werden. Ein vollständiges Aufschmelzen des Grundmaterials und somit eine Diffusion mit den Elementen aus dem Substrat werden vermieden. Dadurch ist es möglich, die chemische Affinität durch das Zusatzmaterial zu verringern.

Während Chrom in der Beschichtung CrN und das Schichtsystem AlCrN zu einer starken Verringerung des Adhäsionsverschleißes führt, wird die Neigung zu Materialanhaftung durch den Zusatz mit Titan zusätzlich reduziert. Der höchste Widerstand gegenüber adhäsiv wirkender Bindungskräfte zwischen den Metallen wird durch AlCrTiN mit einem Titananteil von 30 Gew.-% erzielt, während modifizierte Kontaktflächen mit 15 Gew.-% und 35 Gew.-% Titan eine höhere Neigung zu metallischer Adhäsion aufweisen. Eine signifikante Steigerung der Verschleißbeständigkeit ist ebenfalls durch einen höheren Anteil von Titankarbid in Nickelbasisstählen möglich [151]. Durch Dotieren der PVD-Beschichtung mit zusätzlichem

Titan führt zu Verbindungen, deren molekulare Wechselwirkungen im Metallkontakt stärker ausgeprägt sind. Vor diesem Hintergrund ist für einen optimalen Verschleißschutz eine AlCrTiN-Schicht mit 30 Gew.-% für Presshärtewerkzeuge zu empfehlen. Titan ist als Legierungsbestandteil geeignet, da dieses Element über eine geringe Elektronendichte verfügt. Die Elektronenstruktur beeinflusst entscheidend die Adhäsionsneigung von Metallpaarungen [33].

Abschließend ist für Presshärtewerkzeuge zu empfehlen, segmentierte Werkzeuge zu verwenden und diese Oberflächen zu modifizieren. Ein Abscheiden der Verschleißschicht an den höchstbeanspruchten Werkzeugebereichen wird dadurch sichergestellt und ist anlagentechnisch mit weniger Kosten- und Zeitaufwand verbunden. Während für legierte Werkzeuge im industriellen Einsatz im Falle eines zunehmenden Verschleißes eine mechanische Nachbearbeitung dieser Bereiche möglich ist, sind beschichtete Werkzeuge zu ersetzen. Im Vergleich zu massiven Werkzeugaufbauten ist ein Austausch von einzelnen Segmenten umsetzbar, welche anschließend erneut durch Aufbringen einer Verschleißschicht bearbeitet werden. Um die Oberflächenmodifizierung den veränderten Prozessbedingungen, welche während des Presshärteprozesses auftreten, anzupassen, erfolgten im Rahmen dieser Arbeit Untersuchungen für variierende Werkzeugbeanspruchungen. Zudem ist sicherzustellen, dass eine hohe Abschreckgeschwindigkeit zur Martensitumwandlung der Halbzeuge vorhanden ist. In Tabelle 6 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 6: Bewertungsmatrix hinsichtlich variierender Prozessbedingungen

Prozessbedingungen beim Presshärten									
Einflussgröße	Referenz			Laserstrahllegieren			PVD-Schichtsysteme		
	5 MPa:	10 MPa:	20 MPa:	5 MPa:	10 MPa:	20 MPa:	5 MPa:	10 MPa:	20 MPa:
Flächenpressung	↑	↑	↑↑	○	○	↑	○	○	↑
Blehtemperatur 600 °C + 800 °C	-			-			-		
AlSi-Schichtdicke	Austenitisierungszeit 360 s		480 s				Austenitisierungszeit 360 s		480 s
	↑		↓				↑		↓
<b>Ergebnisgröße nach Oberflächen- modifizieren</b>									
Reibzahl	-			-			-		
Abschreck- geschwindigkeit	-			-			-		

○ Keine signifikante Beeinflussung      - Kein Einfluss nachweisbar      ↑ Zunahme      ↑↑ Starke Zunahme      ↓ Abnahme

Im Hinblick auf die Flächenpressung wird das Verschleißverhalten für unmodifizierte Referenzproben entscheidend beeinflusst. In diesem Zusammenhang nimmt der adhäsive Verschleiß insbesondere bei einer maximalen Beanspruchung von 20 MPa zu. Für die legierten und beschichteten Oberflächen hingegen wird lediglich eine geringere Zunahme des Werkzeugverschleißes nachgewiesen, sodass durch die oberflächenangepassten Proben ein hoher Widerstand auch bei hoher Werkzeugbeanspruchung gegeben ist. Ein signifikanter Einfluss der Blechtemperatur zwischen 600 °C und 800 °C auf die Verschleißneigung wird in den Untersuchungen nicht nachgewiesen, welches ebenfalls für die Reibzahl gilt. Es wird zusätzlich die erforderliche Abschreckgeschwindigkeit von circa 30 K/s eingehalten, welche zur Erreichung der hohen mechanischen Festigkeit der Karosserieteile erforderlich ist. Das Aufbringen einer Oberflächenbeschichtung ist daher als unkritisch zu bewerten. Die analysierten Technologien zur gezielten Anpassung der Werkzeugoberflächen, um die Verschleißbeständigkeit und somit die Werkzeugstandmenge zu erhöhen, stellen ein hohes Potential für den Einsatz im Presshärten dar.

Zusammenfassend gilt, dass sowohl das Laserstrahllegieren als auch das Beschichten für das Modifizieren von segmentierten Werkzeugen geeignet ist. Eine großflächige Bearbeitung der Gesamtwerkzeuge ist hingegen als nicht wirtschaftlich zu erachten. Es gilt insbesondere, dass der Legierungsprozess für Reparatur- und Nachbearbeitungszwecke geeignet ist. Durch das Aufbringen einer Schutzschicht vor dem Werkzeugeinsatz ist im Vergleich zu legierten Oberflächen tendenziell eine weitere Steigerung der Werkzeugstandmenge gegeben.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Das Presshärten ist ein industriell etabliertes Fertigungsverfahren, mit welchem sicherheitsrelevante Karosseriebauteile hergestellt werden. Durch den Einsatz AlSi beschichteter Halbzeuge kommt es während des Tiefziehens zu einem Materialübertrag von AlSi-Partikeln auf die Werkzeugoberflächen und somit zu Adhäsionsverschleiß. Um eine gleichbleibende Bauteilqualität der Karosseriekomponenten zu gewährleisten, ist eine zeit- und kostenintensive Wartung der Presshärtewerkzeuge erforderlich. Ein Einsatz von Schmiersystemen zur Reduzierung des Oberflächenverschleißes ist bedingt durch die hohen Prozesstemperaturen von circa 900 °C nicht möglich. Vor diesem Hintergrund sind alternative Methoden anzuwenden, um die Verschleißfestigkeit der Werkzeuge zu erhöhen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher das tribologische Verhalten von Oberflächenmodifizierungen und deren Übertragbarkeit auf den Presshärteprozess analysiert. Zu diesem Zweck kamen das Laserstrahllegieren sowie das PVD-Beschichtungsverfahren zum Einsatz, welche bedingt durch ihre hohe Temperaturbeständigkeit für Warmumformprozesse geeignet sind. Für die Identifizierung der Legierungszusammensetzung, welche die adhäsive Verschleißneigung der Oberflächen verringert, wurde die resultierende Elementkonzentration durch das Legieren und Beschichten variiert. Als Hauptlegierungselemente kamen Nickel, Chrom, Molybdän, Kohlenstoff und Titan zum Einsatz. Diese Legierungsbestandteile stellen als Übergangsmetalle und Nichteisenwerkstoffe wichtige Zusatzmaterialien dar, um das Verschleißverhalten gezielt zu verändern.

Zur Bewertung des unterschiedlichen Verschleißverhaltens ist neben einer Qualifizierung durch Oberflächentopografien eine quantitative Beschreibung der Verschleißmenge erforderlich. Erst dadurch ist eine Aussage durch welche Maßnahme der Verschleiß reduziert wird möglich. Eine Bewertung des Verschleißverhaltens mit konventionellen Auswerteverfahren, wie die Ermittlung der Rauheitskenngrößen vor und nach dem Einsatz, ist lediglich eingeschränkt möglich. Folglich wurde in dieser Arbeit ein Auswerteprogramm entwickelt, um das abrasive und adhäsive Volumen getrennt voneinander zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurde auf eine bereits bekannte Methodik aus dem Bereich der Mikroumformung zurückgegriffen. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein Algorithmus zur Verschleißcharakterisierung von Presshärteprozessen erarbeitet.

Als Substratwerkstoffe wurden für die Untersuchungen der konventionelle Warmarbeitsstahl X38CrMoV5-3 und der Sonderwerkstoff WP7V

verwendet. Ein Vergleich des Verschleißverhaltens beider Materialien zeigte, dass WP7V eine geringere Adhäsionsneigung als X38CrMoV5-3 aufweist. Die experimentellen Analysen an legierten Oberflächen ergaben, dass, sobald neben Chrom und Molybdän ein Bestandteil an Nickel in das Substrat eingebracht wurde, keine Erhöhung der Verschleißfestigkeit resultiert. In allen Fällen trat erhöhter Adhäsionsverschleiß auf. Erst durch Einbringen von Titan wurde eine Verringerung der Materialanhaftungen erzielt. Unter Verwendung eines Legierungsdrahtes, welcher als Hauptlegierungselemente Chrom, Molybdän und Kohlenstoff aufweist, wurde nach dem Oberflächenmodifizieren die höchste Verschleißbeständigkeit für die legierten Varianten realisiert. Im Vergleich zum Laserstrahllegieren weisen beschichtete Werkzeuge tendenziell geringere adhäsive Verschleißerscheinungen auf. Eine PVD-Schicht auf AlCrTiN-Basis, deren Schichtzusammensetzung durch schrittweise Erhöhung des Titananteils verändert wurde, kam zum Einsatz. Es wurde Titan gewählt, da dieses Element als Übergangsmetall über die geringste Elektronendichte verfügt und somit ein hohes Potential zur Reduzierung der chemischen Affinität der Kontaktpartner aufweist. Eine signifikante Zunahme der Beständigkeit gegenüber Adhäsion wurde bei einer Titankonzentration von 30 Gew.-% erreicht.

Neben der Verschleißcharakterisierung wurden ebenfalls Untersuchungen hinsichtlich des Reibverhaltens durchgeführt. Während zwischen den unmodifizierten Oberflächen aus WP7V und X38CrMoV5-3 sowie deren legierten Varianten vergleichbare Reibzahlen ermittelt wurden, nahm die Reibung für die beschichteten Kontaktflächen marginal ab. In Kontakt mit der Oberflächenbeschichtung wird die Adhäsionsneigung verringert, weshalb weniger lokale Verbindungen zwischen den Kontaktflächen während des Reibkontaktes zu überwinden sind. Folglich nimmt die Reibkraft ab. Als sekundärer Einfluss wurde das Abkühlverhalten nach dem Oberflächenmodifizieren untersucht. Im Rahmen der Analysen wurde kein signifikanter Einfluss durch Aufbringen eines Schichtsystems auf den Wärmeübergang ermittelt. Auch in Zugversuchen wurden für die abgeschreckten Proben vergleichbare Festigkeiten festgestellt. Die Übertragbarkeit auf Tiefziehprozesse hat zudem gezeigt, dass nach 200 Abpressungen an der unmodifizierten Matrize herausgebrochenes Material sowie hoher Adhäsionsverschleiß auftritt. Durch das Beschichten mit AlCrTiN mit einem Titananteil von 30 Gew.-% wurden lediglich Materialanhaftungen nachgewiesen, welche im Vergleich zur Referenz geringer in Erscheinung traten.

Für den industriellen Einsatz ist zusammenfassend zu empfehlen, als Hauptlegierungselemente Chrom, Molybdän, Kohlenstoff sowie Titan für die Oberflächenmodifizierung zu wählen. Zusätzlich ist ein Einsatz von

segmentierten Werkzeugen vorteilhaft, um einen Austausch verschlissener Einsätze für die Aufbringung einer Verschleißschicht zu gewährleisten. Um eine Übertragbarkeit für industrierelevante Einsatzbereiche sicherzustellen, sind noch weiterführende Analysen notwendig. Zudem sind für ein tieferes Verständnis hinsichtlich des Einflusses der Oberflächenmodifikationen auf das Verschleißverhalten Kenntnisse über die resultierenden Verbindungen nach dem Modifizieren zu erarbeiten. In diesem Zusammenhang ist zu identifizieren, welche Verbindungen die einzelnen Legierungsbestandteile eingehen und daraus die Ursachen hinsichtlich des unterschiedlichen Verschleißverhaltens abzuleiten. Zusätzlich sind Untersuchungen durchzuführen, um die Auswirkung von Karbiden auf den Adhäsionsverschleiß nachzuweisen. Hinsichtlich des Laserstrahllegierens besteht die Möglichkeit in der Weiterentwicklung von Drahtwerkstoffen, um die Verschleißfestigkeit weiter zu steigern. Um die Adhäsionsneigung der PVD-Schicht neben einen Zusatz von Titan zu verringern, sind als weitere Bestandteile Chrom, Molybdän oder Kohlenstoff denkbar. Als zusätzlicher Einflussfaktor ist für zukünftige Arbeiten die Oberflächenrauheit zu berücksichtigen, welche abhängig vom Fertigungsverfahren der Werkzeuge variieren kann. Abschließend ist eine Erweiterung der Auswertemethodik auf weitere Bauteilgeometrien relevant.



## 10 Summary and Outlook

Hot stamping is an industrially established manufacturing process with which safety-relevant car body components are produced. The use of AlSi coated semi-finished parts results in a material transfer of AlSi-particle on the tool surface and consequently to adhesive wear. In order to ensure a consistent part quality, a time and cost consuming maintenance of the hot stamping tools is necessary. Due to the high process temperatures of approximately 900 °C the use of lubricants to reduce the surface wear is not possible. For that reason, alternative methods are required to increase the wear resistance of the tools.

In this work the tribological behaviour of surface modification and their transferability to the hot stamping process were analyzed. For this purpose, laser alloying and the PVD coating technique were used, which are suitable methods for hot stamping due to their high temperature resistance. The resulting element concentration was varied during the alloying and coating process in order to identify the necessary chemical composition which result in a decrease of the adhesive interaction of between the surfaces. The main alloying elements nickel, chromium, molybdenum, carbon and titanium were chosen. As transition metals and non-metal material these components are important alloying materials to modify the wear behaviour.

The evaluation of the different wear behaviour requires a qualification of the surface topographies and a quantification of the wear volume. Consequently, the method which reduces the surface wear can be identified. By using conventional analysis methods like determining the surface roughness before and after the tests, an evaluation of the wear behaviour is limited. For this reason, a new analysis program was developed within this work to identify the adhesive and abrasive wear volume separately. In this regard, an already established methodology from the microforming was used. Based on these results, a wear characterization for the hot stamping process was developed.

For the investigations the conventional hot work steel X38CrMoV5-3 and the special steel grade WP7V were chosen. Compared to the results of X38CrMoV5-3, the steel WP7V show less tendency to metallic adhesion. Based on the experimental analysis of alloyed surfaces, the wear resistance cannot be increased by adding nickel to the base material in addition to chromium and molybdenum. In all cases the adhesive wear increased. By

introducing titanium, a reduction of the layer build-up on the tool can be achieved. Using a filler wire, which contains as main alloying elements chromium, molybdenum and carbon, the highest wear resistance could be realized after the surface modification with the laser alloying process. Compared to the alloying method, the coated surfaces tend to exhibit less adhesive wear. An AlCrTiN-based PVD coating was used, whose coating composition was changed by gradually increasing the titanium content. Titanium was chosen, because this element has as transition metal the lowest electron density and therefore has a high potential for reducing the chemical affinity of the contact partners. A significant increase against adhesion could be achieved with a titanium concentration of 30 wt. %.

In addition to the wear characterization, the friction behaviour was also examined. While comparable coefficients of friction were determined between the unmodified surfaces of WP7V and X38CrMoV5-3 as well as their alloyed variants, the friction for the coated contact surfaces decreased marginally. In contact with the surface coating the adhesion tendency is decreased, by which fewer local connections between the surfaces have to be broken during sliding. Consequently, the friction force decreases. The cooling behaviour was also investigated after the surface modification. Within the scope of this work no significant influence on the heat transfer could be determined by applying an coating system on the tool. In addition, comparable strengths were also found in tensile tests for the quenched samples. In deep drawing tests the unmodified tool surfaces lead after 200 strokes to a high abrasive wear and also to high adhesive wear. Due to the applied coating system of AlCrTiN with a titanium content of 30 wt. %, only adhesive wear occurs on the tool, which is less apparent compared to the reference surfaces.

For the industrial use it is recommended to choose for the surface modification the main alloying elements chromium, molybdenum, carbon and titanium. Additionally, the use of segmented tools is also suggested to replace worn part for the application of a new wear protection layer. In order to ensure transferability for industrial applications, further analyses are necessary. For a deeper understanding regarding the influence of the surface modification on the wear behaviour, it is necessary to investigate what kind of metallic bondings occur after modifying. For this purpose, it is recommended to identify the individual bonds of the various alloying elements and to derive the cause for different wear behaviour from the results. In order to verify the influence of carbides on the adhesive wear, further investigation has to be carried out. With regard to laser alloying process, it is possible to develop new wire materials to increase wear resistance. In

order to decrease the adhesion tendency of PVD-coatings chromium, molybdenum or carbon are in addition to titanium conceivable alloying elements. For future the surface roughness has also be considered as another influence factor, which can vary depending on the manufacturing process of the tools. Finally, an adjustment of the developed evaluation methodology to further component geometries is relevant.



# Literaturverzeichnis

- [1] Friedrich, Horst E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik: Springer Vieweg Verlag. Wiesbaden, 2013.
- [2] Radke, S.: Verkehr in Zahlen 2017/18. 45. aktualisierte Neuauflage, revidierte Ausgabe: DVV Media Group. Hamburg, 2017, S. 1–372.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Schlüsseltechnologien. Leichtbau. Online verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/leichtbau.html>, abgerufen am 11.09.2019.
- [4] Kuhn, D.: Formhärten. Form- und Presshärten für hochbelastbare Strukturteile. Online verfügbar unter: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/form-und-presshaerten-fuer-hochbelastbare-strukturteile-a-59518/>, abgerufen am 11.09.2019.
- [5] Bruschi, S.; Ghiotti, A.: Hot Stamping: In: Comprehensive materials processing, Elsevier, 2014, S. 27–54.
- [6] Sikora, S.; Banik, J.; Gerber, T.; Mura, J.; Myslowicki, S.: Herausforderungen und resultierende Entwicklungen in der Warmumformung von Karosseriebauteilen. In: Merklein, Marion (Hrsg), 10. Erlanger Workshop Warmblechumformung: Meisenbach. Bamberg, 2015, S. 33–46.
- [7] Karbasian, H.; Tekkaya, A. E.: A review on hot stamping: Journal of Materials Processing Technology (2010) (210), 15, SS. 2103–2118.
- [8] Hardell, J.; Prakash, B.: High-temperature friction and wear behaviour of different tool steels during sliding against Al-Si-coated high-strength steel: In: Tribology International (41), 7, 2008, S. 663–671.
- [9] Boher, C.; Le Roux, S.; Penazzi, L.; Dessain, C.: Experimental investigation of the tribological behavior and wear mechanisms of tool steel grades in hot stamping of a high-strength boron steel: In: Wear (294–295), 2012, S. 286–295.
- [10] Hoffmann, H.; Neugebauer, R.; Spur, G.: Handbuch Umformen. Handbuch Fertigungstechnik: CARL HANSER Verlag GMBH & München, 2012.
- [11] Norrbottens Jaernverk Ab, 1974: Manufacturing A Hardened Steel Article on 11.06.1974. Patent no. GB 1490535 A. GB 4807774 A. Priority no. SE 7315058 A 19731106.

- [12] Burglund, G.: The history of hardening of boron steel in northern Sweden: Proceedings of the 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel. Kassel, 2008, S. 175-177.
- [13] Aspacher, J.: Form hardening concepts: Proceedings of the 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel. Kassel, 2008, S. 1-5.
- [14] Industrie Anzeiger (Ed.), 2019: Wirtschaftliche Wege zu hochfesten Karosseriebauteilen. Online verfügbar unter: <https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/fertigung/wirtschaftliche-wege-zu-hochfesten-karosseriebauteilen/>, abgerufen am 13.09.2019.
- [15] Hoff, Cornelia: Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5: Meisenbach. 193. Bamberg, 2008.
- [16] Nikraves, M.; Naderi, M.; Akbari, G. H.: Influence of hot plastic deformation and cooling rate on martensite and bainite start temperatures in 22MnB5 steel: In: Materials Science and Engineering A (540), 2012, S. 24-29.
- [17] So, H.; Steinbeiß, H.; Hoffman, H.: Entwicklung einer Methodik zur Optimierung von Umformwerkzeugen für die Warmblechumformung. In: Merklein, Marion (Hrsg), 1. Erlanger Workshop Warmblechumformung: Meisenbach. Bamberg, 2006, S. 102-117.
- [18] Escher, Ch.; Wilzer, J. J.: Tool steels for hot stamping of high strength automotive body parts: 3rd International Conference on Stone and Concrete Machining (ICSCM). Ruhr Universität Bochum (3), 2015, SS. 219-228.
- [19] Behrens B. A.: Hot Stamping: CIRP The International Academy for Production Engineering. Springer Berlin, Heidelberg, 2014, S. 1-7.
- [20] Winkel, J.: Die Gesamtbilanz zählt beim Presshärten: Blech InForm, Carl Hanser Verlag. München (Blechpraxis), 2006, S. 64-68.
- [21] Tschätsch, H.; Dietrich, J.: Praxis der Umformtechnik. Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge. 10., überarb. und erw. Aufl.: Vieweg + Teubner. Wiesbaden, 2010, S. XII, 432 Seiten.
- [22] Lechler, J.; Merklein, M.; Geiger, M.: Determination of Thermal and Mechanical Material Properties of Ultra High Strength Steels for

- Hot Stamping: Metal Forming, steel research international (79, Ausgabe 2), 2, 2007, S. 98–104.
- [23] Kolleck, R.; Veit, R.; Merklein, M.; Lechler, J.; Geiger, M.: Investigation on induction heating for hot stamping of boron alloyed steels: CIRP Annals - Manufacturing Technology (58), 1, 2009, S. 275–278.
- [24] Fan, D. W.; Cooman, Bruno C.: State-of-the-Knowledge on Coating Systems for Hot Stamped Parts: steel research international, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (83), 5, 2012, S. 412–433.
- [25] Suehiro, M.; Kusumi, K.; Miyakoshi, T.; Maki, J.; Ohgami, M.: Properties of Aluminum-coated Steels for Hot-forming: Nippon Steel Technical Report, 2003, S. 16–21.
- [26] Veit, R.; Hofmann, H.; Kolleck, R.; Sikora, S.: Investigation of the Phase Formation of AlSi-Coatings for Hot Stamping of Boron Alloyed Steel: International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies (AMPT2010), American Institute of Physics (AIP Conference Proceedings), 2011, S. 769–774.
- [27] Paar, U.; Becker, H.-H.; Alsmann, M.: Press-hardened components from Kassel - chances and challenges: Proceedings of the 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel. Kassel, 2008, S. 153–163.
- [28] Wilsius, J.; Hein, P.; Kefferstein, R.: Status and future trends of hot stamping of USIBOR 1500 P®. In: Merklein, Marion (Hrsg), 1. Erlanger Workshop Warmblechumformung: Meisenbach. Bamberg, 2006.
- [29] Merklein, M.; Lechler, J.: Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels (177), 2006, S. 452–455.
- [30] Dreher, B.; Helwing, S.; Mattes, U.; Schweiker, T., 2007: Verfahren zum Herstellen eines pressgehärteten Bauteils. Applied for by Daimler Chrysler AG. Patent no. WO 2007/028475 A2. PCT/EP2006/007917. Priority no. 10 2005 041 741.8.
- [31] Naganathan, A.; Penter, L.: Hot Stamping. ASM International®: Sheet Metal Forming—Processes and Applications, 2012, S. 133–142.
- [32] Lee, C. W.; Fan, D. W.; Sohn, I. R.; Lee, S.-J.; Cooman, B. C. de: Liquid-Metal-Induced Embrittlement of Zn-Coated Hot Stamping Steel (43), 13, 2012, S. 5122–5127.

- [33] Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch. Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. 3 volumes: Vieweg-Teubner. Wiesbaden, 2010.
- [34] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik. Grundlagen, Technologien, Maschinen. 2 volumes: Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg, 2010.
- [35] Weißbach, W.: Werkstoffkunde. Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. 16 volumes: Viewegs Fachbücher der Technik. Wiesbaden, 2007.
- [36] Popov, V. L.: Kontaktmechanik und Reibung. Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation: Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg, 2009.
- [37] Kondratiuk, J.; Kuhn, P.: Tribological investigation on friction and wear behaviour of coatings for hot sheet metal forming (270), 11-12, 2011, S. 839–849.
- [38] Graff, S.; Werner-Bielefeld, S.; Brenne, T.: Erweiterung und Validierung des Simulationsmodells für die Warmblechumformung. In: Merklein, Marion (Hrsg), 13. Erlanger Workshop Warmblechumformung: Meisenbach. Bamberg, 2018.
- [39] Mulvihill, D. M.; Kartal, M. E.; Nowell, D.; Hills, D. A.: An elastic-plastic asperity interaction model for sliding friction (44), 12, 2011, S. 1679–1694.
- [40] Schwingenschlögl, P.; Hildering, S.; Merklein, M.: Untersuchung der Reibbedingungen beim Presshärten mittels Streifenziehversuchen bei erhöhten Temperaturen. In: Merklein, Marion (Hrsg), 10. Erlanger Workshop Warmblechumformung: Meisenbach. Bamberg, 2015, S. 177-194.
- [41] Ghiotti, A.; Bruschi, S.; Borsetto, F.: Tribological characteristics of high strength steel sheets under hot stamping conditions (211), 11, 2011, S. 1694–1700.
- [42] Bowden, F. P.; Tabor, D.: The friction and lubrication of solids. Wilkonson, D. H.; Marshall, W. (Hrsg.): The international series on monographs on physics. Oxford University Press, 1964.
- [43] Schwingenschlögl, P.; Weldi, M.; Merklein, M.: Investigation of the influence of process parameters on adhesive wear under hot stamping conditions (896), 2017, S. 1–8.

- [44] Schwingenschlögl, P.; Steiner, J.; Gauglitz, S.; Merklein, M.: Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die tribologischen Bedingungen beim Presshärten. In: Merklein, Marion (Hrsg), 11. Erlanger Workshop Warmblechumformung: Meisenbach. Bamberg, 2016, S. 45-62.
- [45] Tian, X.; Zhang, Y.; Li, J., 2012: Investigation on Tribological Behavior of Advanced High Strength Steels. Influence of Hot Stamping Process Parameters. In *Tribol Lett* 45 (3), S. 489-495. DOI: 10.1007/s11249-011-9908-1.
- [46] Pelcastre, L.; Hardell, J.; Prakash, B.: Investigations into the occurrence of galling during hot forming of Al-Si-coated high-strength steel: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology (225), 6, 2011, S. 487-498.
- [47] Austin, M., 2019: Dies for hot stamping. How to design, manage a successful form and quench tool. Edited by Stamping Journal. Online verfügbar unter: <https://www.thefabricator.com/article/stamping/dies-for-hot-stamping>, abgerufen am 17.09.2019.
- [48] Venema, J.; Matthews, D.T.A.; Hazrati, J.; Wörmann, J.; van den Boogaard, A. H.: Friction and wear mechanisms during hot stamping of AlSi coated press hardening steel (380-381), 2017, SS. 137-145.
- [49] Wilzer, J. J.; Escher, Ch.: Herausforderungen bei Werkzeugstählen für die Warmumformung von Strukturbauteilen. In: Merklein, Marion (Hrsg), 12. Erlanger Workshop Warmblechumformung: Meisenbach. Bamberg, 2017, S. 27-41.
- [50] Bargel, H.-J.; Cardina, P.; Hilbrans, H.; Hübner, K.-H.; Krüger, O.; Schulze, G.: Werkstoffkunde. 8 volumes: Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [51] Böhler: Werkzeugstähle für das Presshärten. Tool steels for hot stamping.
- [52] Moeller, E.: Handbuch Konstruktionswerkstoffe. Auswahl, Eigenschaften, Anwendungen: Carl Hanser Verlag. 2. München Wien, 2014.
- [53] Oberroither, C.; Jesner, G.: Tool steel solution for tailored property parts produced via hot stamping. Proceedings of the 4th International Conference on advanced high strength steel and press hardening (ICHSU2018), World Scientific: Advanced high strength steel and press hardening, 2018, S. 451-457.

- [54] Langenberg, S.: Warmarbeitsstahl: Schmolz+Bickenbach Group.
- [55] Schruff, I.: Stahlauswahl für Druckgiessformen. Kriterien der Stahlauswahl und Härtefestlegung bei Druckgießformen: Giesserei-Praxis 7-8, 2014, S. 350–353.
- [56] Wilzer, J. J.: Superior Tool Steels for Hot Stamping of AHSS. Proceedings of the 4th International Conference on advanced high strength steel and press hardening (ICHSU2018), World Scientific: Advanced high strength steel and press hardening, 2018, S. 431–440.
- [57] Wilzer, J. J.: Wärmeleitfähigkeit martensitisch härtbarer Stähle. Physikalische Zusammenhänge, Einflussfaktoren und technischer Nutzen: Dissertation, Lehrstuhl Werkstofftechnik, RUB. Bochum, 2014, SS. XIII, 233 Seiten.
- [58] Chen, J.; Li, X.; Han, X.: Hot Stamping: In: Comprehensive materials processing, Elsevier, 2014, SS. 351–370.
- [59] N.N.: Verschleiß. Begriffe Systemanalyse von Verschleißvorgängen Gliederung des Verschleißgebietes: Beuth, DIN 50320, 1979.
- [60] Hardell, J.: Tribology of hot forming tool and high strength steels: Dissertation, Luleå University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering. Luleå, 2009.
- [61] Beynon, J. H.: Tribology of hot metal forming: Tribology International, Elsevier Science Ltd., 1998, S. 73–77.
- [62] Macherauch, E.; Zoch, H.-W.: Praktikum in Werkstoffkunde. 91 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik: Vieweg+Teubner. 11. Wiesbaden, 2011, S.610.
- [63] Sommer, K.; Heinz, R.; Schöfer, J.: Verschleiß metallischer Werkstoffe. Erscheinungsformen sicher beurteilen. 1 volume: Vieweg + Teubner. Wiesbaden, 210, S.610.
- [64] Bartel, D.: Simulation von Tribosystemen. Grundlagen und Anwendungen: Vieweg + Teubner Research, Habilitationsschrift Universität Magdeburg, 2009, S.179.
- [65] Pelcastre, L.; Hardell, J.; Prakash, B.: Galling mechanisms during interaction of tool steel and Al–Si coated ultra-high strength steel at elevated temperature (67), 2013, S. 263–271.
- [66] Pelcastre, L.; Hardell, J.; Rolland, A.; Prakash, B.: Influence of microstructural evolution of Al-Si coated UHSS on its tribological

- behaviour against tool steel at elevated temperatures (228), 2016, S. 117–124.
- [67] Merklein, M.; Wieland, M.: Investigations on Austenitization Parameters Influencing Wear Behavior Within Hot Stamping: 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014. Nagoya, Japan (81), 2014, S. 1695–1700.
- [68] Dessain, C.; Hein, P.; Wilsius, J.; Penazzi, L.; Boher, C.; Weikert, J.: Experimental investigation of friction and wear in hot stamping of Usibor 1500P: Proceedings of the 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel. Kassel, 2008, S. 217–227.
- [69] Hernandez, S.; Hardell, J.; Prakash, B.: Hot sheet metal forming of high-performance steel: Proceedings of the 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance. Kassel, 2013, S. 517–525.
- [70] Pujante, J.; Vilaseca, M.; Casellas, D.; Riera, M. D.: Analysis of wear In industrial press hardening tools: International Deep Drawing Research Group, IDDRG. Linz, Österreich, 2016, S. 689–696.
- [71] Muro, M.; Artola, G.; Gorriño, A.; Angulo, C.: Wear and Friction Evaluation of Different Tool Steels for Hot Stamping: Advances in Materials Science and Engineering, 2018, S. 1–11.
- [72] Pujante Agudo, J.: Wear Mechanisms in Press Hardening of Boron Steel: Dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- [73] Archard, J. F., 1953: Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal of Applied Physics* 24 (8), SS. 981–988. DOI: 10.1063/1.1721448.
- [74] Affatato, S.; Brando, D.: Wear of Orthopaedic Implants and Artificial Joints. Introduction to wear phenomena of orthopaedic implants: Woodhead Publishing Series in Biomaterials, 2012.
- [75] Verma, R.; Tiwari, S.; Gehlot, V.: An Investigation of Abrasive Wear in Rubber Material: *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, 2014, S. 681–686.
- [76] Dietrich, J.: Praxis der Umformtechnik. Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen. 12. Aufl. 2018: Springer Vieweg. Wiesbaden, 2018, S. Online-Ressource (XIV, 473 Seiten 434 Illustrationen, 122 Illustrationen in Farbe, online resource).

- [77] Hüttemann, S.: Untersuchungen zu Viskosität und Fließverhalten hochviskoser Mineralöle mit Hochdruck-Kapillarviskosimetrie: Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät Maschinenbau, Lehrstuhl für Verfahrenstechnische Transportprozesse. Bochum, 2016.
- [78] Steinhilper, W.; Sauer, B.: Konstruktionselemente des maschinenbaus 2. Grundlagen von maschinenelementen für antriebsaufgaben. 5<sup>th</sup> ed.: Springer. Berlin, 2006, S. 1 online resource (ix, 718).
- [79] Braeuer, G.; Paschke, H.; Weber, M.; Behrens, B. A.; Yilkiran, T.: Surface Modifications for Optimized Forming Operations: Key Engineering Materials, Trans Tech Publications, Switzerland (611-612), 2014, S. 231-239.
- [80] Weist, Chr.; Westheide, H.; Lange, K.: Application of Chemical and Physical Methods for the Reduction of Tool Wear in Bulk Metal Forming Processes: CIRP Annals (35), 1, 1986, S. 199-204.
- [81] Wang, Q. J.; Chung, Y.-W.: Encyclopedia of Tribology: Springer Science+Business Media. New York, 2013.
- [82] Vollertsen, F.; Neumann, S.; Buschenhenke, F.; Partes, K.: Mit Faser- und Scheibenlasern zu neuen Anwendungen. Potenziale beim Schweißen und in der Oberflächenbearbeitung: Laser Technik Journal, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, 2008, S. 25-28.
- [83] Heigl, R.: Herstellung von Randschichten auf Aluminiumgusslegierungen mittels Laserstrahlung: Herbert Utz Verlag GmbH, Wiss. München, 2005, S. 168 Seiten.
- [84] Vollertsen, F.; Habedank, G.; Partes, K.: Maßgeschneiderte Tribologie durch Laseroberflächenbehandlung: Materials Science & Engineering Technology, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim (39), 1, 2008, S. 88-92.
- [85] Hofmann, K.: Maßgeschneiderte mechanische Eigenschaften von Werkzeugoberflächen durch drahtbasiertes Laserstrahllegieren. Edited by Werkstoffe in der Fertigung, Das Portal für die Fertigungswelt von morgen. Online verfügbar unter: <https://werkstoffzeitschrift.de/massgeschneiderte-mechanische-eigenschaften-von-werkzeugoberflaechen-durch-drahtbasiertes-laserstrahllegieren/>, abgerufen am 20.09.2019.
- [86] Bonek, M.; Dobrzański, L. A.; Hajduczek, E.; Klimpel, A.: Structure and properties of laser alloyed surface layers on the hot-work tool

- steel: *Journal of Materials Processing Technology* (175), 1-3, 2006, S. 45-54.
- [87] Spira, C.: Erweiterung der Prozessgrenzen von laserbasierten Härteverfahren im Automotive-Bereich: Dissertation, Fakultät Maschinenwesen, Technischen Universität Dresden.
- [88] Olakanmi, E. O.; Cochrane, R. F.; Dalgarno, K. W.: A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders. Processing, microstructure, and properties: In: *Progress in Materials Science* (74), 2015, S. 401-477.
- [89] Hofmann, K.; Schmitt, S.; Holzera, M.; Manna, V.; Hugger, F.; Roth, S.; Schmidt M.: Development of wire based laser alloying process for highly stressed surfaces of hot forming steel tools: Lasers in Manufacturing Conference, In: Graf, T.; Vollertsen, F.; Overmeyer, L. (Hrsg.): *Lasers in Manufacturing*, 2015.
- [90] Hofmann, K.; Neubauer, F.; Holzer, M.; Mann, V.; Hugger, F.; Roth, S.; Schmidt, M.: Effect of Laser Beam Alloying Strategies on the Metallurgical and Mechanical Properties of Hot Forming Tool Steels: 9th International Conference on Photonic Technologies - LANE (83), 2016, S. 264-276.
- [91] N.N.: Coating & Hardening: Dörrenberg Edelstahl GmbH.
- [92] Fukui, H.: Evolutional History of Coating Technologies for Cemented Carbide Inserts — Chemical Vapor Deposition and Physical Vapor Deposition: Sumitomo electric industries Ltd, 2016, S. 39-45.
- [93] Bobzin, K.: High-performance coatings for cutting tools: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* (18), 2016, S. 1-9.
- [94] N.N.: Dünnschichttechnologie. Physikalische Gasphasenabscheidung: Vakuum in Forschung und Praxis, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, 2016, S. 14-61.
- [95] Billur, E.: Hot Stamping of Ultra High-Strength Steels. From a Technological and Business Perspective: Springer. Ankara, Türkei, 2019.
- [96] N.N.: Datenblatt 1.2367: Dörrenberg Edelstahl.
- [97] Vilaseca, M.; Pujante, J.; Ramírez, G.; Casellas, D.: Investigation into adhesive wear of PVD coated and uncoated hot stamping production tools: *Wear*, 1-2, 2013, S. 148-154.

- [98] Schwingenschlögl, P.; Hauser, D.; Tenner, J.; Merklein, M.: Werkzeugseitige Beeinflussung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten. In: Merklein, Marion (Hrsg), 12. Erlanger Workshop Warmblechumformung: Meisenbach. Bamberg, 2017, S. 169-180.
- [99] Wieland, M.: Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten: Dissertation, Technischen Fakultät, Friedrich-Alexander-Universität, 2015, S.158.
- [100] Ghiotti, A.; Sgarabotto, F.; Bruschi, S.: A novel approach to wear testing in hot stamping of high strength boron steel sheets (302), 1-2, 2013, S. 1319-1326.
- [101] Hardell, J.; Pelcastre, L.; Prakash, B.: High-temperature friction and wear characteristics of hardened ultra-high-strength boron steel: Journal of Engineering Tribology, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I (224), 2010, S. 1139-1151.
- [102] Wagner, S.: Stuttgarter Impulse, Innovation durch Technik und Organisation. Tribologische Untersuchungen in der Blechumformung: FTK '97, Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg, 1997, S. 544-548.
- [103] Deng, L.; Pelcastre, L.; Hardell, J.; Prakash, B.; Oldenburg, M.: A Tribological Test under Press Hardening Conditions for Galling Research: In: Steinhoff, K.; Oldenburg, M.; Prakash, B. (Hrsg.), Proceedings of the 6th International Conference of Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel (CHS2). Atlanta, 2017, S. 453-460.
- [104] Yanagida, A.; Azushima, A.: Evaluation of coefficients of friction in hot stamping by hot flat drawing test: CIRP Annals - Manufacturing Technology (58), 1, 2009, S. 247-250.
- [105] Tian, X.; Zhang, Y.; Wang, Z.; Li, H. Q.; Wang, L.; Zhu, B.; Li, J.: Design of a Tribo-Simulator for the High Strength Steel Friction and Wear Investigation in Hot Stamping: Advanced Materials Research (421), 2011, S. 147-150.
- [106] Keferstein, C. P.; Marxer, M.; Bach, C.: Fertigungsmesstechnik. Alles zu Messunsicherheit, konventioneller Messtechnik und Multisensorik. 9 volumes: Springer-Vieweg. Wiesbaden, 2018.
- [107] Norm DIN 32567-1: Fertigungsmittel für Mikrosysteme –Ermittlung von Materialeinflüssen auf die optische und taktile-dimensionelle

- Messtechnik –Teil 1: Qualitative Abschätzung der material- und verfahrensspezifischen Einflüsse: Beuth. Berlin, 2015.
- [108] Norm DIN EN ISO 25178-602: Geometrische Produktspezifikation (GPS)- Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft- Teil 602: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (mit chromatisch konfokaler Sonde). (ISO 25178-602:2010); Deutsche Fassung EN ISO 25178-602:2010: Beuth. Berlin, 2010.
- [109] Ghiotti, A.; Bruschi, S.; Medea, F.: Comparison of tribological and wear performances of AlSi and Zn coatings in hot stamping of boron steel sheets: *Wear*, 2015, S. 810–821.
- [110] Macherauch, E.; Zoch, Hans-Werner: *Praktikum in Werkstoffkunde. 91 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik. 11., vollständig überarbeitete und erw. Aufl.: Vieweg+Teubner*. Wiesbaden, 2011, S. 1 online resource.
- [111] Norm DIN EN ISO 13565-2: Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren: Beuth. Berlin, 1997.
- [112] Medea, F.; Venturato, G.; Ghiotti, A.; Bruschi, S.: Tribological performances of new steel grades for hot stamping tools: *Journal of Physics: Conference Series*, 36th IDDRG Conference – Materials Modelling and Testing for Sheet Metal Forming, 2017, S. 1–8.
- [113] Schrader, T.: *Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge: Dissertation*, Meisenbach GmbH Verlag, Fertigungstechnik, 270. Bamberg, 2016, S. 160 Seiten.
- [114] Norm DIN EN ISO 4957: Werkzeugstähle (ISO 4957:2018): Beuth. Berlin, 2018.
- [115] Zum Gahr, K.-H.: *Microstructure and Wear of Materials. Chapter 6 Sliding Wear: Tribology Series*. 10, 1987.
- [116] Norm VDI 3824: Qualitätssicherung bei der PVD- und CVD-Hartstoffbeschichtung Eigenschaftsprofile und Anwendungsgebiete von Hartstoffbeschichtungen. VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik, VDI-Handbuch Werkstofftechnik: Beuth. Berlin, 2002.
- [117] N.N.: Alunox - Produkte. Online verfügbar unter: <https://www.alunox.de/de/>, abgerufen am 23.09.2019.
- [118] N.N.: Datenblatt: 22MnB5 / HLB 22: thyssenkrupp Hohenlimburg GmbH. Hagen.

- [119] N. N.: Werkstoffdatenblatt WP7V: Dörrenberg Edelstahl GmbH.
- [120] N.N.: Unsere Schichten im Überblick - Charakterisierung der PVD/PACVD-Schichten: H-O-T Härte- und Oberflächentechnik GmbH & Co. KG, 2019.
- [121] Kumar, T. S.; Prabu, S. B.; Manivasagam, G.; Padmanabhan, K. A.: Comparison of TiAlN, AlCrN, and AlCrN/TiAlN coatings for cutting-tool: International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2014, S. 796–805.
- [122] Menthe, E.: Bildung, Struktur und Eigenschaften der Randschicht von austenitischen Stählen nach dem Plasmanitrieren: Dissertation, Herbert Utz Verlag Wissenschaft, Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik. Braunschweig, 1999.
- [123] Kaulfuß F.: Hoch belastbare Hartstoffschichten mit hoher Oberflächengüte. Geschäftsfeld PVD- und Nanotechnik: Fraunhofer IWS Jahresbericht, 2015, S. 24–25.
- [124] Corporation Keyence: 3D Laser Scanning Microscope VK-X100K/X200K Referenzhandbuch.
- [125] Bauch, J.; Rosenkranz, R.: Physikalische Werkstoffdiagnostik. Ein Kompendium wichtiger Analytikmethoden für Ingenieure und Physiker: Springer Vieweg. Berlin, 2017.
- [126] Hein, P.; Wilsius, J.: Status and Innovation Trends in Hot Stamping of USIBOR 1500 P: Metal Forming, Steel research int. 79, 2008, S. 85–91.
- [127] N.N.: ARAMIS Professional. Online verfügbar unter: <https://www.gom.com/de/3d-software/gom-systemsoftware/aramis-professional.html>, abgerufen am 12.10.2019.
- [128] Iobst, S.; Berger, L.; Schroeder, J.; Dahl, F.; Houston, D.; Mao, M.: Automotive composites consortium B-pillar molding program: SPE Automotive Composites, Conference and Exposition, Troy, CD-Rom Proceedings, 2005, S. 1–13.
- [129] Ganapathy, M.; Li, N.; Lin, J.; Abspoel, M.; Bhattacharjee, D.: Experimental investigation of a new low-temperature hot stamping process for boron steels. 8<sup>th</sup> ed.: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1, 2019, S. 1–14.

- [130] DIN EN ISO 25178-606: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft- Teil 606: Merkmale von berührungslos messenden Geräten. (Fokusvariation) (ISO 25178-606:2015), Deutsche Fassung EN ISO 25178-606:2015: Beuth. Berlin, 2016.
- [131] Svahn, F.; Kassman-Rudolphi, Å.; Wallén, E.: The influence of surface roughness on friction and wear of machine element coatings: *Wear* (254), 11, 2003, S. 1092-1098.
- [132] Ghiotti, A.; Bruschi, S.; Medea, F.: Wear onset in hot stamping of aluminium alloys sheets: *Wear* (376-377), 2017, S. 484-495.
- [133] Kato, K.: Wear in relation to friction — a review: *Wear*, 2000, SS. 151-157.
- [134] Chang, J.-K.; Lin, C.-S.; Wang, W.-R.; Cheng, W.-J.: Microstructural Evaluation and Property Change of 5 Wt Pct Al-Zn Coating on Press Hardening Steel During Austenitization: *Metallurgical and Materials Transactions A*, 8, 2018, SS. 3715-3728.
- [135] Schirdewahn, S.; Spranger, F.; Hilgenberg, K.; Merklein, M.: Tribological performance of localized dispersed X38CrMoV5-3 surfaces for hot stamping of Al-Si coated 22MnB5 sheets: In: Oldenburg, M.; Hardell, J.; Caellas, D. (Hrsg.): *Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel - CHS2*, Wissenschaftliche Skripten, 2019, S. 357-364.
- [136] Fildes, J. M.; Meyers, S. J.; Mulligan, C. P.; Kilaparti, R. S.: Evaluation of the Wear and Abrasion Resistance of Hard Coatings by BOTD Test Methods - A Case: *Wear*, 2003, S. 1040-1049.
- [137] Krishnaveni, K.; Sankara Narayanan, T.S.N.; Seshadri, S. K.: Electroless Ni-B coatings: Preparation and evaluation of hardness and wear resistance: *Surface and Coatings Technology*, 1, 2005, S. 115-121.
- [138] Jiahong, L.; Dejun, K.: Micro-Structures and High-Temperature Friction-Wear Performances of Laser Cladded Cr-Ni Coatings: *Materials*. Basel, Switzerland, 1, 2018, S. 1-16.
- [139] Izdiyad Sidik, M. H.; Amir, N.; Kamal, S.: Wear Mechanism of Wear Resistant HVOF Thermal Spray Coating: Chromium Carbide Nickel Chrome on 304 AISI Steel: *MATEC Web Conf. (MATEC Web of Conferences)*, 2018, S. 1-16.

- [140] Le Roux, S.; Boher, C.; Penazzi, L.; Dessain, C.; Tavernier, B.: A methodology and new criteria to quantify the adhesive and abrasive wear damage on a die radius using white light profilometry: *Tribology International*, 2012, S. 40–49.
- [141] Habig, K.-H.; Chatterjee-Fische, R.: Wear behaviour of boride layers on alloyed steels: *Tribology International*, 1981, S. 209–215.
- [142] Yamanoglu, R.; Karakulak, E.; Zeren, M.: Mechanical and wear properties of pre-alloyed Molybdenum P/M steels with nickel addition: *Journal of Mining and Metallurgy Section B Metallurgy*, 2012, S. 251–258.
- [143] Lin, C.-M.; Kai, W.-Y.; Su, C.-Y.; Tsai, C.-N.; Chen, Y.-C.: Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy diffused: *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 97e204.
- [144] Wilson, A.; Matthews, A.; Housden, J.; Turner, R.; Garside, B.: A comparison of the wear and fatigue properties of plasma-assisted physical vapour deposition TiN, CrN and duplex coatings on Ti-6Al-4V: *Surface and Coatings Technology*, 1993, S. 600–607.
- [145] Fontalvo, G. A.; Humer, R.; Mitterer, C.; Sammt, K.; Schemmel, I.: Microstructural aspects determining the adhesive wear of tool steels: *Wear*, 9-10, 2006, S. 1028–1034.
- [146] Folkhard, E.: *Metallurgie der Schweissung nichtrostender Stähle*: Springer-Verlag, Wien, 1984.
- [147] Schwingenschlögl, P.; Niederhofer, P.; Merklein, M.: Investigation on basic friction and wear mechanisms within hot stamping considering the influence of tool steel and hardness: *Wear*, 2019, S. 378–389.
- [148] Slomski, E. M.; Scheerer, H.; Troßmann, T.; Berger, C.: Einfluss der PVD-Prozessparameter auf die Schichtnukleation und Struktur von CrN-Schichten: *Mat.-wiss. u. Werkstofftech. (Materialwissenschaft und Werkstofftechnik)*, 3, 2010, S. 161–165.
- [149] Shah, H. N.; Jayaganthan, R.: Influence of Al Contents on the Microstructure, Mechanical, and Wear properties of Magnetron Sputtered CrAlN Coatings: *J. of Materi Eng and Perform (Journal of Materials Engineering and Performance)*, 9, 2012, S. 2002–2009.

- [150] Alberdi, A.; Marín, M.; Díaz, B.; Sánchez, O.; Escobar Galindo, R.: Wear resistance of titanium–aluminium–chromium–nitride nano-composite thin films: *Vacuum*, 11-12, 2007, S. 1453–1456.
- [151] Bakkar, A.; Ahmed, M. M.Z.; Alsaleh, N. A.; Seleman, M. M. El-S.; Ataya, S.: Microstructure, wear, and corrosion characterization of high TiC content Inconel 625 matrix composites matrix composites: *Journal of Materials Research and Technology*, 1, 2019, S. 1102–1110.
- [152] Dimigen, H.; Klages, C.-P.: Microstructure and wear behavior of metal-containing diamond-like coatings: *Surface and Coatings Technology*, 1991, S. 543–547.
- [153] Lehmann, H.; Etzold, U.: Wärmebehandlungsanlagen zum Thermischen Printen für das partielle Vergüten beim Presshärten. In: Merklein, Marion (Hrsg), 13. Erlanger Workshop Warmblechumformung: Meisenbach. Bamberg, S. 67-80.
- [154] Lechler, J.: Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von pressgehärtbaren Bor-Manganstählen: Meisenbach. 200. Bamberg.
- [155] Hu, Z.; Schulze Niehoff, H.; Vollertsen, F.: Reibzahlmessung im Tiefziehwerkzeug: BIAS, Proceedings of the 1. Colloquium of DFG Priority Program Process Scaling. Bremen (Strahltechnik), 2003.
- [156] Mehic, B.; Engler, S.; Huskic, A.: Entwicklung einer Streifenziehversuchsanlage zur Untersuchung des Reib- und Verschleißverhaltens von tribologisch beanspruchten Oberflächen: FH Oberösterreich (Hrsg.), Wegbereiter - Karrierepfade durch ein Fachhochschulstudium, FFH, Forschungsforum der Österreichischen Fachhochschulen. Wels, 2015, S. 1–11.
- [157] N.N.: Forming the future. The entire world of metal forming: Schuler AG.
- [158] Groover, M. P.: Fundamentals of Modern Manufacturing. Materials, Processes, and Systems: John Wiley & Sons, Inc., 4, 2010.
- [159] Hardell, J.; Prakash, B.: Tribological properties of PVD coated and plasma nitrided hot forming tool steel during sliding against UHSS at elevated temperature: Proceedings of the 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance, 2009, S. 349–357.

- [160] Rätzer-Scheibe, H.-J.; Schulz, U.; Krell, T.: The effect of coating thickness on the thermal conductivity of EB-PVD PYSZ thermal barrier coatings: *Surface and Coatings Technology*, 18-19, 2006, S. 5636–5644.
- [161] Fan, D. W.; Kim, H. S.; Biroasca, S.; Cooman, B. C. de: Critical review of hot stamping technology for automotive steels: *Proc. from the Materials Science & Technology Conference MS&T*. Detroit, Michigan, 2007, S. 1–12.
- [162] Siniarski, D.; Kula, P.: Heat Conduction in PVD nanocoatings: *Tribology Letters*, 2004, S. 791–796.
- [163] Naderi, M.; Durrenberger, L.; Molinari, A.; Bleck, W.: Constitutive relationships for 22MnB5 boron steel deformed isothermally at high temperatures: *Materials Science and Engineering: A*, 1-2, 2008, S. 130–139.
- [164] Merklein, M.; Lechler, J.; Geiger, M.: Characterisation of the Flow Properties of the Quenchenable Ultra High Strength Steel 22MnB5: *CIRP Annals -Manufacturing Technology*, 1, 2006, S. 229–232.
- [165] Hunkel, M.; Lütjens, J.; Oeckerath, A.; Hofmann, M.; Ellmer, F.; Emmrich, R. et al.: UmCra - Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Vorgeschichte bei hochfesten Stählen: *FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (Hrsg.); VDA, Verband der Automobilindustrie*, 2015.
- [166] Geißler, A.: Leckageortung an Gebäuden. Abschlussbericht: Universität Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Bauphysik, 2000.
- [167] N. N.: Datenblatt Premium 1.2367: *Abrams Premium Stahl*.
- [168] Wieland, M.; Merklein, M.: Wear Behavior of Uncoated and Coated Tools under Complex Loading Conditions: *Tribology in Industry*, 2012, S. 11–17.
- [169] Haseeb, A.S.M.A.; Albers, U.; Bade, K.: Friction and wear characteristics of electrodeposited nanocrystalline nickel-tungsten alloy films: *Wear*, 1-2, 2008, S. 106–112.

**Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen**

- [P1] Wieland, M.; Neubauer, F.; Andreas, K.; Merklein, M.: Investigations on load spectrum and adhesive wear development in hot stamping operations. In: K. Bobzin; K.-D. Bouzakis; B. Denkena; H.J. Maier; M. Merklein (Hrsg.): The "A" Coatings Conference Proceedings, PZH Verlag, 2016, S. 227-234
- [P2] Neubauer, F.; Hofmann, K.; Andreas, K.; Merklein, M.: Investigation of the wear behavior for not alloyed and alloyed hot forming tools. In: Wulfsberg, J.P; Fette, M.; Montag, T. (Hrsg.): WGP Congress 2016, Trans Tech Publications, 2016, S. 99-106
- [P3] Neubauer, F.; Hofmann, K.; Tenner (geb. Steiner), J.; Andreas, K.; Merklein, M.: Oberflächenmodifizierung von Presshärtewerkzeugen durch einen drahtbasierten Laserstrahllegierungsprozess. In: M. Merklein (Hrsg.): 11. Erlanger Workshop Warmblechumformung, Meisenbach GmbH Verlag, 2016, S. 163-176
- [P4] Neubauer, F.; Rupprecht, P.; Hofmann, K.; Andreas, K.; Merklein, M.: Investigation of the tribological behaviour of alloyed hot stamping tools in contact with AlSi coated 22MnB5. In: THE "A" Coatings (Hrsg.): 2017, S. 81-90
- [P5] Neubauer, F.; Tenner (geb. Steiner), J.; Andreas, K.; Merklein, M.: Investigation of the Adhesive Wear Behavior of Alloyed and Not Alloyed Hot Stamping Tools in Contact with 22MnB5. In: Steinhoff, K.; Oldenburg, M.; Prakash, B. (Hrsg.): Hot Sheet Metal Forming of high-Performance Steel - CHS2, Wissenschaftliche Skripten, 2017, S. 443-452
- [P6] Neubauer, F.; Reil, T.; Hofmann, K.; Merklein, M.: Increasing the Adhesive Wear Resistance of Hot Stamping Tools By Modifying the Surfaces. Key Engineering Material 767(2018), S. 61-68
- [P7] Neubauer, F.; Merklein, M.: Tribological and Thermal Investigation of Modified Hot Stamping Tools. Tribology in Industry Vol.41(2019)1, S. 76-89

**Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten. Die folgenden studentischen Arbeiten wurden von der Autorin und der Lehrstuhlinhaberin betreut:**

- [S1] Reutelhuber, C.: Tribologische und metallurgische Untersuchungen an Presshärtewerkzeugen. Bachelorarbeit. Erlangen, 2016
- [S2] Almohammadi, M.: Variantensimulation und Validierung eines numerischen FE-Modells für Presshärteprozesse. Projektarbeit. Erlangen, 2016
- [S3] Rupprecht, P.: Reibuntersuchungen an legiertem und unlegiertem Warmarbeitsstahl zur Beurteilung des Verschleißverhaltens im Presshärteprozess. Bachelorarbeit. Erlangen, 2016
- [S4] Freitag, S.: Ermittlung der höchstbeanspruchten Oberflächenbereiche von Presshärtewerkzeugen anhand numerischer Analysen. Bachelorarbeit. Erlangen, 2016
- [S5] Wu, Y.: Numerische Untersuchung eines Verschleißversuches mittels einer FE-Simulation. Masterarbeit. Erlangen, 2016
- [S6] Reil, T.: Werkzeug- und werkstückseitige Verschleißanalyse von Presshärteprozessen mit AlSi beschichteten 22MnB5. Masterarbeit. Erlangen, 2017
- [S7] Wrangler, V.: Erstellung und Analyse eines numerischen Modells zur Untersuchung des Reibverhaltens im Presshärteprozess. Projektarbeit. Erlangen, 2017
- [S8] Sauer, M.: Analyse des tribologischen Einsatzverhaltens von modifizierten Presshärtewerkzeugen. Bachelorarbeit. Erlangen, 2018
- [S9] Wei, W.: Anpassung einer Analysemethodik zur Beschreibung des Oberflächenverschleißes von Presshärtewerkzeugen. Masterarbeit. Erlangen, 2018
- [S10] Haas, L.: Charakterisierung des Reib- und Verschleißverhaltens verschiedener Beschichtungssysteme für Presshärtewerkzeuge. Projektarbeit. Erlangen, 2018

# Anhang

## Quellcode der Auswertemethodik

```
Import of the microscopic measurement data before the experiments
% "Ausgangszustand als A"
% Import of the microscopic measurement data after the experiments
% "Eingesetzt als E"
A_before=importdata('WP7V_vorher.asc');
E_after=importdata('WP7V_Pin3_3.asc');

% Input of the surface roughness values, which were measured for the
% contact area before the experiments "A_before".

Sk_vorher = 0.00167;
Spk_vorher = 0.00063;
Svk_vorher = 0.00058;

% Compare the number of measured data in both files.
% Verify whether there is an identical number of measurement data.
if isequal(length(A_before),length(E_after))
    disp('gleich');
else
    disp('ungleich');
end

% Find value pairs of the table position in x and y direction, the height
value in z is not taken into account.
% First coloums, 1 as X and 2 as Y. "Ausgangszustand A_XY" and "Eing-
esetzt1
% E_XY
A_XY=A_before(:,1:2);
E_XY=E_after(:,1:2);

% Determine the profile height of the datas.
A_Z=A_before(:,3:3);
E_Z=E_after(:,3:3);
```

```
% Stepsize between x values and y values.
Stepsize_A=A_XY(2,1)-A_XY(1,1);
Stepsize_E=E_XY(2,1)-E_XY(1,1);

% Size of the matrix by calculating the number of lines. As an example the
% number of line of the height "Z" is calculated.
%line_A_Z=size(A_Z,1);
%line_E_Z=size(E_Z,1);

% Identify the same value pairs of x and y in both files,
% where A_XY is before the experiments and E_XY is after the experi-
% ments.
[Valuepairs,Line_valuepairs_before,Line_valuepairs_after]=inter-
sect(A_XY,E_XY,'stable','rows');

% Compare how many lines have the same value pairs
Line_valuepairs=size(Valuepairs,1);

% Write the identified value pairs with the associated height values z in a
% new matrix.
Valuepairs_A=A_before(Line_valuepairs_before,:);
Valuepairs_E=E_after(Line_valuepairs_after,:);

% Determine the profile height of the datas.
A_Z_Short=Valuepairs_A(:,3:3);
E_Z_Short=Valuepairs_E(:,3:3);

% Find value pairs of the table position in x and y direction, the height
% value in z is not taken into account.
% First coloums, 1 as X and 2 as Y. "Ausgangszustand A_XY" and "Eing-
% esetzt E_XY"
A_XY_Short=Valuepairs_A(:,1:2);
E_XY_Short=Valuepairs_E(:,1:2);

% Stepsize between x values and y values.
%Stepsize_A_Short=A_XY_Short(1,2)-A_XY_Short(1,1);
%Stepsize_E_Short=E_XY_Short(1,2)-E_XY_Short(1,1);

% Size of the matrix by calculating the number of lines. As an example the
```

```
% number of line of the height "Z" is calculated.
```

```
line_A_Z_Short=size(A_Z_Short,1);
```

```
line_E_Z_Short=size(E_Z_Short,1);
```

```
% Find the maximum value in both data files, which is the diameter of the  
% contact area. Before importing the files in Matlab, make sure, that the  
% circular contact area was selected in the measuring programm of the  
% microscope.
```

```
[max_before_XY,index_before_XY]=max(A_XY);
```

```
[max_after_XY,index_after_XY]=max(E_XY);
```

```
max_before_X=max_before_XY(1,1);
```

```
max_before_Y=max_before_XY(1,2);
```

```
max_after_X=max_after_XY(1,1);
```

```
max_after_Y=max_after_XY(1,2);
```

```
% In order to exclude areas which are outside of the contact area, the  
% diameter of the circle has to be determined by comparing the maxi-  
% mum
```

```
% values in x an y dircetion. Idnetify the minimum value of the maximum  
% value in x position before and
```

```
% after the experiments.
```

```
min_X=min(max_after_X,max_before_X);
```

```
% Identify the minimum value of the maximum value in y position before  
and
```

```
% after the experiments
```

```
min_Y=min(max_after_Y,max_before_Y);
```

```
% Create a matrix which only consists of values of the real contact area.
```

```
% Values outside of the contact area will be set as "NaN"
```

```
% Determine the diameter of the circle, which is the real contact area.
```

```
if (min_X>min_Y)
```

```
    diameter=min_Y+1;
```

```
else
```

```
    diameter=min_X+1;
```

```
end
```

```
% Determine the center of the real contact area
```

```
Center_X=min_X / 2;
```

```
Center_Y=min_Y / 2;  
radius=diameter/2;
```

```
% Find all the values of the real contact area and save these values in a  
% new matrix. The values out of the contact area set as "NaN".
```

```
for m=1:size(Valuepairs,1)  
if sqrt((Valuepairs(m,1)- Center_X)^2 + (Valuepairs(m,2)- Center_Y)^2  
<radius  
  
else  
if sqrt ((Valuepairs(m,1)- Center_X)^2 + (Valuepairs(m,2)- Center_Y)^2  
>radius  
Valuepairs(m,:)= nan;  
end  
end  
end  
ContactArea=Valuepairs(:,:);
```

```
% Find the value pairs in the circle contact area.
```

```
[Circlearea,lines_circle_contactarea,lines_circle_Valuepairs]=inter-  
sect(ContactArea,Valuepairs,'stable','rows');
```

```
% Write the value pairs of the contact area with the z values in a new  
% matrix. Contact area before the experiment with "circle_before" and af-  
ter
```

```
% the experiments with "circle_after"  
circle_before=Valuepairs_A(lines_circle_Valuepairs,:);  
circle_after=Valuepairs_E(lines_circle_Valuepairs,:);
```

```
% Determine the number of lines, which consists of the same value pairs  
in
```

```
% the contact area. Control mechanism.
```

```
line_circle_A=size(circle_before,1);  
line_circle_E=size(circle_after,1);
```

```
% Save all values of the areas outside the contact area in order to  
% orientate the profile heights to each other
```

```
Valuepairs_OutofContact_before=Valuepairs_A;
```

```
Valuepairs_OutofContact_before(lines_circle_Valuepairs,:) = [];
```

```
Valuepairs_OutofContact_after=Valuepairs_E;
```

```
Valuepairs_OutofContact_after(lines_circle_Valuepairs,:) = [];
```

```
% Difference between the values outside of the contact area. Calculate the  
mean value,
```

```
% which is possible since the surface roughness is constant in this area.
```

```
Difference_OutofContact= abs(Valuepairs_OutofContact_before-Value-  
pairs_OutofContact_after);
```

```
Min_Difference_OutofContact= min(Difference_OutofContact);
```

```
Max_Difference_OutofContact= max(Difference_OutofContact);
```

```
Average_Difference_OutofContact = mean(Difference_OutofContact);
```

```
Standarddev_Difference_OutofContact=std(Difference_OutofContact);
```

```
% Lines in contact area in order to determine the length of the matrix and  
% to use this result to determine the average height value.
```

```
lines_contactarea=size(circle_before,1);
```

```
% Average of the height Z of the contact area before the experiments.
```

```
%Average_contactarea_before_Z = sum(circle_before(:,3)) / lines_con-  
tactarea;
```

```
Displacement=Average_Difference_OutofContact;
```

```
% Move the profile height in order to position both over each other
```

```
if Valuepairs_OutofContact_before(:,3:3) > Valuepairs_OutofContact_af-  
ter(:,3:3)
```

```
    Matrix_Diff_A = repmat(Displacement(3),line_A_Z_Short,1);
```

```
    Valuepairs_newposition_A = A_Z_Short - Matrix_Diff_A;
```

```
    NEWPos_A_Z= Valuepairs_newposition_A;
```

```
    NEWPos_E_Z= E_Z_Short;
```

```
    NEWPos_A=[A_XY_Short,NEWPos_A_Z];
```

```
    NEWPos_E=[E_XY_Short,NEWPos_E_Z];
```

```
else
```

```

Matrix_Diff_A = repmat(Displacement(3),line_A_Z_Short,1);
Valuepairs_newposition_A = A_Z_Short + Matrix_Diff_A;
NEWPos_A_Z= Valuepairs_newposition_A;
NEWPos_E_Z= E_Z_Short;
NEWPos_A=[A_XY_Short,NEWPos_A_Z];
NEWPos_E=[E_XY_Short,NEWPos_E_Z];
% Matrix_Diff_E = [repmat(Displacement(3),line_E_Z_Short,1)];
% Valuepairs_newposition_E = E_Z_Short - Matrix_Diff_E;
% NEWPos_A_Z= A_Z_Short;
% NEWPos_E_Z= Valuepairs_newposition_E;
% NEWPos_A=[A_XY_Short,NEWPos_A_Z];
% NEWPos_E=[E_XY_Short,NEWPos_E_Z];
end

% Select only the valuepairs of the contact area.

NEW_circle_before=NEWPos_A(lines_circle_Valuepairs,:);
NEW_circle_after=NEWPos_E(lines_circle_Valuepairs,:);

% Select only the z values of the new circle area.

NEWPos_A_Z_circle=NEW_circle_before(:,3:3);
NEWPos_E_Z_circle=NEW_circle_after(:,3:3);

% Set a critical wear limit with the surface roughness values Sk, Spk and
% Svk.
%Limit_Adhesion=(Sk/2)+Spk;
%Limint_Abrasion=(Sk/2)

% Calculate the wear volumes
diff_2 = NEWPos_E_Z_circle-NEWPos_A_Z_circle;
diff = NEWPos_A_Z_circle-NEWPos_E_Z_circle;
abrasion = max(diff, 0);
adhesion= max(diff_2, 0);
sum_abra = sum(abrasion)*Stepsize_A*Stepsize_A;
sum_adha = sum(adhesion)*Stepsize_E*Stepsize_E;

if sum_abra > sum_adha
    MAX=sum_abra;

```

```

else
    MIN=sum_adha;
end

% Show results in Command Window
disp(['Anzahl der Zeile der Messdaten im Ausgangszustand:'
num2str(length (A_before))]);
disp(['Anzahl der Zeilen der Messarten nach dem Einsatz:'
num2str(length (E_after))]);
disp(['Übereinstimmung Anzahl der Zeilen mit gleichen Wertepaaren:'
num2str(Line_valuepairs) ' Zeilen.']);
%disp(['½bereinstimmung Angabe in Prozent: ' num2str(Line_value-
pairs/Line_valuepairs_before*100,'%o.of%%') ' Prozent von Vorher! '
num2str(Line_valuepairs/Line_valuepairs_after*100,'%o.of%%') ' Prozent
von Nacher!']);
disp(['Werte im Kontaktbereich Ausgangoberfläche:'
num2str(line_circle_A) ' Zeilen ']);
disp(['Werte im Kontaktbereich nach dem Einsatz:'
num2str(line_circle_E) ' Zeilen ']);

disp(['Abrasionsverschleiß:' num2str(sum_abra ) ' mm3 ');
disp(['Adhäsionsverschleiß:' num2str(sum_adha) ' mm3 ');
%disp(['½bereinstimmung: ' num2str(zeilen_werte-
paare/A*100,'%o.of%%') ' Prozent von Vorher! ' num2str(zeilen_werte-
paare/E*100,'%o.of%%') ' Prozent von Nacher!']);

%End

```



## Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2021):  
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, [www.mb.fau.de/diss/](http://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:

<b>FAPS</b>	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
<b>KTmfk</b>	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
<b>LFT</b>	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
<b>LPT</b>	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 CO<sub>2</sub>-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  
CO<sub>2</sub>-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  
CO<sub>2</sub>-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  
CO<sub>2</sub>-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  
CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-122-9.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 104: Harald Rottbauer  
Modulares Planungswerkzeug zum  
Produktionsmanagement in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-139-3.

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

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

Band 107: Thomas Stöckel  
Kommunikationstechnische Integration  
der Prozeßebe in Produktionssysteme  
durch Middleware-Frameworks  
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter  
Verfügbarkeitssteigerung von  
Werkzeugmaschinen durch Einsatz  
mechatronischer Sensorlösungen  
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli  
Integration lokaler CAP-Systeme in  
einen globalen Fertigungsdatenverbund  
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller  
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -  
Prozeßparameter und Modelle zur  
Aktorkonstruktion  
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer  
Integrierte Telediagnose via Internet  
zum effizienten Service von  
Produktionssystemen  
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein  
Qualitäts- und kosteneffiziente Integra-  
tion neuer Bauelementetechnologien in  
die Flachbaugruppenfertigung  
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-151-2.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 284: Stefan Berger  
Laserstrahlschweißen thermoplastischer  
Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit  
spezifischem Zusatzdraht  
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 Werkzeugoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design

KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

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

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

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

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

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

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

Band 331: Michael Scholz  
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 Kontext der Digitalisierung  
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

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

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

Band 335: Hans Fleischmann  
Modellbasierte Zustands- und 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 Heißscrimpprozesses  
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl  
Erarbeitung eines Prozessverständnisses  
zur Verbesserung der tribologischen  
Bedingungen beim Presshärten  
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti  
Evaluation of failure behaviour  
of sheet metals  
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Herstellung hochfester Aluminiumblech-  
bauteile in einem kombinierten Umform-  
und Abschreckprozess  
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner  
Automatische Bahnplanung für die Auf-  
teilung von Prozessbewegungen in syn-  
chrone Werkstück- und Werkzeugbewe-  
gungen mittels Multi-Roboter-Systemen  
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter  
Qualifizierung des Montageprozesses  
hochminiaturisierter elektronischer Bau-  
elemente  
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser  
Ressourcenorientierte Auftragsregelung  
in einer hybriden Produktion mittels  
betriebsbegleitender Simulation  
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend  
Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen  
LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder  
2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert  
Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung  
KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander  
Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten  
KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4

Band 350: Florian Pilz  
Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen  
LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8

Band 351: Sebastian Josef Katona  
Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle  
KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6

Band 352: Jürgen Herrmann  
Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014  
LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1

Band 353: Christof Küstner  
Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung  
KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9

Band 354: Tobias Gläßel  
Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobile Traktionsantriebe  
FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel  
Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern  
KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8

Band 356: Hannah Riedle  
Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation  
FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0

Band 357: Maximilian Landgraf  
Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen  
FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9

Band 358: Alireza Esfandiyari  
Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production  
FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3

Band 359: Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining

FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.  
2021. ISBN 978-3-96147-398-4

Band 360: Ralf Merkl

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks

FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8

Band 361: Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren

FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab.  
2021. ISBN 978-3-96147-400-4

Band 362: Marius Christian Fechter

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion

KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab.  
2021. ISBN 978-3-96147-404-2

Band 363: Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärtprozess

LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab.  
2021. ISBN 978-3-96147-406-6

## **Abstract**

Growing environmental awareness and the steady rise in vehicle numbers are key challenges for the automotive industry to develop new car concepts. Hot stamping is an established manufacturing process for ensuring occupant safety while reducing the component weight. Compared with conventional forming processes, the tools are subject to massive wear due to the high thermo-mechanical stresses. In order to ensure consistent component quality and reduce maintenance, a suitable wear protection of the tools is required. In this work, two approaches were investigated to increase the wear resistance of hot stamping tools. For this purpose, a laser alloying process and surface coatings were used. The focus of the investigation was on deriving the influence of different alloying elements and element concentrations on the wear behavior. Another essential part of this work was the development of a suitable evaluation methodology in order to determine the wear volume, which enables an evaluation of the different modified surfaces regarding their wear tendency. In the final step, the surface modification was transferred to simple component geometries to ensure its applicability to the hot stamping process.

Das wachsende Umweltbewusstsein und der stetige Anstieg der Fahrzeugzahlen stellen in der Automobilindustrie zentrale Herausforderungen dar, um neue Fahrzeugkonzepte zu entwickeln. Zur Sicherstellung der Insassensicherheit bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion findet als etabliertes Fertigungsverfahren das Presshärten Anwendung. Im Vergleich zu konventionellen Umformverfahren sind die Werkzeuge aufgrund der hohen thermomechanischen Beanspruchungen massiven Verschleißerscheinungen ausgesetzt. Um eine gleichbleibende Bauteilqualität sicherzustellen und den Wartungsaufwand zu reduzieren, ist ein geeigneter Verschleißschutz der Werkzeuge erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Ansätze verfolgt, um die Verschleißbeständigkeit von Presshärte Werkzeugen zu erhöhen. Zu diesem Zweck kam das Laserstrahllegieren sowie das Oberflächenbeschichten zum Einsatz. Der Fokus der Untersuchungen lag darauf, den Einfluss unterschiedlicher Legierungselemente und Elementkonzentrationen auf das Verschleißverhalten abzuleiten. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Arbeit lag in der Entwicklung einer Auswertemethodik zur quantitativen Beschreibung des Oberflächenverschleißes, wodurch eine Bewertung der modifizierten Oberflächen im Hinblick auf die Verschleißneigung ermöglicht wurde. Im letzten Schritt erfolgte zur Sicherstellung der Anwendbarkeit der Oberflächenmodifizierung für den Presshärteprozess eine Übertragbarkeit auf einfache Bauteilgeometrien.

ISBN 978-3-96147-406-6



9 783961 474066